

Міністерство освіти і науки України
Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка
Фізико-математичний факультет
Кафедра комп'ютерних наук

Кваліфікаційна робота бакалавра

з теми: «Моделювання електромеханічної системи, що містить синхронний електродвигун з кітєподібними полюсами»

Виконав: здобувач вищої освіти групи
KNms1-B21 спеціальності 122 Комп'ютерні
науки **Ковальський Микола Михайлович**

Керівник: Федорчук Володимир
Анатолійович, професор кафедри
комп'ютерних наук, доктор технічних наук,
професор

Рецензент: Оптасюк Сергій Васильович,
кандидат фізико-математичних наук, доцент,
завідувач кафедри фізики

Кам'янець-Подільський 2024

Зміст

Вступ.....	3
Розділ 1 Теоретичні відомості математичного опису синхронних електродвигунів.....	5
1.1. Основні принципи роботи синхронного електродвигуна	5
1.2. Синхронний електродвигун з кігтеподібними полюсами	9
1.3. Математична модель синхронного двигуна з кігтеподібними полюсами	9
РОЗДІЛ 2 Методологія дослідження динаміки роботи синхронного електродвигуна.....	15
2.1. Порівняльна характеристика програмного забезпечення для моделювання.....	15
2.2. Моделювання схеми синхронного двигуна з кігтеподібними полюсами в Scilab/xcos	18
Висновки.....	31
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	32

Вступ

У сучасному дослідженні електромеханічних систем особливу увагу привертає процес моделювання динамічних систем, який є ключовим для розуміння та оптимізації їх роботи. **Об'єктом дослідження** є саме цей процес, що включає в себе комплексний аналіз, розробку та валідацію моделей, які описують поведінку електромеханічних систем у різних режимах експлуатації. Це дозволяє не лише передбачити їхню реакцію на різноманітні зовнішні впливи, але й вдосконалювати їх конструкцію та керування для досягнення максимальної ефективності та надійності [1, 2].

Предметом дослідження є модель електродвигуна з кігтеподібними полюсами, що представляє собою специфічний тип синхронних машин. Такі двигуни відзначаються високою ефективністю, компактністю та здатністю забезпечувати високий крутний момент, що робить їх надзвичайно перспективними для широкого спектру застосувань, включаючи промислові процеси, транспортні засоби, альтернативні джерела енергії та інші сфери. Кігтеподібні полюси забезпечують поліпшене магнітне поле, що сприяє більш ефективному перетворенню енергії та зменшенню втрат, що, в свою чергу, підвищує загальну продуктивність системи.

Мета даної бакалаврської роботи полягає в моделюванні електромеханічної системи, що включає в себе синхронний електродвигун із кігтеподібними полюсами. Основна увага буде приділена вивченню особливостей роботи цих систем, їх математичному опису та аналізу динаміки.

Актуальність теми визначається розширенням можливостей застосування таких електродвигунів у сучасних промислових та побутових системах, а також потенціалом підвищення ефективності та надійності їх роботи.

У роботі буде проведений огляд теоретичних аспектів роботи синхронних електродвигунів, зосереджено увагу на моделях з кігтеподібними полюсами та їх

властивостях. Далі буде розглянута методологія дослідження, вибір програмних засобів та параметрів моделі. Основний акцент роботи буде зроблено на математичному моделюванні, розв'язанні відповідних рівнянь та аналізі отриманих результатів. Робота буде завершена висновками та рекомендаціями щодо можливого використання отриманих результатів у практиці та напрямками подальших досліджень у цій галузі.

Цей дослідницький проект не лише сприятиме розумінню принципів функціонування електромеханічних систем з синхронними електродвигунами з кігтеподібними полюсами, але і матиме вагоме значення для інженерного та технічного розвитку, оскільки він розглядає технологічні вирішення, які можуть бути ефективно використані в різних сферах промисловості та побутової техніки.

Таким чином, дана бакалаврська робота покликана внести свій внесок у науковий та технічний прогрес, допомагаючи розширити розуміння принципів функціонування електромеханічних систем та надати конкретні рекомендації для їх практичного застосування.

Розділ 1 Теоретичні відомості математичного опису синхронних електродвигунів

1.1. Основні принципи роботи синхронного електродвигуна

Синхронний електродвигун (рис 1.1) – це тип обертових електродвигунів, де швидкість обертання ротора синхронізована з частотою змінного струму в статорі. Основні принципи роботи синхронного електродвигуна можна описати так:

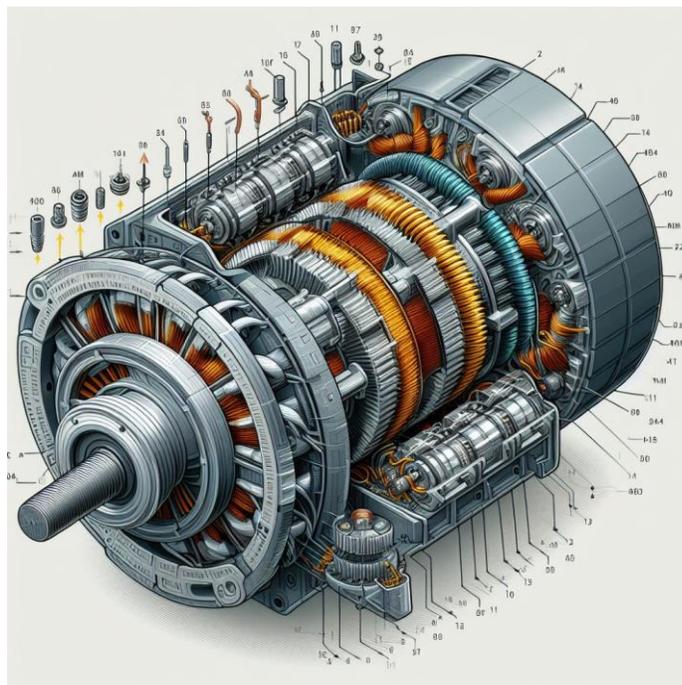


Рис. 1.1 – Синхронний електродвигун

- Створення електромагнітного поля:

Витки статора – у статорі синхронного електродвигуна зазвичай розміщені витки (або обмотки), через які протікає змінний струм. Ці витки можуть бути зроблені з міді або іншого провідника.

Магнітне поле струму – змінний струм протікає через витки статора, вони створюють магнітне поле. Згідно з законами електромагнетизму, струм, що протікає через провідник, генерує магнітне поле навколо себе.

Частота струму. Частота магнітного поля у статорі зазвичай залежить від частоти змінного струму, що живить статор. Чим вища частота струму, тим швидше буде обертатися магнітне поле у статорі.

Число полюсів у статорі також впливає на швидкість обертання магнітного поля. Чим більше полюсів, тим менша швидкість обертання.

Вплив магнітного матеріалу. у деяких випадках статор може містити магнітні матеріали, які підсилюють магнітне поле. Це може бути досягнуто за допомогою постійних магнітів або електромагнітів, в залежності від конкретної конструкції [8].

- Магнітне поле ротора:

Постійні магніти або електромагніти. У роторі синхронного електродвигуна можуть бути використані постійні магніти або електромагніти для створення магнітного поля. Постійні магніти виготовляються з матеріалів, які залишаються магнітними після видалення зовнішнього магнітного поля. Електромагніти працюють на принципі генерації магнітного поля за допомогою протікання електричного струму через котушку, навиту на залізний сердечник.

Направлення магнітного поля. Магнітне поле, створене в роторі, має нахил до синхронізації з магнітним полем статора. Це означає, що полюси магнітів ротора намагаються зіставитися з полюсами магнітного поля статора, створюючи внутрішню синхронізацію.

Обертання ротора. Оскільки магніти розміщені на роторі, вони обертаються разом з ротором. Це створює рухливе магнітне поле, яке впливає на розподіл магнітних полів у просторі.

Стійкість магнітного поля. Магнітне поле ротора зазвичай залишається стійким під час роботи електродвигуна, хоча можуть виникати деякі ефекти, такі як демагнетизація, які можуть впливати на його інтенсивність та напрямок.

- Обертальний момент:

Взаємодія магнітних полів. У синхронному електродвигуні має місце взаємодія магнітних полів статора і ротора. Магнітні поля, створені електричними струмами, що протікають через обмотки статора, і магнітні поля, створені постійними магнітами або електромагнітами на роторі, взаємодіють між собою [9].

Створення оберտального моменту – ця взаємодія призводить до появи оберտального моменту. Обертальний момент виникає через зміну енергії, що виникає внаслідок взаємодії магнітних полів, і призводить до обертання ротора.

Напрямок обертального моменту – визначається співвідношенням магнітних полів статора і ротора. Цей момент спрямований так, щоб змусити ротор обертатися в напрямку, який співпадає з напрямком обертання магнітного поля статора.

Залежність від навантаження. Обертальний момент залежить від навантаження, що діє на ротор. Чим більше навантаження, тим більший обертальний момент потрібно забезпечити для забезпечення обертання ротора з потрібною швидкістю[12].

- Синхронізація швидкості:

Вплив частоти струму. Частота змінного струму, яка живить статор, визначає швидкість обертання магнітного поля статора. Чим вища частота струму, тим швидше обертається магнітне поле. Це, в свою чергу, визначає швидкість обертання ротора.

Кількість полюсів статора. Кількість полюсів у статорі також впливає на швидкість обертання ротора. Чим більше полюсів у статорі, тим менша швидкість обертання ротора при одній і тій же частоті струму.

Синхронна швидкість – це та швидкість, при якій магнітне поле статора обертається з точністю до одного повного оберту за кожен період змінного струму. Це означає, що ротор обертається з точною швидкістю, щоб синхронізуватися з обертанням магнітного поля статора.

Залежність від навантаження. Швидкість ротора може змінюватися в залежності від навантаження і електричної потужності, яку необхідно витратити для підтримки заданої швидкості[13].

- Контроль швидкості

Інвертор частоти – це один з найпоширеніших методів контролю швидкості синхронних електродвигунів. Інвертор частоти приймає постійний змінний струм і перетворює його на змінний струм з регульованою частотою та напругою. Це дозволяє змінювати швидкість обертання ротора відповідно до вимог процесу.

Векторне керування. Цей метод контролю швидкості використовує інвертор частоти разом зі спеціалізованими алгоритмами керування, які дозволяють керувати не лише швидкістю, але й струмами та напругами у системі. Це дозволяє досягти більш точного і динамічного керування двигуном.

Положення датчика. Деякі сучасні синхронні електродвигуни використовують датчики положення для вимірювання швидкості обертання ротора. Це дозволяє точно визначати швидкість і забезпечує можливість керування в реальному часі.

PID-регулятори. У деяких системах керування використовуються PID-регулятори для автоматичного регулювання швидкості на основі відхилення від заданої швидкості. Це дозволяє забезпечити стабільну роботу системи навіть при зміні умов роботи.

Задання швидкості. Одним з основних аспектів контролю швидкості є можливість задавати потрібну швидкість вручну або автоматично. Це може бути виконано за допомогою пульта керування, програмного забезпечення або інших засобів керування [14].

1.2. Синхронний електродвигун з кігтеподібними полюсами

Синхронні електродвигуни з кігтеподібними полюсами є специфічним типом синхронних машин, які мають особливу конструкцію полюсів у формі кігтів або зубів, які виходять з ротора. Ось деякі особливості цих електродвигунів:

- **Конструкція полюсів.** Полюси у синхронних електродвигунах з кігтеподібними полюсами мають форму, схожу на кігті або зуби, які виступають з поверхні ротора. Ця конструкція дозволяє покращити зчеплення між статором і ротором та забезпечити стабільну роботу при великих обертальних швидкостях.

- **Висока швидкість.** Синхронні електродвигуни з кігтеподібними полюсами зазвичай мають високі обертальні швидкості порівняно з іншими типами синхронних машин. Це забезпечує їх ефективність у високошвидкісних застосуваннях, таких як турбіни, млини та компресори [6].

- **Велика потужність.** Завдяки своїй конструкції та високій швидкості обертання, синхронні електродвигуни з кігтеподібними полюсами можуть мати велику потужність. Це робить їх ідеальними для використання в потужних промислових механізмах.

- **Стабільність роботи.** Конструкція з кігтеподібними полюсами дозволяє забезпечити стабільну роботу електродвигуна під час роботи при високих навантаженнях та обертальних швидкостях. Це робить їх досить надійними в експлуатації.

- **Ефективність.** Синхронні електродвигуни з кігтеподібними полюсами можуть мати високий коефіцієнт корисної дії і ефективність роботи, що робить їх економічно вигідними для використання в різних галузях промисловості.

1.3. Математична модель синхронного двигуна з кігтеподібними полюсами

Наразі, в електроприводах глибинних насосних установок (ГНУ) переважно використовуються асинхронні електродвигуни (АД) з короткозамкненим ротором.

Характер навантаження на валу ГНУ суттєво впливає на електричні параметри та якість напруги на контактах АД. Момент на валу АД ГНУ змінюється циклічно від значень, близьких до моменту холостого ходу, до перевантажень у 1,5—1,8 разів більше ніж номінальне навантаження з частотою 4—15 циклів за хвилину. Розбіжність по фазі і частоті циклічного навантаження для великої кількості ГНУ призводить до того, що напруга на АД пульсує за складним законом, що погіршує енергетичні характеристики роботи АД ГНУ. Пульсації напруги доходять до 15% від номінального значення, а коливання і короточасні зниження напруги при коротких замиканнях можуть досягати 40% протягом 0,2—4 с. У зв'язку з цим у системах електропостачання та електрообладнанні нафтовидобутку спостерігаються підвищені втрати електроенергії (до 30—40% від загальної потужності, споживаної промислом), встановлення електродвигунів з підвищеною потужністю та інші негативні явища.

Один з методів зниження втрат електроенергії на нафтових промислах полягає у використанні у частині верстатів-гойдалок безконтактних синхронних електродвигунів із зовнішнім магнітопроводом і ротором з кігтеподібними полюсами. Ці електродвигуни, працюючи з коефіцієнтом потужності $\cos \varphi$ близьким до одиниці, розвантажують нафтопромислові мережі від реактивної потужності, що знижує величину втрат активної потужності та підвищує якість електропостачання.

Для забезпечення нормальної роботи синхронного електродвигуна необхідно мати достатній запас стійкості при зниженні напруги живлення та зміні моменту на його валу. Тому при проектуванні електромеханічних систем, включаючи окремі вузли і всі електроприводи в цілому, необхідно проводити дослідження їхньої динамічної стійкості.

Для вирішення завдань дослідження стійкості електроприводів існує ряд методів. У випадках, коли розглядається задача дослідження стійкості

електроприводу за одночасної зміни навантаження, напруги живлення, струму збудження та інших параметрів, ефективним методом є математичне моделювання.

Використання математичного моделювання дозволяє аналізувати різноманітні сценарії роботи електроприводів і визначати їхню стійкість у різних умовах. Такий підхід дозволяє забезпечити надійність та ефективність роботи систем електроприводу в різних умовах експлуатації.

Математичний опис синхронного електродвигуна може бути здійснений за допомогою системи нелінійних диференціальних рівнянь Парка-Горєва. Ці рівняння враховують динаміку електромагнітного поля, механічну частину та лінії електропередач і мають такий вигляд [7, 11].

Рівняння рівноваги напруги в контурах статора і ротора:

$$\begin{cases} U_d = \frac{d\psi_d}{dt} - \psi_d(1+S) + r_s i_d; \\ U_q = \frac{d\psi_q}{dt} - \psi_q(1+S) + r_s i_q; \end{cases} \quad (1.1)$$

$$U_B = \frac{d\psi_B}{dt} + r_B i_B; \quad (1.2)$$

$$-\frac{d\psi_D}{dt} = -r_D i_D; \quad (1.3)$$

$$-\frac{d\psi_Q}{dt} = -r_Q i_Q, \quad (1.4)$$

де U_d , U_q — напруги на контактах електродвигуна по осях d і q , U_B — напруга збудження; δ — електричний кут машини; S — ковзання; ψ_d , ψ_q , ψ_B , ψ_D , ψ_Q — потокозчеплення статорних обмоток, обмотки збудження та демпферних обмоток відповідно; i_d , i_q — струм статора за осями d і q ; i_B — струм обмотки збудження; i_D , i_Q — струми демпферних обмоток; r_s , r_B , r_D , r_Q — величини опору статорної обмотки, обмотки збудження та демпферних обмоток.

Рівняння регулятора збудження:

$$U = \sqrt{U_d^2 + U_q^2}, \quad (1.5)$$

$$I = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}, \quad (1.6)$$

$$U_B = (K_U U + K_I I) K_B r_B, \quad (1.7)$$

де K_U , K_I — коефіцієнти регулювання; I — струм статора; U — напруга на електродвигуні; K_B — коефіцієнт, що залежить від схеми випрямлення.

Рівняння рівноваги напруги лінії живлення:

$$U_{cd} = U_c \sin \delta; \quad U_{cq} = U_c \cos \delta; \quad (1.8)$$

$$\begin{cases} U_d = U_{cd} - x_\ell \frac{di_d}{dt} - r_\ell i_d + x_\ell i_q (1+S); \\ U_q = U_{cq} - x_\ell \frac{di_q}{dt} - r_\ell i_q + x_\ell i_d (1+S), \end{cases} \quad (1.9)$$

де U_c — напруга мережі, U_{cd} , U_{cq} — напруга лінії живлення по осях d і q ; r_ℓ , x_ℓ — активний і індуктивний опори лінії живлення відповідно.

Рівняння електромагнітного моменту:

$$M_M = x_q i_q i_d - (x_d i_d + x_{ad} i_B) i_q. \quad (1.10)$$

де x_d , x_q — індуктивні опори демпферних обмоток за осями d і q ; x_B — індуктивний опір обмотки збудження.

Рівняння рівноваги моментів на валу двигуна:

$$T_J \frac{dS}{dt} = M_T - M_M; \quad (1.11)$$

$$S = \frac{d\delta}{dt}; \quad (1.12)$$

$$M_T = M_{T_{cp}} + M_a \sin(\Omega t + \beta), \quad (1.13)$$

де T — механічна стала часу приводних мас двигуна і нафтопромислового механізму; M_T — момент опору на валу двигуна; M_a — амплітуда змінної складової моменту; $M_{T_{cp}}$ — середнє значення моменту опору; Ω — кутова частота зміни моменту; β — початкова фаза.

Для зручності, при синтезі моделі, проведемо деякі перетворення.

Розв'язавши систему алгебраїчних рівнянь **Error! Reference source not found.**, одержимо вирази для струмів:

$$\begin{cases} i_d = \frac{\psi_d x_B x_D + x_{ad}^2 (\psi_D + \psi_B - \psi_d) - x_{ad} (\psi_D x_B + \psi_B x_D)}{x_d x_B x_D + 2x_{ad}^3 - x_{ad}^2 (x_B + x_d + x_D)}; \\ i_B = \frac{\psi_B x_d x_D + x_{ad}^2 (\psi_d + \psi_D - \psi_B) - x_{ad} (\psi_D x_d + x_D \psi_d)}{x_d x_B x_D + 2x_{ad}^3 - x_{ad}^2 (x_B + x_d + x_D)}; \\ i_D = \frac{x_d x_B \psi_D + x_{ad}^2 (\psi_B + \psi_d - \psi_D) - x_{ad} (x_B \psi_d + \psi_B x_d)}{x_d x_B x_D + 2x_{ad}^3 - x_{ad}^2 (x_B + x_d + x_D)}, \end{cases} \quad (1.14)$$

$$\begin{cases} i_Q = \frac{\psi_q x_{aq} - \psi_Q x_q}{x_{aq}^2 - x_Q x_q}; \\ i_q = \frac{x_{ad} \psi_Q - x_Q \psi_q}{x_{aq}^2 - x_Q x_q}. \end{cases} \quad (1.15)$$

Початкові значення змінних доцільно задавати в точках перегину навантажувальної кривої, тобто в точках, де похідні кута ковзання та струму демпферних контурів близькі до нульових значень. Розрахунок початкових умов при постійному режимі обчислюється шляхом розв'язування системи рівнянь:

$$U_d = U_c \sin \delta; \quad U_q = U_c \cos \delta; \quad (1.16)$$

$$U = \sqrt{U_d^2 + U_q^2}, \quad (1.17)$$

$$\begin{cases} i_d = \frac{r_s U_d + x_q (U_q - x_{ad} i_B)}{x_d x_q + r_s^2}; \\ i_q = \frac{r_s (U_q - x_{ad} i_B) - x_d U_d}{x_d x_q + r_s^2}, \end{cases} \quad (1.18)$$

$$I = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}, \quad (1.19)$$

$$i_B = (K_U U + K_I I) K_B, \quad (1.20)$$

$$\begin{cases} U_{cd} = U_d - r_\ell i_d + x_\ell i_q; \\ U_{cq} = U_q - r_\ell i_q + x_\ell i_d, \end{cases} \quad (1.21)$$

$$\begin{cases} \psi_d = x_d \dot{i}_d + x_{ad} \dot{i}_B; \\ \psi_q = x_q \dot{i}_q, \end{cases} \quad (1.22)$$

$$M_M = X_q \dot{i}_q \dot{i}_d - (X_d \dot{i}_d + X_{ad} \dot{i}_B) \dot{i}_q, \quad (1.23)$$

$$M_T = M_M. \quad (1.24)$$

де початкові значення потокозчеплення і потоків демпферних контурів, а також ковзання приймаються рівними нулю.

РОЗДІЛ 2 **Методологія дослідження динаміки роботи синхронного електродвигуна**

2.1. Порівняльна характеристика програмного забезпечення для моделювання

Програмне забезпечення відіграє важливу роль у вивченні та аналізі роботи систем електроприводу, дозволяючи виконувати віртуальні експерименти, тестувати різні конфігурації та оптимізувати параметри. У даному розділі буде висвітлено кілька програмних продуктів, серед яких буде обрано один, який найкраще задовольнить критерії вибору програмного забезпечення

Основними критеріями відбору було обрано: відкрите програмне забезпечення, моделювання електромеханічних систем, візуалізація.

GNU Octave (рис. 2.1) – мова програмування високого рівня. Забезпечує зручний інтерфейс командного рядка для чисельного розв’язування лінійних і нелінійних задач, а також для виконання інших чисельних експериментів з використанням мови, яка переважно сумісна з Matlab. Також може використовуватися як пакетно-орієнтована мова. GNU Octave володіє широкими інструментами для розв’язування звичайних задач чисельної лінійної алгебри, знаходження коренів нелінійних рівнянь, інтегрування звичайних функцій, операцій з поліномами та інтегрування звичайних диференціальних та диференціально-алгебраїчних рівнянь. GNU Octave легко розширюється та налаштовується за допомогою визначених користувачем функцій, написаних власною мовою Octave, або за допомогою динамічно завантажуваних модулів, написаних на C++, C, Fortran чи іншими мовами. GNU Octave також є програмним забезпеченням, яке вільно поширюється [3].

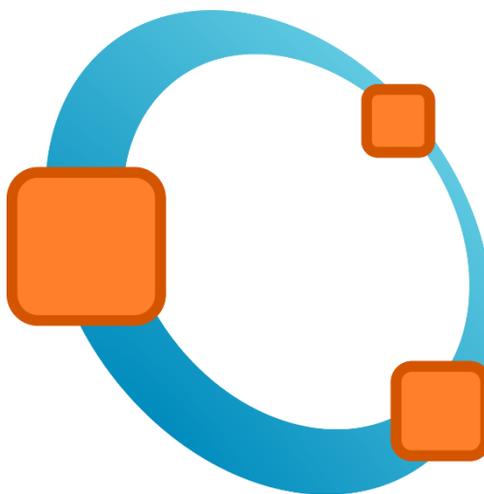


Рис. 2.1 – GNU Octave

MATLAB (рис2.2) - це інтегроване середовище для чисельних обчислень та програмування, яке широко використовується у наукових, інженерних та технічних дослідженнях. Програмний продукт MATLAB пропонує низку інструментів та функцій для розв'язання різноманітних завдань, таких як математичні обчислення, моделювання систем, обробка сигналів, статистика, машинне навчання та багато інших[4].



Рис. 2.2 – MATLAB

Основні характеристики та можливості MATLAB:

1. Мова програмування MATLAB (М-файли) – мова програмування MATLAB дозволяє користувачам створювати власні скрипти та функції для вирішення конкретних завдань.

2. Робота з матрицями та векторами. MATLAB спеціалізується на роботі з матрицями та векторами, що робить його потужним інструментом для лінійної алгебри та чисельних обчислень.

3. Візуалізація даних. Засоби для відображення графіків та діаграм дозволяють користувачам аналізувати та візуалізувати дані.

4. Спеціалізовані інструменти. MATLAB має вбудовані інструменти для роботи з сигналами та обробки зображень, обчислення статистики, моделювання систем, розв'язання диференціальних рівнянь та інше.

5. Тестування та валідація. MATLAB надає інструменти для тестування та валідації програм, що дозволяє розробникам перевіряти правильність свого коду.

6. Можливості роботи з іншими мовами: MATLAB взаємодіє з іншими мовами програмування, що дозволяє використовувати його в різних областях розробки.

Scilab (рис. 2.3) - це потужне програмне середовище для наукових обчислень та інженерних досліджень, що має декілька переваг у порівнянні з MATLAB та Octave, особливо коли мова йде про моделювання електромеханічних систем:

- Відкрите програмне забезпечення: Scilab - це вільне програмне забезпечення з відкритим кодом, що означає, що ви можете використовувати його безкоштовно та мати можливість налаштувати його відповідно до своїх потреб.

- Математичні можливості: Scilab має багатий набір математичних функцій і пакетів для розв'язання різних завдань, включаючи чисельні методи, розв'язання систем лінійних та не лінійних рівнянь, інтегрування, оптимізацію та аналіз сигналів [5].

- Моделювання електромеханічних систем: Scilab підтримує моделювання електромеханічних систем і обробку сигналів, що дозволяє розробляти та аналізувати системи, що містять синхронні електродвигуни з кігтеподібними полюсами.

- Візуалізація: Scilab має потужні засоби для візуалізації даних та результатів обчислень, включаючи можливість побудови графіків, діаграм, теплових карт і т.д.



Рис. 2.3 – Scilab

2.2. Моделювання схеми синхронного двигуна з кігтеподібними полюсами в Scilab/xcos

Використовуючи програмний продукт Scilab/xcos була побудована модель синхронного двигуна з кігтеподібними полюсами. Кожне рівняння буде підсистемою одної великої системи, яка буде імітувати роботу двигуна.

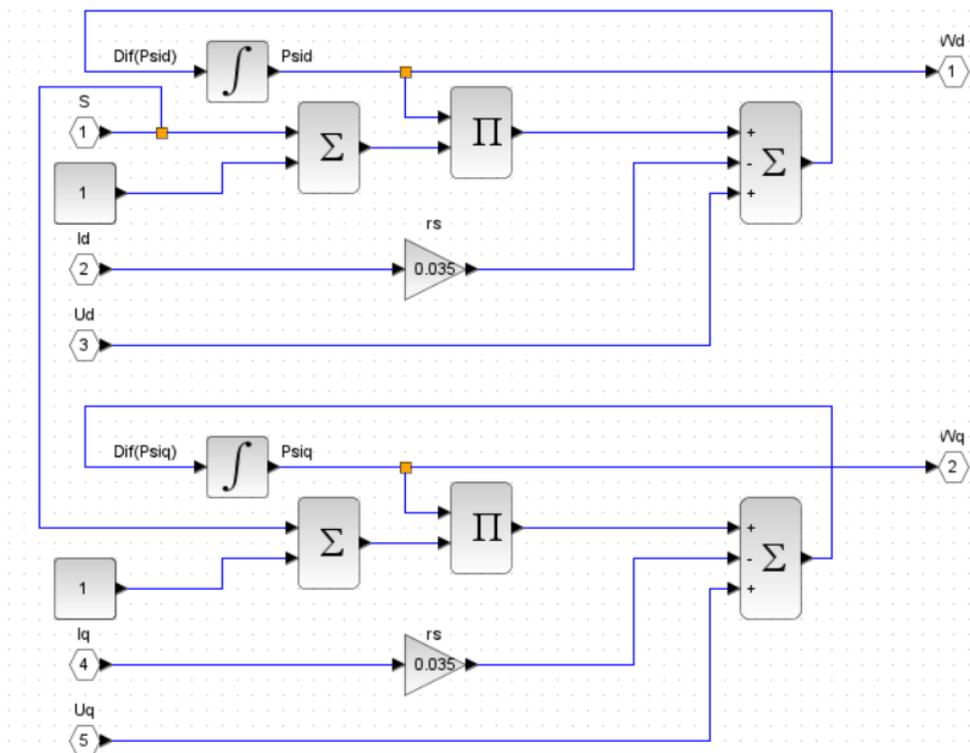


Рис. 2.4 – Схема рівняння (1.1)

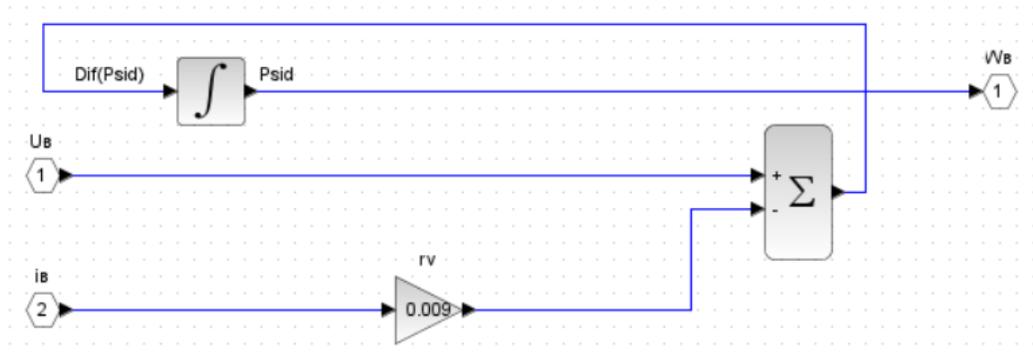


Рис. 2.5 – Схема рівняння (1.2)

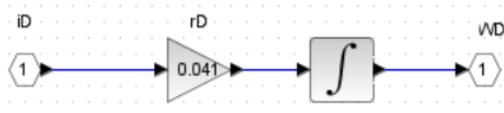


Рис. 2.6 – Схема рівняння (1.3)

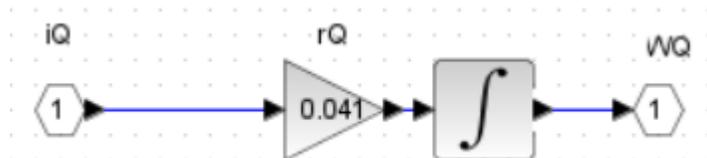


Рис. 2.7 – Схема рівняння (1.4)

На рис. 2.4 – 2.7 використовуються інтегратори на вхід яких подається похідна, а на виході отримуємо результат похідної.

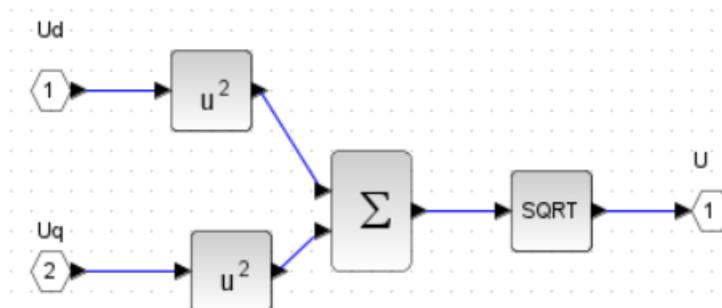


Рис. 2.8 – Схема рівняння (1.5)

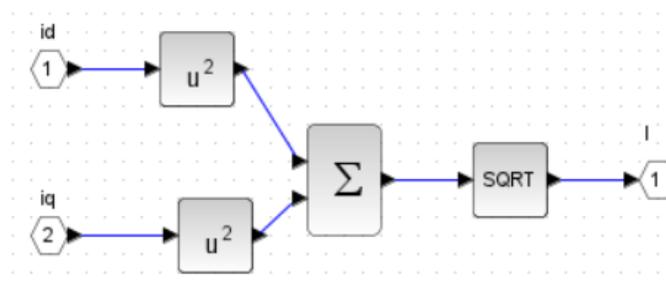


Рис. 2.9 – Схема рівняння (1.6)

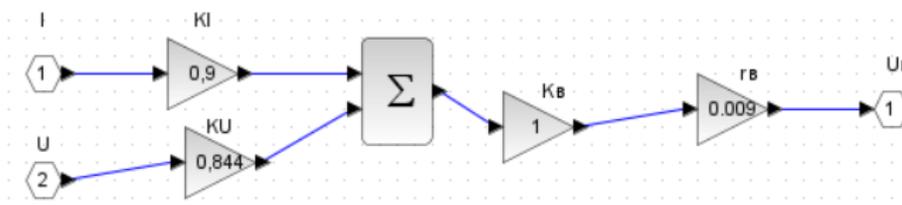


Рис. 2.10 – Схема рівняння (1.7)

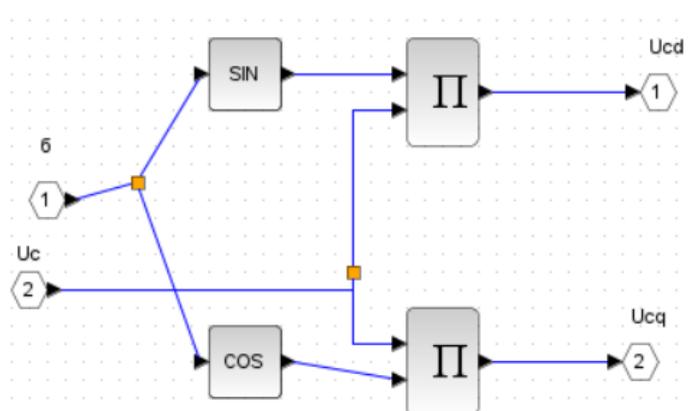


Рис. 2.11 – Схема рівняння (1.8)

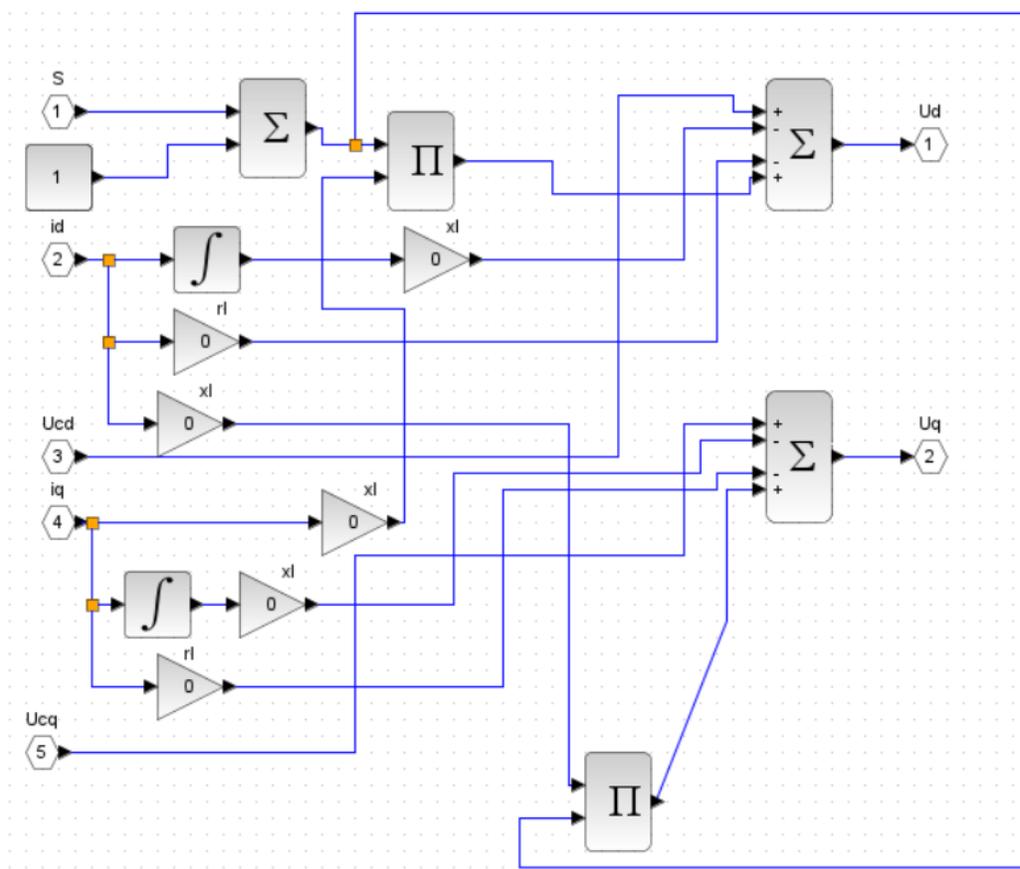


Рис. 2.12 – Схема рівняння (1.9)

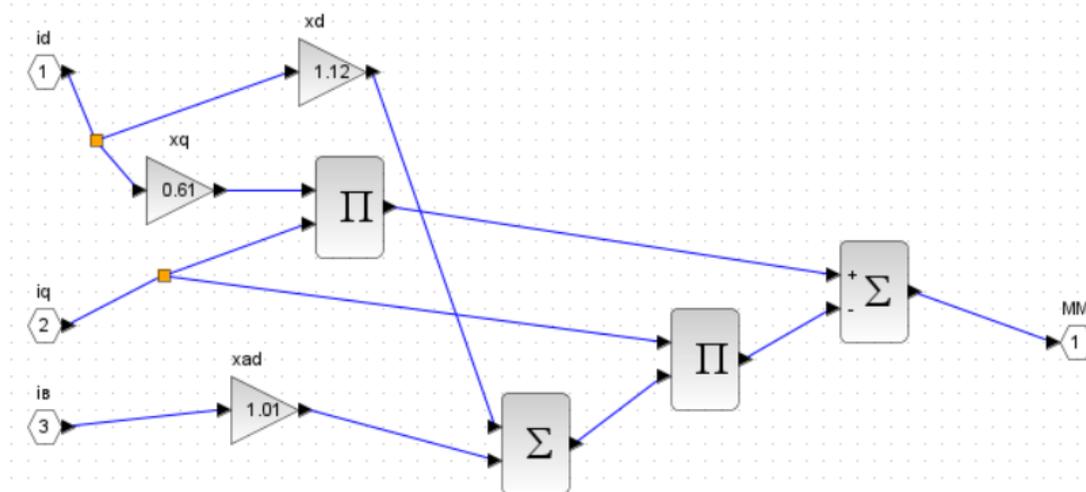


Рис. 2.13 – Схема рівняння (1.10)

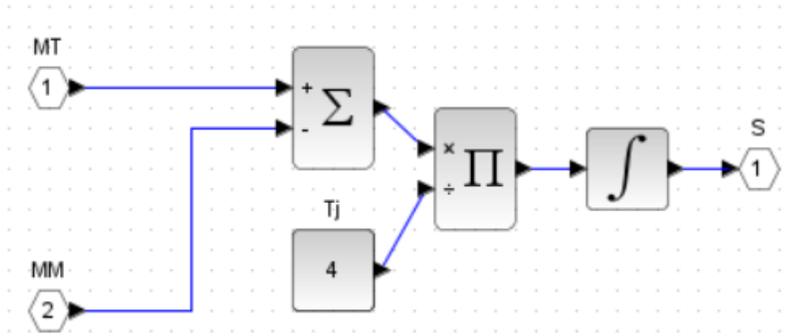


Рис. 2.14 – Схема рівняння (1.11)



Рис. 2.15 – Схема рівняння (1.12)

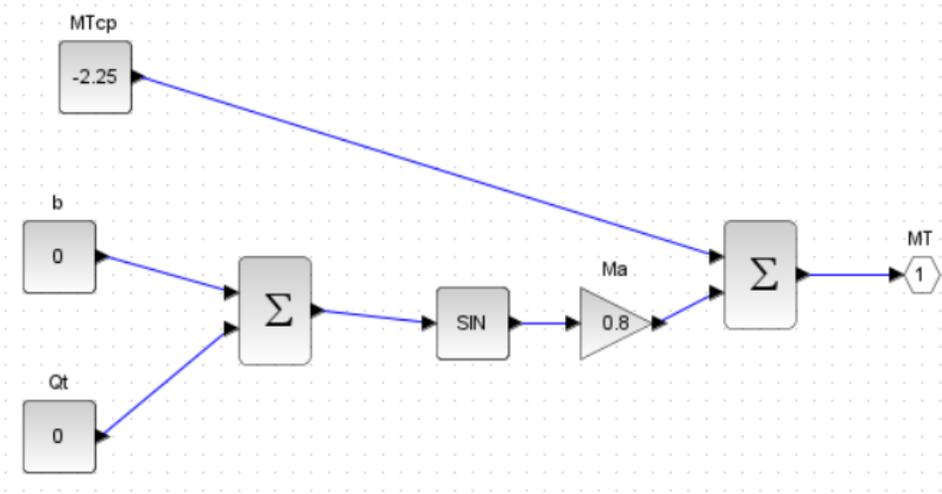


Рис. 2.16 – Схема рівняння (1.13)

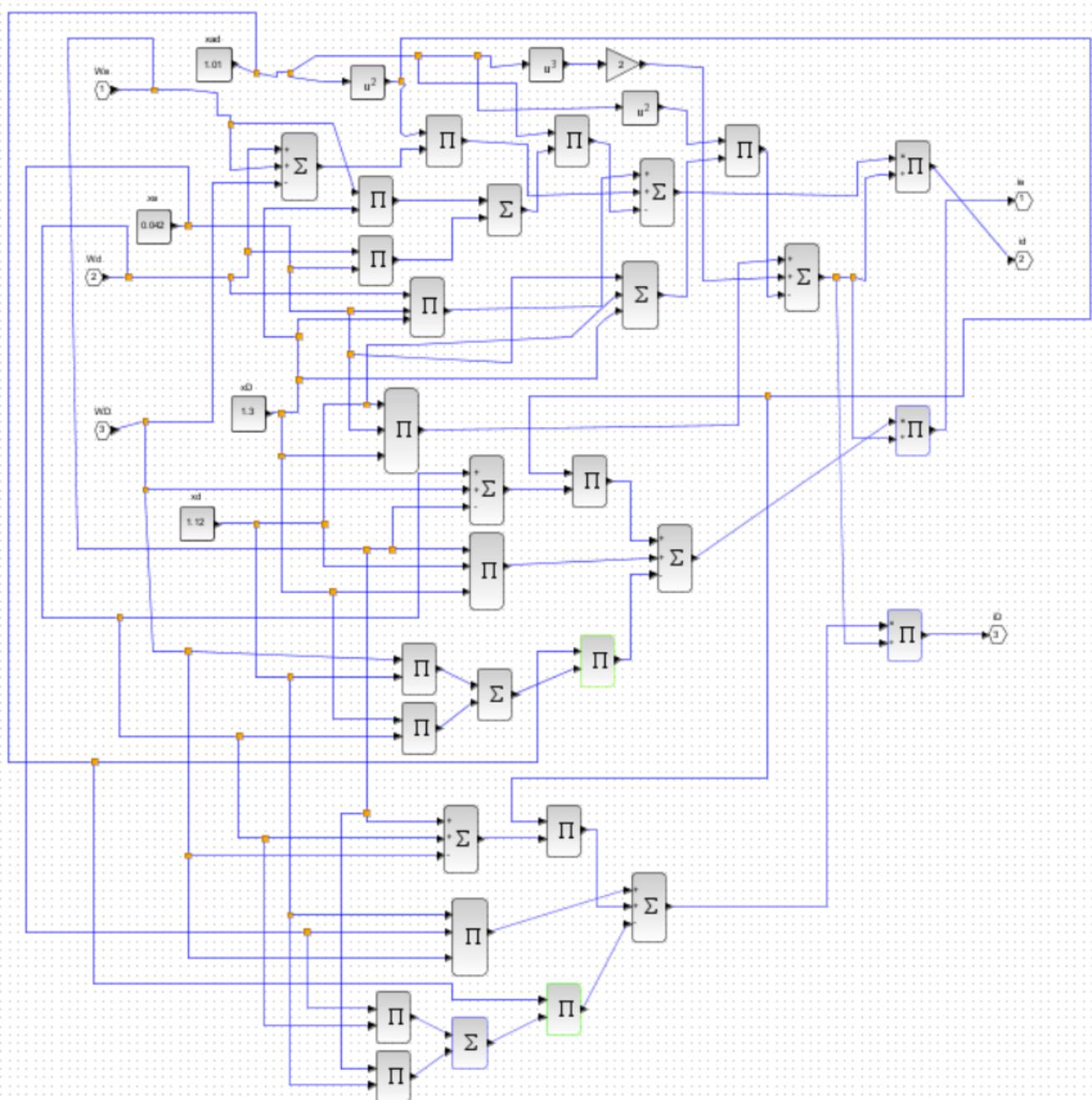


Рис. 2.17 – Схема рівняння (1.14)

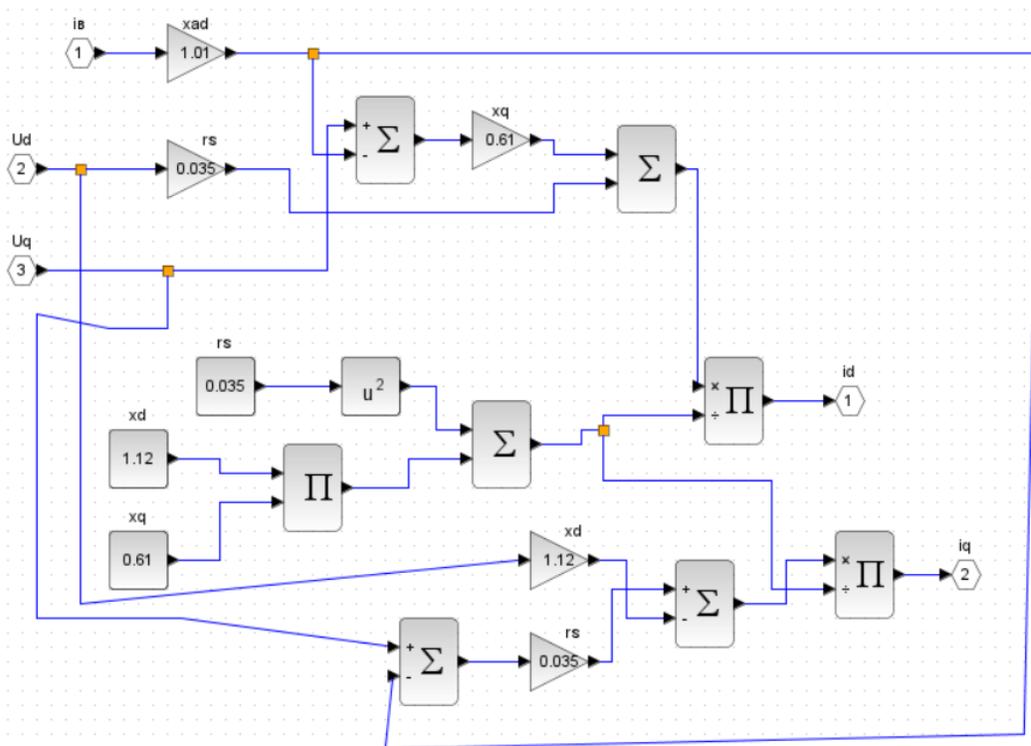


Рис. 2.21 – Схема рівняння (1.18)

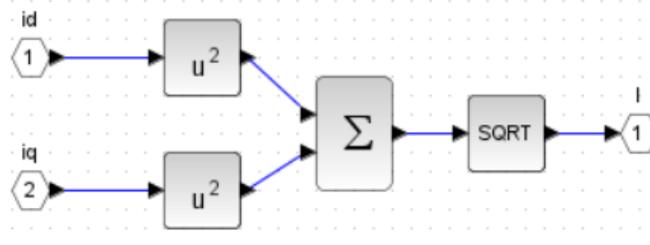


Рис. 2.22 – Схема рівняння (1.19)

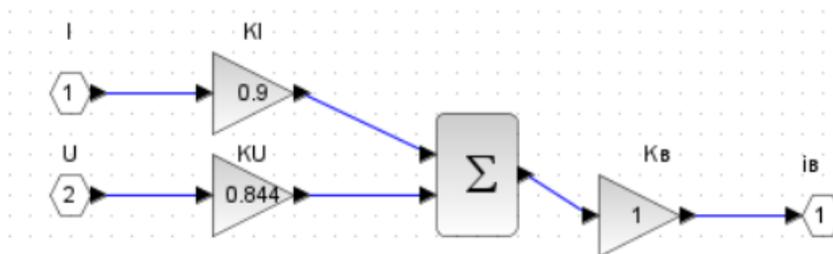


Рис. 2.23 – Схема рівняння (1.20)

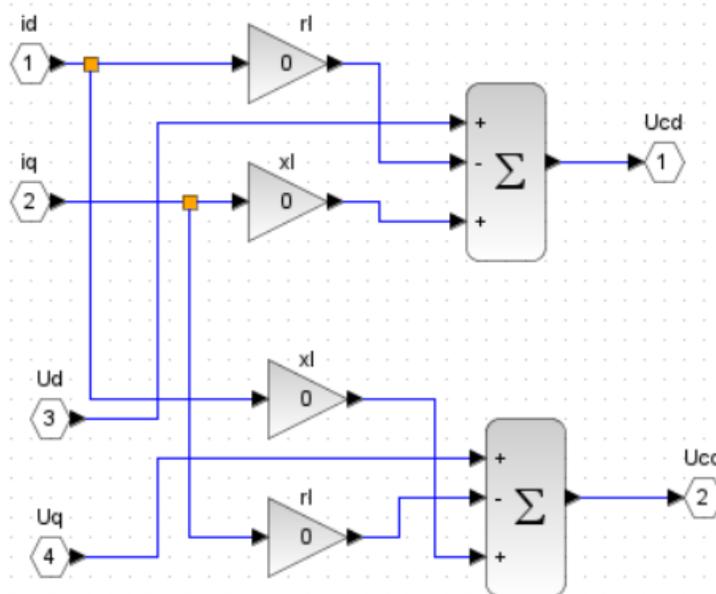


Рис. 2.24 – Схема рівняння (1.21)

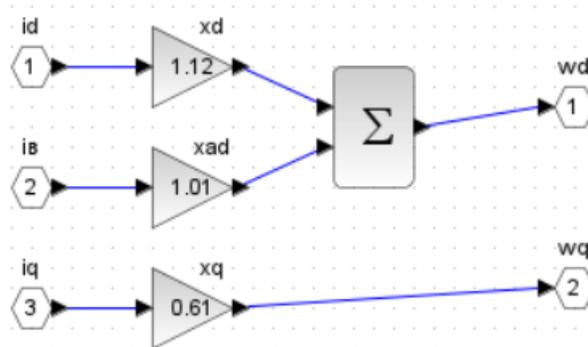


Рис. 2.25 – Схема рівняння (1.22)

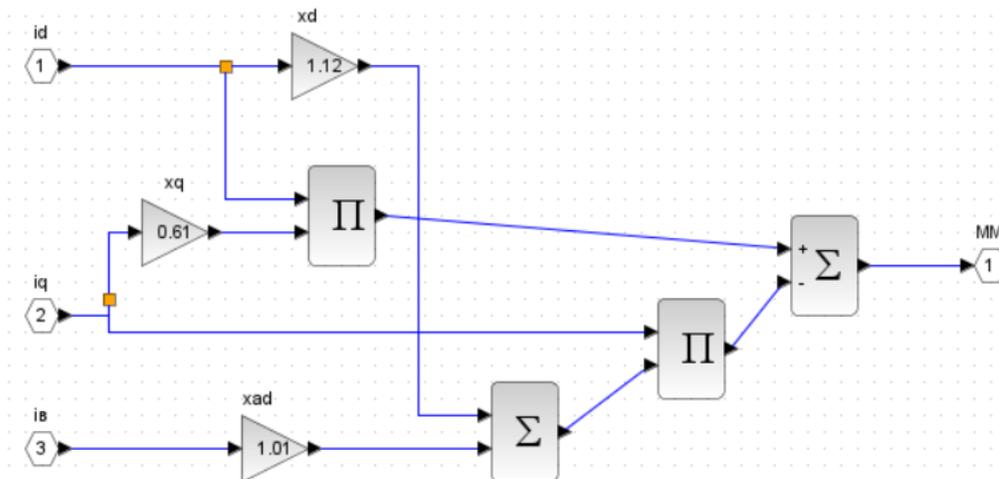


Рис. 2.26 – Схема рівняння (1.23)

Виходячи з рівнянь **Error! Reference source not found.** — **Error! Reference source not found.**, **Error! Reference source not found.**, **Error! Reference source not found.**, одержуємо структурну схему моделі електроприводу, яка зображена на рис. 2.27, де нумерація структурних блоків відповідає нумерації справа від крапки реалізованих ними залежностей. Аналогічно із системи рівнянь **Error! Reference source not found.** — **Error! Reference source not found.** одержуємо структурну схему блоку обчислення початкових умов, зображену на рис. 2.28.

Для електропривода на основі синхронного двигуна CM-72-4 параметри рівнянь мають такі значення: $r_S = 0,035$; $r_D = r_Q = 0,041$; $r_B = 0,009$; $x_q = 0,61$; $x_d = 1,12$; $x_{ad} = x_{aq} = 1,01$; $x_B = 0,042$; $x_Q = 0,053$; $x_D = 1,3$; $K_B = 1$; $T_j = 4$.

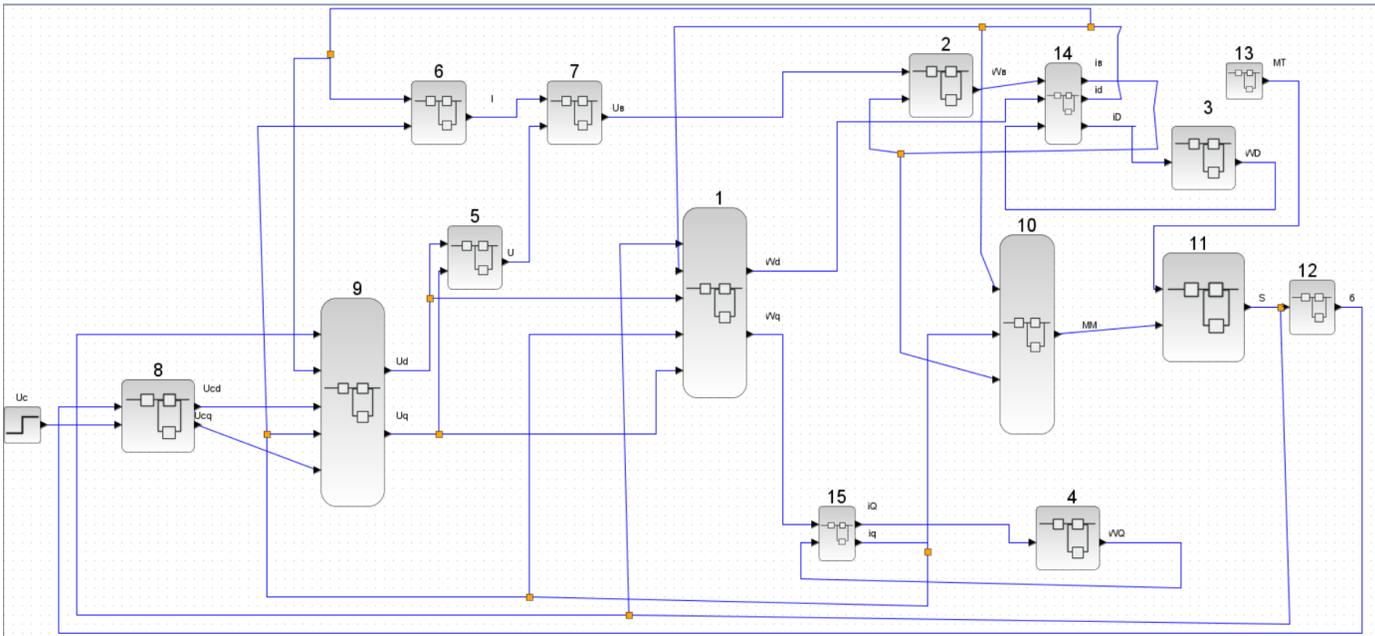


Рис. 2.27 – Scilab/xcos-модель електропривода

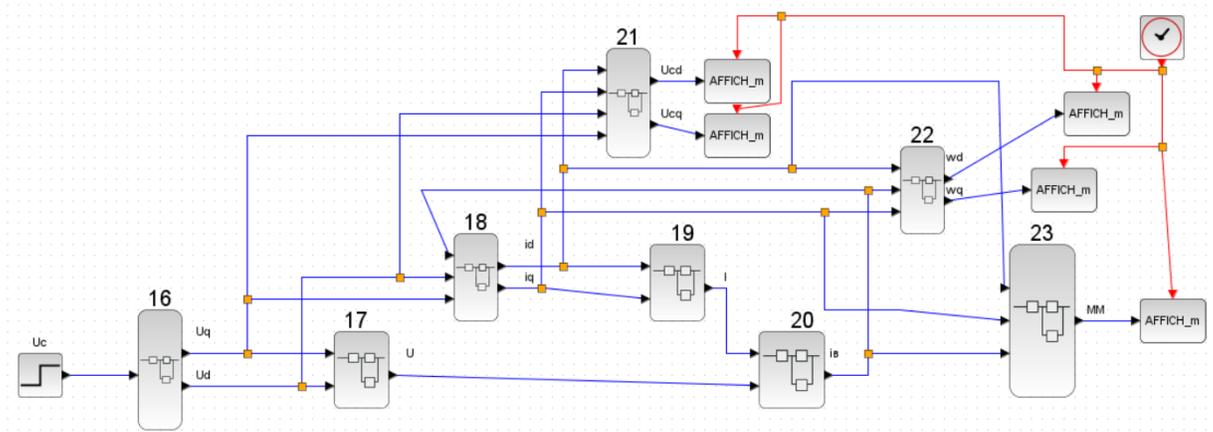


Рис. 2.28 – Scilab/xcos-модель блоку обчислень початкових умов

Запас стійкості визначається виразом:

$$K = \frac{M_k - M_p}{M_p},$$

де M_k і M_p відповідно критичне й номінальне значення моменту на валу електродвигуна. Для знаходження границі стійкості застосовувався метод режиму поступового навантаження, яке може здійснюватися шляхом зміни як одного з параметрів, так і одночасною зміною декількох з них [7, 10].

Проведене дослідження також виявило, що точність відтворення основних властивостей об'єкта залежить від включення спрощень у модель:

- Якщо не враховувати вплив демпферних обмоток електродвигуна, точність моделі зменшується на 9,9%.

Це свідчить про важливість урахування всіх значущих факторів при моделюванні, оскільки навіть невеликі спрощення можуть значно впливати на точність та достовірність результатів.

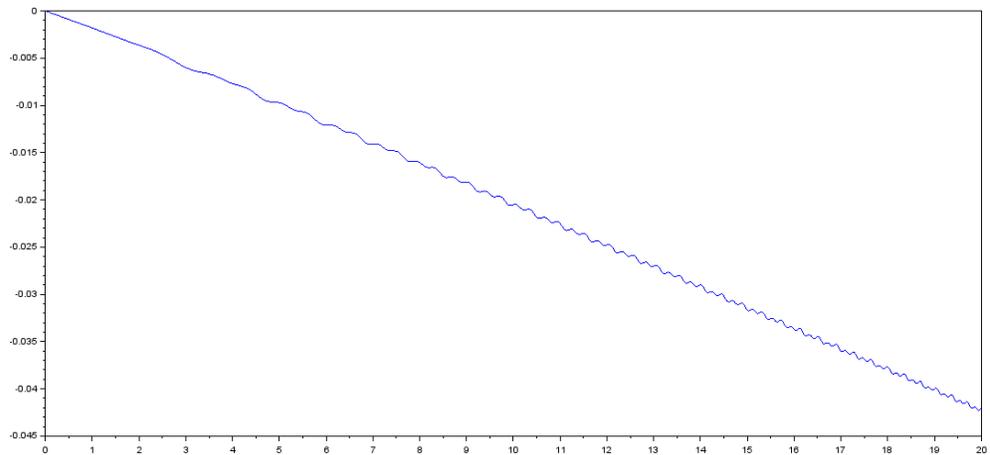


Рис. 2.29 - Зміна параметра S синхронного електродвигуна при увімкненні напруги живлення в мережі

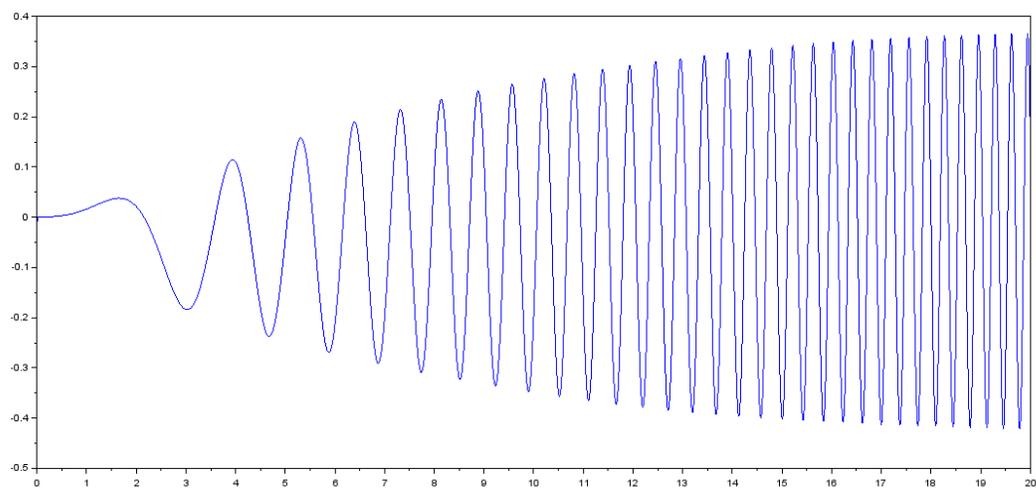


Рис. 2.30 - Зміна параметра i_q синхронного електродвигуна при увімкненні напруги живлення в мережі

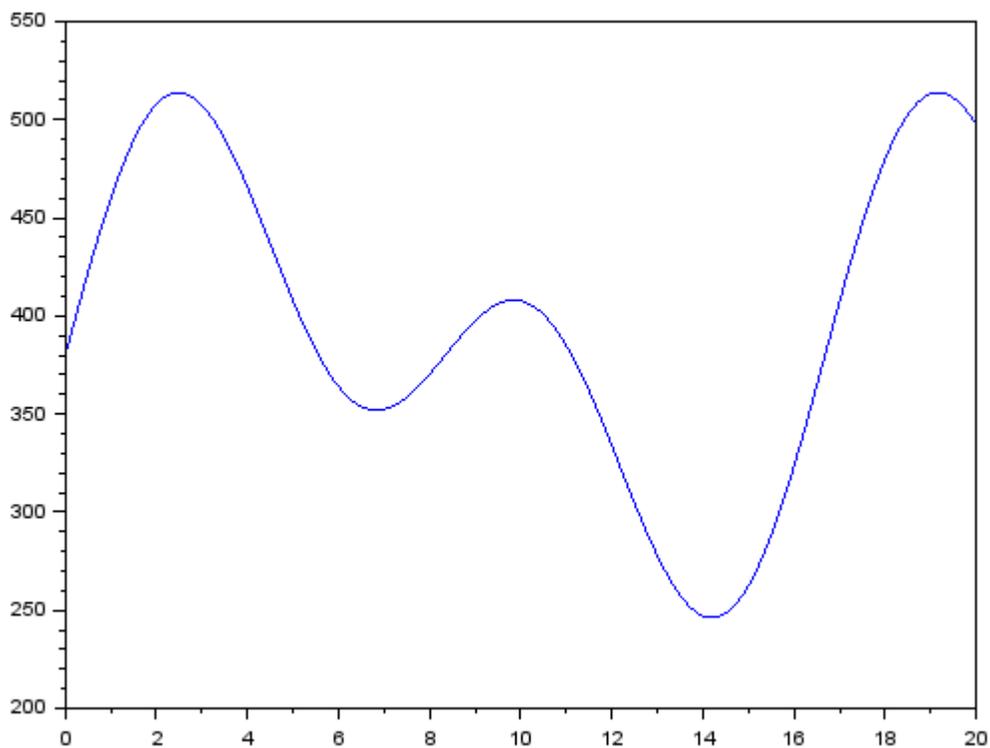


Рис. 2.31 - Зміна параметра U синхронного електродвигуна

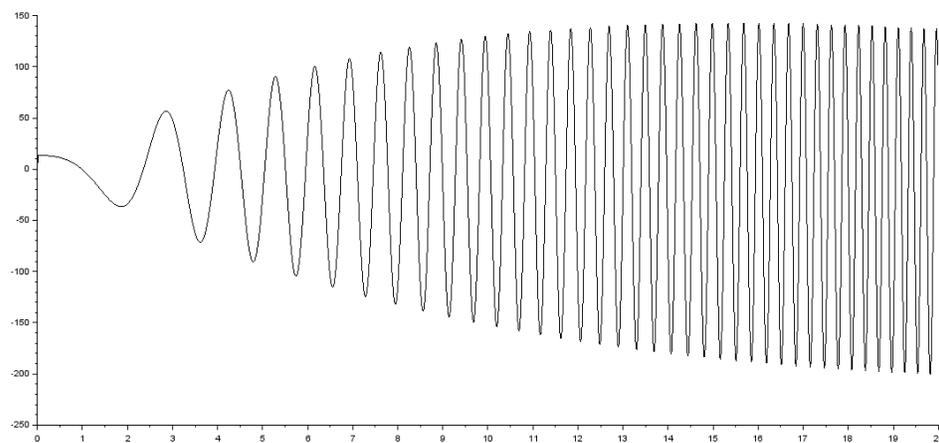


Рис. 2.32 - Зміна параметра i_d синхронного електродвигуна при увімкненні напруги живлення в мережі

Висновки

У процесі виконання бакалаврської роботи було проведено детальне моделювання електромеханічної системи, що містить синхронний електродвигун з кігтеподібними полюсами.

У розділі, присвяченому програмному забезпеченню для моделювання, було використано Scilab/xcos для побудови системи електродвигуна. Scilab/xcos є корисним інструментом для симуляції різних систем, що дозволяє економити час та кошти під час розробки нових продуктів. Отримані результати симуляції дозволяють висунути практичні рекомендації щодо налаштування системи для досягнення бажаних характеристик.

Моделювання показало, що електродвигуни з кігтеподібними полюсами забезпечують високу ефективність перетворення енергії, що є критично важливим для застосувань, де необхідна максимальна продуктивність при мінімальних енергетичних втратах. Також дослідження показали, що кігтеподібні полюси сприяють кращому магнітному взаємозв'язку між статором і ротором, що покращує динамічні характеристики двигуна, зокрема, його здатність до швидкого реагування на зміни навантаження.

Завдяки симулюванню електродвигуна можна бачити його роботу при різних навантаженнях та параметрах, що дозволяє експериментувати та розробляти оптимальні рішення.

Результати досліджень підтверджують, що використання безконтактних синхронних електродвигунів з зовнішніми магнітопроводами та роторами з кігтеподібними полюсами у електроприводах верстатів-гойдалок ГНУ є доцільним.

У результаті виконання бакалаврської роботи отримано глибше розуміння автоматизованих електроприводів та їхнього впливу на сучасну промисловість, що може бути корисним для подальших досліджень у галузі автоматизації та керування системами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. А. А. Видмиш, Л. В. Ярошенко. Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1. / Навчальний посібник. – Вінниця: ВНАУ, 2020. – 387 с.
2. Васильєв Б.Г. Електропривід. Енергетика електроприводу: Підручник: Солон-прес, 2015. - 268 с.
3. Гетьман К.Р. Використання gnu octave в освітньому процесі URL:
[https://informatika.udpu.edu.ua/?page_id=7590#:~:text=%20Використання %20GNU%20Octave%20в%20освітньому,засобів%20для%20досягнення%20поставлених%20задач](https://informatika.udpu.edu.ua/?page_id=7590#:~:text=%20Використання%20GNU%20Octave%20в%20освітньому,засобів%20для%20досягнення%20поставлених%20задач).
4. Документація MATLAB: URL:
https://uk.mathworks.com/help/?s_tid=mlh_sn_help.
5. Дубовой В.М., Юхимчук М.С. Навчальний посібник «Імітаційне моделювання в системі scilab/xcos». URL:
https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fksa/10dubovuj_imitacijne_modelyuvannya_v_systemi_Scilab-Xcos/txt/d&yu_rozdil1.html.
6. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2020. – Вип. 1/2020 (49). – 74 с.
URL:
<https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/34935/94424.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
7. Зенович О.Є., Ключніков І.М., Єлісєєв Є.С., Степанко О.С. Нелінійна Simulink-модель синхронного генератора як об'єкта регулювання напруги // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил, Харків: ХНУПС, 2020, 3(65) С. 106-112.
8. Матвійчук В.А., Стаднік М.І., Рубаненко О.О. Електропривод виробничих машин і механізмів. Навчальний посібник з виконання курсової роботи. – Вінниця: ВНАУ, 2016. – с.

9. Михайленко В.В., Маков Д.К., О.М. Скринник О.М. Конспект лекцій з навчальної дисципліни «Електротехніка та електроніка» для студентів всіх форм навчання. / Уклад.: В.В. Михайленко, Д.К. Маков, О.М. Скринник, Ю.М. Чуняк, Д.К. Зіменков, О.В. Петрученко – К.: НТУУ ”КПІ ім. Ігоря Сікорського” 2017. – 61 с.
10. Моделювання та оптимізація систем : підручник / [Дубовой В. М., Кветний Р. Н., Михальов О. І., А.В.Усов А. В.] – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 798 с.
11. Навчальний посібник з дисципліни "Електротехніка та електропостачання" для студентів спеціальності 185 «Нафтогазова інженерія та технології». – Полтава: ПолтНТУ, 2019. – 177 с. URL:
https://reposit.nupp.edu.ua/bitstream/PoltNTU/6386/1Посібник_електр_Єрмілова.pdf.
12. Науково-практичний журнал «Електротехніка і електромеханіка» 2024/3.
URL: <http://eie.khpi.edu.ua/issue/view/16867/10773>
13. Паначевний Б.І., Свєргун Ю.Ф. Загальна електротехніка: Підручник. – К.: Каравела, 2018. – 296 с.
14. Яні. А.В. Регульований Синхронний електродвигун: навчальний посібник: Лань, 2016. - 464 с.