

ПРОГРАМНИЙ МОДУЛЬ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ПРИ СТВОРЕННІ ВІРТУАЛЬНИХ ЛАБОРАТОРНИХ І ДОСЛІДНИЦЬКИХ КОМПЛЕКСІВ

Кравець О.М., асист., Чорний О.П., д.т.н., проф.

Кременчуцький державний університет імені Михайла Остроградського

вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна

E-mail: apch@kdu.edu.ua

Розроблено універсальний програмний модуль для моделювання електричних машин, математичний опис яких містить як систему диференціальних, так і алгебраїчних рівнянь.

Ключові слова: універсальний програмний модуль, математичний опис, диференціальні й алгебраїчні рівняння.

Вступ. У даний час для підвищення ефективності освітнього процесу та наукових досліджень ведуться розробки зі створення віртуального устаткування, яке є апаратно-програмним інструментом, що підтримує технологію віртуального інструмента, дозволяє створювати вимірювальні прилади, системи збору даних, системи автоматизованого керування й вимірювальні комплекси на основі спеціальних плат уведення-виводу, містить великі бібліотеки функцій і стандартні інструменти розробки й налагодження програм, дозволяє організувати віртуальну лабораторію, яка працює в режимі віртуального експерименту – проведення імітаційного експерименту, що базується на фізичній і математичній моделі реального об'єкта. Загальною частиною зазначених можливостей створення віртуального устаткування є програмний інструментарій [1-4].

Віртуальне устаткування, що працює в режимі віртуального експерименту, є ефективним засобом для формування базових знань досліджуваної предметної області [3, 4]. Ефективність віртуального устаткування може бути підвищена шляхом упровадження в їхній склад додаткових засобів, що дозволяють, у свою чергу, підвищити ефективність формування практичних професійних навичок майбутніх фахівців. У цьому випадку навчальне віртуальне устаткування являє собою комплекс, що складається з реального устаткування й апаратно-програмної підтримки, характерною рисою якого є використання сучасних концепцій проектування великих автоматизованих програмних систем, орієнтованих на підвищення ефективності проектування, експлуатації, а також надійності дорогого устаткування.

Очевидно, що застосування віртуального інструмента як реального приладу з вилученим доступом доцільне також при курсовому чи дипломному проектуванні та проведенні дослідницької роботи студентів, магістрантів, аспірантів та науковців.

Аналіз попередніх досліджень. Для дослідження статичних і динамічних режимів роботи електроприводів з електричними машинами як змінного, так і постійного струму необхідно скласти математичну модель у формі системи диференціальних рівнянь або у вигляді передатних функцій [5]. Аналіз [5-8] показав, що деякі математичні моделі окрім систем диференціальних рівнянь містять і системи лінійних алгебраїчних

рівнянь. Наприклад, при моделюванні асинхронних двигунів у «трифазній» системі координат виникає необхідність розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь відносно струмів статора і ротора, застосовуючи чисельні методи вирішення систем лінійних рівнянь (Крамера, Гауса та ін.). При використанні координатних систем « α , β , 0» і « u , v , 0» для отримання графіків зміни у часі електромагнітного моменту, обертання струмів статора і ротора асинхронного двигуна необхідно виконувати їх розрахунок за допомогою аналітичних виразів. Запропоноване у [9] програмне рішення не дозволяє враховувати наведені вище особливості моделювання електричних машин, а його використання можливе у тому випадку, коли досліджуваний об'єкт описується лише диференціальними рівняннями.

Мета роботи. Створення універсального програмного модулю для моделювання електричних двигунів, математичний опис яких містить як систему диференціальних, так і алгебраїчних рівнянь.

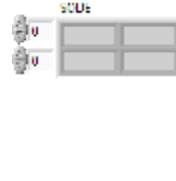

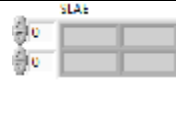
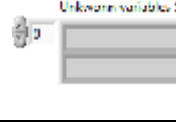

Матеріал і результати дослідження. Основу запропонованої розробки складає простий, зручний і, в той самий час, універсальний «інструмент» – бібліотечний модуль, який дозволяє у середовищі LabVIEW створювати моделі різноманітних електротехнічних об'єктів, наприклад, електроприводів типових промислових механізмів і проводити на отриманих моделях дослідження різних режимів їх роботи. Причому під універсальністю розуміється можливість моделювання різних систем, які можуть бути записані у вигляді систем диференціальних і алгебраїчних рівнянь.

Універсальний бібліотечний модуль для створення віртуальних лабораторних і дослідницьких комплексів складається з двох DLL бібліотек. Він дозволяє розв'язувати системи диференціальних та/або лінійних алгебраїчних рівнянь, якими описується досліджуваний об'єкт чи система, записані у символічному вигляді.

На рис. 1, 2 показані вхідні та вихідні параметри (лицьова панель), а також приведений фрагмент вихідної блок-діаграми (програмний код мовою G) першої DLL бібліотеки відповідно, яка призначена для декодування диференціальних і алгебраїчних рівнянь, якими описується система або досліджуваний об'єкт з символічного в числовий формат.

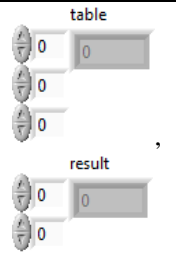

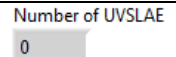
Вхідним параметром є кластер, що складається з п'яти елементів, приведених у табл. 1.

Таблиця 1 – Вхідний кластер першої DLL бібліотеки

| | |
|--|---|
|  | - двовірний (2D) масив рядків для завдання правих і лівих частин (шуканих або невідомих параметрів) диференціальних рівнянь у символічному вигляді; |
|  | - одновірний (1D) масив рядків для завдання у символічному вигляді параметрів з відомим числовим значенням (можуть змінюватись користувачем у процесі обчислень), що входять як до системи диференціальних, так і до системи лінійних алгебраїчних рівнянь; |
|  | - двовірний (2D) масив рядків для завдання правих і лівих частин системи алгебраїчних рівнянь (якщо така є); |
|  | - одновірний (1D) масив рядків для завдання невідомих параметрів, що входять до системи лінійних алгебраїчних рівнянь; |
|  | - двовірний (2D) масив рядків для завдання правих і лівих частин формул, необхідних для розрахунку додаткових величин, які залежать як від невідомих параметрів систем диференціальних та/або лінійних алгебраїчних рівнянь, так і від параметрів з відомим числовим значенням. |

Вихідним параметром є кластер, що складається з восьми елементів, які приведені у табл. 2.

Таблиця 2 – Вихідний кластер першої DLL бібліотеки

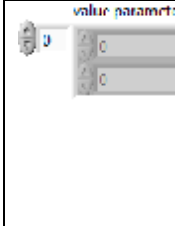



| | |
|---|---|
|  | - пари тримірних (3D) і двовірних (2D) числових масивів, що представляють собою числове представлення правих частин системи лінійних алгебраїчних, диференціальних рівнянь, формул розрахунку додаткових величин відповідно; |
|  | - одновірний (1D) масив, що представляє собою числове представлення значень усіх (відомих і невідомих) символічних параметрів, що входять до системи лінійних алгебраїчних, диференціальних рівнянь та формул розрахунку додаткових величин відповідно. Цей одновірний масив є доповненням до трьох пар числових масивів, які описані вище; |
|  | - кількість невідомих в системі лінійних алгебраїчних рівнянь. |

На рис. 3, 4 показані вхідні та вихідні параметри

(лицьова панель), а також приведена вихідна блок-діаграма (програмний код мовою G) другої DLL бібліотеки відповідно, яка призначена для обчислення правих частин диференціальних рівнянь за допомогою методу Рунге-Кутта 4-го порядку та розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь у матричній формі.

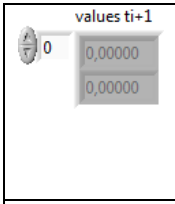
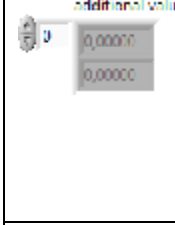
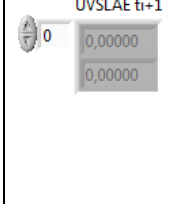
Вхідним параметром є кластер, що складається з дванадцяти елементів, у якому перші вісім є елементами вихідного кластеру першої DLL бібліотеки (табл. 2), а інші приведені у табл. 3.

Таблиця 3 – Елементи вхідного кластеру другої DLL бібліотеки

| | |
|--|--|
|  | - одновірний (1D) масив із числовими значеннями відомих параметрів системи, які можуть бути незмінними або змінюватись користувачем в процесі обчислень в залежності від алгоритму роботи; |
|  | - одновірний (1D) масив із числовими значеннями невідомих параметрів лівих частин диференціальних рівнянь у поточний момент часу; |
|  | - поточний момент часу; |
|  | - крок інтегрування. |

Вихідним параметром є кластер, який містить три елементи, що приведені у табл. 4.

Таблиця 4 – Вихідний кластер другої DLL бібліотеки

| | |
|--|---|
|  | - одновірний (1D) масив із числовими значеннями невідомих параметрів лівих частин диференціальних рівнянь у наступний (розрахунковий) момент часу; |
|  | - одновірний (1D) масив із числовими значеннями додаткових величин у наступний (розрахунковий) момент часу, формули для обчислення яких записані в Expressions of SODE; |
|  | - одновірний (1D) масив із числовими значеннями невідомих параметрів у наступний (розрахунковий) момент часу, що входять до системи лінійних алгебраїчних рівнянь, яка записана в SLAE. |

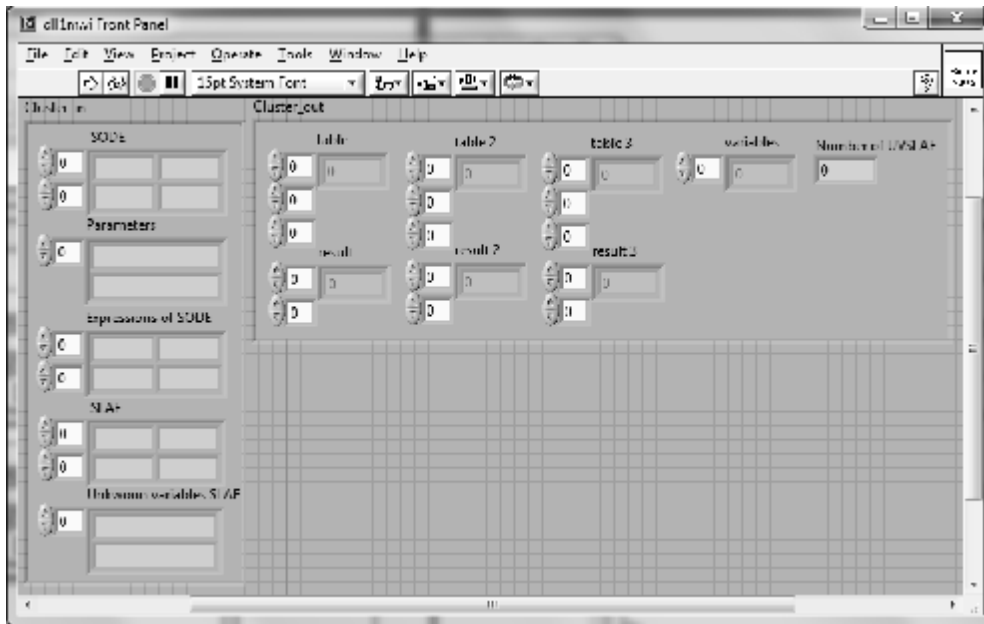


Рисунок 1 – Вхідні та вихідні параметри (лицьова панель) першої DLL бібліотеки універсального модулю

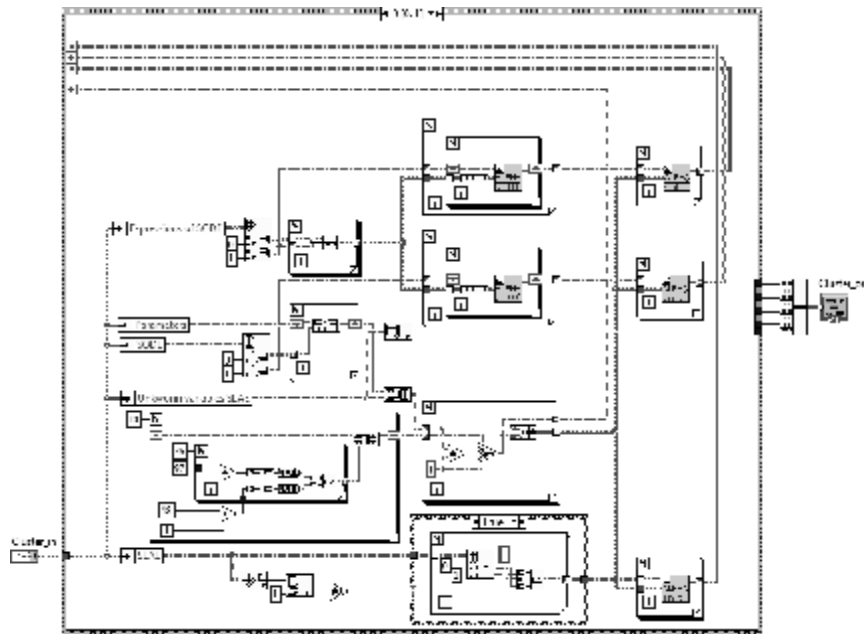


Рисунок 2 – Фрагмент блок-діаграми (вихідний програмний код мовою G) першої DLL бібліотеки універсального модулю

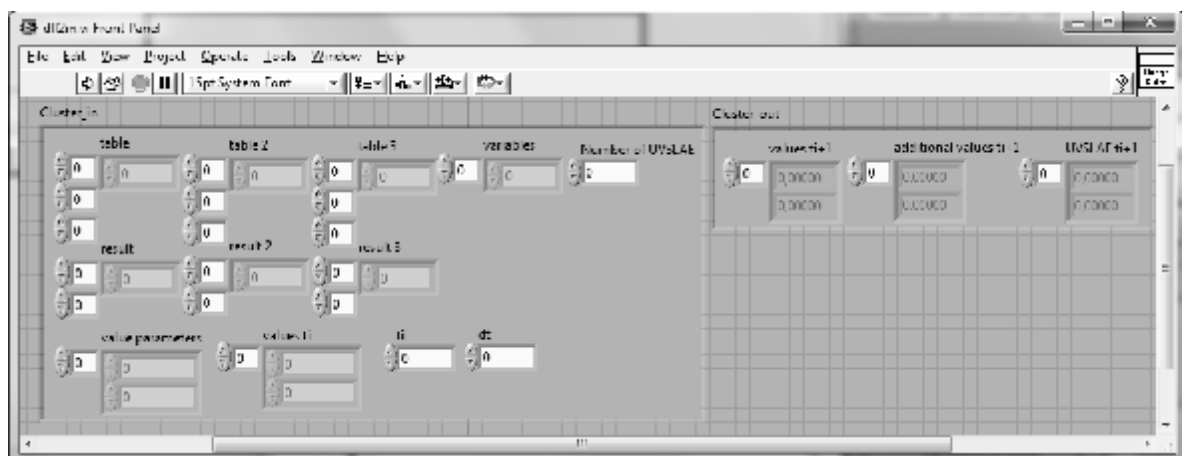


Рисунок 3 – Вхідні та вихідні параметри (лицьова панель) другої DLL бібліотеки універсального модулю

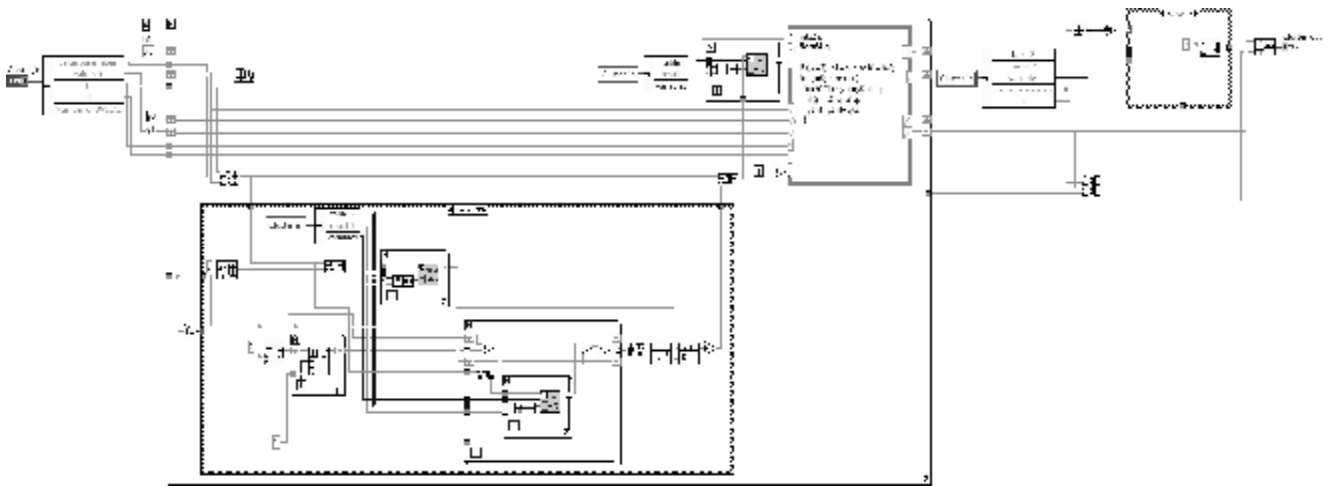


Рисунок 4 – Блок-діаграма (вихідний програмний код мовою G) другої DLL бібліотеки універсального модулю

При розв'язанні науково-технічних задач, пов'язаних з роботою асинхронних двигунів, найбільш доцільним є використання математичної моделі у «трифазній» системі координат, оскільки вона дозволяє дослідити найбільшу кількість режимів їх роботи у порівнянні з іншими існуючими моделями.

Математичний опис асинхронного коротко замкненого двигуна у «трифазній» системі координат має вигляд [5, 8]:

- система диференціальних рівнянь

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\psi_A}{dt} = U_A - (i_A - i_{0ABC})R_s; \\ \frac{d\psi_B}{dt} = U_B - (i_B - i_{0ABC})R_s; \\ \frac{d\psi_C}{dt} = U_C - (i_C - i_{0ABC})R_s; \\ \frac{d\psi_a}{dt} = -(i_a - i_{0abc})R_r; \\ \frac{d\psi_b}{dt} = -(i_b - i_{0abc})R_r; \\ \frac{d\psi_c}{dt} = -(i_c - i_{0abc})R_r; \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{M_e - M_c}{J}; \\ \frac{d\varphi}{dt} = \omega \cdot p; \end{array} \right.$$

- аналітичні вирази

$$M_e = \frac{1}{\sqrt{3}} p \cdot \left\{ \begin{array}{l} (Y_C - Y_B)(i_A - i_{0ABC}) + (Y_A - Y_C) \times \\ \times (i_B - i_{0ABC}) + (Y_B - Y_A)(i_C - i_{0ABC}) \end{array} \right\}$$

$$U_A = 311 \cdot \sin(2\pi f \cdot t);$$

$$U_C = 311 \cdot \sin\left(2\pi f \cdot t + \frac{2\pi}{3}\right);$$

$$i_{0ABC} = \frac{i_A + i_B + i_C}{3};$$

$$i_{0abc} = \frac{i_a + i_b + i_c}{3};$$

- система лінійних алгебраїчних рівнянь

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_A = \left(L_s + \frac{3}{2} L_\mu \right) i_A - \\ - L_\mu \left(\cos(\varphi) \cdot i_a + \cos\left(\varphi + \frac{2\pi}{3}\right) \cdot i_b + \cos\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot i_c \right); \\ \psi_B = \left(L_s + \frac{3}{2} L_\mu \right) i_B - \\ - L_\mu \left(\cos\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot i_a + \cos(\varphi) \cdot i_b + \cos\left(\varphi + \frac{2\pi}{3}\right) \cdot i_c \right); \\ \psi_C = \left(L_s + \frac{3}{2} L_\mu \right) i_C - \\ - L_\mu \left(\cos\left(\varphi + \frac{2\pi}{3}\right) \cdot i_a + \cos\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot i_b + \cos(\varphi) \cdot i_c \right); \\ \psi_a = \left(L_s + \frac{3}{2} L_\mu \right) i_a - \\ - L_\mu \left(\cos(\varphi) \cdot i_A + \cos\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot i_B + \cos\left(\varphi + \frac{2\pi}{3}\right) \cdot i_C \right); \\ \psi_b = \left(L_s + \frac{3}{2} L_\mu \right) i_b - \\ - L_\mu \left(\cos\left(\varphi + \frac{2\pi}{3}\right) \cdot i_A + \cos(\varphi) \cdot i_B + \cos\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot i_C \right); \\ \psi_c = \left(L_s + \frac{3}{2} L_\mu \right) i_c - \\ - L_\mu \left(\cos\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot i_A + \cos\left(\varphi + \frac{2\pi}{3}\right) \cdot i_B + \cos(\varphi) \cdot i_C \right); \end{array} \right.$$

де U_A, U_B, U_C – напруги фаз статора, В;

ψ_A, ψ_B, ψ_C – потокозчеплення фаз статора, В·с;

ψ_a, ψ_b, ψ_c – потокозчеплення фаз ротора, В·с;

R_s, R_r – активні опори фаз статора і ротора, Ом;

L_s, L_r – індуктивності фаз статора і ротора, Гн;

L_μ – взаємні індуктивності обмоток статора і ротора, Гн;

i_A, i_B, i_C – струми потокозчеплення фаз статора, А;

i_a, i_b, i_c – струми потокозчеплення фаз ротора, А;

i_{0ABC}, i_{0abc} – струми нульової послідовності статора і ротора відповідно, А;

M_e, M_c –

обертаючий електромагнітний і статичний момент на валу електричної машини відповідно, Н·м; p – кількість пар полюсів; J – момент інерції, кг·м²; ω , φ – частота і кут обертання ротора відповідно, с⁻¹, рад.; f – частота напруги живлення статора, Гц.

На рис. 5 у якості прикладу приведено зовнішній вигляд універсального модулю, до якого у символному вигляді внесено математичний опис асинхронного короткозамкненого двигуна у «трифазній» системі координат.

На рис. 6 приведені результати тестування роботи універсального бібліотечного модулю (з двох DLL бібліотек) при моделюванні асинхронного короткозамкненого двигуна у «трифазній» системі координат – графіки перехідних процесів кутової швидкості й електромагнітного моменту при пуску й зміні навантаження. На рис. 7 приведена блок-діаграма моделі у середовищі LabVIEW при використанні універсального бібліотечного модуля

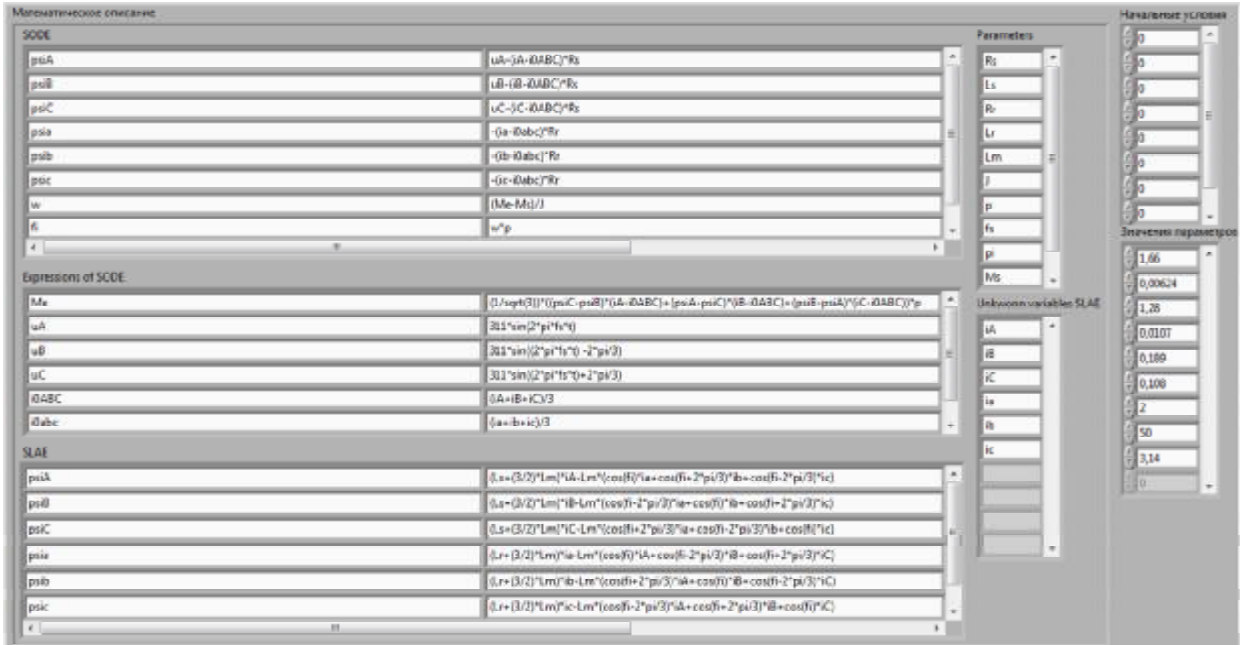


Рисунок 5 – Математичний опис асинхронного короткозамкненого двигуна у «трифазній» системі координат, що внесений до універсального модулю у символному вигляді

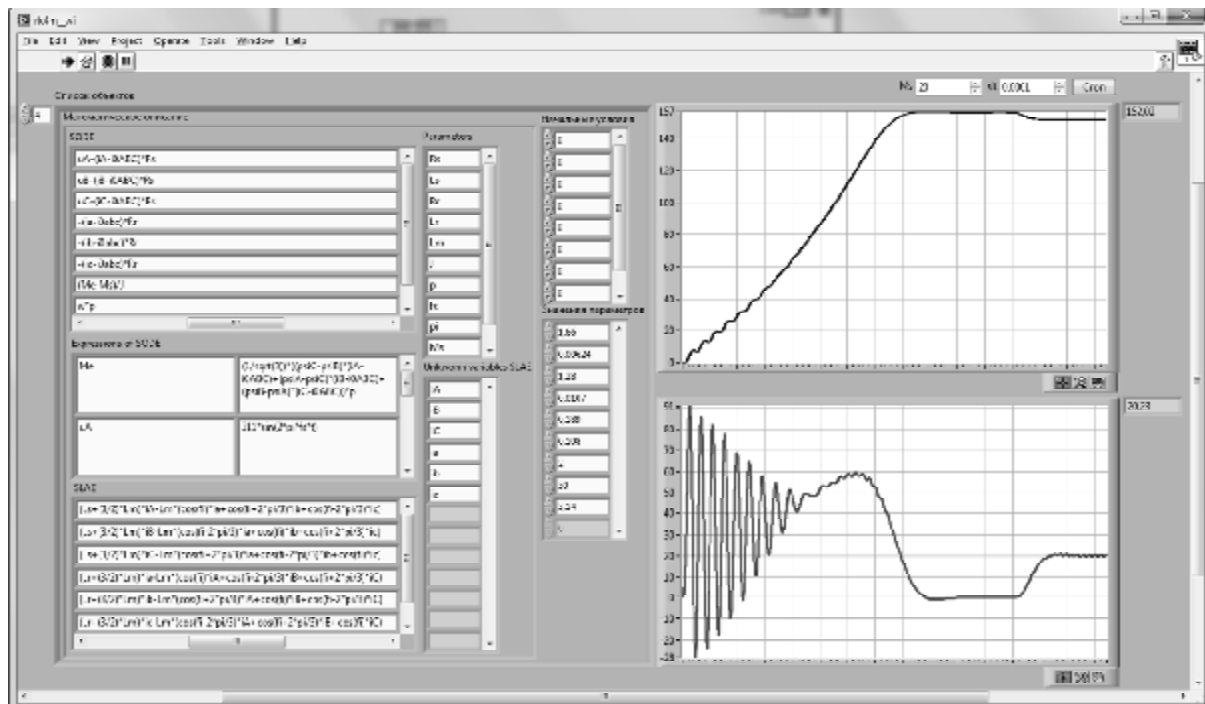


Рисунок 6 – Графіки перехідних процесів кутової швидкості й електромагнітного моменту асинхронного короткозамкненого двигуна при використанні універсального бібліотечного модуля

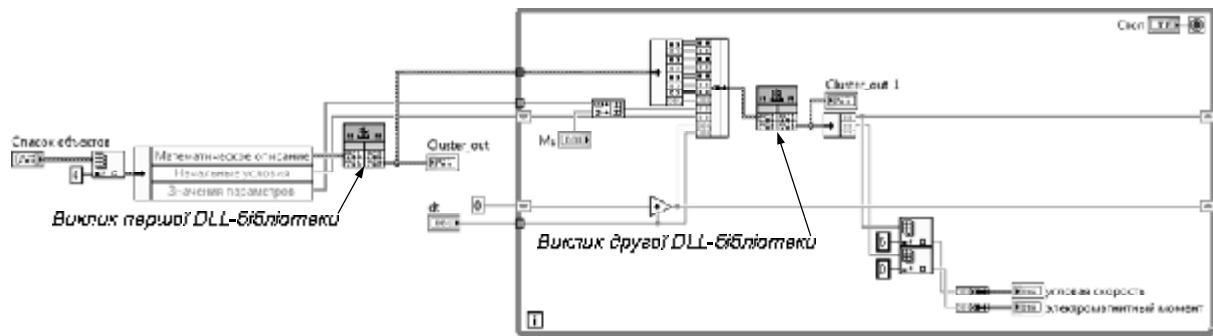


Рисунок 7– Видяг блок-діаграми при моделюванні роботи асинхронного двигуна у «трифазній» системі координат при використанні універсального бібліотечного модуля

Висновки. Універсальний модуль (рис. 7) може містити не один, а декілька математичних описів моделей різних об'єктів (наприклад, електродвигунів, генераторів змінного й постійного струму й т.ін.) і дозволяє створювати для проведення досліджень електромеханічні системи різної складності. Він виконує розв'язання систем диференціальних та/або лінійних алгебраїчних рівнянь, якими описується досліджуваний об'єкт чи система, записаних у символьному вигляді. Для введення до модулю будь-яких математичних моделей передбачено декілька полів для вводу інформації. Поле «SODE» має два масиви рядків, до яких заносяться диференційні рівняння в канонічному символьному вигляді (до першого масиву – шукана величина, до другого – праві частини рівнянь). Таким же чином організовано поле «Expressions of SODE» з тією лише різницею, що до нього записуються формули для розрахунку додаткових параметрів, які залежать як від шуканих (невідомих), так і від змінюваних (відомих) величин. Усі записані в рядках рівнянь шукані (невідомі) і змінювані (відомі) параметри повинні бути відображені в полі «Parameters» для коректної роботи програми. Другою умовою правильності роботи універсального бібліотечного модуля є рівність кількості «Начальных условий» і кількості диференціальних рівнянь, а також рівність кількості «Значений параметров» і кількості елементів у полі «Parameters».

Отриманий програмний продукт здатен забезпечити нові якісні умови для формування зі студента фахівця, здатного осмислено формувати процеси придбання навичок, пізнання і опановування спеціальністю. А також може знайти широке застосування в процесі вивчення навчальних курсів електромеханічного спрямування, в тому числі при курсовому, дипломному проектуванні, проведенні дослідницької роботи студентів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Евстифеев В. А. Виртуальный комплекс для учебного процесса и научных исследований / Евстифеев В. А., Черный А. П., Величко Т. В. // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика: Вестник Национального технического университета «ХПИ», Тематический выпуск 45/2005. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2005. – С. 25-28.
2. Виртуальні лабораторні комплекси для навчального процесу і наукових досліджень. Підсумки і досвід розробки / Чорний О. П., Родькін Д. Й., Євстифеев В. О. та ін...// Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Вип. 3/2008 (50). – Ч.1. – С. 28-42.
3. Загірняк М. В. Виртуальні лабораторні системи і комплекси – нова перспектива наукового пошуку і підвищення якості підготовки фахівців з електромеханіки / Загірняк М. В., Родькін Д. Й., Чорний О. П. // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КДПУ, 2009. – Вип. 2/2009 (6). – С. 8-12.
4. Виртуальний лабораторний комплекс з навчальної дисципліни «Теорія електропривода» / [Чорний О. П., Родькін Д. Й., Євстифеев І. В. та ін.]. // Вісник Кременчуцького державного університету: 36. наук. пр. КДУ. – Вип. 4(63). – Ч.2. – Кременчук: КДУ, 2010. – С. 174-179.
5. Моделювання електромеханічних систем: підручник / [Чорний О. П., Луговой А. В., Родькін Д. Й. та ін.]. – Кременчук, 2001. – 410 с.
6. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: учебное пособие / Герман-Галкин С. Г. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 320 с.
7. Попович М. Г. Теория электропривода / Попович М. Г., Борисюк М. Г., Гаврилюк В. А. – К.: Вища школа, 1993. – 494 с.
8. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин / Копылов И.

9. Структурно-компонентний підхід при моделюванні електромеханічних систем у LABVIEW / Чорний О. П., Лашко Ю. В., Євстіфєєв В. О., Величко Т. В. // Вісник НТУ «ХП», «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» – Харків: НТУ «ХП», 2008, № 30. – С. 129-133.

ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПРИ СОЗДАНИИ ВИРТУАЛЬНЫХ ЛАБОРАТОРНЫХ И ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Кравец А.М., ассист., Черный А.П., д.т.н., проф.

Кременчугский государственный университет имени Михаила Остроградского

ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина

E-mail: apch@kdu.edu.ua

Разработан универсальный программный модуль для моделирования электрических машин, математическое описание которых содержит как систему дифференциальных, так и алгебраических уравнений.

Ключевые слова: универсальный программный модуль, математическое описание, дифференциальные и алгебраические уравнения.

THE PROGRAM MODULE FOR MODELLING OF ELECTRIC MACHINES AT CREATION OF VIRTUAL LABORATORY AND RESEARCH COMPLEXES

Kravets A.M., assistant, Chorniy O. P., prof. dr. hab. ing.

Kremenchuk Mykhaylo Ostrogradskiy State University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine

E-mail: apch@kdu.edu.ua

The universal program module is developed for modeling of the electric machines which mathematical description contains both system differential and the algebraic equations.

Key words: universal program module, mathematical description, differential and the algebraic equations.