

Міністерство освіти і науки України
Луцький національний технічний університет



ЕЛЕКТРОПРИВІД ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Методичні вказівки до виконання лабораторних занять
для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
освітньої програми «Автомобільна електроніка»
галузі знань 17 (G5) Електроніка, автоматизація та електронні комунікації
спеціальності 171 Електроніка
(Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка)
денної та заочної форм навчання

Луцьк 2026

УДК 621.391(07)
Е50

Електронна копія друкованого видання передана для внесення в репозитарій ЛНТУ

Директор бібліотеки _____ Наталія ПОЛЩУК

Рекомендовано до видання вченою радою факультету комп'ютерних та інформаційних технологій ЛНТУ, протокол № __ від «__» _____ 2026 року.

Голова вченої ради ФКІТ _____ Інна КОНДУС

Розглянуто і схвалено на засіданні кафедри електроніки та телекомунікацій ЛНТУ, протокол № __ від «__» _____ 2026 року.

Завідувач кафедри ЕіТК _____ Валентин ЗАБЛОЦЬКИЙ к.т.н., доц. кафедри електроніки та телекомунікацій ЛНТУ

Укладач: _____ Віктор ЛИШУК к.т.н., доц. кафедри електроніки та телекомунікацій ЛНТУ

Рецензент: _____ Андрій ГАДАЙ к.т.н., доц. кафедри електричної інженерії ЛНТУ

Відповідальний за випуск: _____ Валентин ЗАБЛОЦЬКИЙ к.т.н., доц., завідувач кафедри електроніки та телекомунікацій ЛНТУ

Е50 Електропривід транспортних засобів. Методичні вказівки до виконання лабораторних занять для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Автомобільна електроніка» галузі знань 17 (G5) Електроніка, автоматизація та електронні комунікації спеціальності 171 Електроніка (Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка) денної та заочної форм навчання / укладач В. В. Лишук. Луцьк: ЛНТУ, 2026. 100 с.

Лабораторний практикум призначений для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Автомобільна електроніка» галузі знань 17 (G5) Електроніка, автоматизація та електронні комунікації спеціальності 171 Електроніка (Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка) денної та заочної форм навчання.

В. В. Лишук, 2026

Зміст

Вступ	ст. 4
Техніка безпеки при виконанні робіт	5
Лабораторне заняття №1. Моделювання двомасових механічних систем в MATLAB з використанням блоків бібліотеки <i>Simmechanics</i>	6
Лабораторне заняття №2. Дослідження режимів роботи електроприводу постійного струму з незалежним збудженням.....	20
Лабораторне заняття №3. Дослідження режимів роботи електроприводу постійного струму з послідовним збудженням.....	36
Лабораторне заняття №4. Дослідження електроприводу постійного струму паралельного збудження	49
.....	
Лабораторне заняття №5. Моделювання елементів електроприводу постійного струму.....	59
Лабораторне заняття №6. Розрахунок електромеханічних характеристик асинхронного двигуна за його каталожними даними.....	71
Лабораторне заняття №7. Дослідження трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.....	81
Лабораторне заняття №8. Віртуальне фізичне моделювання короткозамкненого асинхронного двигуна.....	90
Лабораторне заняття №9. Дослідження частотно-регульованого електроприводу.....	93
Список використаних джерел	99

Вступ

Лабораторний практикум призначений для опанування студентами практичних навичок, пов'язаних з монтажем електричних схем і подальшим дослідженням режимів роботи електроприводів, побудовою їх характеристик з одного боку, та вмінням застосовувати методики математичного моделювання електроприводів на основі машин постійного і змінного струмів.

Натурні лабораторні заняття проводяться в лабораторії групою студентів. При виконанні групою студентів однієї лабораторної роботи з моделювання електроприводів у методичних вказівках передбачений розподіл завдань по варіантах. Кожний студент виконує дослідження на прикладі певного двигуна. Конкретний варіант завдання для студента до кожної лабораторної роботи вказується викладачем – керівником роботи.

Віртуальні лабораторні роботи (дослідження математичних моделей) можна створювати та досліджувати як за допомогою алгоритмічних мов високого рівня, так і за допомогою спеціалізованих пакетів, що дозволяють користувачеві вводити моделі у вигляді структурних схем, обирати методи рішення диференціальних рівнянь і параметри моделювання в діалоговому режимі й одержувати результати в зручній формі. В даний час на кафедрі використовується встановлений пакет *MATLAB/Simulink*, що у даний момент є одним із самих потужних програмних засобів моделювання, та аналізу електроприводів.

В лабораторії досліджуються електричні машини і трансформатори, які працюють при напругах до 230...380 В, що вимагає суворого дотримання основних правил техніки безпеки.

Техніка безпеки при виконанні робіт

1. Студент може виконувати роботу тільки в складі бригади з трьох-чотирьох чоловік. Одному виконувати роботу не дозволяється.

2. Збирання і розбирання робочої схеми потрібно виконувати тільки при відключеній напрузі живлення. Живлення лабораторії здійснюється від трансформаторної підстанції 10/0,4 кВ через проміжний знижувальний трансформатор 0,4/0,23 кВ. Трифазна вихідна лінійна напруга 0,23 кВ цього трансформатора від головного розподільного щита подається на кожен лабораторний стіл через автоматичний вимикач (автомат) типу АК50К-3М. У лабораторії присутня постійна напруга величиною 220 В.

3. Електричні машини, які досліджують, розташовані під лабораторним столом або біля нього, а виводи початків і кінців всіх їхніх обмоток виводяться на передню панель столу. На вертикальній панелі столу розташовані щитові вимірювальні прилади та прилади керування навантажувальними пристроями, а на горизонтальній панелі – лабораторні прилади. Подавати напругу живлення на схему після складання або будь-яких Perez'єднань у ній дозволяється тільки після перевірки її викладачем або лаборантом.

4. Студентам забороняється:

а) виконувати будь-які роботи на внутрішніх сторонах лабораторних стендів;

б) вмикати комутаційні апарати на головних розподільних щитах лабораторії;

в) торкатися до струмоведучих частин робочої установки, які знаходяться під напругою;

г) торкатися до частин машин, що обертаються;

д) залишати без догляду працюючу машину або схему, що знаходиться під напругою;

е) залишати на машинах чи столах невикористані провідники;

При аваріях у машині або в схемі, що супроводжуються швидким перегрівом машин, з'єднувальних провідників, реостатів, різким збільшенням частоти обертання (рознос двигуна) студенти зобов'язані негайно зняти напругу з робочої схеми, вимкнувши автомат живлення на лабораторному столі і повідомити про аварію викладачеві.

5. У випадку ураження кого-небудь із працюючих електричним струмом необхідно звільнити його від контакту із джерелом струму, негайно приступити до надання першої допомоги потерпілому і викликати швидку допомогу.

Студенти допускаються до виконання лабораторних робіт тільки після ознайомлення з даними правилами і підпису у відповідному журналі. При порушенні правил техніки безпеки студентів усувають від роботи і

допускають до неї тільки з дозволу завідувача кафедри після повторного інструктажу.

Лабораторне заняття №1

МОДЕЛЮВАННЯ ДВОМАСОВИХ МЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ В MATLAB З ВИКОРИСТАННЯМ БЛОКІВ БІБЛІОТЕКИ *SimMechanics*

Мета роботи: ознайомитись з методикою моделювання двомасових систем в MATLAB з використанням блоків бібліотеки *SimMechanics*.

1.1 Теоретичні відомості

Двомасові механічні системи належать до механічних об'єктів з одним ступенем свободи, що здійснюють поступальні або обертальні рухи. Механічну інерційність об'єктів поступального руху характеризує маса (m , кг), а основними параметрами його є переміщення (s , м), лінійна швидкість (v , м/с), лінійне прискорення (a , м/с²) та ривок (ρ , м/с³), що пов'язані одне з одним диференційними рівняннями:

$$v(t) = \frac{ds(t)}{dt}, \quad a(t) = \frac{dv(t)}{dt} = \frac{d^2s(t)}{dt^2}, \quad \rho(t) = \frac{da(t)}{dt} = \frac{d^2v(t)}{dt^2} = \frac{d^3s(t)}{dt^3}. \quad (1.1)$$

Механічну інертність об'єктів обертального руху характеризує момент інерції (J , кг·м²), а основними параметрами його є кутове переміщення (φ , рад), кутова швидкість (ω , рад/с), кутове прискорення (ε , рад/с²) та кутовий ривок (ρ_τ , рад/с³), що пов'язані одне з одним диференційними рівняннями:

$$\omega(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt}, \quad \varepsilon(t) = \frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{d^2\varphi(t)}{dt^2}, \quad \rho_\tau(t) = \frac{d\varepsilon(t)}{dt} = \frac{d^2\omega(t)}{dt^2} = \frac{d^3\varphi(t)}{dt^3}. \quad (1.2)$$

Найбільш просто математично описуються динамічні системи із зосередженими параметрами, зокрема з зосередженими масами. Рівняння руху одномасових механічних об'єктів з постійною механічною інерційністю визначається другим законом Ньютона:

$$\sum_{i=1}^n F_i(t) = ma(t) = m \frac{dv(t)}{dt} = m \frac{d^2s(t)}{dt^2}, \quad (1.3)$$

$$\sum_{i=1}^n M_i(t) = J\varepsilon(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt} = J \frac{d^2\varphi(t)}{dt^2}, \quad (1.4)$$

де $\sum_{i=1}^n F_i(t)$ – алгебраїчна сума сил, що діють на тіло по осі його поступального руху; $\sum_{i=1}^n M_i(t)$ – алгебраїчна сума моментів, що діють на тіло у площині його обертання.

Взаємозв'язок між лінійними та обертальними параметрами суцільного циліндра або диска радіусом R , що обертається навколо своєї осі (рис. 1.1) визначаються рівняннями

$$M = FR, \quad \omega = \frac{v}{R}, \quad \varphi = \frac{s}{R}, \quad J = \frac{mR^2}{2}. \quad (1.5)$$

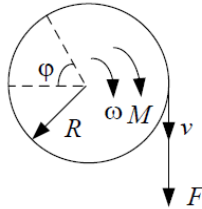


Рисунок 1.1 – Обертальні та поступальні параметри суцільного циліндру

При визначенні моментів інерції тіл, що обертаються, їх форму зазвичай спрощують. Наприклад, ротор (або якір) електричного двигуна уявляють тонкостінним порожнистим циліндром, а пристрої намотки – товстостінними порожнистими циліндрами, для яких відповідно

$$J = mR^2, \quad J = \frac{m(R_1^2 + R_2^2)}{2}. \quad (1.6)$$

Механізми або їх робочі органи приводяться до руху двигунами. Рух від двигуна до механізму передається різноманітними пристроями: валами, шківками, муфтами, зубчатими колесами, черв'ячними передачами, кулачковими механізмами, тощо. Такі пристрої мають пружні властивості і характеризуються коефіцієнтами жорсткості (коефіцієнтами пружності) c_{ij} та коефіцієнтами в'язкого (внутрішнього) тертя d_{ij} .

Лінійна пружна деформація виникає при розтягуванні (стисненні) пружин та пружинно подібних елементів. При обертальному русі може виникнути **пружна деформація скручування** довгих та тонких валів.

При пружній деформації у деформованому тілі з'являється пружне зусилля або пружний момент, пропорційний величині деформації, тобто різниці між переміщеннями протилежних кінців передачі:

$$F_{\text{п}} = c_{ij} \cdot \Delta s = c_{ij}(s_i - s_j) \quad M_{\text{п}} = c_{ij} \cdot \Delta \varphi = c_{ij}(\varphi_i - \varphi_j). \quad (1.7)$$

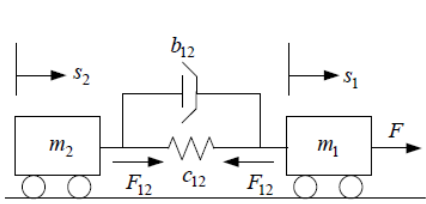
Пружній деформації перешкоджають момент або зусилля внутрішнього в'язкого тертя, зумовлені силами міжмолекулярної взаємодії деформованого матеріалу і пропорційне різниці між швидкостями протилежних кінців передачі:

$$F_{\text{в}} = d_{ij} \cdot \Delta v = d_{ij}(v_i - v_j) \quad M_{\text{в}} = d_{ij} \cdot \Delta \omega = d_{ij}(\omega_i - \omega_j). \quad (1.8)$$

При взаємодії величин (1.7) та (1.8) утворюється пружно-в'язке зусилля або пружно-в'язкий момент

$$F_{ij} = F_{\text{п}} + F_{\text{в}} \quad M_{ij} = M_{\text{п}} + M_{\text{в}}. \quad (1.9)$$

Для прикладу розглянемо кінематичну схему двомасової пружно-в'язкої механічної системи поступального руху, зображену на рисунку 1.2. Її математичний опис без урахування сухого тертя має вигляд



$$\left\{ \begin{array}{l} F - F_{12} = m_1 \frac{dv_1}{dt}, \\ F_{12} = m_2 \frac{dv_2}{dt}, \\ \frac{ds_1}{dt} = v_1, \\ \frac{ds_2}{dt} = v_2, \\ \frac{d}{dt} F_{\text{п}} = c_{12}(s_1 - s_2), \\ F_{\text{в}} = d_{12}(v_1 - v_2), \\ F_{12} = F_{\text{п}} + F_{\text{в}}. \end{array} \right. \quad (1.10)$$

Рисунок 1.2 – Кінематична схема двомасової механічної системи поступального руху

Структурна *Simulink*-модель, складена за рівняннями (1.10), зображена на рисунку 1.3.

Кінематична схема двомасової механічної системи обертального руху зображена на рисунку 1.4. На ній позначено:

– $M_{\text{ХХ}}$, M_{12} , $M_{\text{С}}$, M_{T} – електромагнітний момент двигуна, момент холостого ходу двигуна, момент скручування валу, момент статичного опору віюд навантаження і момент сухого тертя в механізмі відповідно;

– ω_1 , ω_2 , – кутові швидкості двигуна і механізму;

– c_{12} , b_{12} – коефіцієнти жорсткості і в'язкого тертя;

– δ_{12} – люфт (зазор) у кінематичній передачі;

– J_1, J_2 – моменти інерції двигуна і механізму.

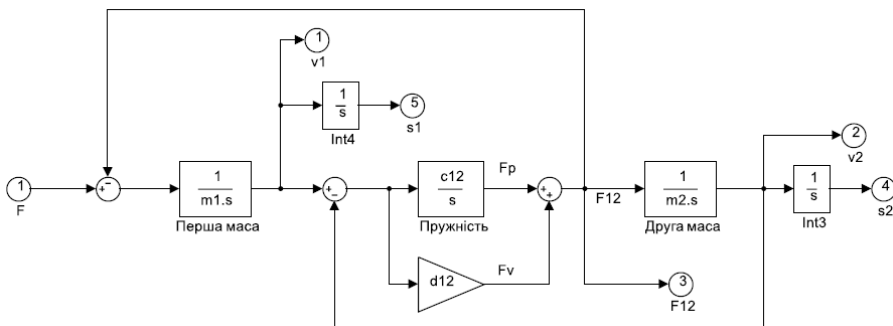


Рисунок 1.3 – Структурна *Simulink*-модель двомасової механічної системи поступального руху

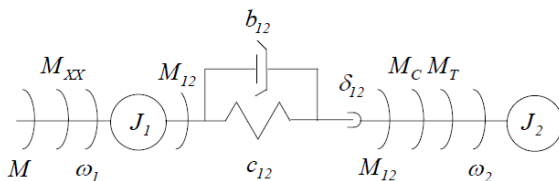


Рисунок 1.4 – Спрощена кінематична схема двомасової електромеханічної системи

Математичний опис такої системи без врахування зазору в кінематичній передачі та сухого тертя має вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} M - M_{12} = J_1 \frac{d\omega_1}{dt}, \\ M_{12} - M_c = J_2 \frac{d\omega_2}{dt}, \\ \frac{d\varphi_1}{dt} = \omega_1, \\ \frac{d\varphi_2}{dt} = \omega_2, \\ M_{\Pi} = c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2), \\ M_{\text{В}} = b_{12}(\omega_1 - \omega_2), \\ M_{12} = M_{\Pi} + M_{\text{В}}. \end{array} \right. \quad (1.11)$$

1.2 Моделювання механічних об'єктів у середовищі *MATLAB-Simulink-SimMechanics*

Для дослідження кінематики та динаміки механізмів різного рівня складності ефективно використовувати моделювання за допомогою бібліотеки *SimMechanics*. Віртуальна фізична модель подається у вигляді блочної діаграми. Блоки пакета є моделями механічних пристроїв, розташування яких у просторі та відносно одне від одного може змінюватися у відповідності до законів механіки. Моделі *SimMechanics* зображують фізичну структуру механізмів, геометричні та кінематичні відношення їх компонентів. *SimMechanics* автоматично перетворює ці блочні зображення в еквівалентну математичну модель.

SimMechanics оперує не з сигналами, а з механічними зусиллями. В силу третього закону Ньютона, зв'язки між входами і виходами блоків не можна розглядати як односпрямовані. Ці зв'язки слугують для передачі силових дій, якими обмінюються частини механізмів або механізми між собою. Тому вони не позначаються стрілками.

SimMechanics підтримує засоби анімації для демонстрації роботи механізмів у динаміці. Анімація застосовує інструменти *Microsoft Audio Video Interleave® (AVI)*, мають розширення *.avi, підтримує засоби *OpenGL* та може використовувати віртуальні вимірювальні засоби.

Розділи бібліотеки показані на рисунку 1.5, а блоки розділу *Bodies* на рисунку 1.6.

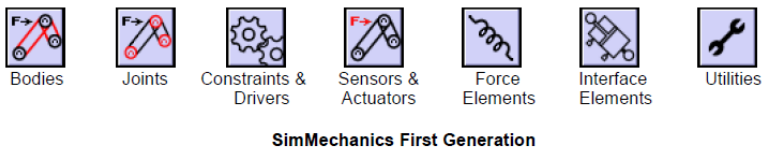


Рисунок 1.5 – Бібліотека *SimMechanics*

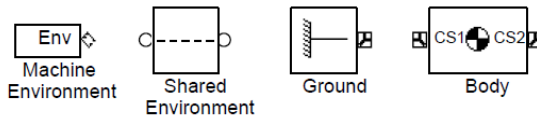


Рисунок 1.6 – Блоки розділу *Bodies*

Комбінація блоків *Machine Environment* і *Ground* задає гравітаційні сили, прикладені до центру координат та їх орієнтацію в заданій системі відліку (рис. 1.7). За замовчанням у *SimMechanics* прийнята Ейлерова правобічна система координат (Euler X-Y-Z), зображена на рисунку 1.8. Тому вектор сили тяжіння (*Gravity vector*) у блоці *Machine Environment* (рис. 1.9) має вигляд $[0 \ 9.81 \ 0]$.

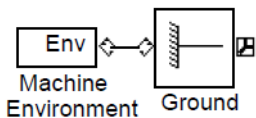


Рисунок 1.7 – Комбінація блоків *Machine Environment* і *Ground*

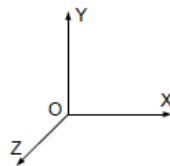


Рисунок – 1.8. Система координат, прийнята у *SimMechanics*

Блок *Ground* уявляє собою нерухому основу, жорстко пов'язану з абсолютною світовою системою координат *World*. До кожного блоку *Ground* приєднують свій блок *Machine Environment*. Щоб з'єднати ці блоки треба у вікні налаштування останнього (рис. 1.10) встановити прапорець у полі *Show Machine Environment Port*.

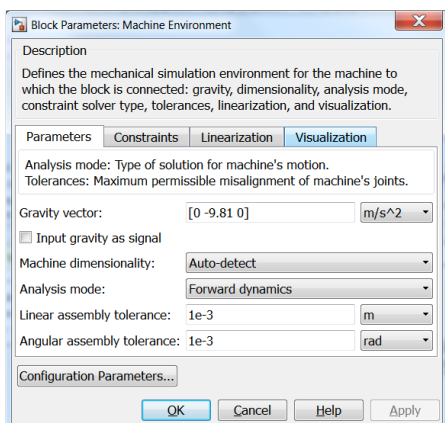


Рисунок 1.9 – Вікно налаштування блоку *Machine Environment*

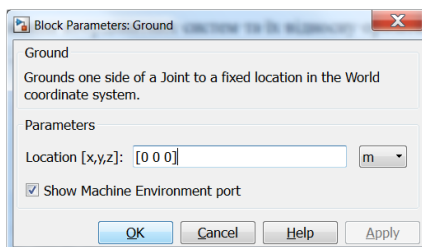


Рисунок 1.10 – Вікно налаштування блоку *Machine Environment*

При дослідженні механічних об'єктів скористаємося такою термінологією:

- механічна ланка – сукупність деталей, з'єднаних у такий спосіб, що їх взаємне розташування не змінюється у процесі руху;
- кінематична пара – з'єднання двох механічних ланок, що стикаються, але можуть змінювати своє відносне положення у просторі;
- нижчі кінематичні пари – це такі пари, в яких ланки торкаються одна одної по поверхням кінцевих розмірів або по площості. До них відносяться поступальна та оберտальна пари першого, другого і третього класів, а також гвинтова пара;

– вищі кінематичні пари – це пари, в яких контакт елементів відбувається по лінії або у точці.

Кінематичні пари відрізняються одна від одної кількістю ступенів свободи, які можуть бути як поступальними, так і обертальними.

Механічні ланки відображаються блоками *Body*, а зв'язки між ними (з'єднання, шарніри, кінематичні пари) – блоками розділу *Joints*. Вікно налаштування блок *Body* показано на рисунку 1.11.

Його структура дозволяє повністю визначити фізичні параметри матеріальних тіл: масу, тензор інерції, геометричний центр мас, положення координатних систем та їх відносну орієнтацію.

Тензор інерції тіла відносно його центра мас (Inertia) уявляє собою матрицю 3×3 , яка для симетричних тіл є діагональною $J = \text{diag}[J_{ix}, J_{iy}, J_{iz}]$. На головній діагоналі розташовані моменти інерції тіла відносно осей власної локальної системи координат, пов'язаної з його центром мас. Якщо тіло моделюється як точкова маса, то усі складові тензору інерції є нульовими: $J = \text{zeros}(3,3)$.

Декартові координати характерних точок тіла (*Origin Position Vector*), серед яких обов'язково повинна бути точка центру тяжіння (CG) і довільна кількість інших точок (CS1, CS2, ..., CSN), призначених або для з'єднання їх з іншими блоками або для підвищення наочності візуалізації. У першому випадку у полі *Show Port* треба встановити прапорець. Для кожної характерної точки можна обрати місце її розташування у вигляді порту *Port Side* (*Left* або *Right*). «Кнопки» з правого боку вікна на рисунку 1.11 дозволяють додавати, видаляти та змінювати черговість цих точок у списку.

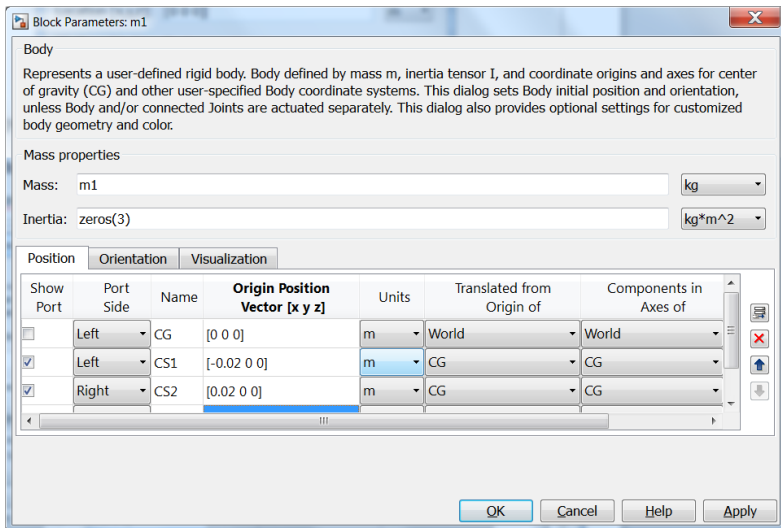


Рисунок 1.11 – Вікно налаштування блоку *Body*

Координати тіл і шарніру, що складають кінематичну пару, повинні бути узгодженими, тобто позиції поєднаних через шарнір тіл матимуть збіг.

Блоки бібліотеки Joints показано на рисунку 1.12. Розглянемо деякі з них. Жодного ступеня свободи немає пара Weld (нерухоме з'єднання, стойка, зварювання).

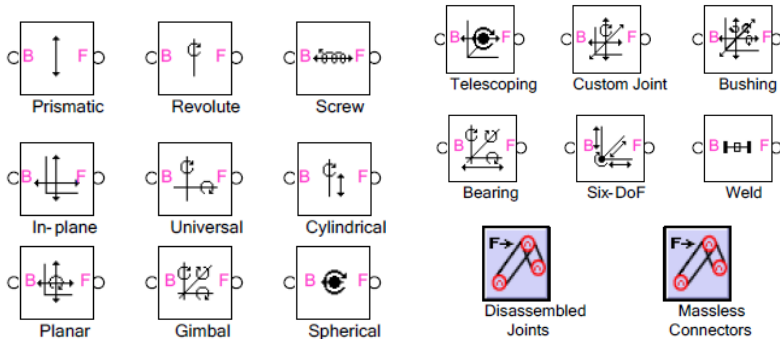


Рисунок 1.12 – Блоки розділу Joints (Шарніри)

До пар з одним ступенем свободи належать: Prismatic (кінематична пара поступального руху) – забезпечує переміщення впродовж однієї прямої, Revolute (поворотний важіль, обертальна пара, циліндричний шарнір) – забезпечує обертальний рух навколо однієї з осей тримірного простору, тобто в одній площині (наприклад, математичний маятник), Screw (гвинтова пара, черв'як, шнек) – перетворює обертальний рух у поступальний впродовж однієї прямої.

До пар з двома ступенями свободи належать: In-plane (планарна, плоска пара) забезпечує поступальний рух в одній площині, Cylindrical (циліндрична пара) – забезпечує обертальний рух навколо однієї з осей тримірного простору та поступальний рух впродовж цієї ж осі, Universal (універсальна обертальна пара) – забезпечує обертальний рух з можливістю повороту площини обертань наприклад, маятник, що може змінювати площину коливань.

До пар з трьома ступенями свободи належать: Planar (пара поступального руху) – забезпечує поступальний рух у просторі, Gimbal (шарнір, кардан) – забезпечує обертальний рух з можливістю повороту осі обертання, Spherical (сферичний шарнір, шарова опора) – забезпечує обертальний рух навкруги однієї точки з можливістю повороту площини обертань.

При складанні моделі тіла і шарніри повинні чергуватися, тобто будь-який шарнір розташовується завжди між двома тілами, попереднє з яких, що називається Base Body, приєднується до порту B, а наступне (Following Body) – до порту F шарніру.

Для прикладу на рисунку 1.13 подано вікно налаштування циліндричного шарніру.

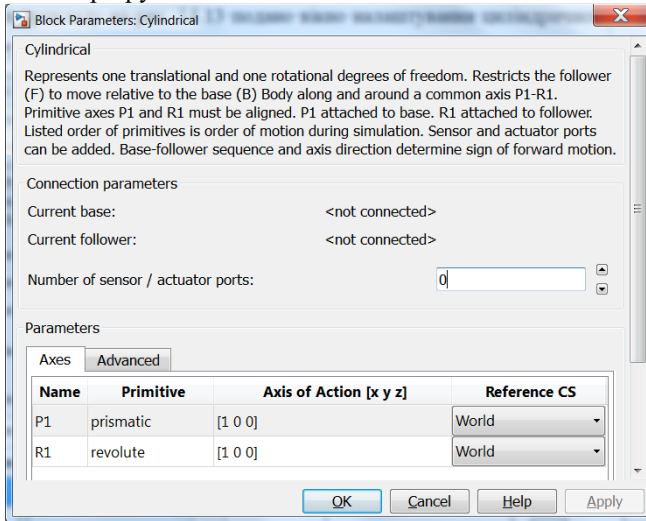


Рисунок 1.13 – Вікно налаштування суглобу *Cylindrical*

Для моделювання пружно в'язких з'єднань між механічними ланками використовують блоки розділу *Force Elements* (див. рис. 14.14).

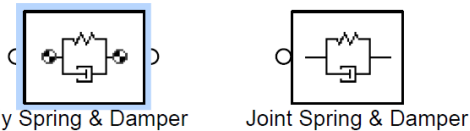


Рисунок 1.14 – Блоки для моделювання пружно-в'язких зв'язків розділу *Force Elements*

Вікна параметрів цих блоків подані на рисунках 1.15 та 1.16.

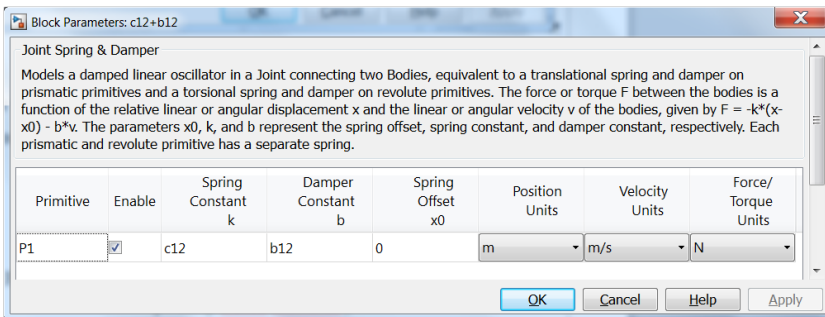


Рисунок 1.15 – Вікно налаштування блоку *Joint Spring & Damper*

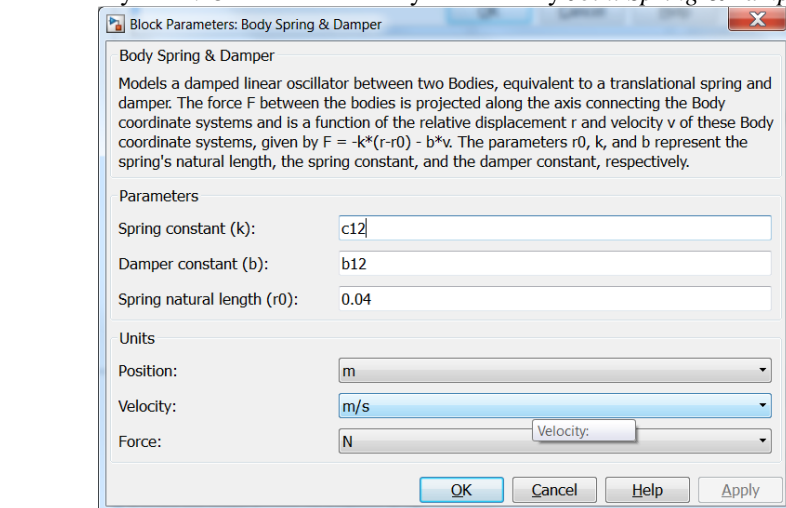


Рисунок 1.16 – Вікно налаштування блоку *Body Spring & Damper*

Перший з цих блоків має тільки один порт, що приєднується до шарніру, а другий має два порти, які з'єднують між собою два тіла, вмикаючись паралельно з шарніром даної кінематичної пари. Цей блок може збуджувати один або декілька примітивів шарніру, що визначається установкою прапорців у стовпчику *Enable* (розблокувати). Пружно-в'язке зусилля або пружно-в'язкий момент у першому випадку прикладається до частин шарніру, а у другому – до обох тіл у заданих точках з протилежними знаками.

Параметри *Spring offset* та *Spring naturel length* визначають відстань між точками взаємодії тіл, при якій сила пружності дорівнює 0.

У розділі *Sensors & Actuators* (рис. 1.17) розташовані датчики для вимірювання механічних сигналів та приводні механізми, що дають можливість прикласти до механічних ланок або з'єднань між ними зусилля або моменти.

Блоки *Actuator* перетворюють силові сигнали (зусилля або моменти) або завдання на рух (лінійні чи кутові прискорення, швидкість та переміщення у вигляді векторного сигналу), сформовані за допомогою блоків *Simulink*, у сигнали, що можуть бути сприйнятими блоками *SimMechanics*. Різниця між блоками *Body Actuator* та *Joint Actuator* полягає у тому, що блок *Body Actuator* вимагає завдання відповідних сигналів у трьох напрямках декартової системи координат або обертання навколо трьох її осей, а блок *Joint Actuator* – тільки сигналів, притаманних заданому ступеню свободи.

Блоки *Sensor* вимірюють сигнали, що виробляються тілами або суглобами, та перетворюють їх у сигнали, придатні для подальшої обробки, візуалізації або запам'ятовування їх за допомогою блоків *Simulink*. Різниця між блоками *Body Sensor* та *Joint Sensor* полягає у тому, що блоки *Body Sensor* вимірюють вектори абсолютних сигналів поступального або обертального рухів, а блок *Joint Sensor* – різниці між сигналами тіл однієї кінематичної пари у напрямку. сигнали, притаманних заданому ступеню свободи.

Блок *Joint Initial Condition* задає початкове відносне положення та початкову відносну швидкість двох частин суглобів типу *Revolute* або *Prismatic*.

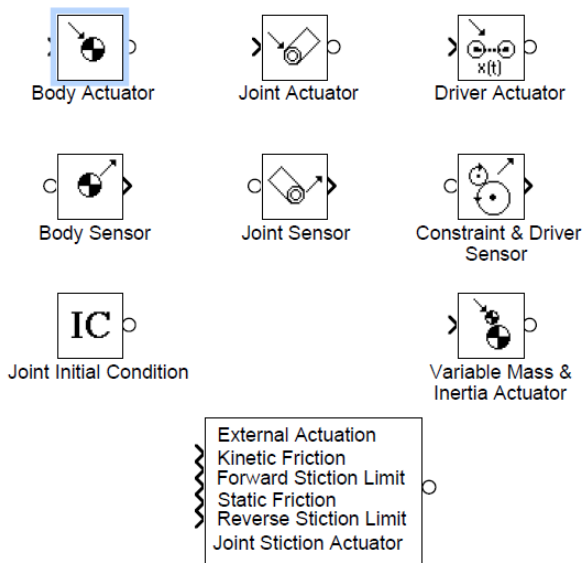


Рисунок 1.17 – Блоки розділу *Sensors & Actuators*

Розглянутих блоків цілком достатньо для створення простих віртуальних механічних моделей.

Віртуальна фізична модель двомасової механічної системи з використанням описаних вище блоків подана на рисунку 1.18. Тип руху (поступальний чи обертальний залежить тільки від параметрів блоків.

Блок *Body1* є моделлю першої маси, а блок *Body2* – другої. Блоки *Prismatic* за допомогою встановлення параметру *Axis of Action [x y z]* у стан [1 0 0] визначають один поступальний ступінь свободи у напрямку осі x (рис. 1.8) між нерухомою основою і першою масою та між першою і другою масами. Зусилля F , сформоване блоком *Step1*, прикладається до блоку *Body1* через суглоб *Prismatic1* у напрямку осі x .

Блок *Joint Sensor* вимірює силу реакції суглобу на зусилля, створене блоком *Joint Spring & Damper*, тобто є пружно-в'язким зусиллям F_{12} . Блок вимірює швидкість першої маси та зусилля, що діють на неї у трьох напрямках. Оскільки базовим блоком першої кінематичної маси є нерухома опора, то виміряні відносні сигнали суглобу збігаються з відповідними абсолютними сигналами першої маси. Для вимірювання абсолютної швидкості першої маси встановлено блок *Body Sensor*.

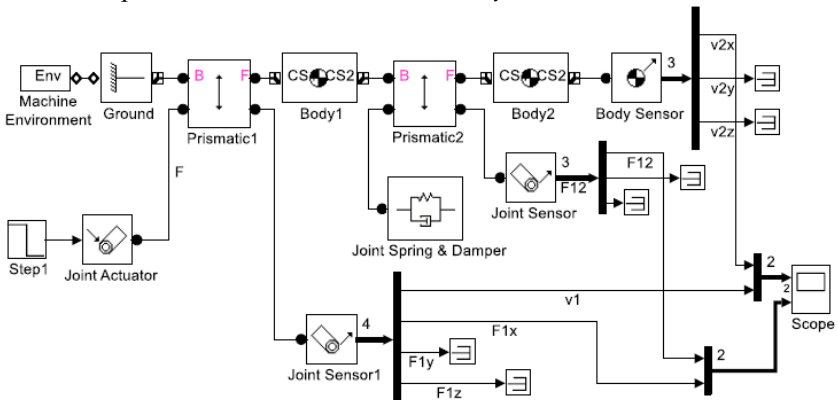


Рисунок 1.18 – Віртуальна фізична модель двомасової механічної системи поступального руху

1.3 Завдання

Розрахувати перехідні процеси у двомасовій механічній системі поступального руху, для рисунка 1.2 при заданому характері зміни зусилля, зображених на рисунку 1.19. Параметри систем надано у таблиці 1.1.

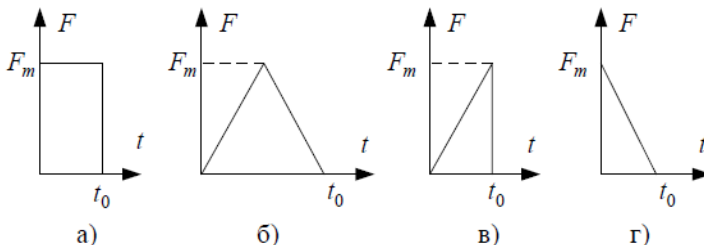


Рисунок 1.19 – Варіанти вхідних зусиль

Побудувати графіки переміщень і швидкостей зосереджених мас та пружно-в'язких зусиль у елементах кінематичних зв'язків у функції часу. Розрахунки виконати методами структурного математичного та віртуального фізичного моделювання. Результати порівняти.

Таблиця 1.1 – Вихідні дані до моделювання

№ вар.	m_1 , кг	m_2 , кг	c_{12} , кг/с ²	d_{12} , кг/с	F_m , Н	t_0	$F(t)$
1,13	5	5	20	0 5 10	16	4	а
2,14	5	5	20	0 5 10	16	8	б
3,15	5	5	20	0 5 10	16	7	в
4,16	5	5	20	0 5 10	16	6	г
5,17	7.5	2.5	10	0 2 5	16	4	а
6,18	7.5	2.5	10	0 2 5	16	8	б
7,19	7.5	2.5	10	0 2 5	16	7	в
8,20	7.5	2.5	10	0 2 5	16	6	г
9,21	2.5	7.5	20	0 5 10	16	4	а
10,22	2.5	7.5	20	0 5 10	16	8	б

1.4 Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з блоками бібліотек *SimMechanics*.
2. Зібрати нелінійну та лінеаризовану *S*-моделі математичного маятника, розрахувати параметри коливань за формулами
3. За даними двигуна розрахувати необхідні параметри і встановити їх.

4. Виконати такі віртуальні експерименти:
 - прямий пуск двигуна від джерела, що виробляє трифазну синусоїдальну напругу, параметри якої відповідають номінальній напрузі та номінальній частоті статора; після досягнення двигуном синхронної швидкості здійснити стрибкоподібний накид навантаження;
 - поступово підвищуючи момент статичного опору на валу двигуна, знайдіть його критичний момент та критичне ковзання;
 - виконайте попередні 2 експерименти зі зменшеною на 50% частотою джерела при номінальній амплітуді та зі зменшеною на 20% амплітудою напруги джерела при номінальній частоті;
 - здійсніть пуск двигуна у протилежному напрямку.
5. Спробуйте побудувати статичну механічну та статичну швидкісні характеристики двигуна.
6. Проаналізуйте результати досліджень. Сформулюйте висновки.

1.5 Методичні вказівки

1. Зовнішнє зусилля формуйте блоками *Simulink* та приєднайте його до вхідного порту блоку *Joint Actuator*. Зусилля можна прикладати і до блоку *Body Actuator*, але тоді треба формувати зусилля за трьома напрямками ($F_x = F(t)$, $F_y = 0$, $F_z = 0$), а потім поєднувати їх у один векторний сигнал.
2. Параметр *Inertia* блоків *Body* можна задавати матрицею з нулів розміром 3×3 (`zeros(3,3)`).
3. До блоків *Body* та блоків бібліотеки *Joints* можна приєднувати додаткові порти, розташовуючи їх за власним вибором ліворуч або праворуч, що ніяк не впливає на роботу цих блоків.
4. До непотрібних для візуалізації виходів блоків приєднайте ланки *Terminator Simulink*-бібліотеки *Sinks*.

1.6 Контрольні запитання

1. Чим відрізняються жорсткі механічні системи від пружно-в'язких?
2. Як пов'язані сигнали поступального та обертального рухів?
3. Що таке коефіцієнт пружності та коефіцієнт в'язкого тертя?
4. Запишіть рівняння руху першої та другої мас пружно-в'язкої двомасової системи.
5. Як обчислити періоди й амплітуди коливань двомасової системи і другої маси у виконуваних експериментах?
6. Як впливає на перехідні процеси ДЕМС коефіцієнт жорсткості, коефіцієнт в'язкого тертя, коефіцієнт розподілу мас?
7. Що таке кінематична пара? Наведіть приклади кінематичних пар.
8. Як треба узгоджувати параметри тіл та шарніру, що входять до складу однієї кінематичної пари?

Лабораторне заняття №2

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З НЕЗАЛЕЖНИМ ЗБУДЖЕННЯМ

Мета роботи: вивчення основних характеристик і режимів роботи електроприводу постійного струму з незалежним збудженням, практичне ознайомлення з режимом гальмування-протivismання, режимами генераторного та динамічного гальмування, а також ознайомлення з реостатним регулюванням швидкості обертання.

2.1 Теоретичні відомості

Класичний електропривід постійного струму на основі двигуна постійного струму (ДПС) має три основні частини: статор з обмоткою збудження, якір з обмоткою та щітково-колекторний вузол, який необхідний для підведення напруги до обмотки якоря (ОЯ). При цьому щітки нерухомі, а колектор і якір жорстко зв'язані. У ДПС для поліпшення умов комутації можуть бути використані додаткові полюси, а для компенсування поперечної реакції якоря – компенсаційні обмотки на полюсах статора.

У залежності від способу електромагнітного збудження ДПС поділяються на ДПС з паралельним, послідовним і змішаним збудженням. Іноді зустрічається назва ДПС з незалежним збудженням, але цей ДПС є поодиноким випадком ДПС з паралельним збудженням.

Для ДПС з НЗ справедлива система рівнянь, яка описує його статичний режим:

$$\begin{cases} U = I \cdot R + E, \\ E = c \cdot \omega, \\ M = c \cdot I, \end{cases} \quad (2.1)$$

де U – напруга на якорному колі, В; R – сумарний опір якорного кола, Ом; M – електромагнітний момент, Н·м; I – струм якоря, А; ω – кутова швидкість двигуна, рад/с; E – ЕРС обертання якоря, В; $c = k \cdot \Phi$ – коефіцієнт пропорційності, В·с; $k = \frac{p \cdot N}{2\pi \cdot a}$ – постійна ДПС; p – кількість пар полюсів; N – кількість активних провідників ОЯ; Φ – магнітний потік, Вб.

Схема вмикання ДПС з НЗ показана на рисунку 1.1, а.

Розв'язавши перші два рівняння в (1.1) відносно E , отримаємо рівняння електромеханічної характеристики ДПС:

$$\omega = \frac{U - I \cdot R}{k \cdot \Phi} = \frac{U - I \cdot R}{c}, \quad (2.2)$$

яке визначає залежність $\omega = f(I)$.

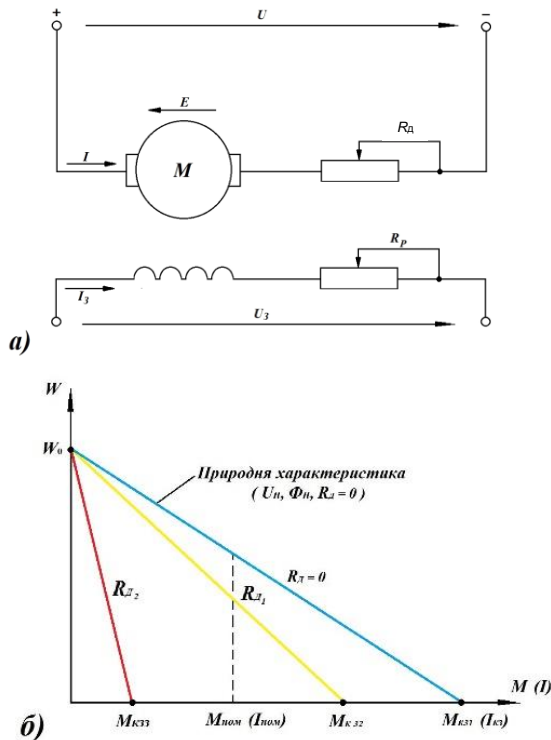


Рисунок 2.1 – Схема вмикання електроприводу (а) і його механічна характеристика у режимі двигуна (б)

Із врахуванням останнього рівняння в (2.1), рівняння (2.2) можна переписати так:

$$\omega = \frac{U}{c} - \frac{M \cdot R}{c^2}. \quad (2.3)$$

Це рівняння механічної характеристики визначає залежність швидкості обертання від моменту на валу двигуна. Так як у статисти обертальний момент дорівнює моменту опору M_o на валу ДПС, то це рівняння визначає залежність ω від M_o . Коефіцієнт пропорційності $c = k \cdot \Phi$ можна рахувати постійним для ДПС з НЗ, у яких є компенсаційні обмотки або у випадку, коли можна знехтувати впливом реакції якоря на величину Φ . Вплив поперечної реакції якоря на магнітний потік Φ веде до порушення лінійності механічної характеристики при збільшенні струму.

Із аналізу рівняння (2.2) випливає, що вона може бути зображена прямою лінією при постійних U , Φ та R . Якщо $U = U_{ном}$, $\Phi = \Phi_{ном}$ та $R_o = 0$, то це *природна* електромеханічна характеристика. При зміні хоча б одного з вказаних параметрів електромеханічна характеристика має назву *штучної*. Отже, ДПС з НЗ має лише одну природну характеристику і багато штучних (рис. 1.1).

У випадку, коли $I = 0$ має місце режим ідеального холостого ходу, при цьому:

$$\omega = \omega_0 = \frac{U}{k \cdot \Phi} = \frac{U}{c}, \quad (2.4)$$

де ω_0 – швидкість ідеального холостого ходу.

При збільшенні навантаження на валу ДПС зростає струм якоря I , що веде до спаду швидкості обертання ω . У випадку коли $\omega = 0$, має місце режим короткого замикання, при якому:

$$I_{кз} = \frac{U}{R}.$$

Максимальне значення струму короткого замикання має місце при $R_o = 0$, коли $R = R_y$ (R_y – власний опір ОЯ) і він може бути в десятки разів більший за $I_{ном}$ двигуна, так як R_y – величина достатньо мала. Режим короткого замикання має короточасний характер, під час пуску двигуна та при гальмуванні двигуна моментом опору.

Під час прямого пуску двигуна ударні значення струму $I_{кз} \gg I_{ном}$ і ОЯ може швидко перегрітися та вийти з ладу, окрім того великі струми негативно впливають на працездатність щітково-колекторного вузла.

Усе це обумовлює необхідність обмеження $I_{кз}$ до допустимої величини, або введенням додаткового опору в якірне коло R_0 , або зменшенням напруги живлення U .

Максимально допустимий струм короткого замикання повинен відповідати нерівності:

$$I_{кз} \leq k_T \cdot I_n, \quad (2.6)$$

де $k_T = 2 \div 5$ – коефіцієнт перевантаження за струмом.

Із введенням R_0 в якірне коло жорсткість електромеханічної характеристики зменшується (рис. 2.1, б).

Із виразу (2.4) випливає, що графічно механічна характеристика ДПС з НЗ може бути зображена прямою лінією з двома характерними точками – швидкістю холостого ходу ω_0 та моментом короткого замикання $M_{кз}$, який також має назву *пускового*.

Величина $M_{кз}$ визначається з виразу:

$$M_{кз} = c \cdot I_{кз} = \frac{k \cdot \Phi \cdot U}{R}. \quad (2.7)$$

Із введенням додаткового опору R_0 в якірне коло жорсткість механічної характеристики також падає, що знаходить використання при регулюванні швидкості обертання. Для механічних характеристик справедливий поняття *природної* та *штучної* характеристик.

Рівняння механічної характеристики можна записати так:

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega, \quad (2.8)$$

де $\Delta\omega = \frac{M \cdot R}{c^2}$ – перепад швидкості; $R = R_y + R_0$.

Із врахуванням пропорційного зв'язку між I та M випливає, що графік механічної та електромеханічної характеристик один і той самий при відповідному масштабі по осі абсцис величин I та M .

Із рівняння механічної характеристики (1.4) випливає, що ω може регулюватися зміною U , R та Φ .

Одним із основних показників, який характеризує методи регулювання швидкості, є *діапазон регулювання* D . Він визначається як відношення максимальної швидкості обертання ω_{max} до мінімальної ω_{min} :

$$D = \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}}$$

Як видно з виразу (2.4), при зміні напруги живлення можна отримати сімейство паралельних механічних характеристик (рис. 2.2).

Практично можна зменшувати напругу живлення якоря відносно його номінального значення U_n , тобто при регулюванні швидкості зміною напруги повинна виконуватися умова $U < U_n$, при цьому швидкість обертання можна регулювати тільки вниз від основної. Це обумовлено тим, що вже на стадії проектування ДПС розраховують на конкретну номінальну напругу і перевищення напруги може призвести до пробію ізоляції.

Напруга на якорі двигуна може регулюватись за допомогою електромашинних та статичних пристроїв.

Реостатне регулювання кутової швидкості обертання є самим простим способом регулювання кутової швидкості (рис. 2.1). Із рівняння механічної характеристики (2.8) маємо, що при постійному моменті опору M_o на валу можна отримати різні усталені кутові швидкості нижчі основної. Жорсткість механічних характеристик зменшується при збільшенні величини додаткового опору R_o .

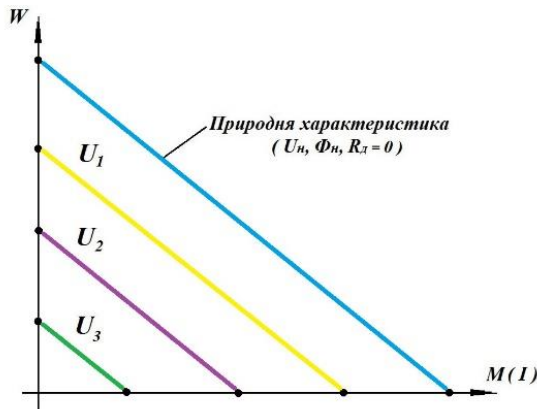


Рисунок 2.2 – Механічні характеристики ДПС з НЗ при різних напругах на якорі: $U_n > U_1 > U_2 > U_3$

Діапазон регулювання швидкості звичайно не перевищує 2:1. Спосіб характеризується великими тепловими втратами на додатковому опорі. При введенні додаткового опору в коло обмотки збудження (R_3) можна

змінювати величину магнітного потоку двигуна Φ у бік зменшення від його номінального значення Φ_n , яке має місце при $R_3 = 0$.

Із рівняння (2.2) для різних значень потоку збудження можна отримати сімейство електромеханічних характеристик (рис. 2.3).

На рисунку 2.3 нижня характеристика відповідає номінальному потоку збудження. Якщо зменшувати величину потоку збудження, то кутові швидкості обертання холостого ходу зростають відповідно з співвідношенням (2.4). Струм короткого замикання при цьому залишається незмінним.

Пусковий момент визначається співвідношенням (2.7). При зменшенні величини потоку збудження Φ зменшується і відповідний пусковий момент $M_{кз}$. На рис. 2.4 зображені механічні характеристики для різних значень потоків. Цей спосіб дозволяє регулювати кутову швидкість обертання вверх від основної.

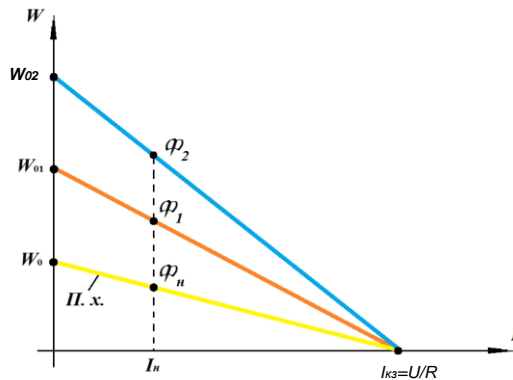


Рисунок 2.3 – Електромеханічні характеристики при різних потоках збудження: $\Phi_n > \Phi_1 > \Phi_2$

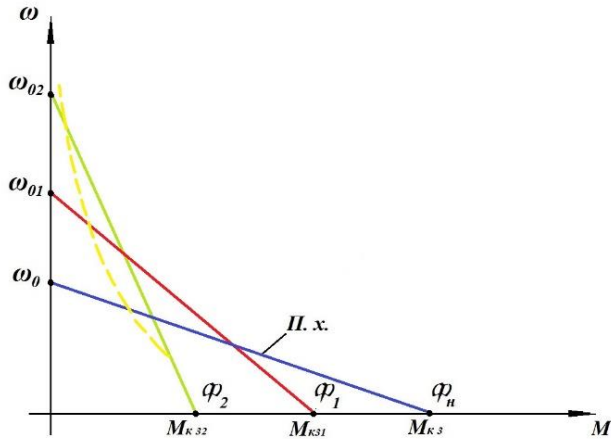


Рисунок 2.4 – Механічні характеристики при різних потоках збудження: $\Phi_{\text{н}} > \Phi_1 > \Phi_2$

З економічної точки зору доцільно регулювати кутову швидкість обертання при струмі якоря рівному номінальному, але при цьому номінальні значення моментів будуть різними для різних значень величини потоку Φ .

Точки, які відповідають номінальним моментам двигуна, будуть знаходитись на гіперболі, яка позначена пунктирною лінією на рисунку 2.4. При цьому способі регулювання навантаження повинно характеризуватись нелінійною механічною характеристикою.

Двигун може працювати у режимі двигуна та у режимах гальмування. При цьому для зображення механічних характеристик треба використати чотири квадранти, як це показано на рисунку 2.5.

У квадрантах 1 та 3, в яких потік потужності додатній, має місце режим двигуна для різних напрямків обертання. У квадрантах 2 та 4 з від'ємним потоком потужності, мають місце гальмівні режими роботи.

Розрізняють такі режими гальмування:

- гальмування з віддачею енергії в мережу (рекуперативне);
- динамічне гальмування;
- гальмування противмиканням.



Рисунок 2.5 – Чотириквadrантна система координат для зображення механічних характеристик для всіх режимів роботи

Якщо розігнати ДПС з НЗ до швидкості вище швидкості холостого ходу, то він починає працювати генератором з віддачею електричної енергії в мережу. Струм якоря при цьому змінює свій знак на протилежний, так як $E > U$ і ДПС переходить у режим гальмування з моментом $M_e = -M$. У цьому випадку рівняння механічної характеристики має вигляд:

$$\omega = \frac{U}{c} + \frac{M_e \cdot R}{c^2}. \quad (2.9)$$

Графічно залежність $\omega = f(M_e)$ у цьому випадку є продовженням механічної характеристики для режиму двигуна, яка розташована у 2 та 4 квадрантах (рис. 2.6). Гальмування з віддачею енергії у мережу є досить економічним режимом роботи.

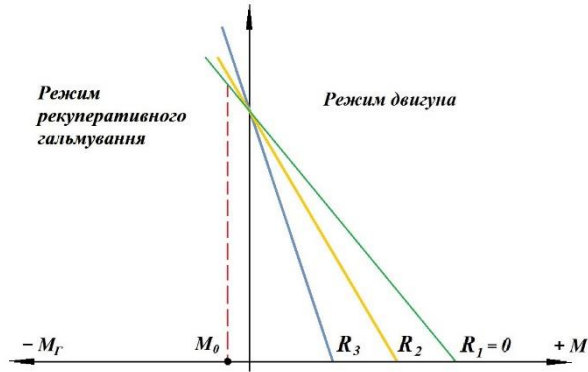


Рисунок 2.6 – Механічні характеристики для режиму двигуна та режиму рекуперативного гальмування для: $R_3 > R_2 > R_1$

Для здійснення динамічного гальмування якір двигуна вимикають від мережі і вмикають на опір гальмування R_p (рис. 2.7).

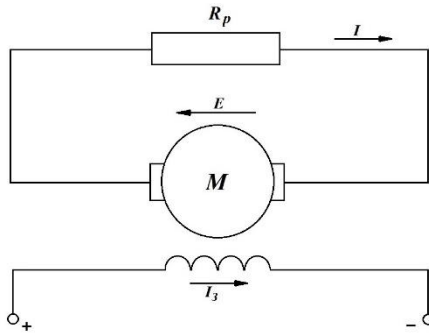


Рисунок 2.7 – Схема вмикання ДПС з НЗ при динамічному гальмуванні

Рівняння механічної характеристики для цього режиму має вигляд:

$$\omega = \frac{M_z \cdot R}{c^2}, \quad (2.10)$$

де M_z – момент гальмування; R – опір якірного кола, $R = R_y + R_p$.

Струм якоря можна визначити як:

$$I = -\frac{E}{R}, \quad (2.11)$$

тобто він змінює свій знак.

На рисунку 2.8 зображені механічні характеристики режиму динамічного гальмування.

Спосіб динамічного гальмування досить економічний, так як двигун працює генератором на постійне навантаження, споживаючи з мережі енергію тільки на електромагнітне збудження.

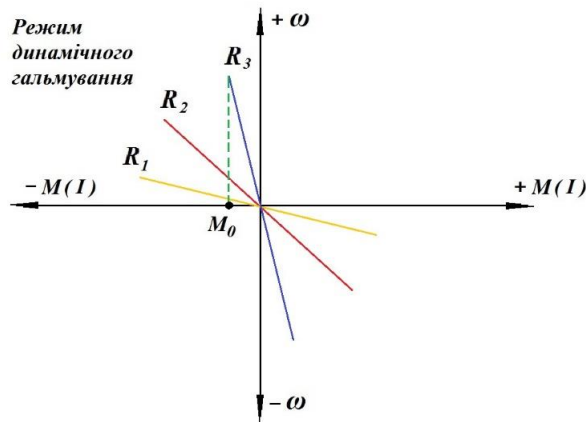


Рисунок 2.8 – Механічні характеристики режиму динамічного гальмування, при $R_3 > R_2 > R_1$

Гальмівний спуск має місце при перевищенні активним моментом опору величини пускового моменту, що призводить до зміни напрямку обертання якоря двигуна і, відповідно, знаку ЕРС. У цьому випадку струм якоря визначається так:

$$I = \frac{U + E}{R},$$

тобто, струм якоря перевищує значення струмів короткого замикання. Для здійснення цього режиму необхідно обмежувати струм якоря за допомогою додаткового опору R_0 .

Механічні та електромеханічні характеристики у цьому випадку є продовженням відповідних характеристик у 4 квадрант (рис. 2.9).

Якщо у ДПС, який працює у режимі двигуна, змінити полярність напруги на якорі на протилежну, то знак струму якоря зміниться на протилежний у відповідності з виразом:

$$I = -\frac{U + E}{R}.$$

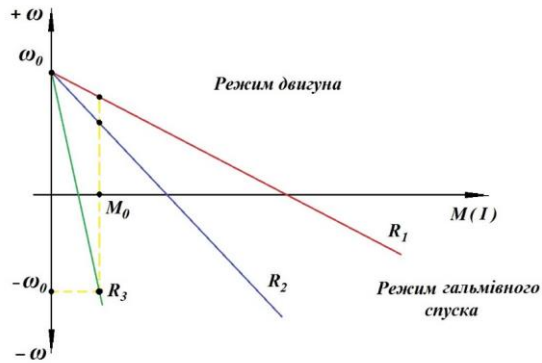


Рисунок 2.9 – Механічні характеристики режиму гальмівного спуску, при $R_3 > R_2 > R_1$

Двигун переходить у режим гальмування і його механічна характеристика буде розташована у 2 квадранті. При цьому відбувається інтенсивне гальмування і швидкість обертання двигуна падає до нуля. Якщо у цей момент часу обмотку якоря не відключити від мережі, то напрямок обертання зміниться на протилежний. Це безумовно накладає відповідні обмеження на застосування способу гальмування противмиканням.

Із енергетичної точки зору цей спосіб не економічний оскільки велика кількість енергії виділяється на додатковому опорі, який обмежує струм гальмування.

Механічні характеристики для цього режиму гальмування зображені на рисунку 2.10.

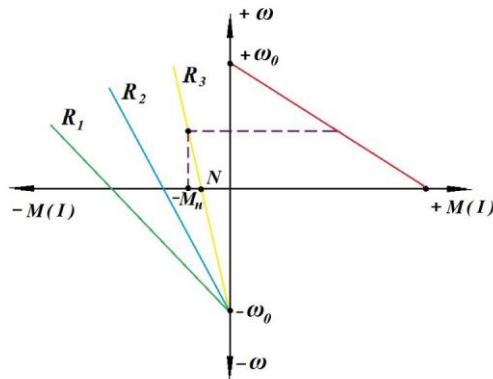


Рисунок 2.10 – Механічні характеристики у режимі гальмування противмиканням при зміні полярності напруги для $R_3 > R_2 > R_1$

2.2 Опис лабораторного стенду

Стенд складається із електромеханічного агрегату та блоку приладів, які з'єднані між собою двома силовими і одним вимірювальним кабелями. Блок приладів живиться від мережі напругою 380 В.

Ввімкнення стенду здійснюється вимикачем, який розміщений на лівій боковій панелі блоку приладів, а вимірювання частоти обертання – цифровим індикатором. Принцип вимірювання швидкості-фотоімпульсний.

Переклад позначень на панелі лабораторного стенду:

POWER – енергія

SUPPLY VOLTAGE – напруга живлення

TACHOMETER – тахометр

SPEED, rpm – швидкість, об/хв

CURRENT SOURCE – джерело живлення

ARMATURE CURRENT – струм якоря

EXCITING CURRENT – струм збудження

DC MOTOR – двигун постійного струму

STUDY MOTOR – досліджуваний двигун

BRAKE MOTOR – гальмівний двигун

LOAD – навантаження

ON – ввімкнено

OFF – вимкнено.

Величини додаткових опорів R_1 , R_3 можна змінювати перемикачами на панелі блоку приладів від 0 до 10 ступені. Відповідно R_1 та R_3 можуть приймати десять значень від 0 до 6,5 Ом із кроком 0,65 Ом.

2.3 Порядок виконання лабораторної роботи

2.3.1. Перевірка працездатності стенду

Для цього необхідно:

- установити всі тумблери на панелі у нижнє положення;
- ввімкнути повітряний вимикач на лівому боці стенду, при цьому має світитись індикатор „*POWER*”;
- виставити R_1 у положення 10 для здійснення реостатного пуску;
- ввімкнути тумблер S_1 і виставити потенціометром R_2 максимальне значення струму збудження за амперметром $PA2$;
- ввімкнути автомат $QF1$, при цьому має обертатись двигун $M1$ і реєструватись його швидкість обертання;
- перевірити можливість регулювання швидкості обертання, для чого вивести R_1 у положення 0. При цьому має зрости швидкість обертання;
- вимкнути $QF1$ і виставити R_1 у положення 10;
- повторити всі зазначені вище дії для перевірки двигуна $M2$ за допомогою перемикача R_3 , потенціометра R_4 , автомата $QF3$ і тумблера S_3 . Положення тумблера S_4 будь-яке;
- вимкнути двигун.

2.3.2. Експериментальне визначення залежності коефіцієнта двигуна $c=k\Phi$ від струму збудження I_{31}

При зміні струму збудження I_{31} двигуна $M1$ змінюється потік збудження Φ та коефіцієнт двигуна c . Для визначення механічних характеристик ДПС необхідно побудувати залежність $c = f(I_{31})$. Для цього необхідно:

- виконати реостатний пуск тільки двигуна $M1$ за п.2.3.1 та вивести R_1 у положення 0;
- ввести двигун $M1$ у режим ідеального неробочого ходу, для чого згідно ввімкнути двигун $M2$, виставивши S_4 у нижнє положення, а R_3 у положення 10;
- ввімкнути S_3 та $QF3$, виставити потенціометром R_4 струм збудження $I_{32}=1,5$ А і перемикачем R_3 добитися нульового значення струму якоря I_1 двигуна $M1$;
- змінюючи струм збудження I_{31} потенціометром R_2 , зняти покази вольметра „SUPPLY VOLTAGE” і тахометра. Дані звести у таблицю 2.1;
- вимкнути двигун.

Таблиця 2.1 – Результати досліджень

I_{31}	А	1,5	1,4	1,2	1,0	0,75	0,5
n	об/хв						
ω_0	c^{-1}						
U	В						
c	В·с						

У таблиці 2.1 зробити перерахунок n у ω_0 та визначити коефіцієнт двигуна c з виразу $c = \frac{U}{\omega_0}$. Визначити коефіцієнт двигуна c для номінального струму збудження I_{31} за паспортними даними двигуна Д-200: номінальна потужність $P_H = 200$ Вт, номінальний струм $I_H = 12$ А, номінальна швидкість обертання $n_H = 2750$ об/хв., опір якоря $R_Y = 0,127$ Ом та формулою:

$$C = k\Phi_H = \frac{U_H - I_H R_Y}{\omega_H} \quad (2.12)$$

2.3.3. Зняття механічних характеристик ДПС з НЗ в режимі рекуперативного гальмування

Для зняття характеристик необхідно:

- здійснити реостатний пуск двигуна $M1$ для струму збудження $I_{31}=1,7$ А, а потім вивести перемикач R_1 у положення 0;
- потенціометром R_4 виставити струм збудження $I_{32}=1,7$ А і ввімкнути S_3 , $QF3$, а S_4 вимкнути, перемикач R_3 вивести у положення 0;
- за допомогою потенціометра R_4 зменшити струм збудження I_{32} і вивести двигун $M1$ у рекуперативний режим, при якому струм якоря $I_1 < 0$, причому, одночасно необхідно зняти покази амперметра $PA1$ та тахометра і

заповнити таблицю 2.2.

Таблиця 2.2 – Результати досліджень
для $R_l = 0 \text{ Ом}$

n	об/хв					
ω	с^{-1}					
I_l	А					
M	Н·м					

для $R_l = 1,95 \text{ Ом}$

n	об/хв					
ω	с^{-1}					
I_l	А					
M	Н·м					

для $R_l = 3,9 \text{ Ом}$

n	об/хв					
ω	с^{-1}					
I_l	А					
M	Н·м					

для $R_l = 5,85 \text{ Ом}$

n	об/хв					
ω	с^{-1}					
I_l	А					
M	Н·м					

УВАГА! При виконанні досліду необхідно контролювати за амперметром $PA3$ струм якоря I_2 , який не повинен перевищувати 15 А.

Дослід провести для положень 0, 3, 6 та 9 перемикача R_l , при яких величина додаткового опору R_l в якорному колі буде відповідно 0 Ом, 1,95 Ом, 3,9 Ом та 5,85 Ом. Величину гальмівного моменту M визначити за формулою $M=cI$. Оскільки цей дослід здійснюється для струму збудження $I_{3l} = 1,7 \text{ А}$, то можна вважати, що при цьому потік $\Phi = \Phi_H$ і коефіцієнт c визначається за формулою (2.12).

2.3.4. Зняття механічних характеристик ДПС з НЗ у режимі двигуна

Для зняття характеристик необхідно:

- здійснити реостатний пуск двигуна $M1$ і вивести перемикач R_l у положення 0;
- ввести двигун $M2$ у режим динамічного гальмування, для чого послідовно ввімкнути S_4 , вимкнути S_3 , виставити перемикач R_l у положення 3, повернути до упору вліво потенціометр R_4 , ввімкнути автомат $QF3$;
- регулюючи струм збудження двигуна $M2$ потенціометром R_4 , навантажити двигун $M1$ до величини $I_l = 10 \text{ А}$ і зафіксувати частоту обертання та струм;

- струм збудження двигуна $M1$ підтримувати на рівні 1,7 А;
- дані звести у таблицю 1.3 для 5-6 значень струму якоря I_1 ;

Таблиця 2.3 – Результати досліджень

для $R_1 = 0 \text{ Ом}$

n	об/хв					
ω	с^{-1}					
I_1	А					
M	Н·м					

для $R_1 = 1,95 \text{ Ом}$

n	об/хв					
ω	с^{-1}					
I_1	А					
M	Н·м					

для $R_1 = 3,9 \text{ Ом}$

n	об/хв					
ω	с^{-1}					
I_1	А					
M	Н·м					

для $R_1 = 5,85 \text{ Ом}$

n	об/хв					
ω	с^{-1}					
I_1	А					
M	Н·м					

– дослід провести для положень 0, 3, 6 та 9 перемикача R_1 , при яких додатковий опір R_1 в якорному колі буде відповідно 0 Ом, 1,95 Ом, 3,9 Ом та 5,85 Ом;

– при знятті характеристик опори R_2 та R_4 можна змінювати для відповідного навантаження двигуна $M1$, але при цьому струм якоря двигуна $M1$ не повинен перевищувати 15 А;

– у табл. 1.3 за певними величинами струмів визначити величини моментів так само, як і у табл. 1.2;

– вимкнути двигуни від мережі вимикачами $QF1$ та $QF3$.

2.3.5. Зняття механічних характеристик ДПС з НЗ у режимі гальмування противмиканням

У цій роботі експериментально виконується режим гальмівного спуску. Оскільки у цьому режимі струми перевищують пускові значення, то характеристики треба знімати тільки при введеному додатковому опорі R_1 .

Для зняття характеристик необхідно:

– здійснити реостатний пуск двигуна $M1$ при $I_{31} = 1,7 \text{ А}$ за амперметром $PA1$;

- перемикач R_1 поставити у положення 3;
- повернути потенціометр R_4 вліво до упору, а перемикач R_3 встановити у положення 10;
- перемикач S_4 поставити у верхнє положення та послідовно ввімкнути тумблери S_3 та $QF3$;
- повертаючи потенціометр R_4 , зняти декілька значень струму якоря I_1 за амперметром $PA1$ і частоти обертання, а коли струм збудження I_{32} досягне величини 1,7 А подальше навантаження здійснювати перемикачем R_3 ;
- дані дослідів занести у таблицю 2.4.

Таблиця 2.4 – Результати досліджень

для $R_1 = 3,9$ Ом

n	об/хв					
ω	c^{-1}					
I_1	А					
M	Н·м					

для $R_1 = 5,85$ Ом

n	об/хв					
ω	c^{-1}					
I_1	А					
M	Н·м					

Дослід повторити для положень 6 та 9 перемикача R_1 , а дані звести у таблицю 2.4.

2.3.6. Зняття механічних характеристик ДПС з НЗ у режимі динамічного гальмування

Дослідні дані для побудови механічних характеристик необхідно зняти при додаткових опорах $R_1 = 0$ Ом, 1,95 Ом, 3,9 Ом, 5,85 Ом, для чого перемикач R_1 необхідно поставити у положення 0, 3, 6, 9.

Для зняття характеристик необхідно:

- здійснити реостатний пуск двигуна $M2$;
- встановити потенціометром R_4 струм збудження $I_{32} = 1,7$ А за амперметром $PA1$;
- вимкнути S_4 і ввімкнути S_3 ;
- поставити перемикач R_3 у положення 10 і ввімкнути $QF3$;
- плавно вивести R_3 у положення 0;
- ввести двигун $M1$ у режим динамічного гальмування, для чого встановити потенціометром R_3 струм збудження $I_{31} = 1,7$ А, поставити перемикач R_1 у положення 9, вимкнути S_1 і ввімкнути $QF1$;
- регулюючи швидкість обертання двигуна $M2$ перемикачем R_3 і потенціометром R_4 , зняти 5-6 точок частоти обертання та струму якоря I_1 двигуна $M1$ за амперметром $PA1$;
- дані занести у таблицю 2.5.

Таблиця 2.5 – Результати досліджень

для $R_I = 0 \text{ Ом}$

n	об/хв					
ω	с^{-1}					
I_I	А					
M	Н·м					

для $R_I = 1,95 \text{ Ом}$

n	об/хв					
ω	с^{-1}					
I_I	А					
M	Н·м					

для $R_I = 3,9 \text{ Ом}$

n	об/хв					
ω	с^{-1}					
I_I	А					
M	Н·м					

для $R_I = 5,85 \text{ Ом}$

n	об/хв					
ω	с^{-1}					
I_I	А					
M	Н·м					

– не вимикаючи двигуни, перемкнути R_I у положення 6 і зняти швидкість n та I_I і так далі.

При виконанні цього дослідження необхідно, щоб струм якоря двигуна $M2$ не перевищував 15 А за амперметром $PA3$.

2.4 Вказівки до оформлення звіту

1. Побудувати електромеханічні характеристики ДПС у режимі рекуперативного гальмування, режимі двигуна, режимі противмикання та динамічного гальмування.

2. Побудувати графіки механічних характеристик для тих же режимів двигуна.

2.5 Контрольні запитання

1. Як відрізняється природна механічна характеристика від штучних?
2. Які Ви можете назвати способи регулювання кутової швидкості обертання ДПС?
3. Які основні недоліки мають способи регулювання кутової швидкості обертання ДПС?
4. Яке призначення щіток у ДПС?
5. Які Ви можете назвати режими роботи ДПС?

Лабораторне заняття №3

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З ПОСЛІДОВНИМ ЗБУДЖЕННЯМ

Мета роботи: вивчення основних характеристик і режимів роботи двигуна постійного струму з послідовним збудженням (ДПС з ПЗ), практичне ознайомлення з режимом гальмування-противмикання, режимами генераторного та динамічного гальмування, а також ознайомлення з реостатним регулюванням швидкості обертання ДПС з ПЗ.

3.1 Теоретичні відомості

Схему двигуна постійного струму послідовного збудження (ДПС з ПЗ) наведено на рисунку 3.1. Обмотка збудження включена послідовно з якорем, що створює умови для форсованої зміни потоку двигуна. Для здійснення пуску ДПС з ПЗ послідовно з його обмоткою вмикається додатковий реостат.

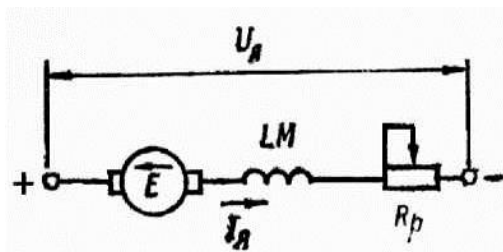


Рисунок 3.1 – Електрична принципова схема вмикання ДПС з ПЗ

Якщо для двигуна незалежного збудження потік не залежить від струму навантаження, то для двигуна послідовного збудження потік є функцією струму навантаження. Потік збудження ДПС з ПЗ Φ пов'язаний зі струмом якоря залежністю, яка має назву “крива намагнічування” (рис. 3.2). Залежність $\Phi(I)$ для малих струмів має вигляд лінійної характеристики. Зі зростанням струму у зв'язку з насиченням магнітної системи ДПС ця залежність стає нелінійною. Рівняння електромеханічної характеристики ДПС з ПЗ має вигляд:

$$\omega = \frac{U - I \cdot R}{k \cdot \Phi}, \quad (3.1)$$

де ω - кутова швидкість обертання двигуна, рад/с; U - напруга живлення, В; I - струм якоря, А; k - стала двигуна; $R = R_{\text{я}} + R_{\text{о3}} + R_{\text{д}}$ - опір електричного кола.

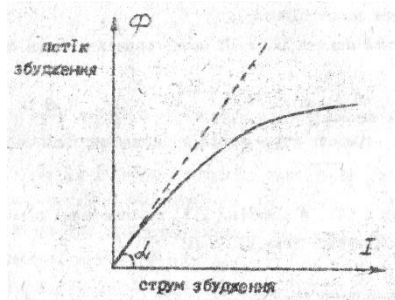


Рисунок 3.2 – Крива намагнічування ДПС з ПЗ

З теорії електричних машин відомо, що двигуни розраховуються на конкретний струм I_n . При цьому струм короткого замикання не повинен перевищувати значення :

$$I_{кз} = I_n \cdot k_i, \quad (3.2)$$

де k_i - коефіцієнт перевантаження по струму.

При прямому пуску двигуна ударні значення струму $I_{кз} \gg I_n$. Це призводить до того, що обмотки двигуна можуть швидко перегрітися та вийти з ладу. Крім цього, значні струми негативно діють і на надійність щітково-колекторного вузла. Це викликає необхідність обмежувати струм к.з до певної допустимої величини або введення в коло якоря додаткового опору R_p , або зменшення напруги живлення. Величина максимально допустимого струму визначається коефіцієнтом перевантаження.

Як видно з рівняння механічної характеристики (3.1), кутову швидкість обертання можна регулювати зміною напруги U , опору кола R та магнітного потоку Φ . Одним з основних показників, які характеризують методи регулювання швидкості, є діапазон регулювання D , який визначається як відношення максимальної швидкості обертання до мінімальної:

$$D = \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}}. \quad (3.3)$$

Регулювання швидкості обертання ДПС з ПЗ зміною напруги живлення. В цьому випадку двигун 2 (рис. 3.3) підключається до керованого випрямляча 1, вихідна напруга якого U регулюється відповідно до зміни вхідного сигналу U_y , управління. Механічні характеристики ДПС з ПЗ при різних значеннях напруги живлення показані на рисунку 3.4.

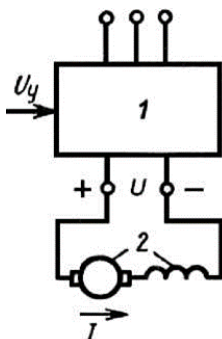


Рисунок 3.3 – Схема для регулювання координат ДПС ПЗ зміною напруги



Рисунок 3.4 – Механічні характеристики ДПС з ПЗ при різних значення напруги живлення $U_n > U_1 > U_2 > U_3$

Регулювання швидкості обертання ДПС з ПЗ зміною опору в колі збудження. Механічні характеристики ДПС для різних значень додаткового опору R_p зображено на рисунку 3.5. Діапазон регулювання при даному способі не перевищує 2,5:1 і залежить від навантаження. Таке регулювання швидкості проводять при сталому моменті опору. Перевагою цього способу регулювання є його простота, а недоліком – значні втрати енергії на додатковому опорі.

Регулювання швидкості зміною магнітного потоку. Оскільки у ДПС з ПЗ обмотка якоря послідовно з'єднана з обмоткою збудження, то для зміни величини магнітного потоку збудження необхідно шунтувати обмотку збудження реостатом $R_{ш}$ (рис. 3.6). Струм збудження при цьому визначається як різниця між струмом якоря та струмом з шунтуючим реостатом, тобто $I_{зб} = I_{я} - I_{ш}$. Регулювання здійснюється ввєрх від основної кутової швидкості обертання внаслідок зменшення величини магнітного потоку. Механічні характеристики ДПС для різних значень шунтуючого опору $R_{ш}$ зображено на рисунку 3.7.

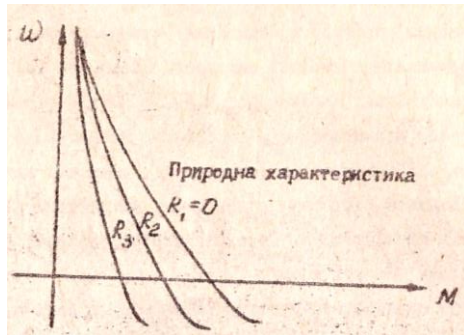


Рисунок 3.5 – Механічні характеристики ДПС з ПЗ при різних значеннях послідовного додаткового опору $R_3 > R_2 > R_1$

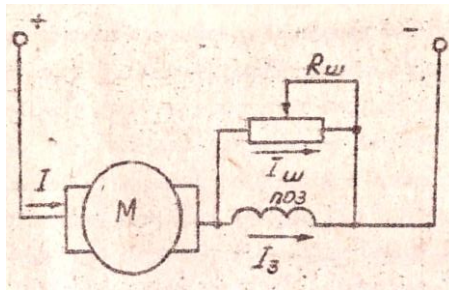


Рисунок 3.6 – Електрична принципова схема регулювання кутової швидкості обертання ДПС з ПЗ зміною потоку збудження

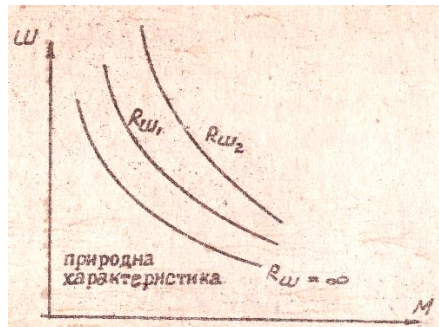


Рисунок 3.7 – Механічні характеристики ДПС з ПЗ при різних значеннях шунтуючого опору $R_{ш1} > R_{ш2}$

Зі зменшенням величини $R_{ш}$ швидкість зростає. Цей спосіб регулювання є достатньо економічним, оскільки величина опору послідовної

обмотки збудження мала, і, відповідно, величина $R_{ш}$ також вибирається малою. Втрати енергії в цьому випадку приблизно такі ж, як у ДПС з НЗ при регулюванні швидкості зміною потоку збудження. Діапазон регулювання при даному способі не перевищує 2:1 при сталому навантаженні. Даний спосіб регулювання швидкості знаходить застосування в електроприводах, які потребують прискорення при малих навантаженнях.

Всі перелічені вище способи регулювання характеризуються відсутністю кінцевої кутової швидкості обертання ідеального неробочого ходу Ω_0 . Однак необхідно знати, що є схемотехнічні рішення, які дозволяють отримати кінцеві значення Ω_0 . Для цього шунтуються реостатами обидві обмотки двигуна або тільки одна обмотка якоря. Ці способи є неекономічні в енергетичному відношенні, але дозволяють отримати характеристики підвищеної жорсткості з малими швидкостями ідеального неробочого ходу. Діапазон регулювання при цьому не перевищує 3:1, а регулювання швидкості здійснюється вниз від основної. При переході у генераторний режим в цьому випадку ДПС з ПЗ не віддає енергії в мережу, а працює генератором, який замкнений на опір. В автоматизованих електроприводах величина опору регулюється, як правило, імпульсним методом за допомогою періодичного шунтування напівпровідниковим вентилем опору $R_{ш}$ або R_d з певною відмінністю.

Для ДПС з ПЗ можливо здійснювати гальмування-протivismкання та динамічне гальмування. В них відсутнє рекуперативне гальмування з віддачею енергії в мережу, бо його ЕРС не може бути більшою від напруги живлення. Крім даних гальмівних режимів, у ДПС з ПЗ також можливий режим гальмування за допомогою зміни полярності на обмотці якоря, але без зміни напрямку струму в обмотці збудження.

Гальмування протivismкання ДПС ПЗ. Цей режим здійснюється зміною полярності напруги на обмотці якоря при збереженні того ж напрямку струму в обмотці збудження (або навпаки). При цьому струм змінює свій напрям у відповідності з виразом:

$$I = -\frac{U + E}{R}. \quad (3.4)$$

Для обмеження струму в цьому режимі в колі якоря 1 вводиться додатковий резистор 2. Двигун переходить в гальмівний режим і його механічна характеристика має вигляд, який зображений на рисунку 3.8. При цьому відбулось інтенсивне гальмування і кутова швидкість падає до нуля. Якщо в цей момент часу, який відповідає досягненню точки N на механічній характеристиці не вимкнути двигун з мережі, то напрям обертання зміниться на протилежний, тобто здійснюється реверс двигуна. З енергетичної точки зору, цей спосіб не є економічний, оскільки значна кількість енергії виділяється на додатковому опорі, який необхідно увімкнути в якріне коло

для обмеження стрибків гальмівного струму. Перевага даного способу – висока ефективність гальмування. Схема включення двигуна при здійсненні гальмування противмикання показано на рисунку 3.9.

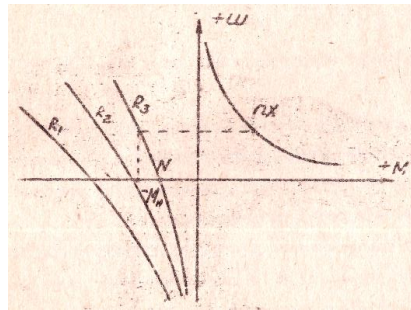


Рисунок 3.8 – Механічні характеристики ДПС з ПЗ у режимі гальмування противмикання при зміні полярності напруги $R_3 > R_2 > R_1$

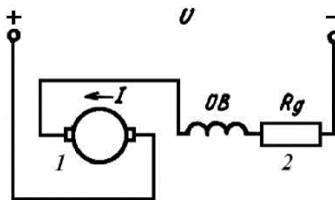


Рисунок 3.9 – Схема гальмування противмикання ДПС з ПЗ

Іншим способом гальмування є гальмування з самозбудженням. Двигун в цьому випадку не споживає енергії з мережі. Електрична схема при такому гальмуванні показана на рисунку 3.10. Характеристики на ведені на рисунку 3.11.

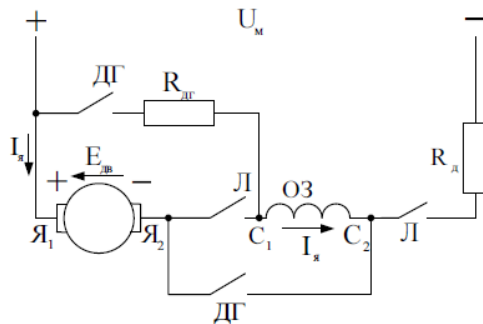


Рисунок 3.10 – Схема динамічного гальмування з самозбудженням

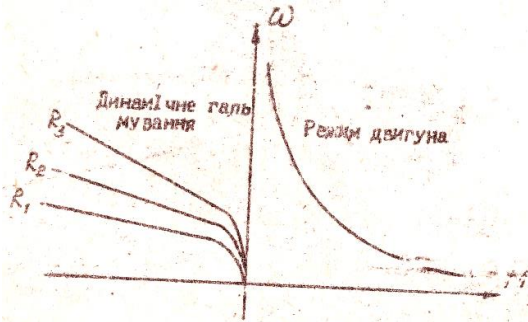


Рисунок 3.11 – Механічні характеристики ДПС у режимі динамічного гальмування з самозбудженням при $R_1 < R_2 < R_3$

3.2 Опис лабораторного стенду

Стенд має електромеханічний агрегат та блок приладів, які з'єднані між собою двома силовими і одним вимірювальним кабелями.

Блок приладів підключається до трифазної мережі 380 В.

Вмикання стенда до мережі здійснюється автоматом на лівому боці панелі блоку приладів. Принцип вимірювання швидкості-фотоімпульсний.

Електромеханічний агрегат являє собою два механічно з'єднаних електродвигуна. Один з них, досліджуваний ДПС з ПЗ типу МВП-3Аз паспортними даними: номінальна напруга $U_n=27$ В, номінальний струм $I_n=11$ А, номінальна швидкість обертання $n=7800$ об/хв, номінальний момент $M_n=0,196$ Нм. Інший двигун-навантажувальний ДПС з НЗ типу Д-200 з паспортними даними: номінальна потужність $P_n=200$ Вт, напруга $U_n=27$ В, номінальний струм $I_n=10$ А, номінальна швидкість обертання $n=2710$ об/хв, номінальний момент $M_n=0,69$ Нм, опір обмотки якоря $R_{я}=0,127$ Ом.

Переклад позначень на панелі лабораторного стенду:

POWER – енергія

SERIES MOTOR – ДПС з ПЗ

SEPARATELY EXCITED MOTOR – ДПС з НЗ

SUPPLY VOLTAGE – напруга живлення

STEP VOLTAGE – ступінчата напруга

TACHOMETER – тахометер

ARMATURE CURRENT – струм якоря

ARMATURE VOLTAGE – напруга якоря

SPEED – швидкість

PULSE FREQUENCY – частота імпульсів

DC MOTOR – двигун постійного струму

CURRENT SOURCE – джерело струму

ARMATURE VOLTAGE – напруга якоря

EXCITING CURRENT – струм збудження

3.3 Порядок виконання лабораторної роботи

3.3.1. Перевірка працездатності стенду

Для цього необхідно:

– установити всі тумблери на панелі у нижнє положення;

– установити перемикачі R1 та R2 у положення 10;

– ввімкнути повітряний вимикач на лівому боці стенду, при цьому має світитись індикатор „POWER”;

– перемикач S5 встановити у положення 1.

Перевірка працездатності ДПС з НЗ – M2:

– виставити потенціометром R₃ за амперметром PA3 струм 1,8 А;

– ввімкнути тумблер S₃ і QF2, при цьому має почати обертатись двигун M2, а його частота обертання висвічуватись на індикаторі «SPEED» в об/хв;

– за допомогою додаткового опору R2 переконатись, що частота обертання регулюється;

– вимкнути QF2 та S3.

Перевірка працездатності ДПС з ПЗ:

– ввімкнути тумблер S₁ і QF1 і за допомогою додаткового опору R1 переконатись, що частота обертання регулюється;

– вимкнути QF1 та S1.

3.3.2. Експериментальне визначення залежності коефіцієнта двигуна $c=k\Phi$ від струму збудження I_{32}

При зміні струму збудження I_{32} двигуна M2 змінюється потік збудження Φ та коефіцієнт двигуна c . Для визначення механічних характеристик ДПС необхідно побудувати залежність $c = f(I_{32})$. Для цього необхідно:

– встановити перемикач S5 у положення 3;

– здійснити реостатний пуск двигуна M2, для чого ввімкнути S3 та QF3 і встановити R₂ у положення 0. Двигун починає обертатись;

– перемкнути S2 у нижнє положення і ввімкнути S1 та QF1;

– виставити потенціометром R₃ за амперметром PA3 струм збудження 1,7 А, а потім за допомогою перемикача R1 досягти режиму ідеального неробочого ходу двигуна M2, при якому струм якоря I_я=0. Значення частоти обертання та напруги якоря занести в таблицю 3.1

– змінюючи струм збудження I_{32} потенціометром R₃, зняти покази вольтметра „SUPPLY VOLTAGE” і тахометра. Дані звести у таблицю 3.1;

– вимкнути двигун.

Таблиця 3.1 – Результати досліджень

I_{32}	А	1,7	1,5	1,4	1,2	1,0	0,75	0,5
n	об/хв							
ω_0	c^{-1}							
U	В							

c	В·с						
-----	-----	--	--	--	--	--	--

У таблиці 3.1 зробити перерахунок n у ω_0 та визначити коефіцієнт двигуна c з виразу $c = \frac{U}{\omega_0}$. Визначити коефіцієнт двигуна c для номінального

струму збудження I_{32} за паспортними даними двигуна Д-200: номінальна потужність $P_H = 200$ Вт, номінальний струм $I_H = 12$ А, номінальна швидкість обертання $n_H = 2750$ об/хв., опір якоря $R_J = 0,127$ Ом та формулою:

$$c = k\Phi_H = \frac{U_H - I_H R_J}{\omega_H} \quad (3.1)$$

3.3.3. Визначення моменту двигуна від втрат

Запустити двигун М2 і визначити його струм неробочого ходу I_{20} для різних значень струму збудження I_{32} . Для цього:

- перемикач R_2 виставити у положення 10;
- потенціометром R_3 виставити струм збудження $I_{32} = 1,7$ А;
- ввімкнути S_3 та QF2. Двигун має запуститись при максимальному значенні додаткового опору R_2 ;
- перемикач R_2 виставити у положення 0;
- внести в таблицю 3.2 значення I_{32} і I_{20} .

Таблиця 3.2 – Результати досліджень

I_{32}	А	1,7	1,5	1,4	1,2	1,0	0,75	0,5
I_{20}	А							
c	Вс							
ΔM	Н·м							

– змінюючи струм збудження I_{32} за допомогою потенціометра R_3 , зняти покази для інших значень струму збудження I_{32} і внести їх в таблицю 3.2. Величина коефіцієнту двигуна c визначається за таблицею 3.1 для аналогічних значень струму I_{32} / Момент від втрат визначається за формулою:

$$\Delta M = c \cdot I_{20}, \text{ Нм} \quad (3.2)$$

- вимкнути QF2, S_3 та встановити перемикач R_3 у положення 10.

3.3.4. Зняття механічних характеристик ДПС з ПЗ у режимі двигуна

Для зняття характеристик необхідно:

- перемикач S_5 встановити у положення 2;
- ввімкнути тумблер S_1 і QF1, двигун М1 починає обертатись;
- установити перемикачі R_1 у положення 0;
- ввімкнути QF2, вимкнути S_3 , при цьому двигун М2 працює в режимі динамічного гальмування;

– регулюючи струм збудження I_{32} потенціометром R_3 , і якщо цього недостатньо, використати перемикач R_2 , навантажуючи двигун $M1$ до $I_2 = 20$ А і зафіксувати частоту обертання та струм I_2 і внести дані в таблицю 2.3;

– дослід повторити для положень 1, 2 і 3 перемикача R1. При цьому слід пам'ятати, що $R_1 = 0.35N$, де N – номер положення перемикача;

– дані звести у таблицю 2.3, які аналогічні даним таблицю 3.2. Причому, момент ДПС з ПЗ визначається за формулою:

$$M_2 = c \cdot I_2, \quad (3.3)$$

а момент ДПС з НЗ визначається за виразом:

$$M_1 = M_2 - \Delta M \quad (3.4)$$

– вимкнути QF1, встановити перемикач R1 у положення 10.

Таблиця 3.3 – Результати досліджень
для $R_1=0, U=27B$

I_{32}	А							
I_1	А							
I_2	А							
c	Вс							
n	об/хв							
ω	c^{-1}							
M_2	Н·м							
ΔM	Н·м							
M_1	Н·м							

для $R_1=0,35 \text{ Ом } U=27B$

I_{32}	А							
I_1	А							
I_2	А							
c	Вс							
n	об/хв							
ω	c^{-1}							
M_2	Н·м							
ΔM	Н·м							
M_1	Н·м							

для $R_1=0,7 \text{ Ом } U=27B$

I_{32}	А							
I_1	А							
I_2	А							
c	Вс							
n	об/хв							
ω	c^{-1}							
M_2	Н·м							
ΔM	Н·м							
M_1	Н·м							

для $R_1=1,05 \text{ Ом}$ $U=27\text{В}$

I_{32}	А							
I_1	А							
I_2	А							
c	Вс							
n	об/хв							
ω	с^{-1}							
M_2	Н·м							
ΔM	Н·м							
M_1	Н·м							

3.3.5. Зняття механічних характеристик ДПС з ПЗ у режимі гальмування противмиканням

Для зняття характеристик необхідно:

– перемикач R_1 та R_2 поставити у положення 5, S_5 у положення 2, S_2 та S_4 у верхнє положення; увімкнути QF_1 та S_1 і визначити напрямок обертання. Вимкнути QF_1 та S_1 ;

– увімкнути QF_2 та S_3 і переконатися, що привод обертається у протилежному напрямку. Вимкнути QF_2 та S_3 ;

– увімкнути QF_1 , S_1 та QF_2 . При цьому двигун M_1 працює в режимі двигуна, а двигун M_2 – в режимі динамічного гальмування;

– змінюючи струм збудження I_{32} потенціометром R_3 за амперметром PA_3 , від мінімального до максимального значення, зняти для кількох значень I_{32} значення струмів I_1 , I_2 за PA_1 та PA_2 і частоти обертання за індикатором швидкості.

– після досягнення максимального значення струму збудження I_{32} увімкнути S_3 і перевірити, що привод обертається в протилежному напрямку;

– послідовно перемикаючи перемикач R_2 з положення 6 в положення 0, записати відповідні значення струмів I_1 , I_2 за PA_1 та PA_2 і частоти обертання за індикатором швидкості. Струм при цьому утримувати

$$I_{362} = 1,7 \text{ А}.$$

Дані внести у таблицю 3.4.

Таблиця 3.4 – Результати досліджень

для $R_1=1,75 \text{ Ом}$

I_{32}	А							
I_1	А							
I_2	А							
c	Вс							
n	об/хв							
ω	с^{-1}							
M_2	Н·м							

ΔM	Н·м								
M_1	Н·м								

для $R_1 = 2,1$ Ом

I_{32}	А								
I_1	А								
I_2	А								
c	Вс								
n	об/хв								
ω	с ⁻¹								
M_2	Н·м								
ΔM	Н·м								
M_1	Н·м								

для $R_1 = 2,45$ Ом

I_{32}	А								
I_1	А								
I_2	А								
c	Вс								
n	об/хв								
ω	с ⁻¹								
M_2	Н·м								
ΔM	Н·м								
M_1	Н·м								

– повторити дослід для декількох значень додаткового опору R_1 в коло ДПС з ПЗ ($R_1=2,1$ Ом та $R_1=2,45$ Ом). У режимі гальмування противмикання момент M_2 визначають за формулою:

$$M_2 = M_1 + \Delta M.$$

3.3.6. Зняття механічних характеристик ДПС з ПЗ у режимі динамічного гальмування зі самозбудженням

Для зняття характеристик необхідно:

- встановити струм збудження $I_{32}=1,3$ А за амперметром $PA3$;
- поставити перемикач R_1 у положення 0, а R_2 у положення 10;
- перемикачі $S3$ та $S4$ виставити у верхнє положення;
- перемикачі $S1$ та $S2$ виставити у нижнє положення;
- ввімкнути $QF2$;

– увімкнути $QF1$ і спостерігати процес самозбудження двигуна за амперметром $PA1$, який характеризується стрибком струму I_1 при переміщенні перемикача з положення 10 у положення 0. Зняти декілька значень струмів I_1 та I_2 за амперметром $PA1$ та $PA2$ і швидкості обертання за індикатором швидкості. Дані занести у таблицю 3.5.

Таблиця 3.5 – Результати досліджень
для $R_l = 0 \text{ Ом}$

I_{32}	А								
I_1	А								
I_2	А								
c	Вс								
n	об/хв								
ω	c^{-1}								
M_2	Н·м								
ΔM	Н·м								
M_1	Н·м								

для $R_l = 0,35 \text{ Ом}$

I_{32}	А								
I_1	А								
I_2	А								
c	Вс								
n	об/хв								
ω	c^{-1}								
M_2	Н·м								
ΔM	Н·м								
M_1	Н·м								

- повторити дослід для значення додаткового опору $R_l=0,35 \text{ Ом}$.
- вимкнути автоматичний вимикач на лівому боці стенду.

3.4 Вказівки до оформлення звіту

1. За даними таблиці 3.1 побудувати залежність $c = f(I_{362})$.
2. За даними таблиці 3.2 побудувати залежність $\Delta M = f(I_{362})$.
3. Побудувати механічні характеристики ДПС з ПЗ $\omega = f(M_1)$ у режимі двигуна за даними таблиці 2.3 та характеристики при роботі двигуна у гальмівних режимах за даними таблиць 3.4 та 3.5.

3.5 Контрольні запитання

1. Що таке природна та штучні механічні характеристики ДПС з ПЗ?
2. Які Ви можете назвати способи регулювання кутової швидкості обертання ДПС з ПЗ?
3. Назвіть режими роботи ДПС з ПЗ.
4. Що називається діапазоном регулювання швидкості обертання?

5. Назвіть переваги та недоліки регулювання швидкості ДПС з ПЗ.
6. Перелічить переваги та недоліки режимів гальмування ДПС з ПЗ.

Лабораторне заняття №4

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПАРАЛЕЛЬНОГО ЗБУДЖЕННЯ

Мета роботи: ознайомлення з будовою двигуна постійного струму, вивчення правил пуску, зупинки, реверсу і регулювання швидкості обертання; зняття основних характеристик двигуна постійного струму.

4.1 Основні теоретичні положення

Згідно з принципом зворотності, в електричних машинах постійного струму напрям перетворення енергії може бути змінений на протилежний, тобто машина постійного струму може працювати як генератором, так і двигуном. Двигуни постійного струму знаходять широке використання в промислових, транспортних та інших установках, де потрібне широке і плавне регулювання швидкості обертання (прокатні стани, металорізальні верстати, електрична тяга на транспорті).

Розглянемо принцип роботи двигуна постійного струму, схематичне зображення якого наведено на рисунку 4.1. Згідно закону Ампера, на відрізок l контуру з постійним струмом I , що знаходиться в зовнішньому стаціонарному магнітному полі в немагнітному середовищі, діє електромагнітна сила

$$F_{np} = B l I, \quad (4.1)$$

де B – вектор магнітної індукції; l – відрізок провідника з струмом, який знаходиться в магнітному полі; I – струм в провіднику. Ця сила утворює обертний механічний момент M_{EM} , який називається електромагнітним моментом

$$M_{EM} = F_{np} D_{я} = B l I D_{я}, \quad (4.2)$$

де $D_{я}$ – діаметр якоря. В подальшому індекс EM будемо опускати.

Якщо до обмоток якоря машини підвести постійний струм від зовнішнього джерела, то машина буде працювати в режимі двигуна, перетворюючи електричну енергію в механічну. При цьому на провідники обмотки якоря будуть діяти електромагнітні сили F_{np} і виникне електромагнітний момент M . Величини F_{np} і M визначаються згідно рівнянь (4.1) і (4.2).

При достатній величині M якір машини почне обертатись і буде розвивати електромагнітну потужність. Момент M при цьому є рушійним і діє у напрямку обертання.

Провідники обмоток якоря двигуна обертаються в магнітному полі і тому в обмотці якоря двигуна індукується ЕРС E

$$E = C_E \Phi n, \quad (4.3)$$

де C_E – конструктивна постійна машини, що залежить від типу обмотки якоря і числа пар полюсів, Φ – магнітний потік пари полюсів машини, n – швидкість обертання якоря.

Напрямок цієї ЕРС в двигуні такий самий, як і в генераторі. Таким чином в двигуні ЕРС якоря E направлена проти струму I_a і прикладеної до затискачів якоря напруги U . Тому ЕРС якоря двигуна називається також протиелектрорушійною силою. Прикладена до якоря двигуна напруга зрівноважується ЕРС E і спадом напруги в обмотці якоря

$$U = E + I_a \cdot R_a; \quad I_a = \frac{U - E}{R_a}, \quad (4.4)$$

де R_a – опір обмотки якоря двигуна.

Отже, для двигуна постійного струму

$$U > E. \quad (4.5)$$

Наприклад дії механічних і електричних величин в якорі двигуна постійного струму показані на рисунку 4.2.

Згідно першого закону Ньютона при використанні до обертового руху, діючи на обертове тіло рушійний і гальмівний моменти зрівноважують один одного. Тому в двигуні при усталеному режимі роботи електромагнітний момент визначається за формулою

$$M = C_M \Phi I_a = M_{ТВ} + M_{ТР} + M_C, \quad (4.6)$$

де $M_{ТВ}$ – гальмівний момент двигуна, який розвивається машиною, що працює (станок, насос тощо); $M_{ТР}$ – момент сили тертя в підшипниках, об повітря і на колекторі електричної машини; M_C – гальмівний момент, що викликаний втратами на генезис і вихрові струми в сердечнику якоря;

$C_M = \frac{60 C_M}{2\pi}$ – величина, що постійна для даної машини.

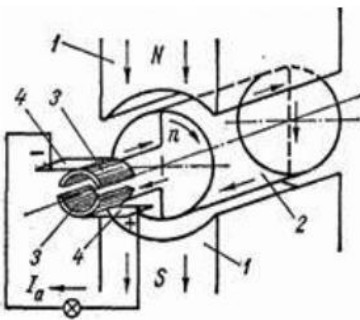


Рисунок 4.1 – Найпростіший двигун постійного струму

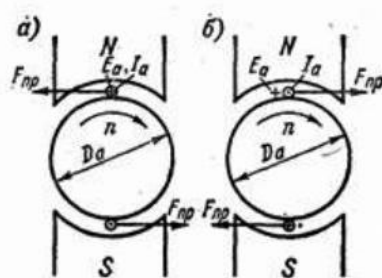


Рисунок 4.2 – Напрямок ЕРС, струму і моментів в двигуні постійного струму

Потужність P , що розвивається електромагнітним моментом M називається електромагнітною потужністю

$$P = M \omega = E \cdot I_{я}, \quad (4.7)$$

де $\omega = \frac{\pi n}{30}$ – кутова швидкість обертання.

З рівняння (4.4) отримаємо

$$U \cdot I_{я} = E \cdot I_{я} + I_{я}^2 \cdot R_{я}. \quad (4.8)$$

Це рівняння балансу потужностей двигуна постійного струму. Електрична потужність на затискачах якоря дорівнює сумі електромагнітної потужності якоря і електричних втрат в якорі. Ці співвідношення є вираженням закону збереження енергії і відтворюють процес перетворення енергії в машині постійного струму.

Виразивши потужність P у ватах, а кутову швидкість обертання ω через число обертів за хвилину n , з виразу (4.7) отримаємо

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{\frac{\pi n}{30}} = \frac{30}{3,14} \cdot \frac{P}{n} = 9,55 \frac{P}{n} \quad [H \cdot m]. \quad (4.9)$$

Зупинимося на механічних характеристиках двигуна постійного струму.

З рівняння (4.3) і (4.4) знаходимо рівняння швидкісної характеристики $n = f(I)$ двигуна

$$n = \frac{U - I_{я} \cdot R_{я}}{C_E \Phi}. \quad (4.10)$$

Визначивши з (4.6) значення струму I та підставивши його в (4.10) отримаємо рівняння механічної характеристики $n = f(M)$ двигуна

$$n = \frac{U}{C_E \Phi} - \frac{M \cdot R_{я}}{C_E C_M \Phi^2}, \quad (4.11)$$

яке визначає залежність швидкості обертання двигуна від моменту обертання.

Вигляд механічної характеристики $n = f(M)$ чи $M = f(n)$ при $U = const$ залежить від того, як при навантаженні змінюється потік машини Φ , а також від способу збудження двигуна. Це справедливо і для швидкісних характеристик.

Розглянемо схеми ввімкнення двигунів постійного струму, що наведені на рисунку 4.3. Існують схеми ввімкнення двигунів незалежного (а), паралельного (б), послідовного (в) і змішаного (г) збудження.

Обмотка збудження ОЗ двигуна незалежного збудження (рис. 4.3, а) живиться постійним струмом від стороннього джерела живлення (акумулятор, випрямляч). Обмотки збудження ОЗ двигунів паралельного, послідовного і змішаного збудження, відповідно рисунку 4.3, б, в, г, живляться від тієї ж мережі постійного струму, що і обмотки якоря цих

двигунів. У всіх двигунах постійного струму, струм збудження складає (1-5) % від струму якоря $I_{ян}$.

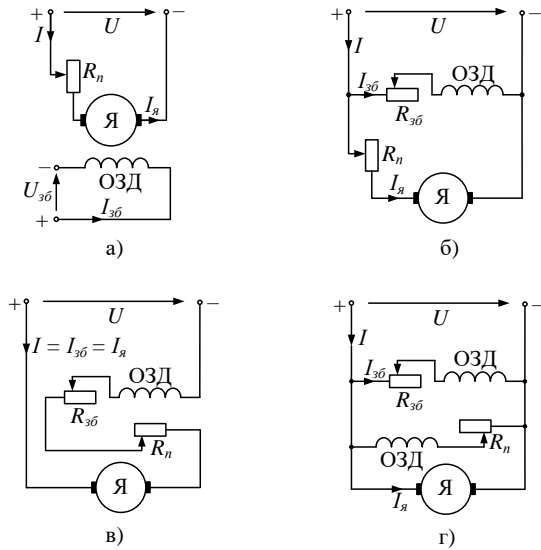


Рисунок 4.3– Схеми ввімкнення двигунів незалежного (а), паралельного (б), послідовного (в) і змішаного (г) збудження

При пуску двигуна необхідно: забезпечити певну величину пускового моменту і умови для досягнення необхідної швидкості обертання, не допустити виникнення надмірного пускового струму небезпечного для двигуна.

Можливі три способи пуску двигуна: 1) прямий пуск, коли обмотка якоря підключається безпосередньо до мережі на повну напругу; 2) пуск за допомогою пускового реостата або пускових опорів, що включаються послідовно в коло якоря; 3) пуск при понижений напрузі кола якоря. Прямий пуск від мережі двигунів постійного струму при номінальній напрузі $U = U_{ном}$ недопустимий внаслідок великого пускового струму.

Як слідує з (4.3) і (4.4) при пуску $n = 0$, а також $E = 0$ і тоді пусковий струм $I_{ян}$ визначаємо з (4.4)

$$I_{ян} = \frac{U}{R_я}. \quad (4.12)$$

У звичайних машинах $R_я = (0,02 - 0,1)$ Ом, і тому при прямому пуску з напругою $U = U_{ном}$ струм якоря недопустимо великий

$$I_я = (50 \div 10) I_{яном}.$$

Внаслідок цього прямий пуск застосовується тільки для двигунів потужністю до декількох сотень ват, в яких $R_{я}$ відносно великий і тому при пуску $I_{я} \leq (4 \div 6) I_{яном}$, а процес пуску триває не більше 1-2 с.

Найбільш поширеним є пуск за допомогою пускового реостата або пускових опорів, що ввімкнені послідовно з обмоткою якоря (рис. 4.4). Пусковий струм при цьому дорівнює

$$I_{ян} = \frac{U - E}{R_{я} + R_{п}}. \quad (4.13)$$

де $R_{п}$ – опір пускового реостата.

Для забезпечення достатнього пускового моменту перед пуском необхідно утворити потік збудження Φ , а отже підключити обмотку збудження до мережі, замкнувши накоротко реостат збудження $R_{зб}$. З іншої сторони при пуску при $n = 0$ маємо $F = 0$, а отже струм якоря $I_{я}$ обмежується тільки величиною пускового опору $R_{п}$, оскільки опір якоря $R_{я}$ малий. Величина $R_{п}$ вибирається так, щоб в початковий момент пуску було $I_{ян} = (1,4 \div 1,7) I_{яном}$.

Розглянемо детальніше пуск двигуна паралельного збудження за допомогою пускового реостата $R_{п}$ (рис. 4.4, а).

Перед пуском ($t = 0$) рухомий контакт пускового реостата стоїть на неробочому контакті «стоп» і коло якоря розімкнуте. Регульований реостат $R_{зб}$ колі обмотки збудження ОЗ замкнутий накоротко ($R_{зб} = 0$). В початковий момент пуску $t = 0$ двигун підключаємо на напругу. В обмотці збудження ОЗ буде протікати струм $I_{зб}$ утворюючи потік збудження Φ . Перша умова для утворення моменту M виконана.

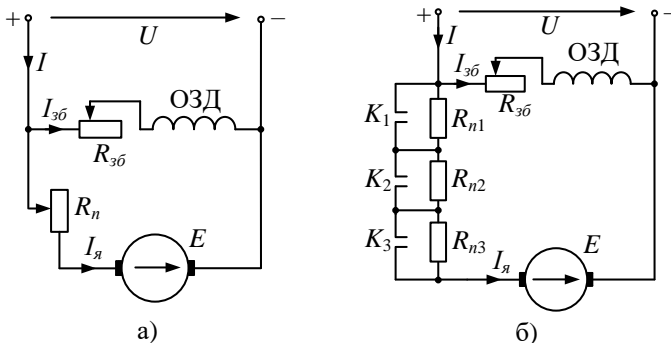


Рисунок 4.4 – Схема двигуна паралельного збудження за допомогою пускового реостата (а) і пускових опорів (б)

При переміщенні рухомого контакту пускового реостата з положення, здійснюється поступове зменшення величини пускового опору,

струм I_a в якірному колі двигуна зростає. Виконана друга умова для утворення пускового моменту. Обертовий момент двигуна стає більшим нуля ($M > 0$). Двигун починає обертатись, зростає його швидкість ($n > 0$). В якорі двигуна індукуються ЕРС E , напрямлена проти напруги мережі.

По мірі розгону двигуна індуквана в обмотці в обмотці якоря проти ЕРС E зростає, що призводить до зменшення струму якоря і зменшення обертового моменту M , що розвивається двигуном. Для підтримки обертового моменту на певному рівні пусковий реостат поступово виводиться з кола якоря. При досягненні двигуном номінальної швидкості пусковий реостат повністю вимикається.

В автоматизованих установках замість пускового реостата використовують пускові опори R_{n1} , R_{n2} , R_{n3} (рис. 4.4, б), які по чергово шунтуються контактами K_1 , K_2 , K_3 автоматично працюючих контакторів.

Зупинка двигуна проводиться його відключенням від мережі.

Ні в якому разі не можна допускати розриву кола паралельного збудження. З рівняння (4.10) видно, що при різкому зменшенні потоку збудження ($\Phi \rightarrow 0$) швидкість обертання різко зростає. Виникає так званий «рознос». Одночасно зменшується ЕРС ($E \rightarrow 0$), а струм якоря зростає, тому в колах збудження не встановлюють запобіжники і вимикачі.

Пуск двигунів послідовного і змішаного збудження здійснюється аналогічно.

Для зміни напрямку обертання (реверсування) двигуна необхідно змінити напрям струму в якорі (разом з додатковими полюсами і компенсаційною обмоткою) або в обмотці (обмотках) збудження.

Регулювання швидкості обертання двигунів постійного струму можливо трьома способами.

1. Найбільш зручним і розповсюдженим є спосіб регулювання швидкості шляхом зміни потоку Φ , тобто струму збудження $I_{зб}$.

Зі зменшенням потоку Φ згідно рівнянь (4.10) і (4.11) швидкість n зростає. Оскільки двигуни розраховуються для роботи при номінальному режимі з найбільшим значенням потоку збудження Φ , тобто з найменшою величиною швидкості обертання n , то практично можна тільки зменшувати потік збудження Φ .

Даний спосіб дозволяє регулювати швидкість n вище від номінального значення. При такому регулюванні коефіцієнт корисної дії (ККД) двигуна залишається високим, так як потужність, що затрачується на збудження мала – при зменшенні струму потужність збудження $UI_{зб}$ зменшується.

Верхня межа регулюванні швидкості обертання лімітується механічною міцністю машини і умовами її комутації.

2. Другий спосіб регулювання швидкості заключається в ввімкненні послідовного в коло якоря реостата чи регульованого опору $R_{рв}$. Замість виразу (4.10) в цьому випадку маємо

$$n = \frac{U - I_{\text{я}} \cdot (R_{\text{я}} + R_{\text{р\у}})}{C_E \Phi} \quad (4.14)$$

Цей спосіб дає можливість регулювати швидкість вниз від номінального значення і пов'язаний зі значними втратами потужності в опорі і зниженні ККД. Через це даний спосіб застосовується в основному для двигунів невеликої потужності, а для більш потужних двигунів використовується рідко і тільки короткочасно.

3. Регулювання швидкості здійснюється також шляхом регулювання напруги кола якоря. Так як робота двигуна при напрузі в мережі $U > U_{\text{ном}}$ недопустима, то даний спосіб, згідно виразів (4.10) і (4.11) дає можливість регулювати швидкість також вниз від номінального, значення ККД двигуна при цьому залишається високим, так як ніяких додаткових джерел втрат в схему двигуна не вноситься. Але в цьому випадку необхідне окреме джерело струму з регульованою напругою, що збільшує вартість установки.

Швидкісна характеристика двигуна в режимі неробочого ходу є залежністю $n = f(I_{\text{зб}})$ при $U = U_{\text{ном}} = \text{const}$, $M = 0$.

Зовнішня чи механічна характеристика двигуна є залежністю $n = f(I_{\text{я}})$ при $U = U_{\text{ном}} = \text{const}$, $I_{\text{зб}} = \text{const}$. Згідно (4.6) магнітний потік Φ прямо пропорційний струмові якоря $I_{\text{я}}$ при $I_{\text{зб}} = \text{const}$, а тому $n = f(M)$ при $U = U_{\text{ном}} = \text{const}$, $I_{\text{зб}} = \text{const}$. Характер цієї залежності визначається впливом реакції якоря на магнітне поле двигуна. Відомо, що реакція якоря викликає зменшення і перерозподіл магнітного потоку Φ при збільшенні струму якоря $I_{\text{я}}$. На рисунках 4.5, 4.6 показані швидкісну та моментну характеристики.

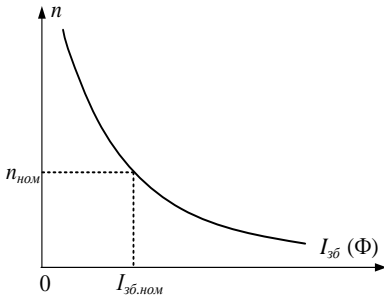


Рисунок 4.5 – Швидкісна характеристика

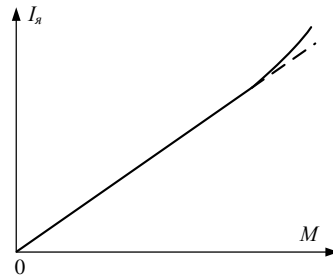


Рисунок 4.6 – Моментна характеристика

При відсутності в двигуні розмагнічуючої реакції якоря (компенсація реакції якоря), збільшення струму якоря $I_{\text{я}}$ призводить до зменшення швидкості обертання двигуна n (крива 1 на рисунку 4.7) чи при значній реакції якоря може навіть зрости (крива 3 на рисунку 4.7).

Регульовальна характеристика двигуна постійного струму паралельного збудження є залежністю $I_{\text{зб}} = f(I_{\text{я}})$ при $U = U_{\text{ном}} = \text{const}$, $n = n_{\text{ном}} = \text{const}$.

Вигляд регулювальної характеристики залежить від характеру зовнішньої характеристики, тобто залежить від інтенсивності реакції якоря в двигуні. Типові регулювальні характеристики наведені на рисунку 4.8 і відповідають кривим зовнішньої характеристики з тими ж номерами. Постійність швидкості обертання двигуна при знятті регулювальної характеристики підтримується зміною величини опору в колі збудження двигуна $R_{зб}$.

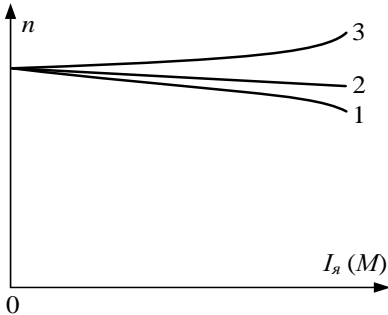


Рисунок 4.7 – Зовнішня (механічна) характеристика двигуна

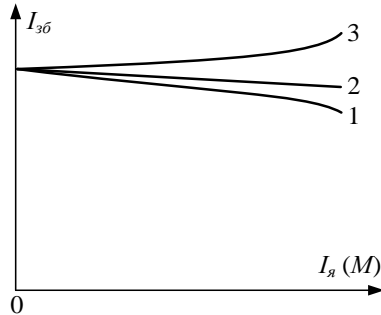


Рисунок 4.8 – Регулювальна характеристика двигуна

4.2 Опис лабораторної установки

Лабораторна установка (рис. 4.9) для експериментальних досліджень двигуна постійного струму паралельного збудження складається з двох машин постійного струму з'єднаних муфтою. Одна машина використовується в якості досліджуваного двигуна, в якорному колі якого є пусковий реостат R_n , а в колі обмотки збудження – регулювальний реостат $R_{зб}$. Встановлені також відповідні вимірювальні прилади. Швидкість обертання вала двигуна вимірюється тахометром. Друга машина служить навантажувальним генератором, який виконує роль механічного навантаження для двигуна.

В якості навантаження генератора служить опір R_n . Потужність генератора визначається за показами приладів, що ввімкнені в коло навантаження.

4.3 Зміст і порядок виконання роботи

1. Вивчити будову двигуна постійного струму паралельного збудження за плакатами і за розбірним зразком. Звернути увагу на будову станини, головних магнітних полюсів, додаткових полюсів, щіткотримачів з щітками, якоря з колектором, клемної панелі. З'ясувати призначення кожної деталі.

2. Ознайомитися з вимірювальними приладами і обладнанням досліджуваної установки, записати їх технічні дані в звіт про роботу.

3. Вивчити способи пуску, регулювання швидкості обертання і зупинки двигуна постійного струму з паралельним збудженням.
4. Скласти схему експериментальної установки згідно рисунку 4.9.
5. Дотримуючись всіх мір безпеки провести пуск, зупинку і реверс двигуна постійного струму.
6. Зняти швидкісну характеристику двигуна в режимі неробочого ходу $n = f(I_{зб})$ при $U = U_{ном} = const, I_{зб} = const$. Результати вимірювань занести в таблицю 4.1.

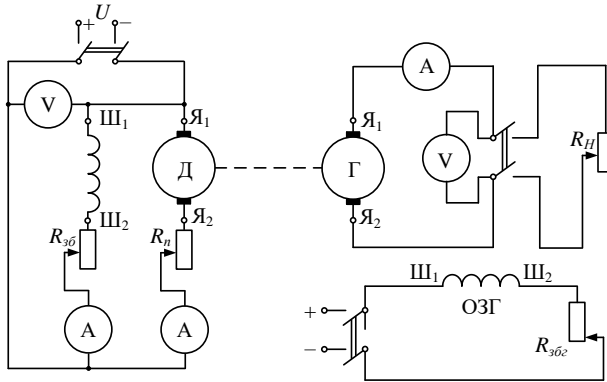


Рисунок 4.9 – Схема експериментальної установки для зняття робочих характеристик двигуна постійного струму паралельного збудження

Таблиця 4.1 – Швидкісна характеристика двигуна

$I_{зб}$	A								
n	об/хв								

7. Зняти зовнішню (механічну) характеристику $n = f(I_{я})$ при $U = U_{ном} = const, I_{зб} = const$. Результати вимірювань занести в таблицю 4.2.

Таблиця 4.2 – Зовнішня характеристика двигуна

$I_{я}$	A								
n	об/хв								

8. Зняти регульовальну характеристику $I_{зб} = f(I_{я})$ при $U = U_{ном} = const, n = n_{ном} = const$. Результати вимірювань занести в таблицю 4.3.

Таблиця 4.3 – Регульовальна характеристика двигуна

$I_{я}$	A								
$I_{зб}$	A								

4.4 Аналіз і обробка результатів експерименту

1. За даними таблиць 4.1, 4.2, 4.3 побудувати швидкісну, зовнішню (механічну) і регульовальну характеристику двигуна постійного струму з паралельним збудженням.

2. На основі знятих характеристик зробити висновки про інтенсивність реакції якоря двигуна.

3. Вказати: які існують способи пуску двигуна постійного струму паралельного збудження, їх переваги і недоліки; які існують способи регулювання швидкості обертання якоря двигуна і які з них є найбільш економічними: які переваги і недоліки двигуна постійного струму порівнюючи з іншими типами двигунів.

4.5 Контрольні запитання

1. Пояснити принцип дії і будову двигуна постійного струму.
2. Способи збудження двигунів постійного струму.
3. Як здійснюється пуск, реверс і зупинка двигуна постійного струму паралельного збудження?
4. Що таке рознос двигуна постійного струму і чи це небезпечно?
5. Як знімати основні характеристики двигуна?
6. Поясніть характер основних характеристик двигуна.
7. Який вплив чинить реакція якоря на характеристики двигуна?
8. Як найбільш економічно регулювати швидкість обертання якоря двигуна?
9. Що називається номінальною потужністю двигуна?
10. Для чого потрібні двигуну пусковий реостат і з яких міркувань вибирають його величину?
11. Яке призначення головних і додаткових полюсів в двигуні?
12. В якому положенні повинна бути ручка реостата, що регулює струм збудження при пуску двигуна паралельного збудження?
13. Як можна змінити напрям обертання якоря двигуна постійного струму?

Лабораторне заняття №5 МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Мета роботи: ознайомись з методикою моделювання та побудовою електромеханічних характеристик електроприводу постійного струму в середовищі MATLAB.

5.1 Теоретичні відомості

Модель машини постійного струму (двигуна) знаходиться в бібліотеці SimPowerSystems в розділі Machines. Зображення двигуна постійного струму представлено рисунку 5.1, а модель у Simulink файл Fig1_1.

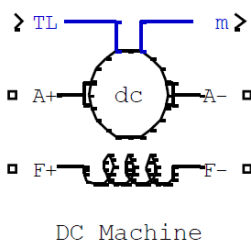


Рисунок 5.1 – Умовне зображення двигуна постійного струму SimPowerSystems (Fig1_1)

Виводи F+ і F- служать для підключення напруги збудження для створення магнітного потоку в машині. Виводи A+ та A- використовуються для підключення обмотки якоря на силове джерело живлення.

Активне навантаження двигуна вводиться через віртуальний вхід TL.

Вихідні параметри двигуна: частота обертання ω , струм обмотки якоря I_a , струм збудження I_f та електромагнітний момент T_e формуються на мультиплексорній шині m. Щоб отримати доступ до вихідних параметрів, необхідно використовувати демультимплексор на чотири виходи та з'єднати його вхід з точкою m. Тоді на першому (верхньому) виході діє частота

обертання, другому – струм обмотки якоря, третьому – струм збудження і на четвертому – електромагнітний момент двигуна.

Введення параметрів двигуна здійснюється через діалогове вікно (графічний інтерфейс), яке відкривається подвійним клацанням по зображенню двигуна у схемі моделі на Fig1_1 (рис. 5.2). У Simulink є невелика бібліотека двигунів постійного струму у вигляді 23 варіантів. На рисунку 5.2 внесені дані двигуна за 20-м варіантом:

– R_a – активний опір кола якоря, що включає опір обмотки якоря, опір щіточно-колекторного вузла та активний опір обмотки додаткових полюсів. Величина сумарного опору якірного кола, якщо немає даних, наближено визначається за формулою

$$R_a = 0,5U(1 - \eta_n) / I.$$

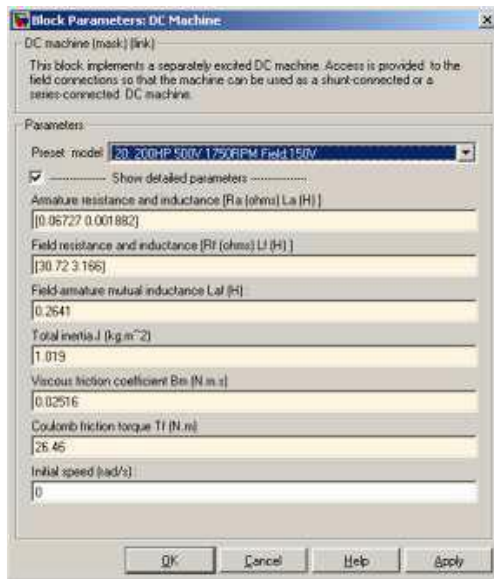


Рисунок 5.2 – Діалогове вікно введення параметрів двигуна

– L_a – індуктивність розсіювання кола обмотки якоря, включаючи індуктивність розсіювання обмотки якоря і індуктивний опір обмотки додаткових полюсів. Якщо немає даних, індуктивність розсіювання якірного кола двигуна може бути обчислена за наближеною формулою

$$L_a = \gamma U_{ном} / p \omega_n I_n,$$

де U_n – номінальна напруга обмотки якоря двигуна, I_n – номінальний струм обмотки якоря, ω_n – номінальна частота обертання якоря, p – число пар

полосів двигуна, γ – коефіцієнт, $\gamma = 0,6$ – для некомпенсованих машин, $\gamma = 0,25$ – для компенсованих машин;

– R_f – активний опір обмотки збудження двигуна;

– L_f – індуктивність обмотки збудження. Її можна визначити за кривою намагнічування ланцюга збудження при извесном значенні числа витків

котушки полюса в W як:
$$L_f = 2pW^2 \frac{\Delta\Phi}{(\Delta IW)}$$
;

– L_{af} – взаємна індуктивність обмоток збудження та обмотки якоря двигуна. Визначається взаємна індуктивність по номінальних параметрах

двигуна, як
$$L_{af} = \frac{(U_n - I_{an} R_n) R_f}{\omega_n U_{fn}}$$
;

Реактивний момент опору, що визначається як $T_m = B_m \cdot \omega$.

Тут B_m – коефіцієнт.

T_f – реактивний момент опору. Однак, цей параметр, що вводиться через діалогове вікно (див. рис. 5.2), моделлю не сприймається у зв'язку з принциповою помилкою моделювання реактивного моменту опору.

Слід зазначити, що редагування параметрів, що вводяться (із-за зміни числових значень) можливе лише тоді, коли в рядку Preset model (рис. 5.2) буде обрано процедуру No.

Розглянемо структуру моделі двигуна, відкривши файл Fig1_1 та динамічне меню правою кнопкою миші (рис. 5.3), орієнтуючи курсор на зображенні двигуна. Вибираємо команду Lock Under Mask та розкриваємо структуру моделі двигуна (рис. 5.4). Структура включає датчик струму обмотки якоря i_A та датчик струму обмотки збудження i_F . Елементи i_A , i_F , R_a , L_a , FCEM (кероване джерело напруги), R_f , L_f входять до складу бібліотеки SimPowerSystems.

Всі інші блоки структури (рис. 5.4) реалізовані на елементах, що входять до бібліотеки Simulink. Розкриємо блок Mechanics подвійним клацанням миші (рис. 5.5). Блок Mechanics виконує моделювання моменту та швидкості.

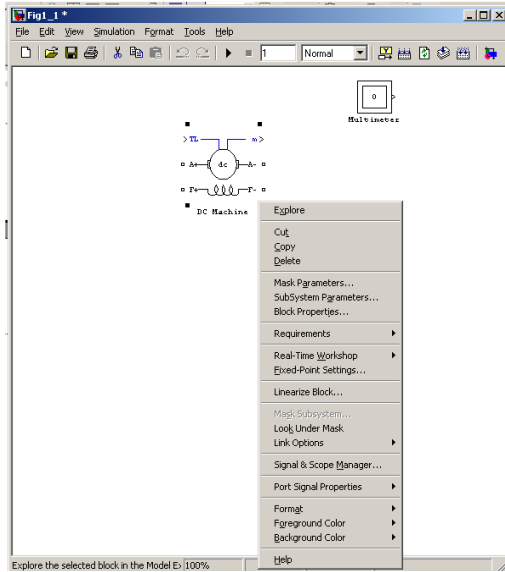


Рисунок 5.3 – Динамічне меню

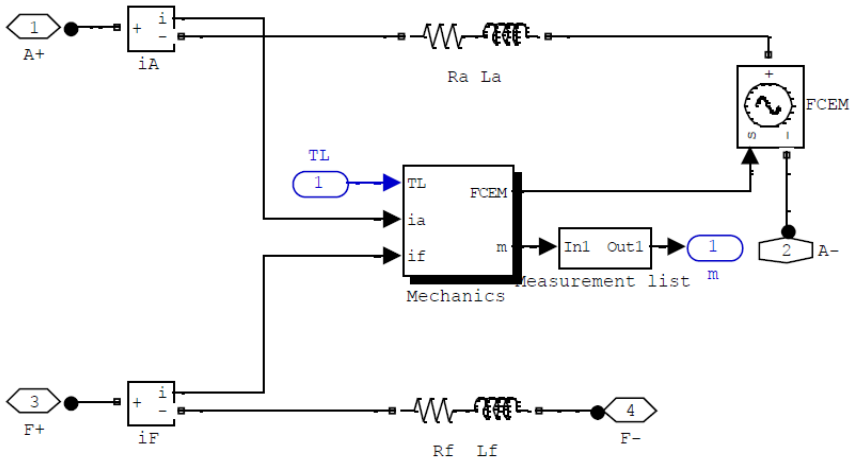


Рисунок 5.4 – Структура моделі двигуна постійного струму

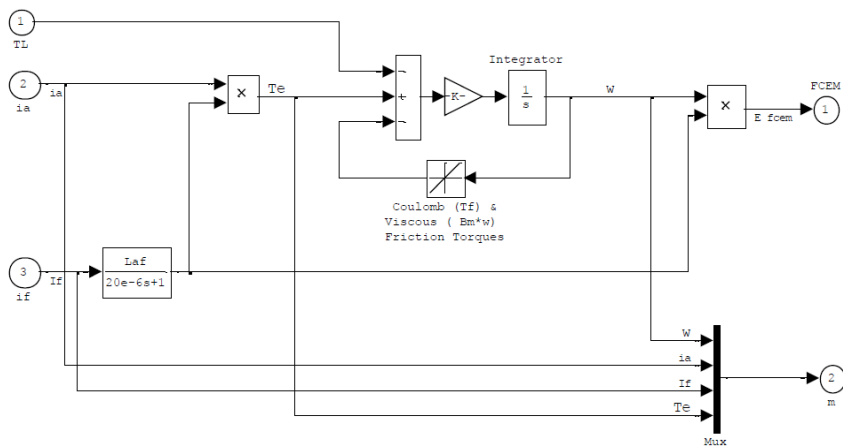


Рисунок 5.5 – Структура блоку Mechanics

Блок із передавальною функцією $W(s) = \frac{L_{af}}{20e - 6s + 1}$ реалізує постійну по ЕРС $K_E = L_{af} \cdot I_f$. При введенні параметрів двигуна вказаних у діалоговому вікні розмірностях (рис. 5.2) постійні за ЕРС і моменту однакові: $K_E = K_T$. Тому перший блок множення формує електромагнітний момент двигуна $T_E = L_{af} \cdot I_f \cdot I_a = K_T \cdot I_a$, а другий блок множення – протиЕРС двигуна $E = L_{af} \cdot I_f \cdot \omega = K_E \cdot \omega$.

Частота обертання отримується шляхом інтегрування рівняння руху електроприводу

$$T_E - T_L - T_f - B_m \omega = J \frac{d\omega}{dt},$$

де J – момент інерції двигуна, кг·м².

Розкриємо блок Coulomb (T_f) і представимо на рисунку 5.6.

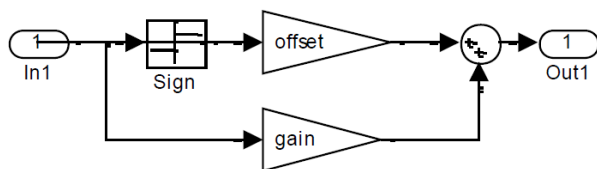


Рисунок 5.6 – Схема моделі реактивного моменту

Блоки Sign і offset призначені моделювати реактивний момент опору. Однак це рішення не передбачає при нульовому значенні частоти обертання

заборону наростання частоти обертання при моменті двигуна меншому, ніж реактивний момент опору, що задається параметром offset.

Тому при використанні бібліотечної моделі двигуна рекомендується ці блоки видалити. Підсилювальний блок із параметром $gain = V_m$ моделює процес формування моменту опору за виразом $T_m = B_m \cdot \omega$.

Блок мультиплексора Mux поєднує вихідні змінні двигуна: частоту обертання ω , струм обмотки якоря (двигуна) I_a , струм обмотки збудження I_f та електромагнітний момент двигуна в одну шину m. Це зроблено для спрощення віртуального зображення двигуна в SimPowerSystems.

Наприклад розглянемо модель пуску двигуна. Обмеження пускового струму досягається введенням резистора в коло обмотки якоря. Схема моделі показано на рисунку 5.7. Джерела живлення обмотки збудження та обмотки якоря обрані керованими, щоб можна було за допомогою блоку Step реверсувати або змінювати величину постійної напруги.

На виходах демультимплексора діють сигнали частоти обертання, струму двигуна, струму обмотки збудження та електромагнітного моменту. Прилад Scope фіксує зміну поданих на його входи сигналів у часі та буде діаграми (осцилограми). Multimeter не використовується, але ввести його рекомендує програма Simulink, інакше моделювання заборонено. Введені параметри двигуна показані на рисунку 5.8.

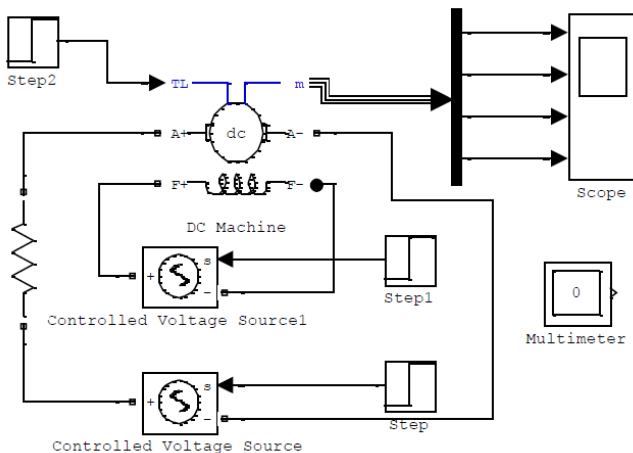


Рисунок 5.7 – Модель пуску та реверсу двигуна постійного струму (Fig1_7)

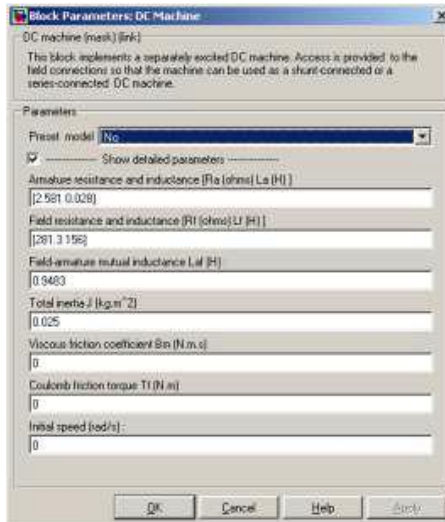


Рисунок 5.8 – Параметри двигуна в файлі Fig1_7

Відкриємо файл Fig1_7, який знаходиться у папці «Посібник». Нарисунку 5.9 показаний робочий стіл Simulink з відкритим файлом. Час моделювання вибрано 2 с. Час моделювання вводиться у вікно, поруч з яким знаходяться кнопки «Стоп» та «Пуск» моделювання.

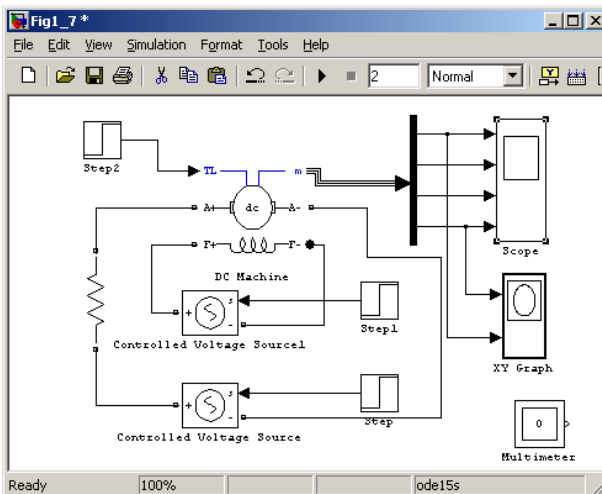


Рисунок 5.9 – Робочий стіл Simulink

Параметри системи, що забезпечують процес моделювання задаються у діалоговому вікні при виборі в головному меню процедури Simulation та команди Configuration Parameters (рис. 5.10).



Рисунок 5.10 – Параметри системи моделювання

Рекомендується розпочати дослідження з використанням чисельного методу ode 15s. Інші параметри за замовчуванням. Прилад Scope дозволяє одночасно спостерігати зміну частоти обертання, струму, струму збудження та моменту двигуна.

Прилад XY Graph формує статичну механічну характеристику двигуна за динамічними характеристикам частоти обертання та моменту. Блок Step задає напругу на обмотці якоря двигуна: +240 В у часі 0...1с і -240В від 1 до 2-х с. Блок Step 1 задає напругу на обмотці збудження 300 В. Зауважимо, що тут можливі два результати. Якщо для джерела обмотки збудження встановлено напругу (див. рис. 5.11), то налаштування блоку Step 1 не сприймаються і струм збудження при нульовому часі діє до усталеного значення.

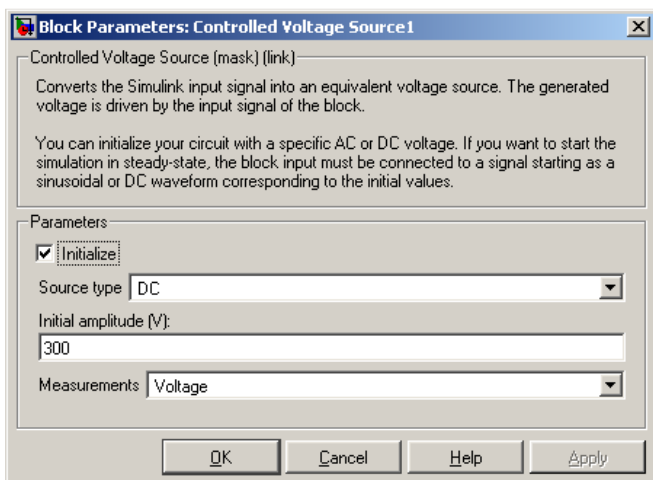


Рисунок 5.11 – Налаштування джерела обмотки збудження

Якщо прапорець у вікні Initialize прибраний, то початкове значення струму збудження є нульовим і після перебігу перехідного процесу встановлюється струм, зумовлений напругою, заданою в блоці Step 1. Блок Step 2 задає активний момент навантаження T_L , що дорівнює, наприклад, 5 Нм.

Змодельовано процеси пуску – реверс при заданому початковому значенні струму збудження.

Запускаємо процес моделювання натисканням кнопки у вигляді зарисованого трикутника, після чого подвійним клацанням відкривається лицьова панель осцилографа Scope (рис. 5.12).

Для того, щоб забезпечити доступ до редагування отриманої діаграми, необхідно після моделювання виконати у командному вікні Matlab команди:

```
set(0, 'ShowHiddenHandles', 'On')
set(gcf, 'menubar', 'figure').
```

На верхній частині діаграми з'являється головне меню і можливість редагування (див. рис. 5.12). Вибирається в меню View команда Property Editor і встановлюються необхідні властивості діаграми: буквене позначення, колір фону, колір і товщина ліній осцилограм.

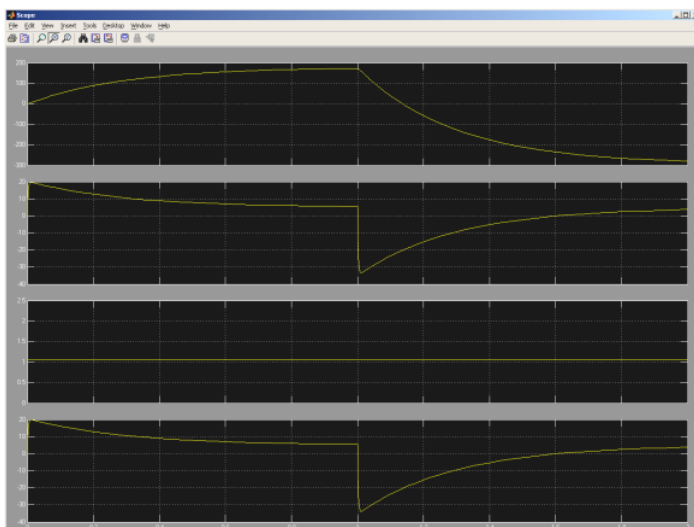


Рисунок 5.12 – Результати моделювання

Після редагування необхідно вийти із команди Property Editor. Для оцифрування потрібних точок осцилограм у меню Tools вибрати команду Data Cursor. На курсорі з'являється хрестик, за допомогою якого призначається координата точки, що обробляється. Але раніше необхідно дозволити довільний вибір необхідної координати. Подвійним клацанням правої кнопки миші відкривається динамічне меню, якому вибирається команда Selection Style і призначається вибір позиції мишею (Mouse Position). Після оцифрування вибраної точки, потрібно дозволити обробку наступної точки, викликавши динамічне меню та вибравши команду Create Now Datatip. Після закінчення процесу оцифрування закрити команду Data Cursor.

Насамперед зазначимо, що струм збудження на початку моделювання відповідає усталеному значенню. У реальних приводах постійного струму порядок включення такий, що спочатку подається напруга на обмотку збудження, а потім запускається двигун у роботу. Пуск двигуна здійснюється через струмообмежуючий резистор. Пусковий струм досягає значення 19,4 А і знижується по мірі розгону двигуна до значення 5,457 А (слід мати на увазі, що теоретичний процес пуску ще не закінчився). Частота обертання досягла величини 171,4 1/с.

У момент часу, що відповідає одній секунді, виконано реверс шляхом зміни полярності напруги на обмотці якоря. Струм двигуна змінює знак на протилежний і досягає значення $-33,29$ А. Починається процес інтенсивного зменшення частоти обертання (гальмування) двигуна. Двигун розганяється до частоти обертання $-278,4$ 1/с, а струм досягає величини $+3,545$ А. Це свідчить про те, що момент навантаження T_L , що діє на двигун, має активний характер і переводить двигун у режим генераторного гальмування. Від'ємна частота

обертання двигуна значно перевищує абсолютне значення додатної частоти обертання. Одночасно із закінченням моделювання з'являється лицева панель плотера XY Graph. Після виконання у командному вікні зазначених раніше команд з'являється головне меню плотера та відкривається доступ до редагування отриманої діаграми.

Вибирається в меню View команда Property Editor і встановлюються необхідні властивості діаграми: написи, колір фону, колір і товщина лінії осцилограми. Але спочатку слід встановити масштаби по осях. Найбільш доцільно виконати встановлення масштабів за осям X та Y автоматично. Для цього на закладці X Axis вікна Property Editor (рис. 5.13) поставити прапорець на рядку X Limit Auto, на закладці Y Axis – прапор на рядку Y Limit Auto. Статичні характеристики приймають вигляд, показаний на рисунку 5.13.

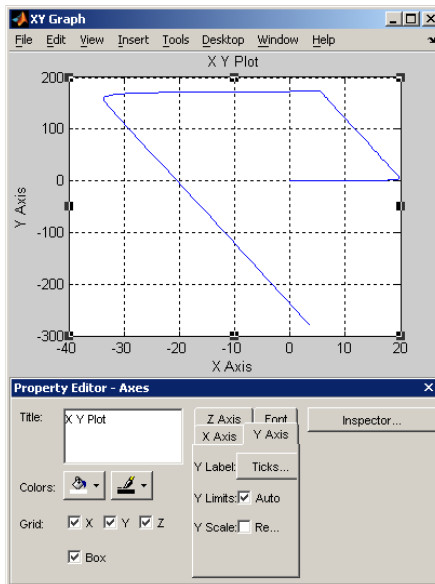


Рисунок 5.13 – Статичні характеристики двигуна постійного струму в різних режимах роботи

Після редагування діаграми засобами Property Editor та внесення доповнення у вигляді номерів точок за допомогою програми Microsoft Visio 11 діаграма набуває вигляду, представленого на рисунку 5.14. Характерні точки оцифровані. Розглянемо окремі ділянки отриманої діаграми.

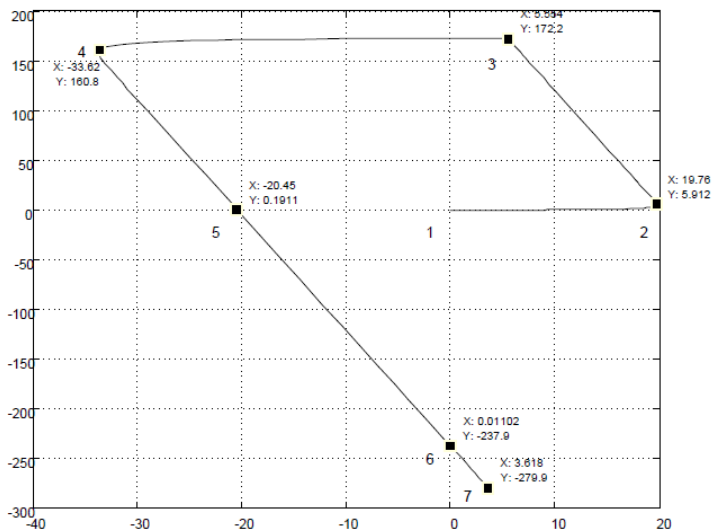


Рисунок 5.14 – Відредагована діаграма статичних показників

Ділянка 1, 2 відповідає процесу наростання моменту до значення 19,76 Нм, причому частота обертання змінилася до 5,912 1/с. Ділянка 2, 3 відповідає статичній механічній характеристиці двигунного режиму на умовний напрямок руху «вперед». Двигун досяг частоти обертання 172,2 1/с при моменті 5,56 Нм. Характеристика лінійна, нахил визначається сумарним опором колага обмотки якоря. Ділянка 3, 4 відповідає переходу двигуна на роботу у режим гальмування. Двигун ввімкнений «назад», але за інерцією обертається ще «вперед». Ділянка механічної характеристики 4, 5 закінчується при нульовій частоті обертання (т. 5) і є продовженням (ділянка 5, 6) механічної характеристики для двигунного режиму під час роботи «назад».

Ця ділянка демонструє повний вигляд механічної характеристики: момент короткого замикання (пусковий) становить приблизно 20,45 Нм, а частота обертання ідеального холостого ходу 237,9 1/с. Ділянка 6, 7 є продовженням механічної характеристики (5, 6) і представляє механічну характеристику режиму генераторного гальмування. Абсолютне значення частоти обертання т.7 (279,9 1/с) більше частоти обертання ідеального холостого ходу, оскільки момент навантаження двигуна – активний і розкручує двигун до швидкості, на якій досягається рівність моментів двигуна та навантаження.

Двигун працює в режимі генератора та віддає енергію, наприклад, для заряджання акумулятора. Таким чином, на отриманій діаграмі знайшли

відображення майже всі можливі режими роботи двигуна (крім режиму динамічного гальмування).

5.2 Порядок виконання роботи

1. Згідно варіанту, виданого викладачем скласти модель в MATLAB для розрахунку перехідних процесів електроприводу постійного струму.

2. Побудувати статичні механічні характеристики електроприводу постійного струму $M = f(\omega)$.

3. Оформити звіт, що містить математичну модель, роздрук програми, графіки характеристик двигуна.

5.3 Контрольні запитання

1. Згідно варіанту, виданого викладачем скласти модель в MATLAB для розрахунку перехідних процесів електроприводу постійного струму.

2. Побудувати статичні механічні характеристики електроприводу постійного струму $M = f(\omega)$.

3. Оформити звіт, що містить математичну модель, роздрук програми, графіки характеристик двигуна.

4. Згідно варіанту, виданого викладачем скласти модель в MATLAB для розрахунку перехідних процесів електроприводу постійного струму.

5. Побудувати статичні механічні характеристики електроприводу постійного струму $M = f(\omega)$.

3. Оформити звіт, що містить математичну модель, роздрук програми, графіки характеристик двигуна.

Лабораторне заняття №6
РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ЗА ЙОГО КАТАЛОЖНИМИ ДАНИМИ

Мета роботи: навчитись розраховувати параметри АД для формування вхідних даних для моделювання статичних та динамічних режимів.

6.1 Теоретичні положення

Розрахунок статичних електромеханічних характеристик та аналіз процесів базуються на використанні системи алгебраїчних рівнянь, які описують Γ -подібну заступну схему АД, зображену на рисунку 6.1. Враховуючи симетрію електромагнітних контурів АД, така схема побудована для однієї фази. Для отримання необхідних параметрів, скористаємося приведеними параметрами Γ -подібної схеми заміщення для АД серії 4А у відносних одиницях. Виконаємо перерахунок параметрів АД. Абсолютні значення опорів:

$$r = R' \cdot \frac{U_{\phi, \text{ном}}}{I_{\phi, \text{ном}}}; \quad x = X' \cdot \frac{U_{\phi, \text{ном}}}{I_{\phi, \text{ном}}}, \quad (6.1)$$

або в розгорнутій формі

$$\begin{aligned} x_m = X_m \cdot \frac{U_{\phi, \text{ном}}}{I_{\phi, \text{ном}}}; \quad r_1' = R_1' \cdot \frac{U_{\phi, \text{ном}}}{I_{\phi, \text{ном}}}; \quad x_1' = X_1' \cdot \frac{U_{\phi, \text{ном}}}{I_{\phi, \text{ном}}}; \\ r_2'' = R_2'' \cdot \frac{U_{\phi, \text{ном}}}{I_{\phi, \text{ном}}}; \quad x_2'' = X_2'' \cdot \frac{U_{\phi, \text{ном}}}{I_{\phi, \text{ном}}}, \end{aligned} \quad (6.2)$$

де номінальний фазний струм двигуна беремо з довідника [3] або розраховуємо за формулою

$$I_{\phi, \text{ном}} = \frac{P_{2\text{ном}}}{3 \cdot U_{\phi, \text{ном}} \eta_{\text{ном}} \cos \varphi_{\text{ном}}}. \quad (6.3)$$

Знаходимо індуктивний опір розсіяння фази обмотки статора

$$x_{\sigma 1} \approx \frac{2x_1' x_m}{x_m + \sqrt{x_m^2 + 4x_1' \cdot x_m}}. \quad (6.4)$$

Далі визначаємо опори фази статора r_1 , x_1 .

$$r_1 = \frac{r_1'}{m_T}, \quad (6.5)$$

де m_T – коефіцієнт приведення активного опору до розрахункової робочої температури, що визначається класом ізоляції по нагрівостійкості (для класів ізоляції F і H , $m_T = 1,38$).

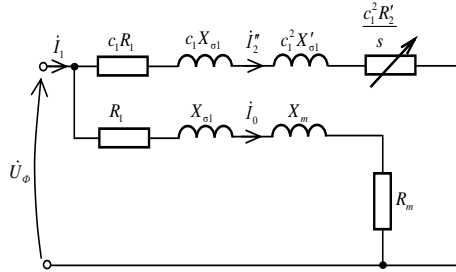


Рисунок 6.1 – Γ -подібна заступна схема АД

$$x_1 = \frac{x_1'}{1 + \tau_1} - r_1 \rho_1, \quad (6.6)$$

де τ_1, ρ_1 – відповідно коефіцієнти розсіяння та опору фази статора

$$\tau_1 = \frac{x_1}{x_m}, \quad \rho_1 = \frac{r_1 m_T}{x_1 + x_m}. \quad (6.7)$$

Розв'язавши (6.5), (6.6), (6.7), визначимо опори обмотки ротора r_2', x_2' .

$$r_2' = \frac{r_2''}{m_T (1 + \tau_1)^2 \cdot (1 + \rho_1^2)}; \quad x_2' = \frac{x_2''}{(1 + \tau_1)^2 \cdot (1 + \rho_1^2)}. \quad (6.8)$$

Звідси обернені індуктивності двигуна обчислимо за формулами

$$\alpha_1 = \frac{1}{L_1} = \frac{\omega}{x_1}; \quad \alpha_2' = \frac{1}{L_2} = \frac{\omega}{x_2'}; \quad \alpha_m = \frac{1}{L_m} = \frac{\omega}{x_m}, \quad (6.9)$$

де $\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \text{ Гц} = 314 \text{ с}^{-1}$ – кутова частота напруги мережі.

Застосувавши середовище MATHCAD отримано такі розраховані параметри АД: $R_1 = 0,015 \text{ Ом}$; $X_{\sigma 1} = 0,12 \text{ Ом}$; $R_2' = 0,014 \text{ Ом}$; $X'_{\sigma 2} = 0,15 \text{ Ом}$; $R_m = 0,13 \text{ Ом}$; $X_m = 7,5 \text{ Ом}$.

Візьмемо за основу АД серії 4А355М2У3 з такими номінальними параметрами: $P_{2н} = 315$ кВт; $U_n = 660$ В; $f_n = 50$ Гц; $\cos\varphi_n = 0,93$; $\eta_n = 0,95$; $n_n = 2965$ об/хв.; $p = 1$; $K_M = 2,2$; $K_I = 7,5$; $\Delta p_{мех} = 3650$ Вт; $\Delta p_{см} = 1050$ Вт; $J = 3,2$ кг·м².

Наступні розрахунки розпочинають із визначення величин, незалежних від ковзання: $c_1, I_{0A}, I_{0P}, P_{1H}, I_{1H}, n_0$. Коефіцієнт c_1 , який враховує зміну параметрів заступної схеми двигуна при її перетворенні з T-подібної у Г-подібну, визначають за формулою:

$$c_1 = 1 + \frac{X_{\sigma 1}}{X_m}. \quad (6.10)$$

У цій схемі введено такі позначення: R_1, R'_2 – активні опори статора та ротора відповідно; $X_{\sigma 1}, X'_{\sigma 2}, X_m$ – індуктивні опори статора, ротора та вітки намагнічування, I_1, I'_2, I_0 – фазні струми статора, ротора та холостого ходу, U_ϕ – значення номінальної фазної напруги двигуна

$$U_\phi = \frac{U_{ном.л}}{\sqrt{3}}, \quad (6.11)$$

$U_{ном.л}$ – задане значення номінальної лінійної напруги.

Змінний резистор на схемі імітує навантаження на валу АД.

Активна I_{0A} та реактивна I_{0P} складові струму I_0 :

$$I_{0A} = I_0 \cdot \cos\varphi_0; \quad I_{0P} = I_0 \cdot \sin\varphi_0, \quad (6.12)$$

де I_0 – значення струму неробочого ходу

$$I_0 = \frac{U_\phi}{Z_0}. \quad (6.13)$$

Повний опір холостого ходу визначимо із заступної схеми

$$Z_0 = \sqrt{(R_1 + R_m)^2 + (X_{\sigma 1} + X_m)^2}; \quad (6.14)$$

$$\cos\varphi_0 = \frac{R_1 + R_m}{Z_0}; \quad \sin\varphi_0 = \frac{X_{\sigma 1} + X_m}{Z_0}. \quad (6.15)$$

З урахуванням (6.12), (6.13), (6.14) активну і реактивну складові струму фази статора визначимо із виразів

$$I_{1A} = \frac{U_\phi (R_1 + R_m)}{(R_1 + R_m)^2 + (X_{\sigma 1} + X_m)^2} + \frac{U_\phi c_1 \left(R_1 + \frac{c_1 R'_2}{s} \right)}{\left(c_1 R_1 + \frac{c_1 R'_2}{s} \right)^2 + (c_1 X_1 + c_1^2 X'_{\sigma 2})^2}. \quad (6.16)$$

$$I_{1P} = \frac{U_\phi (X_{\sigma 1} + X_m)}{(R_1 + R_m)^2 + (X_{\sigma 1} + X_m)^2} + \frac{U_\phi c_1 (X_{\sigma 1} + c_1 X'_{\sigma 2})}{\left(c_1 R_1 + \frac{c_1 R'_2}{s} \right)^2 + (c_1 X_1 + c_1^2 X'_{\sigma 2})^2}. \quad (6.17)$$

Тоді струми статора і ротора відповідно

$$I_1 = \sqrt{I_{1A}^2 + I_{1P}^2}. \quad (6.18)$$

$$I_2 = \frac{c_1 U_\phi}{\sqrt{\left(c_1 R_1 + \frac{c_1 R'_2}{s} \right)^2 + (c_1 X_1 + c_1^2 X'_{\sigma 2})^2}}. \quad (6.19)$$

Додаткові втрати $\Delta p_{\text{од.н}}$ у номінальному режимі визначаються згідно стандартів як 0,5% від споживаної потужності:

$$\Delta p_{\text{од.н.}} = 0,0005 P_{1H}. \quad (6.20)$$

Значення активної та реактивної потужності P_{1H} , Q_{1H} та струму статора I_{1H} , які споживає двигун, визначають за формулами:

$$P_{1H} = \frac{P_H}{\eta_H}. \quad (6.21)$$

$$Q_{1H} = 3U_\phi I_{1H} \sin \varphi_H. \quad (6.22)$$

$$I_{1H} = \frac{P_{1H}}{3U_\phi \cos \varphi_H}. \quad (6.23)$$

Залежність $\cos \varphi = f(P_2)$ будують за виразом

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{Q_0 + (Q_{1H} - Q_0) \cdot \beta^2}{\beta P_{2H}} \right)^2}}, \quad (6.24)$$

де $Q_0 = 3U_\phi I_0$ – реактивна потужність холостого ходу, $\beta = \frac{P_2}{P_{2H}}$ – коефіцієнт завантаження двигуна.

Номінальне значення ковзання обчислюють за формулою у в.о.:

$$s_H = \frac{\omega_1 - \omega_H}{\omega_1}, \quad (6.25)$$

де $\omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p}$ – кутова швидкість обертання магнітного поля статора, c^{-1} ;

$\omega_H = \frac{\pi n_H}{30}$ – номінальна кутова швидкість обертання ротора, c^{-1} ; p – кількість пар полюсів.

Незалежними від ковзання вважають втрати механічні $\Delta p_{\text{мех}}$ та втрати в сталі $\Delta p_{\text{ст}}$.

Для розрахунку механічної характеристики задаються низкою значень ковзання s із діапазону $0 \leq s \leq 1$. При цьому в діапазоні $0 \leq s \leq s_m$ інтервал Δs зміни ковзання рекомендується приймати таким, що дорівнює $\Delta s = 0,25 s_m$, а в діапазоні $s_m < s \leq 1$ – таким, що дорівнює $\Delta s = 0,2$.

Обов'язково слід урахувати опорні точки, що відповідають режимам холостому ходу, номінальному, критичному (максимальному) та пусковому.

Критичне ковзання обчислюють за формулою:

$$s_m = \frac{c_1 R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 X_{\sigma 2}')^2}}, \quad (6.26)$$

або

$$s_m = s_H \left[\frac{M_m}{M_H} + \sqrt{\left(\frac{M_m}{M_H} \right)^2 - 1} \right]. \quad (6.27)$$

Електромагнітний момент АД

$$M = \frac{3pU_\phi^2 R_2'}{\omega_1 s \left[(R_1 + c_1 R_2' / s)^2 + (X_{\sigma 1} + c_1 X_{\sigma 2}')^2 \right]}, \quad (6.28)$$

де ω_1 – кутова частота струму, c^{-1} .

$$\omega_1 = 2\pi f. \quad (6.29)$$

Механічну характеристику можна й побудувати за формулою Клосса:

$$M = \frac{2M_m}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}}, \quad (6.30)$$

де M_m – максимальний момент АД

$$M_m = \left(\frac{M_m}{M_H} \right) \cdot M_H, \quad (6.31)$$

а

$$M_H = \frac{P_H}{\frac{2\pi n_1}{60}(1-s_H)} \quad (6.32)$$

- номінальний момент АД.

Сумарні втрати в АД

$$\sum \Delta p = \Delta p_{e1} + \Delta p_{e2} + \Delta p_{o\partial\partial} + \Delta p_{mex} + \Delta p_{cm}. \quad (6.33)$$

Тут $\Delta p_{e1} = 3I_1^2 R_1$, $\Delta p_{e2} = 3(I_2')^2 R_2'$ – відповідно електричні втрати в статорі та роторі, Δp_{mex} , Δp_{cm} – механічні втрати та втрати в сталі, задані в каталозі двигуна, $\Delta p_{o\partial\partial} = \Delta p_{o\partial\partial n} \left(\frac{I_1}{I_{1n}} \right)^2$ – додаткові втрати, викликані вищими гармоніками.

Звідси механічна потужність на валу

$$P_2 = P_1 - \sum \Delta p. \quad (6.34)$$

ККД двигуна

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}. \quad (6.35)$$

На рисунках 6.2, 6.3 побудовано робочі та механічну характеристику досліджуваного АД.

Заступні колові схеми будують для усталених станів, що становлять менший інтерес для інженерів-електриків. Для реальної фізичної картини перебігу перехідних процесів у АД необхідно будувати їх математичні моделі на основі законів електромеханіки.

6.2 Математична модель

Для того ж двигуна використаємо математичну модель і дослідимо процес його пуску, а саме побудуємо часові електромеханічні залежності.

Змодельуємо процеси в АД з короткозамкненим ротором. Він містить на статорі й на роторі симетричні трифазні обмотки, фази в яких зміщені в просторі на 120° . Струми обмоток створюють обертове магнітне поле. Оскільки ротор і статор в просторі взаємопереміщуються, то обертове магнітне поле перетинає їх з різними швидкостями, отже, й індукує в них відмінні за частотою електрорушійні сили ЕРС – трансформаторні й руху [3].

За основу рівнянь приймемо диференціальні рівняння в косокутній системі координат, записані безпосередньо в нормальній формі Коші для двох фаз A та B . Величини третьої фази легко знаходяться згідно I закону Кірхгофа.

$$\begin{aligned} \frac{dI_{1j}}{dt} &= A_{11}(U_j - R_1 I_{1j}) + A_{12}(\Omega \Psi_{2j} - R_2 I_{2j}); \\ \frac{dI_{2j}}{dt} &= A_{21}(U_j - r_1 I_{1j}) + A_{22}(\Omega \Psi_{2j} - R_2 I_{2j}), \quad j = A, B. \end{aligned} \quad (6.36)$$

Тут I_1, I_2 – колонки струмів статора і перетворених струмів ротора: $I_1 = (I_{1A}, I_{1B})_t$, $I_2 = (I_{2A}, I_{2B})_t$,

U – колонка напруг живлення: $U_{1A} = U_m \sin \omega t$, $U_{1B} = U_m \sin(\omega t - 2\pi/3)$, Ψ_2 – колонка повних потокозчеплень обмотки ротора, R_1, R_2 – резистивні опори обмоток статора і ротора; A_1, A_{12}, A_{21}, A_2 – матриці коефіцієнтів.

Матрицю швидкості обертання Ω ротора визначимо з [3]

$$\Omega = \frac{\omega}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} -1 & -2 \\ 2 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6.37)$$

$$A_{11} = \begin{bmatrix} \alpha_1 - \frac{\alpha_1^2}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_m} & 0 \\ 0 & \alpha_1 - \frac{\alpha_1^2}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_m} \end{bmatrix}; \quad A_{12} = A_{21} = \begin{bmatrix} \frac{-\alpha_1 \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_m} & 0 \\ 0 & \frac{-\alpha_1 \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_m} \end{bmatrix}; \quad (6.38)$$

$$A_{22} = \begin{bmatrix} \alpha_2 - \frac{\alpha_2^2}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_m} & 0 \\ 0 & \alpha_2 - \frac{\alpha_2^2}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_m} \end{bmatrix}.$$

Тут α_1 , α_2 , α_m – обернені індуктивності розсіяння обмоток статора і ротора та основна обернена індуктивність двигуна

$$\alpha_1 = \frac{2\pi f}{X_{\sigma 1}}; \quad \alpha_2 = \frac{2\pi f}{X'_{\sigma 2}}; \quad \alpha_m = \frac{2\pi f}{X_m}. \quad (6.39)$$

Слід відмітити, що матриці (6.29) записані при неврахуванні насичення магнітної системи машини, що може мати місце для розглядуваного двигуна.

Колонку повних потокозчеплень знаходимо так

$$\Psi_{2j} = \frac{I_{1j} + I_{2j}}{\alpha_m} + \frac{I_{2j}}{\alpha_2}, \quad j = A, B. \quad (6.40)$$

Рівняння електромагнітного стану слід доповнити рівняннями механічного стану, щоб обчислити кутову швидкість ω

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} [M_E - M(\omega)]. \quad (6.41)$$

$$M_E = \frac{\sqrt{3}p}{\alpha_m} (I_{2A}I_{1B} - I_{2B}I_{1A}) \quad (6.42)$$

де $M(\omega)$ – механічний момент; p – число пар магнітних полюсів; J – момент інерції ротора; M_E – електромагнітний момент.

Для практичного користування даною моделлю необхідно знати резистивні опори обмоток статора і ротора R_S , R_R , обернені індуктивності розсіяння α_S , α_R обмоток, основну обернену індуктивність α_m , момент інерції J , кількість пар магнітних полюсів p , напругу обмотки статора U і механічний момент на валу ротора $M_{\text{мех}}$.

Інтегрування диференціальних рівнянь (6.36), (6.41), (6.42) здійснено явним методом Ейлера. Крок часової дискретизації $h = 0,02 / 360$. Для розрахунку перехідного процесу використано мову програмування *Visual FORTRAN* з графічним пакетом *GRAPHER*. Перехідні процеси досліджуваного двигуна показано на рисунках 6.4, 6.5 та 6.6.

Просимульовано пуск двигуна до усталеної швидкості з номінальним механічним моментом на валу, що становить $M_{\text{мех}} = 1050$ Нм. Значення максимального моменту становить 2190 Нм на рисунку 6.3, а з рисунка 6.6, що відповідає моделі 2380 Нм. Час розгону двигуна складає приблизно 1,7 сек. При цьому амплітудні значення для пускового струму становлять 2850 А, для номінального 440 А (діючого 312 А). Номінальне діюче значення струму з рисунка 6.2 складає 320 А. Номінальна швидкість обертання становить становить 2965 об/хв., або 310 c^{-1} .

Якщо порівняти часові залежності рисунків 6.4, 6.5, 6.6 в усталеному процесі ($t > 2$ сек.) з номінальним режимом для $P_{2\text{н}} = 315$ кВт з рисунків 6.2,

6.3, то побачимо, що відхилення електромеханічних величин лежать в допустимих межах. Робочі характеристики АД побудовані починаючи з режиму холостого ходу до навантаження, що становить $1,5P_{2H}$.

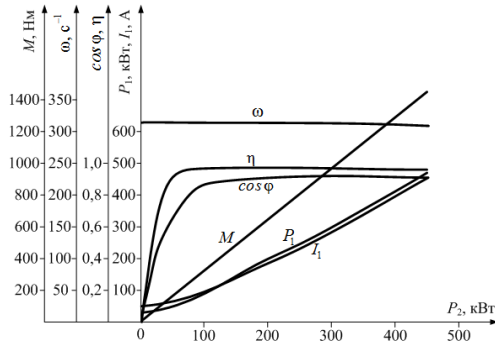


Рисунок 6.2 – Робочі характеристики АД

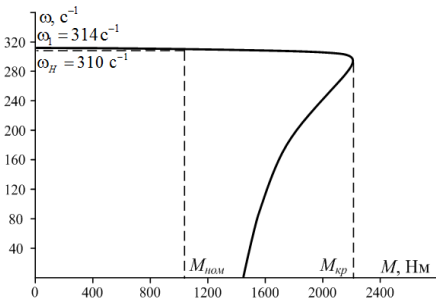


Рисунок 6.3 – Механічна характеристика АД

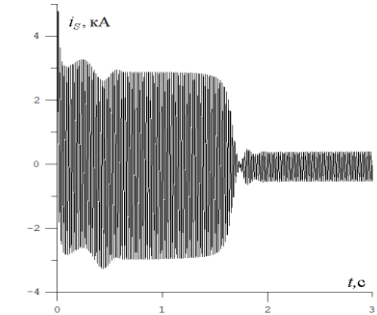


Рисунок 6.4 – Часова залежність струму АД

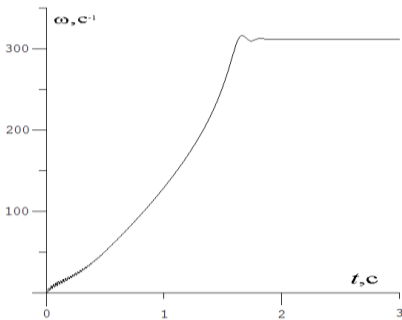


Рисунок 6.5 – Часова залежність кутової швидкості АД

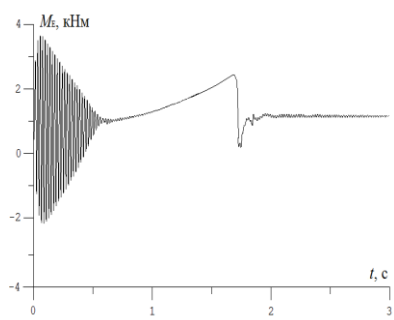


Рисунок 6.6 – Часова залежність електромагнітного моменту АД

Система диференціальних рівнянь (6.37), (6.41), (6.42) становить модель трифазного АД. Її незамінні якості: диференціальні безпараметричні рівняння записані в нормальній формі Коші, первинні сторони оперують фізичними величинами.

6.3 Порядок виконання роботи

1. Згідно варіанту, виданого викладачем розрахувати фізичні величини обмоток асинхронного двигуна
2. Згідно вищенаведеної методики побудувати статичні та динамічні характеристики асинхронного двигуна.
3. Співставити результати моделювання з величинами, розрахованими для фізичного експерименту. Зробити висновки про адекватність моделі.
4. Оформити звіт.

Вхідні дані до роботи наведені в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Вихідні дані до розрахунку

№ п/п	Типорозмір АД	$P_{2ном}$, кВт	ККД, %	$\cos\phi$, в.о.	x'_m , в.о.	R'_1 , в.о.	X'_1 , в.о.	R_2'' , в.о.	X_2'' , в.о.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Синхронна швидкість обертання $n = 3000$ об/хв									
1	4A132M2Y3	11,0	88,0	0,90	4,2	0,04	0,061	0,025	0,025
2	4A160S2Y3	15,0	88,0	0,91	4,0	0,052	0,092	0,022	0,12
3	4A160M2Y3	18,5	88,5	0,92	4,5	0,049	0,092	0,022	0,12
4	4A180S2Y3	22,0	88,5	0,91	3,6	0,039	0,091	0,02	0,11
5	4A180M2Y3	30,0	90,5	0,9	3,8	0,03	0,073	0,018	0,11
6	4A200L2Y3	37,0	90,0	0,89	4,1	0,029	0,094	0,021	0,12
7	4A200L2Y3	45,0	91,0	0,9	4,9	0,027	0,088	0,02	0,13
8	4A225M2Y3	55,0	91,0	0,92	5,6	0,026	0,092	0,019	0,12
9	4A250S2Y3	75,0	91,0	0,89	4,8	0,021	0,08	0,015	0,13
10	4A250M2Y3	90,0	92,0	0,9	5,2	0,02	0,078	0,016	0,13
Синхронна швидкість обертання $n = 1500$ об/хв									
11	4A132M4Y3	11,0	87,5	0,87	3,2	0,043	0,085	0,032	0,13
12	4A160S4Y3	15,0	88,5	0,88	4,0	0,047	0,085	0,025	0,13
13	4A160M4Y3	18,5	89,5	0,88	4,3	0,042	0,085	0,024	0,13
14	4A180S4Y3	22,0	90,0	0,9	4,0	0,041	0,08	0,021	0,12
15	4A180M4Y3	30,0	91,0	0,9	3,9	0,034	0,068	0,018	0,12
16	4A200M4Y3	37,0	91,0	0,9	4,4	0,039	0,086	0,018	0,14
17	4A200L4Y3	45,0	92,0	0,9	4,6	0,034	0,082	0,017	0,14
18	4A225M4Y3	55,0	92,5	0,1	4,2	0,027	0,086	0,015	0,14
19	4A250S4Y3	75,0	93,0	0,9	4,4	0,025	0,089	0,014	0,11
20	4A250M4Y3	90,0	93,0	0,9	5,0	0,024	0,093	0,014	0,12

6.4 Контрольні запитання

1. Методика розрахунку реальних фізичних величин обмоток асинхронного двигуна через відносні параметри.

2. Суть інтегрування алгебро-диференціальних рівнянь.
3. Стійкість роботи асинхронного двигуна.
4. Перевірка адекватності математичної моделі з фізичним прототипом.

Лабораторне заняття №7

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ

Мета роботи: вивчення будови і принципу дії асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором; вивчення способів пуску та регулювання швидкості обертання ротора двигуна, зняття основних характеристик асинхронного двигуна в режимі навантаження.

7.1 Основні теоретичні положення

В промислових електроустановах і в останній час в електротранспорті найбільшого розповсюдження отримали трифазні асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором. Двигун складається з нерухомого статора і рухомого ротора. Робота асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, також як і асинхронного двигуна з фазним ротором ґрунтується на електромагнітній взаємодії між обертовим магнітним полем, що створюється системою трифазного струму і струмами, що наводяться в обмотці ротора при перетині її провідників обертовим полем.

Швидкість n_1 обертового поля визначається за формулою

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}, \quad (7.1)$$

де f_1 і p – відповідно частота і число пар полюсів обмотки статора.

Електромагнітна взаємодія між статором і ротором асинхронного двигуна можлива тільки при різниці швидкостей обертового поля n_1 і ротора n , тобто при умові $n \neq n_1$, тому що при $n = n_1$ поле було б нерухоме відносно ротора і в обмотці ротора не наводилася б ЕРС. Відношення

$$s = \frac{n_1 - n}{n} \quad \text{або} \quad s = \frac{n_1 - n}{n} \cdot 100\% \quad (7.2)$$

називається ковзанням асинхронного двигуна.

В асинхронному двигуні ротор обертається відносно магнітного поля з швидкістю $n_1 - n$. Тому наведена в роторі ЕРС має частоту

$$f_2 = \frac{p_1(n_1 - n)}{60} = \frac{pn}{60} \cdot \frac{n_1 - n}{n_1} = f_1 s. \quad (7.3)$$

Робота асинхронного двигуна за своїм фізичним змістом подібна до роботи трансформатора. При цьому статор можна розглядати як первинну обмотку, а ротор – як вторинну, що обертається з швидкістю n .

Створений обмоткою статора обертовий магнітний потік Φ перетинає обмотку статора і обмотку ротора, індуюючи в кожній з них ЕРС, діючі значення яких визначаються за формулами

$$E_1 = 4,44 f_1 \Phi w_1 k_{об1}; \quad E_2 = 4,44 f_2 \Phi w_2 k_{об2}, \quad (7.4)$$

де w_1, w_2 – числа витків обмотки статора і ротора; $k_{об1}$ і $k_{об2}$ – обмоткові коефіцієнти обмоток статора і ротора, величини яких для трифазних обмоток лежать в межах від 0,92 до 0,96, а для короткозамкненої обмотки ротора $k_{об2}=1$.

Обертовий магнітний потік статора наводить в обмотці ротора систему трифазних ЕРС, які в замкненому колі ротора будуть підтримувати трифазні струми. Ці струми створять обертовий магнітний потік ротора, швидкість обертання n'_2 якого по відношенню до самого ротора дорівнює

$$n_2 = \frac{60 f_2}{p_2}. \quad (7.5)$$

Ротор обертається в просторі зі швидкістю n . З цією швидкістю він обертає магнітний потік ротора. Отже, магнітний потік ротора обертається зі швидкістю

$$n_2 = n'_2 + n = \frac{60 f_2}{p_2} + n. \quad (7.6)$$

Підставивши в (7.6) значення f_2 з рівняння (7.3) і з врахуванням того, що $p_2 = p_1$ маємо

$$n_2 = 60 \cdot \frac{p_1 \cdot p_2}{60 p_2} \cdot \frac{n_1 - n}{n_1} + n. \quad (6.7)$$

Після перетворень (7.7) отримаємо

$$n_2 = n_1, \quad (7.8)$$

тобто швидкість n_2 обертання магнітного поля ротора дорівнює швидкості n_1 обертання магнітного поля статора незалежно від того з якою швидкістю обертається ротор. Магнітні потоки статора і ротора обертаються синхронно і є нерухомими один відносно одного. Взаємна нерухомість двох обертових потоків дає змогу розглядати їх взаємодію як взаємодію магнітних потоків, що створюються первинною і вторинною обмотками трансформатора.

За правилом Ленца магнітний потік ротора послаблює магнітний потік статора. Однак при постійності частоти f_1 і напруги мережі U_1 величина результуючого магнітного потоку двигуна при навантаженні приблизно така як і при роботі двигуна в неробочому режимі.

Однією з найважливіших характеристик асинхронного двигуна є механічна характеристика, що є залежністю $M = f(n)$ чи $M = f(s)$. Рівняння механічної характеристики має вигляд

$$M = \frac{3U_{1\phi}^2 \cdot R'_2}{\omega_1 s \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_1 + X_2)^2 \right]}, \quad (7.9)$$

де R'_2, X'_2 – зведені значення опорів обмотки ротора

$$R'_2 = kR_2; \quad X'_2 = \kappa X_2; \quad k = \frac{\kappa_{оо1} W_1}{\kappa_{оо2} W_2}.$$

На рисунку 7.1, а, б зображені механічні характеристики.

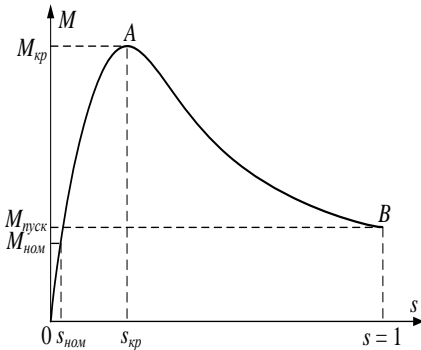


Рисунок 7.1,а – Механічна характеристика АД в координатах $M = f(s)$

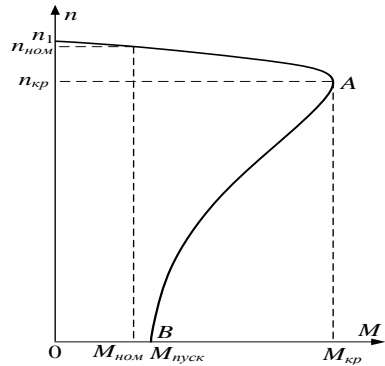


Рисунок 7.1,б – Механічна характеристика АД в координатах $M = f(n)$

Важливою точкою при аналізі роботи двигуна є точка, де момент досягає найбільшого значення. Координати цієї точки ($s_{кр}, M_{кр}$)

$$M_{кр} = \frac{3U_{1\phi}^2}{2\omega_1 \left[R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2} \right]}; \quad (7.10)$$

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

Ділянка AO (рис. 7.1) характеризує стійку роботу асинхронного двигуна, а ділянка AB – нестійку.

При роботі двигуна на ділянці OA автоматично встановлюється динамічна рівновага моментів, тобто при збільшенні гальмівного моменту на валу двигуна швидкість ротора зменшується (ковзання збільшується), зростає струм I_2 , а разом з ним і обертовий момент, що зрівноважує зростаючий гальмівний момент. Збільшення гальмівного моменту понад $M_{кр}$ призведе до зупинки двигуна, оскільки динамічна рівновага моментів є неможливою (при

подальшому збільшенні навантаження зростання ковзання буде зменшувати обертовий момент).

Тому для стійкої роботи асинхронного двигуна необхідно, щоб його максимальний момент був більший за номінальний. Величина $\lambda = M_K / M_H$ характеризує переважувальну здатність двигуна за моментом. Для більшості двигунів загальнопромислового призначення $\lambda = 1,7-2,5$.

Пуск асинхронного двигуна характеризується ділянкою AB (рис. 7.1). В момент пуску $X_2 > R_2$. В міру розгону ротора ковзання зменшується, а обертовий момент зростає. Індуктивний опір ротора зменшуючись наближується до незмінного за величиною опору R_2 і при $sX_2 = R_2$ момент, що розвивається двигуном, досягає максимального значення. При подальшому зменшенні ковзання виникає нерівність опорів кола ротора $sX_2 < R_2$ і момент, що розвивається двигуном, зменшується. Зменшення моменту призупиниться, коли настане динамічна рівновага обертового і гальмівного моментів.

Пускові властивості асинхронного двигуна визначається наступними величинами: пусковим струмом I_n ; пусковим моментом M_n (при $s = 1$); плавністю і тривалістю пуску, будовою ротора. Кратність пускового значення величини до її номінального значення (I_n / I_n ; M_n / M_n) вказується в каталогах.

З виразів (7.9), (7.10) слідує, що:

1. Момент, що розвивається асинхронним двигуном при будь-якому ковзанні, пропорційний квадрату напруги

$$M \cong c U_{1\phi}^2.$$

2. Критичне ковзання пропорційне опору кола ротора і не залежить від напруги мережі.

В інженерних розрахунках зазвичай користуються спрощеним рівнянням механічної характеристики, за допомогою якого можна розрахувати і побудувати механічну характеристику, використовуючи тільки паспортні і каталожні дані. Спрощене рівняння механічної характеристики (рівняння Клосса) має вигляд

$$M = \frac{2M_{кр}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s}{s_{кр}}}, \quad (7.11)$$

$$s_{кр} = s_{ном} \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right); \quad \lambda = \frac{M_{кр}}{M_{ном}}; \quad s = \frac{n_1 - n_{ном}}{n_1};$$

$$M_{кр} = \lambda M_{ном} = \lambda \frac{9550P_{ном}}{n_{ном}} \quad [Hm].$$

Асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором потужністю 0,6-100 кВт найбільш часто пускають вхід прямих підключенням обмотки статора до трифазною мережі за допомогою найпростішого комутаційного

апарату (рубильника, магнітного пускача). Такий пуск дуже простий і швидкий, але має наступні недоліки:

1. відносно малий пусковий момент $M_n = (1,2-1,6)M_{ном}$;
2. великий пусковий струм $I_n=(5-7)I_{ном}$.

Перший недоліки інколи доводиться усувати шляхом вибору двигуна більшої потужності, ніж вимагається за умовами роботи в номінальному режимі. П'яти-семи кратний струм при пускові відносно безпечний для двигуна, але викликає різке падіння напруги в мережі, що може мати поганий вплив на інших споживачів енергії. Тому при прямому пускові номінальна потужність асинхронного двигуна залежить від потужності живлячої мережі.

Для обмеження пускового струму асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором застосовують пуск при пониженої напрузі, який досягається шляхом ввімкнення додаткового опору в коло обмотки статора (рис. 7.2, а) чи пуск з переключенням обмотки статора з зірки на трикутник (рис. 7.2, б).

Пуск двигуна з додатковим опором в колі статора (рис. 7.2, а) здійснюється наступним чином. Перед пуском рубильник P_2 встановлюють в розімкненому положенні, потім вмикають рубильник P_1 . Після закінчення розгону ротора вмикають рубильник P_2 , тим самим шунтують додатковий опір R_0 .

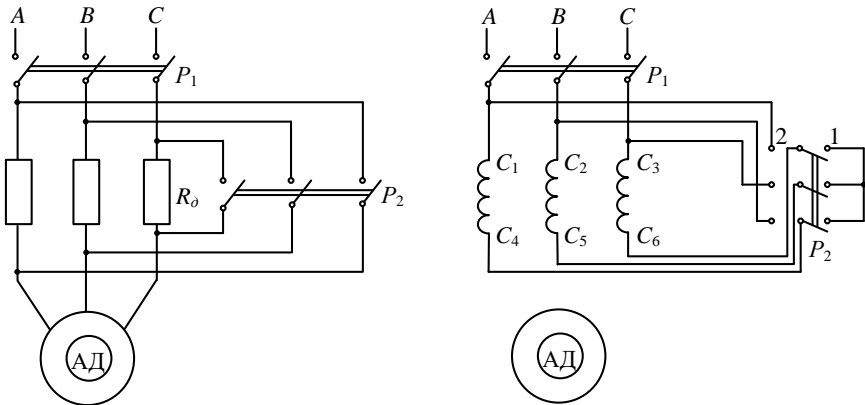


Рисунок 7.2 – Схеми пуску асинхронного двигуна з короткозамкненою обмоткою ротора: з додатковим опором в колі обмотки статора (а) і перемиканням фаз обмотки з зірки на трикутник (б)

Пуск двигуна переключенням фаз обмотки статора з зірки на трикутник (рис. 7.2, б) можливий, коли статорна обмотка може бути з'єднана зіркою чи трикутником і лінійна напруга мережі відповідає номінальній фазній напрузі обмотки статора. Встановивши попередньо рубильник P_2 в положенні 1, що відповідає з'єднанню обмотки статора зіркою, рубильником

P_1 подають напругу на обмотку статора. Після закінчення розгону ротора рубильник P_2 перемикають в положення 2, завдяки чому обмотка статора з'єднується трикутником.

Зменшення пускового струму, що створюється завдяки пониженню напруги на обмотці статора, викликає зменшення пускового моменту пропорційно квадрату напруги на статорі. Так, наприклад, при переключенні обмотки статора з зірки на трикутник момент зменшується в три рази (фазна напруга зменшується $\sqrt{3}$). Тому такий спосіб пуску можливий тільки при малих моментах на валу двигуна.

Для регулювання швидкостей обертання асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором зазвичай використовують два методи: частотний метод регулювання частоти обертання магнітного поля шляхом регулювання частоти напруги обмотки статора; метод зміни числа пар полюсів обертового магнітного поля, що дає змогу стрибкоподібно змінювати швидкість обертання магнітного поля.

Частотний спосіб регулювання швидкості ротора асинхронного двигуна потребує окремого джерела чи перетворювача електричної енергії з регульованою частотою. При зміні частоти живлячої напруги пропорційно змінюється швидкість обертання магнітного поля. На рисунку 7.3 зображені механічні характеристики асинхронного двигуна при частотному способі регулювання швидкості.

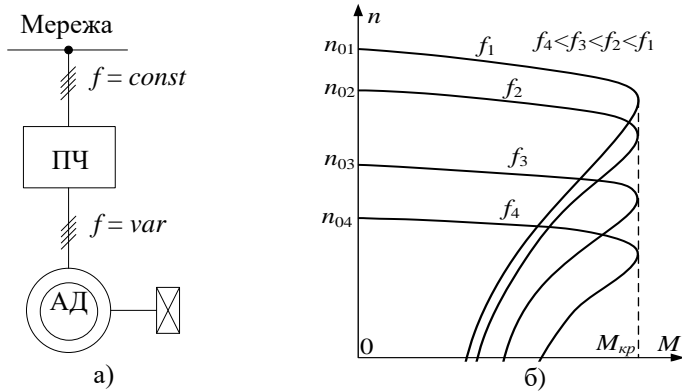


Рисунок 7.3 – Структурна схема (а) і механічні характеристики (б) асинхронного двигуна при частотному регулюванні швидкості

При регулюванні частоти напруги живлення необхідно одночасно регулювати амплітуду напруги. Так як магнітний потік повинен при всіх режимах зберігатись одним і тим же, то величину напруги необхідно змінювати прямопропорційно частоті, тобто відношення $U_{1\phi} / f_1$ повинно бути постійним.

Частотний спосіб регулювання швидкості дає змогу отримувати широкий діапазон і плавне регулювання швидкості, але він застосовується рідко, внаслідок низького ККД і великих капітальних витрат.

Для знаходження всіх основних величин, що визначають режим роботи двигуна при різних навантаженнях застосовують його робочі характеристики. Робочими характеристиками асинхронного двигуна називають залежності споживаної потужності P_1 , струму статора I_1 , коефіцієнта потужності $\cos\phi_1$, моменту на валу M_2 , ковзання s і ККД η від корисної потужності P_2 при номінальній напрузі і частоті.

На рисунку 7.4 зображені робочі характеристики асинхронного двигуна потужністю 3 кВт. При $P_2 = 0$ величини I_1 і $\cos\phi_1$ відповідають режиму неробочого ходу. Робочі характеристики можна побудувати за розрахунковими даними при проектуванні двигуна, а також за даними експерименту.

Корисну потужність на валу асинхронного двигуна в лабораторних умовах зазвичай визначають методом гальмування за допомогою генератора постійного струму на основі потужності $U_2 \cdot I_2$, що віддається генератором і його втрат ΔP_2

$$P_2 = U_2 I_2 + \Delta P_{\text{я}} + \Delta P_{\text{щ}} + \Delta P_{\text{мех.}} + \Delta P_{\text{ст.}} + \Delta P_{\text{дод.}},$$

де $U_2 \cdot I_2$ – напруга і струм якірного кола генератора, що вимірюється вольтметром і амперметром;

$\Delta P_{\text{я}} = I_2 \cdot R_{\text{я}}$ – втрати в обмотці якоря;

$\Delta P_{\text{щ}} = \Delta U_{\text{щ}} \cdot I_2$ – втрати в контактні щіток (приймається, що $\Delta U_{\text{щ}} = 2$ В і не залежить від струму I_2);

$$\Delta P_{\text{мех}} = \Delta P_{\text{мех.ном}} \cdot \frac{n}{n_{\text{ном}}} - \text{механічні втрати, що приблизно пропорційні}$$

швидкості n генератора, $\Delta P_{\text{мех.ном}}$ – механічні втрати в генераторі при номінальній швидкості $n_{\text{ном}}$;

$$\Delta P_{\text{ст}} = \Delta P_{\text{ст.ном}} \cdot \left(\frac{n}{n_{\text{ном}}} \right)^2 - \text{втрати в сталі генератора, що в першому}$$

наближенні пропорційні квадрату зменшення швидкості, $\Delta P_{\text{ст.ном}}$ – номінальні втрати в сталі генератора;

$$\Delta P_{\text{дод.}} = \Delta P_{\text{дод.ном}} \cdot \frac{I_{\Gamma}}{I_{\Gamma\text{ном}}} - \text{додаткові втрати. Додаткові втрати } \Delta P_{\text{дод.ном}} \text{ при}$$

номінальному режимі дорівнюють 1% від потужності генератора $P_{\Gamma\text{ном}}$.

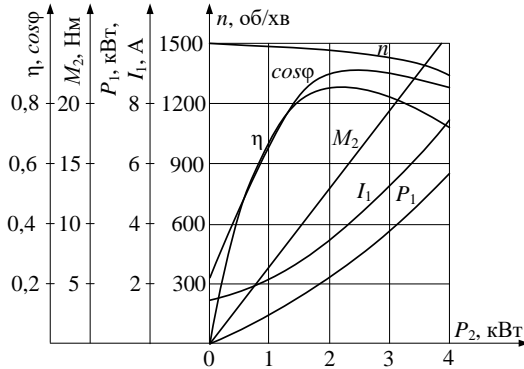


Рисунок 7.4 – Робочі характеристики асинхронного двигуна потужністю 3 кВт
 Величини $R_{я}$, $I_{г.ном}$, $\Delta P_{мех.ном}$, $\Delta P_{ст.ном}$, $P_{г.ном}$, $n_{ном}$ для кожного генератора повинні видаватися на занятті викладачем.

7.2 Зміст і порядок виконання роботи

1. Вивчити будову асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором за плакатами і розбірним зразком. Звернути увагу на будову статора, ротора з короткозамкненою обмоткою (білячою кліткою), вентилятора, панелі з клемми, корпусу. Вияснити призначення кожної деталі.

2. Ознайомитись з електровимірювальними приладами і обладнанням досліджуваної електроустановки.

3. Вивчити способи пуску і регулювання швидкості обертання асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.

4. Скласти електричне коло згідно рисунку 7.2, б.

5. Провести пуск асинхронного двигуна способом переключення фаз обмотки статора з зірки на трикутник. Значення фазних і лінійних напруг, що встановилися записати в таблицю 7.1.

6. Скласти електричне коло згідно рисунку 7.5.

7. Зняти основні характеристики асинхронного двигуна в режимі навантаження. Результати вимірювань занести в таблицю 7.2.

Таблиця 7.1 – Пуск асинхронного двигуна переключенням обмотки статора з зірки на трикутник

Схема з'єднання	U_L	U_ϕ
Y		
Δ		

Рисунок 7.5 – Схема пуску двошвидкісного асинхронного двигуна з переключенням фаз обмотки статора з трикутника на подвійну зірку

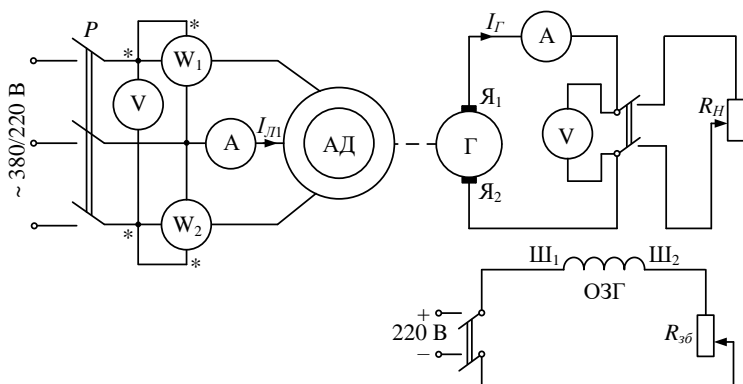


Рисунок 7.5 – Схема експериментальної установки для зняття робочих характеристик асинхронного двигуна

Таблиця 7.2 – Робочі характеристики асинхронного двигуна

№ п/п	Дані спостережень						Результати обчислень												
	$U_{Л1}$	$I_{Л1}$	P_{w1}	P_{w2}	n	$U_{Г}$	$I_{Г}$	$P_{Г}$	$\Delta P_{Я}$	$\Delta P_{Щ}$	$\Delta P_{М}$	$\Delta P_{С}$	$\Delta P_{Д}$	P_2	P_1	M	s	η	$\cos\phi$
	В	А	Вт	Вт	об/хв	В	А	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт	Нм	в.о.	в.о.	в.о.
1																			
...																			
7																			

7.3 Аналіз і обробка результатів експерименту

- Здійснити розрахунок величин, що наведені в таблиці 7.2.
- За розрахунковими і експериментальними даними таблиці 7.2 побудувати на одному рисунку залежності $I_{Л1}$, n , M , s , η , $\cos\phi_1 = f(P)$.
- Зробити аналіз результатів розрахунку і експерименту в якому вказати: які існують способи пуску асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, найбільш економічний спосіб регулювання швидкості обертання ротора, які переваги і недоліки має асинхронний двигун з короткозамкненим ротором в порівнянні з двигуном з фазним ротором.

7.4 Контрольні запитання

- Поясніть будову і принцип дії асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.
- Способи пуску трифазних асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором.
- Чому в трифазному асинхронному двигуні утворюється обертовий момент, а в трансформаторі не утворюється?
- Як визначити швидкість обертання магнітного поля і номінальну швидкість обертання ротора при заданих величинах p , f , s ?

5. У скільки раз зменшаться фазний і пусковий струми двигуна, якщо при пускові обмотку статора з'єднати зіркою замість трикутника?

7. На скільки відсотків зменшаться початковий пусковий і максимальний моменти, якщо напруга на обмотці статора двигуна зменшиться на 10%?

8. Які переваги і недоліки має асинхронний двигун з короткозамкненим ротором в порівнянні з асинхронним двигуном з фазним ротором?

9. Як можна регулювати швидкість обертання ротора асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором?

Лабораторне заняття №8

ДОСЛІДЖЕННЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

Мета роботи: ознайомлення з будовою перетворювача частоти, асинхронного двигуна генератора постійного струму, вивчення правил пуску, зупинки, реверсу і регулювання швидкості обертання; зняття основних характеристик генератора постійного струму.

8.1 Основні теоретичні положення

Основними складовими лабораторної установки є перетворювач частоти, побудований на транзисторах, що регулює оберти асинхронного двигуна, генератор з електронним збудженням та акумуляторна батарея. Генератор, що приводиться в рух реміною передачею від АД є джерелом для навантаження у вигляді автомобільних ламп різної потужності. Кожна з чотирьох паралельних віток, що ввімкнені паралельно через вимикачі має потужність 55 Вт. Регулятор ПЧ змінює оберти і АД і генератора.

Для виконання лабораторної роботи було використано наступне електротехнічне та силове електронне обладнання.

Перетворювач частоти:

- напруга живлення: $\approx 220\text{-}240$ В, 50/60 Гц;
- діапазон можливої зміни частоти: $f = 1,0 \dots 50,0$ Гц;
- несуча частота ШІМ при перемиканні транзисторів: $f_{\text{ШІМ}} = 8$ кГц;
- споживана потужність електронною схемою керування: $P_{\text{кер}} \leq 20$ Вт.

Асинхронний двигун:

- потужність на валу: $P_{\text{ном}} = 750$ Вт;
- номінальний споживаний струм: $I_{\text{ном}} = 3,86$ А;

- коефіцієнт корисної дії $\eta = 0,87$;
- номінальні оберти валу: $n_{ном} = 2920$ об/хв.;
- лінійна напруга (обмотки з'єднані трикутником) $U_{ном} = 220$ В.

Автомобільний генератор:

- номінальна електрична потужність: $P_{1\text{ ЕЛ}} = 500$ Вт;
- номінальна постійна напруга: $U_{ном} = 12,8$ В;
- номінальний струм: $I_{ном} = 40$ А;
- коефіцієнт корисної дії $\eta = 0,82$;
- струм збудження електронного регулятора: $I_{зб} = 1,2$ А.

На рисунку 8.1 показано експериментальну установку, а на рисунку 8.2 налаштування перетворювача частоти.

8.2 Зміст і порядок виконання роботи

1. Вивчити будову і принцип дії генератора за плакатами, на розбірному зразку. Звернути увагу на будову статора з головними і додатковими полюсами, на будову якоря з колектором, на щіткотримачі з щітками. Зрозуміти призначення кожної деталі.

2. Ознайомитись з вимірювальними приладами і обладнанням досліджуваної установки, записати технічні дані в звіт по роботі.

3. Вивчивши правила пуску, провести пуск і привести генератор в обертання. Впевнитися в відповідності напрямку обертання якоря генератора.

4. Перевірити за допомогою вольтметра чи збудиться генератор постійного струму. Якщо генератор не збудився, прийняти відповідні міри для самозбудження генератора.

5. Скласти електричне коло згідно рисунку 8.3.

6. Зняти основні характеристики асинхронного двигуна в режимі навантаження для трьох значень частот напруги мережі $f_1 = 50$ Гц, $f_2 = 30$ Гц, $f_3 = 50$ Гц. Навантаження змінюється шляхом почергового вмикання ламп. Результати вимірювань занести в таблицю 8.1.



Рисунок 8.1 – Загальний вигляд лабораторної установки



Рисунок 8.2 – Налаштування перетворювача частоти

8.3 Алгоритм дослідження лабораторної установки

1. Вивчаємо будову і принцип дії перетворювача частоти, асинхронного двигуна, генератора за плакатами та на розбірному зразку.

2. Ознайомлюємось з елементною базою силової електронної частини перетворювача частоти, з аналоговими та цифровими вимірювальними приладами і обладнанням досліджуваної установки. Виставляємо за допомогою потенціометра струм збудження електронної системи керування на рівні 1 А.

3. Вивчаємо і засвоюємо правила пуску, проводимо пуск перетворювача і двигуна в обертання. Впевнюємось у відповідності напрямку обертання якоря генератора. Перевіряємо вольтметром чи збудився генератор.

На рисунку 8.3 показано електричну схему лабораторної установки.

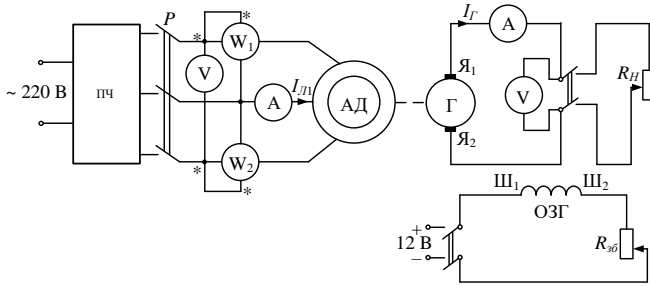


Рисунок 8.3 – Схема експериментальної установки

Таблиця 8.1 – Результати навантаження частотно-регульованого ЕП
 $f_1 = 50$ Гц

№ п/п	Дані спостережень						Результати обчислень												
	$U_{Л1}$ В	$I_{Л1}$ А	P_{w1} Вт	P_{w2} Вт	n об/хв	$U_{Г}$ В	$I_{Г}$ А	$P_{Г}$ Вт	$\Delta P_{Я}$ Вт	$\Delta P_{Щ}$ Вт	$\Delta P_{М}$ Вт	$\Delta P_{С}$ Вт	$\Delta P_{Д}$ Вт	P_2 Вт	P_1 Вт	M Нм	s в.о.	η в.о.	$\cos\phi$ в.о.
1																			
...																			
7																			

$f_2 = 30$ Гц

№ п/п	Дані спостережень						Результати обчислень												
	$U_{Л1}$ В	$I_{Л1}$ А	P_{w1} Вт	P_{w2} Вт	n об/хв	$U_{Г}$ В	$I_{Г}$ А	$P_{Г}$ Вт	$\Delta P_{Я}$ Вт	$\Delta P_{Щ}$ Вт	$\Delta P_{М}$ Вт	$\Delta P_{С}$ Вт	$\Delta P_{Д}$ Вт	P_2 Вт	P_1 Вт	M Нм	s в.о.	η в.о.	$\cos\phi$ в.о.
1																			
...																			
7																			

$f_3 = 10$ Гц

№ п/п	Дані спостережень						Результати обчислень												
	$U_{Л1}$ В	$I_{Л1}$ А	P_{w1} Вт	P_{w2} Вт	n об/хв	$U_{Г}$ В	$I_{Г}$ А	$P_{Г}$ Вт	$\Delta P_{Я}$ Вт	$\Delta P_{Щ}$ Вт	$\Delta P_{М}$ Вт	$\Delta P_{С}$ Вт	$\Delta P_{Д}$ Вт	P_2 Вт	P_1 Вт	M Нм	s в.о.	η в.о.	$\cos\phi$ в.о.
1																			
...																			
7																			

8.4 Аналіз і обробка результатів експерименту

1. За даними таблиці 8.1 будемо зовнішні характеристики.
2. Методику щодо результатів обчислень взяти з лабораторного заняття №7.
2. Описати роботу схеми і провести аналіз знятих характеристик.

8.5 Контрольні запитання

1. Пояснити будову і принцип дії перетворювача частоти.
2. Пояснить суть частотного регулювання швидкості обертання АД.
3. Як можна регулювати напругу генератора постійного струму паралельного збудження при змінному навантаженні?

Лабораторна робота №9

ВІРТУАЛЬНЕ ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КОРОТКОЗАМКНЕНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Мета роботи: навчитись складати динамічні моделі асинхронних двигунів, вміти користуватись бібліотеками в програмі MATHLAB, дослідити перехідні процеси при різних збуреннях.

9.1 Теоретичні відомості

В розділі *Machines* бібліотеки *SimPowerSystems* представлені два блоки трифазної асинхронної машини: *Asynchronous Machine SI Units* (асинхронна машина в абсолютних одиницях системи СІ) та *Asynchronous Machine pu Units* (асинхронна машина у відносних одиницях).

Блоки мають порти А, В, С та а, b, с, що відповідають «електричним» затискачам статора та ротора відповідно. Крім «електричних» портів, моделі мають один механічний вхід та векторний «інформаційний» вихід *m* (від *measurements*), який передбачає подальшу обробку або фіксацію сигналів за допомогою базових блоків *Simulink*.

Зовнішній вигляд блоків *Asynchronous Machine* (рис. 9.1) визначається типом ротора та механічного входу, які встановлюються за допомогою меню параметрів *Rotor type* і *Mechanical input* вкладки *Configuration* (рис. 9.2, а).

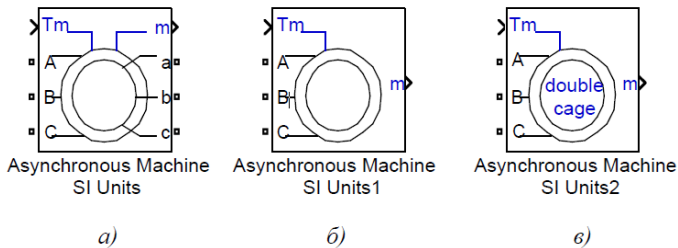
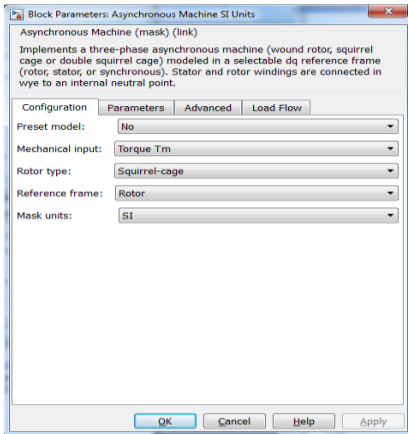


Рисунок 9.1 – Блоки *Asynchronous Machine* з різними типами ротора (*Rotor Type*): а – з фазним ротором (*Wound*), б – з білячою кліткою на роторі (*Squirrel-cage*), в – з двома білячими клітками на роторі (*Double squirrel-cage*)

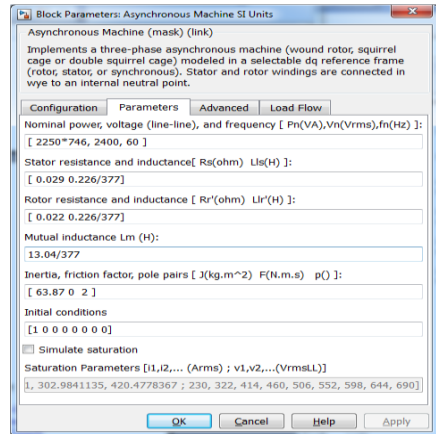
Вкладка *Parameters* (рис. 9.2, б) діалогового вікна установки параметрів блока дозволяє встановити значення таких параметрів асинхронного двигуна (АД):

- *Nominal power* P_n (VA) – номінальна потужність P_n , ВА;
- *Voltage (line-line)* V_n (Vrms) – діюче, тобто ефективне або середньоквадратичне (*rms – root mean square*) значення номінальної лінійної напруги статора U_{1en} , В;
- *Frequency* f_n (Hz) – номінальна частота напруги живлення, f_n , Гц;
- *Stator resistance* R_s (Ohm) – активний опір фази статора, R_s , Ом;
- *Stator inductance* L_{ls} (Hn) – індуктивність розсіяння фази статора, L_{ls} Гн;

- Rotor resistance R'_r (Ohm) – активний опір фази ротора, приведений до статора R_r , Ом;
- Rotor inductance L'_{lr} – індуктивність розсіяння фази ротора, приведена до статора, $L_{R\sigma}$, Гн;
- Mutual inductance L_m (H) – головна взаємна індуктивність, L_m , Гн;
- Inertia J ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$) – момент інерції ротора, J , $\text{кг}\cdot\text{м}^2$;
- Friction factor F ($\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$) – коефіцієнт в'язкого тертя, k_{fv} ($\text{Н}\cdot\text{м}/\text{рад}/\text{с}$);
- Pole pairs p – кількість пар полюсів Z_p ;
- Initial conditions – початкові умови за координатами: ковзання, кутове положення ротора, амплітуди та фазові кути струмів фаз статора та (якщо потрібно) ротора;
- Simulate saturation – при наявності в полі цього параметру прапорця буде враховуватись ефект насичення магнітного кола за табличними даними кривої намагнічування $U_s = f(I_s)$, що вводяться у вигляді дворядкової матриці параметру *Saturation Parameters*; перший стовбець цієї матриці отримує координати тієї точки кривої намагнічування, з якої починає проявлятися ефект насичення, тобто він повинен бути ненульовим.



а)



б)

Рисунок 9.2 – Вкладки діалогового вікна встановлення параметрів блоку *Asynchronous Machine SI Units*

Параметри АД та можливість їх встановлення або коригування залежать від стану опції *Preset Model* (попередня ініціалізація моделі даними деякого двигуна) вкладки *Configuration* (рис. 9.2, а).

У початковому стані ця функція має значення *No*, параметри вкладки *Parameters* мають певні значення, які після переміщення блоку у вікно моделі можна змінювати.

В меню функції *Preset Model* наводиться перелік, з якого можна обрати конкретний двигун за його потужністю у кіньських силах HP ($1\text{HP} = 746\text{ Вт}$), діючим значенням лінійної напруги статора у V_{rms} , номінальною частотою в Hz та номінальною швидкістю в RPM (*Revolutions Per Minute* = об/хв). Вибір певного двигуна, підтверджений натисканням кнопки *Apply*, призводить до автоматичного встановлення відповідних параметрів у вкладці *Parameters*, які тепер не можуть бути скориговані користувачем.

Слід зазначити, що до параметрів попередньо обраних двигунів не входять координати кривої намагнічування, тобто, ці координати задані тільки для одного двигуна, параметри якого встановлюються за замовченням (початковий стан моделі).

Для того, щоб зробити дані попередньо обраного двигуна доступними до коригування, треба після вибору цього двигуна віртуальною кнопкою *Apply* знову встановити функцію *Preset Model* у значення *No*. Підкреслимо, що можливість ініціалізації моделі через встановлення певного набору параметрів АД передбачена тільки для двигунів з однією білячою кліткою на роторі. Параметри вкладок *Reference frame* будуть пояснені у подальших дисциплінах, а параметри вкладок *Advanced* та *Load Flow* (рис. 9.3а) зазвичай можна не змінювати.

На рисунку 9.3 зображена SPS-модель, призначена для дослідження прямого пуску АД.

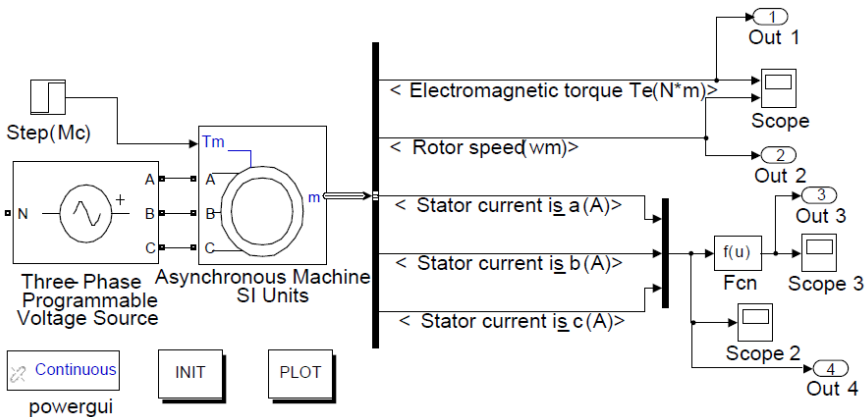


Рисунок 9.3 – SPS-модель прямого пуску асинхронного двигуна

У наведеній моделі вибір сигналів для реєстрації здійснюється з загального вектору вихідних *Simulink*-сигналів (порт *m*) SPS-блоку *Asynchronous Machine SI Units* S-блоком *Bus Selector* бібліотеки *Signal Routing*. Вікно блоку *Bus Selector* показано на рисунку 9.4.

Обчислення діючого (ефективного) значення струму статора виконує блок F_{cn} за формулою:

$$I_{se} = \sqrt{(I_A^2 + I_B^2 + I_C^2)} / 3. \quad (9.1)$$

Фазні напруги формуються джерелом *Tree-Phase Programmable Voltage Source*, вікно параметрів якого відображено на рисунку 8.5.

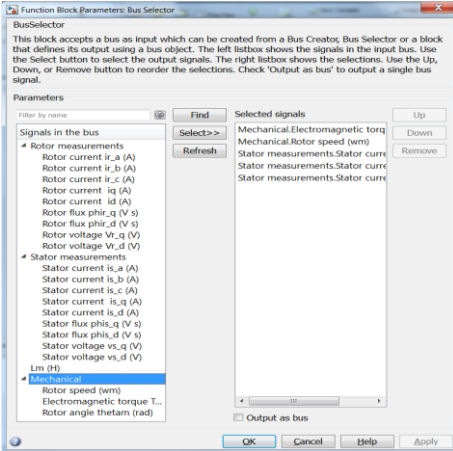


Рисунок 9.4 – Діалогове вікно блоку *Bus Selector*, підключеного до вихідного інформаційного порту двигуна

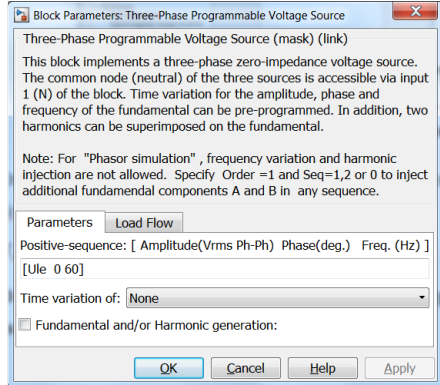


Рисунок 9.5 – Діалогове вікно блоку *Tree-Phase Programmable Voltage Source*

Замість одного джерела *Tree-Phase Programmable Voltage Source*, можна використати три блока *AC Voltage Source*, з'єднаних зіркою.

При визначенні параметрів джерел необхідно звернути увагу на те, що в параметрах двигуна задано діюче значення лінійної напруги [Voltage (line-line) (V_{rms})], а блоки *AC Voltage Source* потребують амплітудних значень фазних напруг [Peak amplitude (V)], а також, що SPS-джерела *AC Voltage Source* використовують частоту не в рад/с, а в герцах, а фазовий зсув синусоїдних сигналів – не в радіанах, а в градусах [Phase (deg)].

Перехідні процеси, отримані за результатами симуляції моделі рисунку 9.3 подані на рисунку 9.6. За допомогою цієї ж моделі можна побудувати і статичні характеристики двигуна, якщо змінювати момент статичного опору за лінійним законом настільки повільно, щоб практично не призводити до збудження електромагнітного перехідного процесу.

Завершення сеансу моделювання у цьому експерименті можна здійснити блоком *Stop Simulation*, який здійснює зупинку моделювання тоді, коли швидкість АД після перекидання явно перейде в область від'ємних значень, що досягається застосуванням блоку *Relational Operator*.

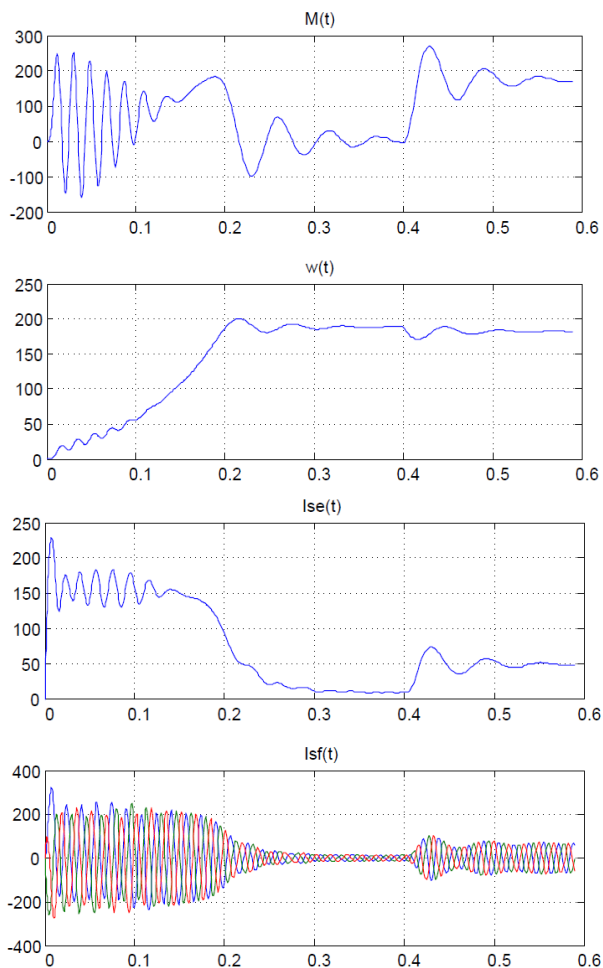


Рисунок 9.6 – Перехідні процеси при прямому пуску асинхронного двигуна

9.2 Завдання

Виконати дослідження процесу прямого пуску асинхронного двигуна методом віртуального фізичного моделювання за даними таблиці 9.1, наведеними для АД з короткозамкненим ротором серії МТК, 380 В, 50 Гц.

9.3 Порядок виконання роботи

1) Ознайомитися з параметрами *SPS*-блоку *Asynchronous Machine SI Units* бібліотек *SimPowerSystem*.

2) Зібрати *SPS*-модель асинхронного двигуна для його дослідження у режимі прямого пуску та накиду навантаження.

3) За даними двигуна розрахувати необхідні параметри і встановити їх.

4) Виконати такі віртуальні експерименти:

– прямий пуск двигуна від джерела, що виробляє трифазну синусоїдальну напругу, параметри якої відповідають номінальній напрузі та номінальній частоті статора; після досягнення двигуном синхронної швидкості здійс-ніть стрибкоподібний накид навантаження;

– поступово підвищуючи момент статичного опору на валу двигуна, знайдіть його критичний момент та критичне ковзання;

– виконайте попередні два експерименти зі зменшеною на 50% частотою джерела при номінальній амплітуді та зі зменшеною на 20% амплітудою напруги джерела при номінальній частоті;

– здійcніть пуск двигуна у протилежному напрямку;

– побудувати статичні механічну швидкісні характеристики двигуна;

– проаналізувати результати досліджень. Сформулюйте висновки.

Таблиця 9.1 – Номінальні параметри асинхронних двигунів

№ вар.	Тип	P_n кВт	n_n об/хв	X_m Гн	Статор		Ротор		
					R_1	$X_{1\sigma}$	R_2	$X_{2\sigma}$	J
					Ом	Ом	Ом	Ом	кг*м ²
1	МТК011-6	1.4	870	54.0	5.98	3.93	8.41	3.80	0.02
2	МТК012-6	2.2	875	36.4	3.6	2.58	5.7	2.63	0.028
3	МТК-11-6	2.2	883	48.4	3.67	2.54	5.02	2.88	0.04
4	МТК-12-6	3.5	875	35.2	2.09	1.61	3.36	1.92	0.063
5	МТК111-6	3.5	870	29.8	2.16	2.03	3.33	1.46	0.046
6	МТК-21-6	5.0	910	24.5	1.11	1.07	1.86	1.5	0.098
7	МТК112-6	5.0	890	22.9	1.32	1.39	2.34	1.02	0.065
8	МТК-22-6	7.5	905	17.6	0.69	0.74	1.33	1.07	0.138
9	МТК-31-8	7.5	682	17.3	0.79	0.90	1.30	0.79	0.25
10	МТК-31-6	11.0	920	13.5	0.42	0.47	0.82	0.71	0.25

9.4 Контрольні запитання

1. Які параметри АД треба знати, щоб скористатися блоком *Asynchronous Machine SI Units*?

2. Як впливає на усталену швидкість зміна частоти напруги статора?

3. Як впливає на час розгону двигуна, просадку швидкості при накиді навантаження та критичний момент зміна амплітуди напруги статора?

4. Який із струмів підтримує АД у намагніченому стані: струм статора чи струм ротора?

Список використаних джерел

1. Viktor Lyshuk, Anatolii Tkachuk, Serhii Moroz, Yosyp Selepyna, Valentyn Zablotyski, Viktor Satsyk. Modeling dynamic and static operating modes of a low-power asynchronous electric drive. *Informatyka, Automatyka, Pomiarы w Gospodarce i Ochronie Srodowiska*, 2025, Vol. 15 No. 2 (2025), pp. 118-123.
2. Безвесільна О.М. Толочко Т.О. Елементи і пристрої автоматики та систем управління. НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Київ. 2023, 328 с.
3. Видмиш А.А., Ярошенко Л.В. Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1. Навчальний посібник. Вінниця: ВНАУ. 2020, 387 с.
4. Донець О.В. Теорія електропривода. Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова. 2021, 148 с.
5. Лавріненко Ю.М. Основи електропривода. К.: Ліра-К. 2021, 532 с.
6. Лишук В.В., Заблоцький В.Ю., Приступа С.О., Мороз С.А., Євсюк М.М. Дослідження мехатронної системи «перетворювач частоти-асинхронний двигун-автомобільний генератор». *Науковий журнал "Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво" Луцьк*, 2025. Випуск № 61, 2025, с.127-135. DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-61-18>
7. Синявський О.Ю., Лавріненко Ю.М., Войтюк Д.Г., Бунько В.Я., Рамш В.Ю. Електропривод виробничих машин і механізмів. К.: ФОП Ямчинський О.В. 2020, 444 с.
8. Щерба А.А., Поворознюк Н.І. Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси. НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Київ. 2022, 497 с.

E50

Електропривід транспортних засобів. Методичні вказівки до виконання лабораторних занять для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Автомобільна електроніка» галузі знань 17 (G5) Електроніка, автоматизація та електронні комунікації спеціальності 171 Електроніка (Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка) денної та заочної форм навчання / укладач В. В. Лишук. Луцьк: ЛНТУ, 2026. 100 с.

Комп'ютерний набір

Віктор ЛИШУК

Редактор

Віктор ЛИШУК

Підп. до друку «__»_____2026 р.

Формат 60x84/16. Папір офс.

Гарн. Таймс. Ум. друк. арк. 6,25.

Тираж 50 прим.

Відділ іміджу та промоції

Луцького національного технічного університету

43018 м. Луцьк, вул. Львівська, 75

Друк – ВІП Луцького НТУ

