

СТРУКТУРНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ В ПРОГРАМНОМУ ЗАБЕЗПЕЧЕННІ MATLAB R2024A

Стьопкін В.В.¹, Трунов Д.Є.²

¹ Український державний університет науки і технологій, к. т. н, доцент, Україна

² Український державний університет науки і технологій, Україна

Анотація. Досліджена структура математичної моделі двигуна постійного струму в програмному забезпеченні MATLAB v.R2024a. Особливістю є відсутність заборони наростання швидкості двигуна при значеннях електромагнітного моменту меншого за реактивний момент, що слід враховувати. Дослідження режимів роботи двигуна виконано за механічною характеристикою у динамічному режимі, яка знята за допомогою блоку XY Graph і яка охоплює усі можливі режими роботи крім динамічного гальмування. Також паралельно виконаний аналіз перехідних процесів за осцилограмами струмів, швидкості та моменту. В даній моделі враховано завдання довільної навантажувальної діаграми у часі за допомогою блоку Stair Generator. Розглянута структура моделі двигуна постійного струму може легко інтегруватися з системами керування, поєднуватися з ПД-регуляторами, алгоритмами керування, використанням ШІМ-модуляції для керування. Для коректного моделювання необхідно мати точні параметри двигуна.

Ключові слова: двигун постійного струму, режими роботи, електромагнітний момент, пусковий струм, датчик струму якоря, кероване джерело напруги, динамічна характеристика

Вступ. В даній роботі виконано структурне дослідження математичної моделі двигуна постійного струму з врахуванням можливостей програмного забезпечення MATLAB R2024a, отримані механічні характеристики в динаміці. Досліджена робота двигуна під навантаження у всіх чотирьох квадрантах динамічної механічної характеристики за допомогою блоку XY Graph MATLAB.

Основний матеріал. Двигун постійного струму DC Machine знаходиться в бібліотеці Simscape у розділі Electrical підрозділі Specialized Power System, підрозділі Electrical Machines. Дана модель двигуна була доступною ще у версіях MATLAB 7 у бібліотеці Sim Power System у розділі Machines. На рисунку 1, а наведене умовне позначення двигуна постійного струму. Введення параметрів двигуна здійснюється через діалогове вікно (графічний інтерфейс), яке наведено на рисунку 1, б.

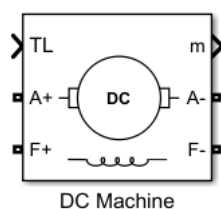
Виводи F+ та F- необхідні для підключення напруги збудження для створення магнітного потоку в двигуні. Виводи A+ та A- використовуються для підключення обмотки якоря на силове джерело живлення. Активне навантаження на двигун вводиться через віртуальний вхід TL. Вихідними параметрами двигуна є: частота обертання ω , струм обмотки якоря I_a , струм збудження I_f та електромагнітний момент T_e . Перелічені вихідні параметри формуються на мультиплексорній шині m. На першому (верхньому) виході m діє частота обертання, на другому – струм обмотки якоря, на третьому – струм збудження і на четвертому – електромагнітний момент двигуна.

При відсутності (рис.1, б) сумарного опору кола якоря двигуна R_a , індуктивності L_a , їх значення можна розрахувати за формулами:

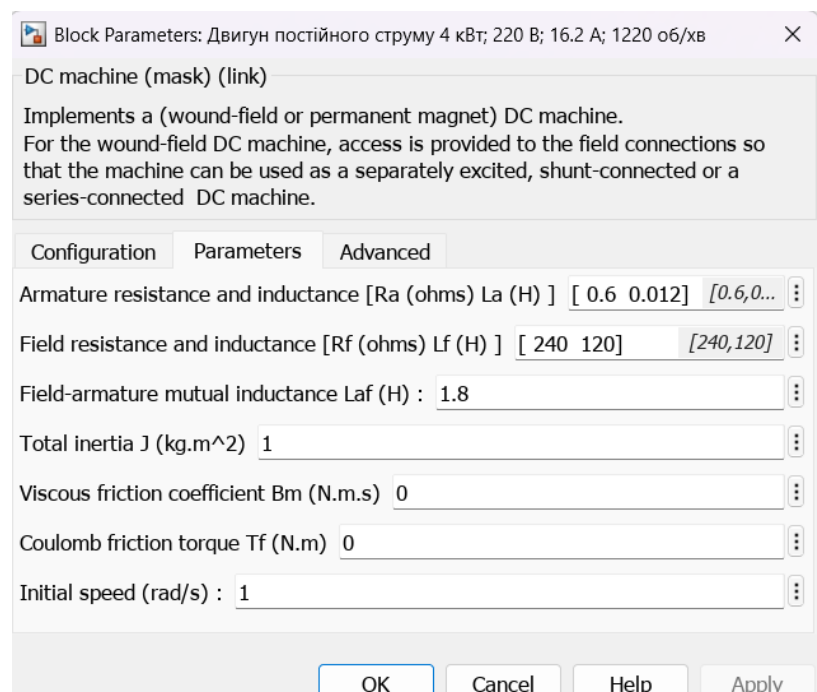
$$R_a = 0,5 \cdot (1 - \eta_n) \cdot (I_n / U_n), \quad (1)$$

$$L_a = (\gamma \cdot U_n) / (p \cdot \omega_n \cdot I_n), \quad (2)$$

тут U_n – номінальна напруга обмотки якоря; I_n – номінальний струм обмотки якоря; ω_n – номінальна частота обертання якоря; p – кількість пар полюсів двигуна; $\gamma = 0,6$ – коефіцієнт для некомпенсованих двигунів.



а)



б)

Рисунок 1 - Умовне позначення двигуна постійного струму (а) та графічний інтерфейс введення параметрів двигуна (б)

На рис.1, б необхідними для введення є також: R_f – активний опір обмотки збудження двигуна; L_f – індуктивність обмотки збудження двигуна; L_{af} – взаємна індуктивність обмоток збудження і якоря двигуна; J – зведений до валу двигуна момент інерції, який включає момент інерції двигуна та момент інерції виробничого механізму; B_m – коефіцієнт, за допомогою якого вводиться на вал двигуна реактивний момент опору $T_f = B_m \cdot \omega$; T_f – реактивний момент опору.

На рисунку 2 наведена структура моделі двигуна постійного струму. Дана 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 (керування джерело напруги, через яке вводиться в коло якоря проти ЕРС двигуна), R_f , L_f . Інші блоки на рис.3 реалізовані на елементах бібліотеки Simulink.

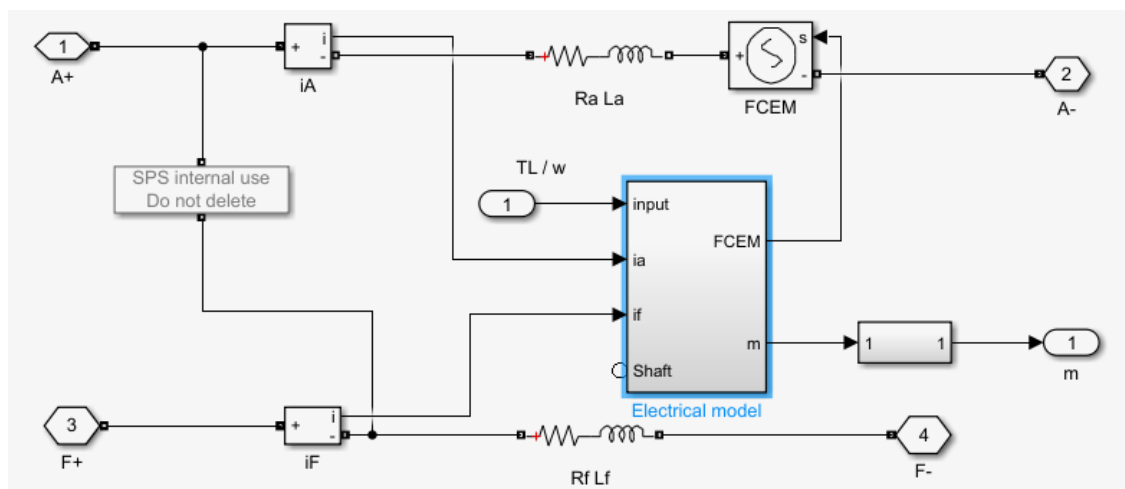


Рисунок.2 - Структура моделі двигуна постійного струму

На рисунку 3 наведена структура блоку механіки Electrical model.

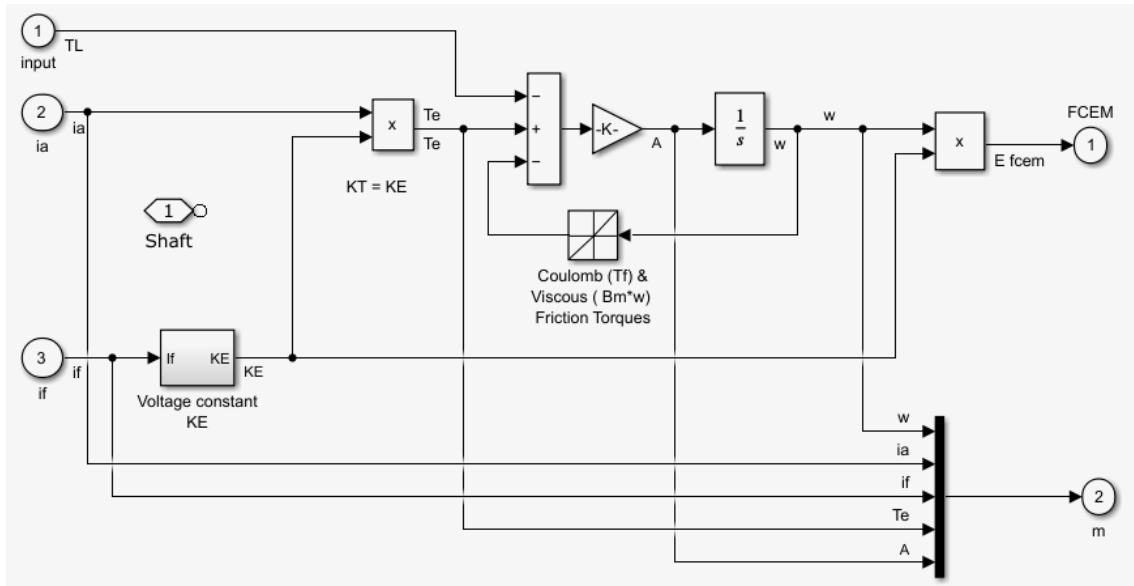


Рисунок 3 - Структура блоку механіки Electrical model

Блок механіки виконує моделювання моменту та швидкості при вмиканні електричної машини у режимі двигуна. Блок Voltage constant K_E реалізує коефіцієнт по ЕРС $K_E = L_{af} \cdot I_f$. При введенні параметрів двигуна (рис.1, б), коефіцієнти за ЕРС та моментом дорівнюють $K_E = K_T$. Формуються – електромагнітний момент двигуна $T_e = K_T \cdot I_a$ і проти ЕРС $E = K_E \cdot \omega$. Частота обертання формується шляхом інтегрування рівняння руху електропривода $T_E - T_L - T_f - B_m \cdot \omega = J \cdot (d\omega / dt)$.

На рисунку 4 наведений блок Coulomb (T_f) & Viscous ($B_m \cdot \omega$) Friction Torques.

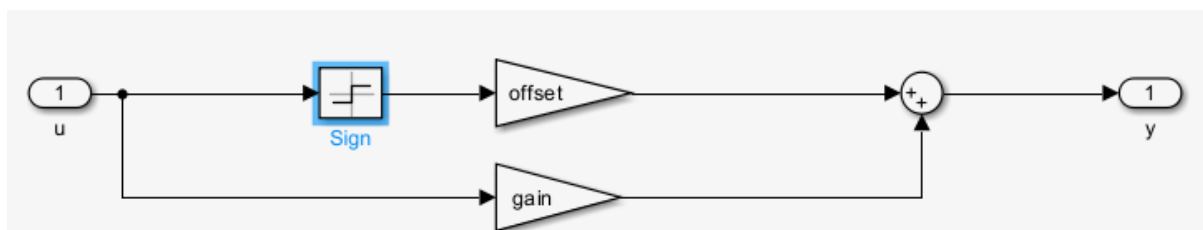


Рисунок 4 - Блок Coulomb (T_f) & Viscous ($B_m \cdot \omega$) Friction Torques

Блоки Sing і offset (рис.4) повинні моделювати реактивний момент опору. Однак тут присутній недолік. Не передбачено при нульовому значенні частоти обертання заборони наростання частоти обертання при моменті двигна, меншому за реактивний момент опору, який задається параметром offset.

На рисунку 5 наведена математична модель двигуна постійного струму. Обмеження пускового струму досягається введенням резистора у коло обмотки якоря (блок Series RLC Branch на рис.5). Регульовані джерела живлення обмоток збудження і якоря (Controlled Voltage Source) дозволяють реверсувати або змінювати величину постійної напруги за допомогою блоку Step в будь який момент часу. На виходах демультіплексора m діють сигнали кутової швидкості, струму якоря, струму збудження та електромагнітного моменту. Блок Scope фіксує зміну сигналів на його входах та будує осцилограми. Блок powergui використовується для завдання способу моделювання.

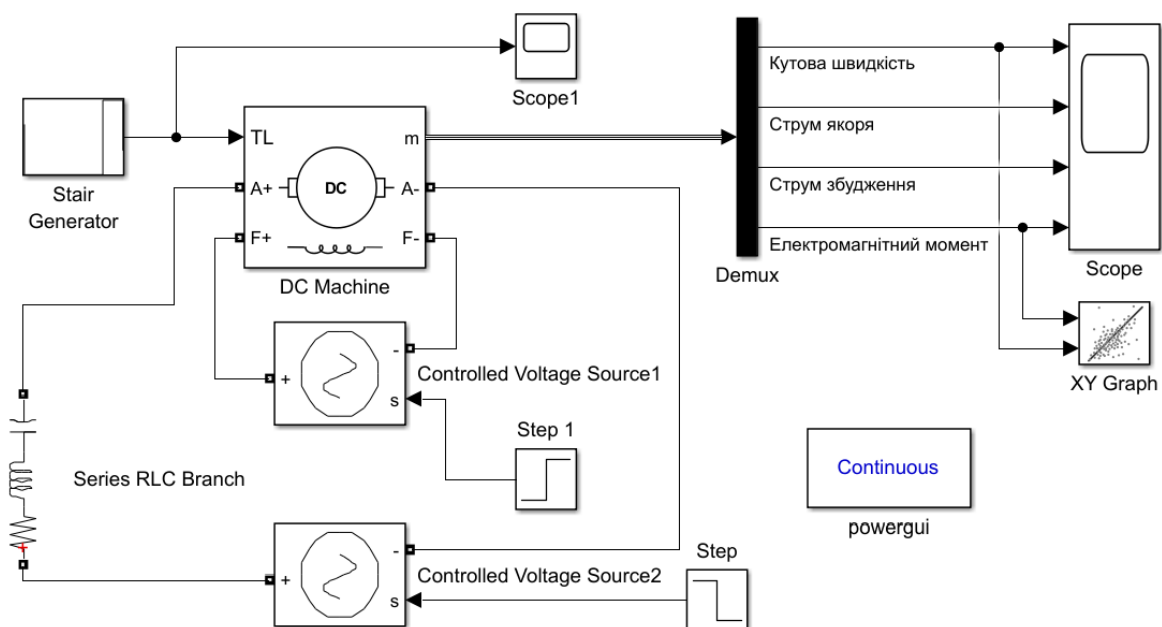


Рисунок 5 - Математична модель двигуна постійного струму

Напруга на обмотці збудження задається 150 В. Напруга на якорі двигуна задається 240 В і через 2 с реверсується (змінює полярність). Навантаження на валу двигуна задається блоком Stair Generator та приймає додатні і від'ємні значення. Навантаження водиться через вхід TL двигуна і це відповідає активному характеру навантаження. Блок XY Graph формує механічну характеристику двигуна за динамічними характеристиками частоти обертання та моменту. Блок Step задає напругу на обмотці якоря двигуна «+240 В» за часом 0-2 с та «-240 В» за часом 2-4 с.

На рисунку 6 наведена осцилограма пуску та реверсу двигуна.

В момент часу 2 с виконаний реверс двигуна, шляхом зміни полярності на обмотці якоря. Струм і момент двигуна змінюють знак на протилежний і збільшуються до значень -50 А та -60 Нм. Розпочинається процес інтенсивного гальмування до нульової швидкості. Після чого двигун розганяється в двигунному режимі до швидкості -200 рад/с при активному навантаженні 5 Нм. Струм двигун досягає -6 А. В момент часу 3 с з'являється навантаження 10 Нм. Струм двигуна падає до нуля і зростає, до позитивного значення 5 А. Це свідчить про те, що момент навантаження, діючий на вал двигуна, має активний характер і переводить двигун в режим генераторного гальмування.

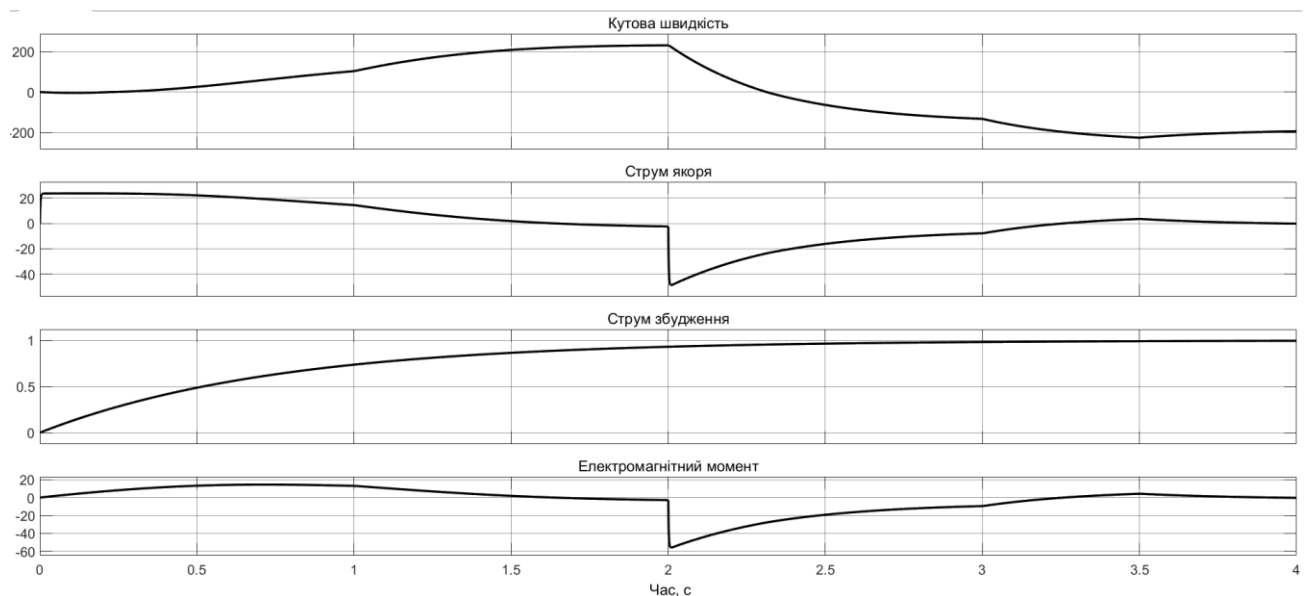


Рисунок 6 - Осцилограма пуску та реверсу двигуна

Механічні характеристик, зняті в динамічному режимі, наведені на рисунку 7. Ділянка 1-2 має нелінійний характер. При формуванні цієї ділянки характеристики нарастали струм збудження та момент двигуна. Лінійна частина механічної характеристики в двигунному режимі наведена на ділянці 2-3. Ділянка 3-4 відповідає переходу двигуна на роботу в режим протиструмного гальмування. Тут швидкість двигуна зменшилась з 230,63 рад/с до 221,66 рад/с. Максимальний момент у точці 4 склав -55,87 Нм. Двигун увімкнений на напрям обертання «назад», але обертається ще «вперед». Ділянка протиструмного гальмування 4-5 закінчується при нульовій швидкості. Ділянка 5-6 відповідає роботі двигуна «назад». Момент короткого замикання складає 27,72 Нм, швидкість ідеального холостого ходу -197,67 рад/с. Ділянка 6-

7 є відрізком генераторного гальмування, швидкість тут складає $-225,39$ рад/с і є більшою за швидкість холостого ходу $-197,67$ рад/с. Двигун працює у режимі генератора та віддає енергію. Таким чином, отримана на рис.7 характеристика двигуна охоплює усі можливі режими роботи (крім динамічного гальмування).

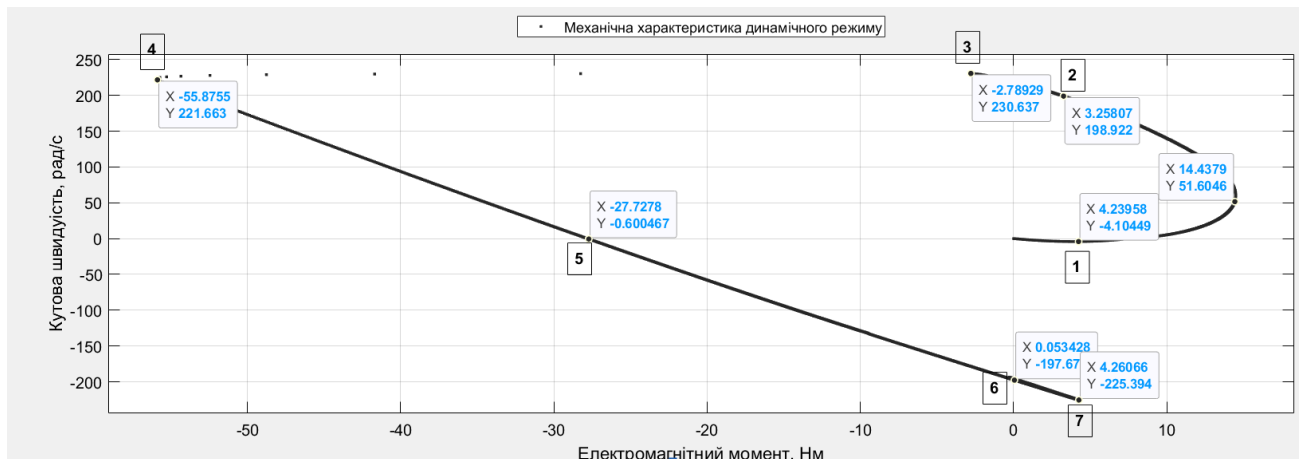


Рисунок 7 - Механічні характеристик, зняті в динамічному режимі

В роботі досліджена структура моделі двигуна постійного струму, виявлений недолік моделювання реактивного моменту.

Висновки. Досліджена математична модель двигуна постійного струму, виявлений типовий недолік, пов'язаний з моделюванням реактивного моменту. Виконано дослідження усіх режимів роботи двигуна за механічними характеристиками, знятими в динамічному режимі. Розглянута математична модель може бути інтегрованою до складних систем керування електроприводами.

ЛІТЕРАТУРА/ REFERENCE

1. Electrical machine fundamentals with numerical simulation using MATLAB/SIMULINK by Iqbal, Atif; Moinoddin, Shaikh; Reddy, Bhimireddy Prathap 2021, 1
2. Implement wound-field or permanent magnet DC machine. URL: https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/dcmachine.html?searchHighlight=DC%20Machine&s_tid=srchtitle_support_results_1_DC%20Machine (date of access: 03.04.2025).
3. Variable torque on DC Machine URL: https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/81723-variable-torque-on-dc-machine?s_tid=srchtitle_support_results_3_DC%20Machine (date of access: 03.04.2025).
4. DC Motor Control URL: <https://www.mathworks.com/help/control/ug/dc-motor-control.html> (date of access: 03.04.2025).

Structural study of a DC motor model in MATLAB R2024a software

Stepkin V.V, Trunov D.E

Abstract. *The structure of the mathematical model of a DC motor in the MATLAB v.R2024a software is studied. A feature is the absence of a ban on increasing the motor speed at values of the electromagnetic torque less than the reactive torque, which should be taken into account. The study of the motor operating modes was performed according to the mechanical characteristic in dynamic mode, which was taken using the XY Graph block and which covers all possible operating modes except dynamic braking. Also, a transient analysis was performed in parallel using the oscillograms of currents, speed and torque. This model takes into account the task of an arbitrary load diagram in time using the Stair Generator block. The considered structure of the DC motor model can be easily integrated with control systems, combined with PID controllers, control algorithms, and using PWM modulation for control. For correct modeling, it is necessary to have accurate motor parameters.*

Keywords: *DC motor, operating modes, electromagnetic torque, starting current, armature current sensor, controlled voltage source, dynamic characteristic*