

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
Автомобільний факультет
Кафедра Автомобільної електроніки

ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Методичні вказівки до лабораторних робіт та самостійної роботи
для студентів дистанційної форми навчання за спеціальністю
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Частина 1

Затверджено на засіданні
кафедри,
протокол № 12 від 20.06.2023.

Харків 2023

Теорія електропривода. Методичні вказівки до лабораторних робіт та самостійної роботи для студентів дистанційної форми навчання за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / А.В. Гнатов, О.В. Шраменко – Х.: ХНАДУ, 2023. – 46 с.

Методичні вказівки до лабораторних робіт та самостійної роботи студентів з дисципліни «Теорія електропривода» містить опис лабораторних робіт, які виконуються студентами за дистанційною формою навчання. При цьому для кожної роботи вказані: мета, програма роботи, опис схеми лабораторного експерименту, опис експерименту, запитання для самоконтролю. Коротко висловлюється теоретичний матеріал, необхідний для осмисленого виконання робіт.

Ілюстрацій – 31, бібліографія – 7 найменувань.

Зміст

Вступ	4
Лабораторна робота 1 «Електро механічні характеристики електропривода постійного струму при зміні опорів кіл якоря і збудження»	6
Лабораторна робота 2 «Електро механічні характеристики електропривода постійного струму при зміні напруги якоря»	21
Лабораторна робота 3 «Електропривод постійного струму в гальмівних режимах»	27
Лабораторна робота 4 «Дослідження характеристик двигуна постійного струму послідовного збудження»	38
Література.....	46

Вступ

Змістом даного видання є методичні рекомендації до виконання та опис лабораторних робіт кредитного модуля «Теорія електроприводу. Частина 1», які виконуються студентами за дистанційною формою навчання.

У вказівках до кожної лабораторної роботи наведені теоретичні питання в необхідному для виконання лабораторних робіт об'ємі.

Виконання кожної із лабораторних робіт, що наведені в даному посібнику, розраховане на 4 академічні години.

Виконання лабораторних робіт. Перед виконанням лабораторних робіт студенти повинні самостійно вивчити відповідні розділи дисципліни за рекомендованою літературою і конспектом лекцій, зміст лабораторної роботи, порядок її виконання. Результати виконання лабораторної роботи у вигляді працюючих схем, часових діаграм при симуляції реалізованого проекту, тощо надаються викладачу, та оформлюються у вигляді звіту.

Зміст та оформлення звіту. У звіті необхідно відобразити:

- тему роботи;
- мету роботи;
- стислі теоретичні відомості;
- схеми підключення двигуна та інших компонентів;
- результати моделювання у вигляді отриманих діаграм, тощо;
- аналіз отриманих результатів та висновки;
- відповіді на запитання для самоконтролю.

Звіти з лабораторних робіт виконуються кожним студентом індивідуально на окремих аркушах формату А4. На координатних осях графіків повинні бути позначенням масштабу та розмірності вимірюваних величин. У формулах та електричних схемах необхідно використовувати умовні позначення, які відповідають стандартам ЄСКД або використаної САПР. Особливу увагу необхідно приділити аналізу отриманих результатів та формулюванню висновків за результатами роботи.

Для забезпечення дистанційного (online) навчання використовуються платформа Moodle, яка дозволяє проводити дистанційно лекційні та лабораторні роботи. Роз'яснення (консультації) зі складних та незрозумілих питань проводяться на онлайн зустрічах в Zoom чи Moodle.

Контроль виконання робіт та їх захист здійснюється на платформі дистанційного навчання Moodle. Звіти виконання робіт завантажуються у відповідний розділ дисципліни в Moodle. Треба звернути увагу при оформленні звітів робіт на дотримання вимог ДСТУ 3008:2015.

Зв'язок зі студентами підтримується через чат «Питання, відповіді», приватні повідомлення та електронну пошту, що забезпечує своєчасну видачу та контроль індивідуальних завдань у відповідності до графіку навчання.

Отримані бали відповідно до рейтингової системи оцінювання накопичуються в журналі оцінок Moodle.

Лабораторна робота 1

ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПРИ ЗМІНІ ОПОРІВ КІЛ ЯКОРЯ І ЗБУДЖЕННЯ

Метою роботи є визначення електромеханічних характеристик електропривода постійного струму при відомих способах регулювання швидкості.

Основні теоретичні положення

Способи регулювання швидкості можуть бути обґрунтованими за допомогою рівняння електричної рівноваги кола якоря двигуна:

$$U_{\text{я}} = I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}} + E_{\text{я}}, \quad (1.1)$$

де $U_{\text{я}}$ – напруга живлення кола якоря, В;

$I_{\text{я}}$ – струм у колі якоря, А;

$R_{\text{я}}$ – опір кола якоря, Ом;

$E_{\text{я}}$ – електрорушійна сила обмотки якоря (проти-ЕРС), що визначаються за формулою:

$$E_{\text{я}} = c \cdot \Phi \cdot \omega_{\text{я}}, \quad (1.2)$$

де c – конструктивна стала двигуна;

Φ – магнітний потік обмотки збудження;

$\omega_{\text{я}}$ – кутова швидкість якоря, рад/с.

З формул (1.1) і (1.2) витікає формула залежності швидкості від параметрів електропривода

$$\omega = \frac{U - IR}{k\Phi} \quad (1.3)$$

За формулою (1.3) можна сформулювати три способи регулювання швидкості:

- зміною напруги якоря;
- зміною опору кола якорю;
- зміною струму збудження (магнітного потоку).

Одним з головних показників оцінки способів регулювання є величина *жорсткості* електромеханічних характеристик, що забезпечує електропривод як сукупність двигуна і регулювальних пристроїв відповідно до даного способу регулювання.

Природною електромеханічною характеристикою двигуна називають таку, яку отримують при безпосередньому вмиканні кіл якоря і збудження двигуна на напругу номінального значення. А характеристики, отримані одним із способів регулювання, називають *штучними* або *регулювальними*.

Програма роботи

В роботі потрібно виконати три експерименти:

1. Визначення природної електромеханічної характеристики двигуна.
2. Визначення електромеханічних характеристик при зміні опору в колі якоря.
3. Визначення електромеханічної характеристики при зміні струму збудження.

Дослідження проводяться за допомогою середовища моделювання Simulink (сімулінк), що входить до складу MathLab.

Експеримент 1.

Визначення природної-електромеханічної характеристики двигуна.

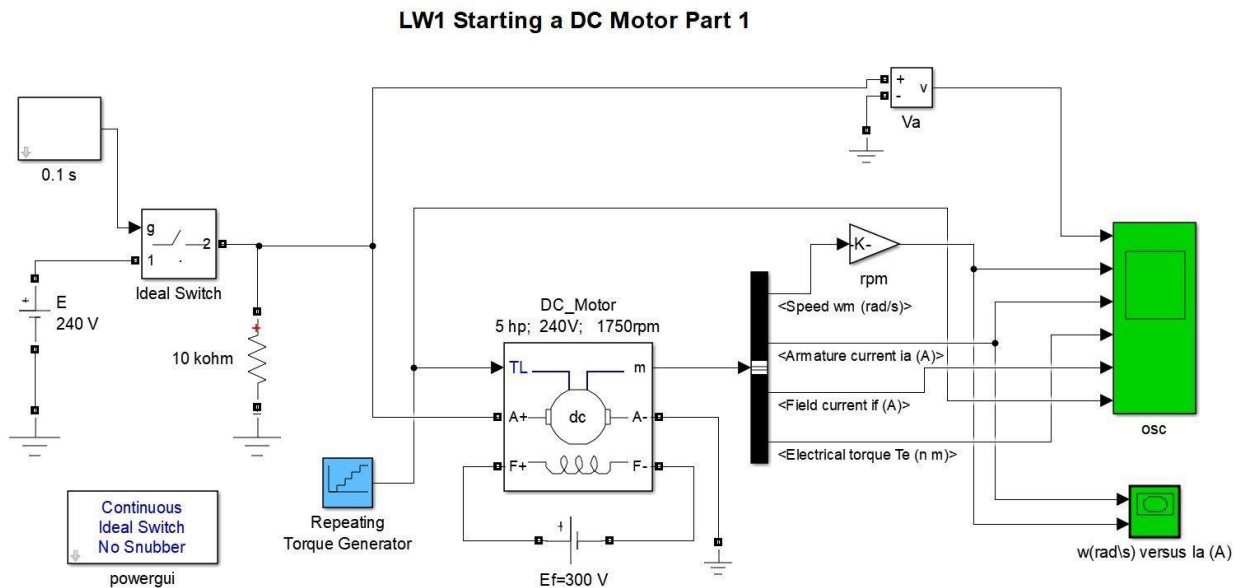


Рисунок 1.1 Схема моделі для визначення природної-електромеханічної характеристики двигуна.

Основний елемент схеми (DC_Motor) є двигун постійного струму, він живиться від джерела постійного струму 240В та джерела постійного струму 300 вольт. Джерело постійного струму 300 вольт живить обмотку збудження, а джерело 240 В живить якір двигуна.

Для дослідження результатів використовується осцилограф (OSC), який буде записувати параметри моделювання це швидкість обертів ротора двигуна, струм якоря, струм обмотки збудження та електричний момент, також вимірюється напруга якоря.

Характеристики двигуна: потужність дорівнює 5 лс., числом обертів 1750 на хв.(номінальна частота обертів при номінальному навантаженні), опір якоря 2.58 Ом, індуктивність 0.028 Гн, опір обмотки збудження 281.3 Ом, індуктивність 156Гн.

Змінне навантаження на двигун надається за допомогою елемента «Repeating Torque Generator», який дозволяє прикладати до ротору двигуна змінний у часі гальмівний момент.

Час моделювання становить 6 секунд. Після проведення моделювання з осцилографа потрібно отримати шість графіків (Рисунок 1.2).

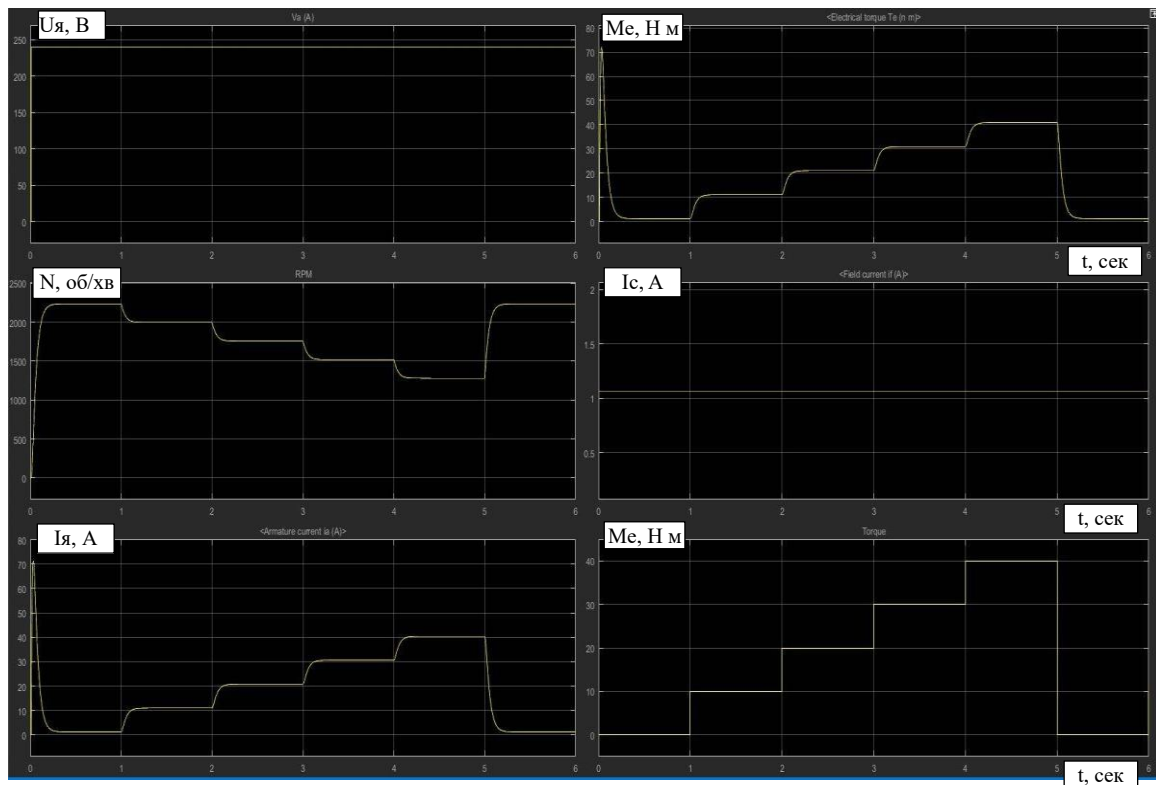


Рисунок 1.2 Результати моделювання.

В отриманих графіках представлено у часі такі параметри як: напруга якоря $V_a(V)$, кількість обертів на хвилину (RPM), струм якоря $I_a(A)$, електричний момент якоря $T_e(NM)$, струм в колі збудження $I_f(A)$, а також момент який навантажується на вал двигуна $Torque(NM)$. Струм якоря та електричний момент, замінюються пропорційно навантаженню на валу двигуна: чим більше навантаження на валу тим більше зростає струм якоря та електромагнітний момент двигуна. При збільшенні навантаження на валу, кількість обертів за хвилину зменшується.

Розглянемо електромеханічну характеристику двигуна (Рисунок 1.3).

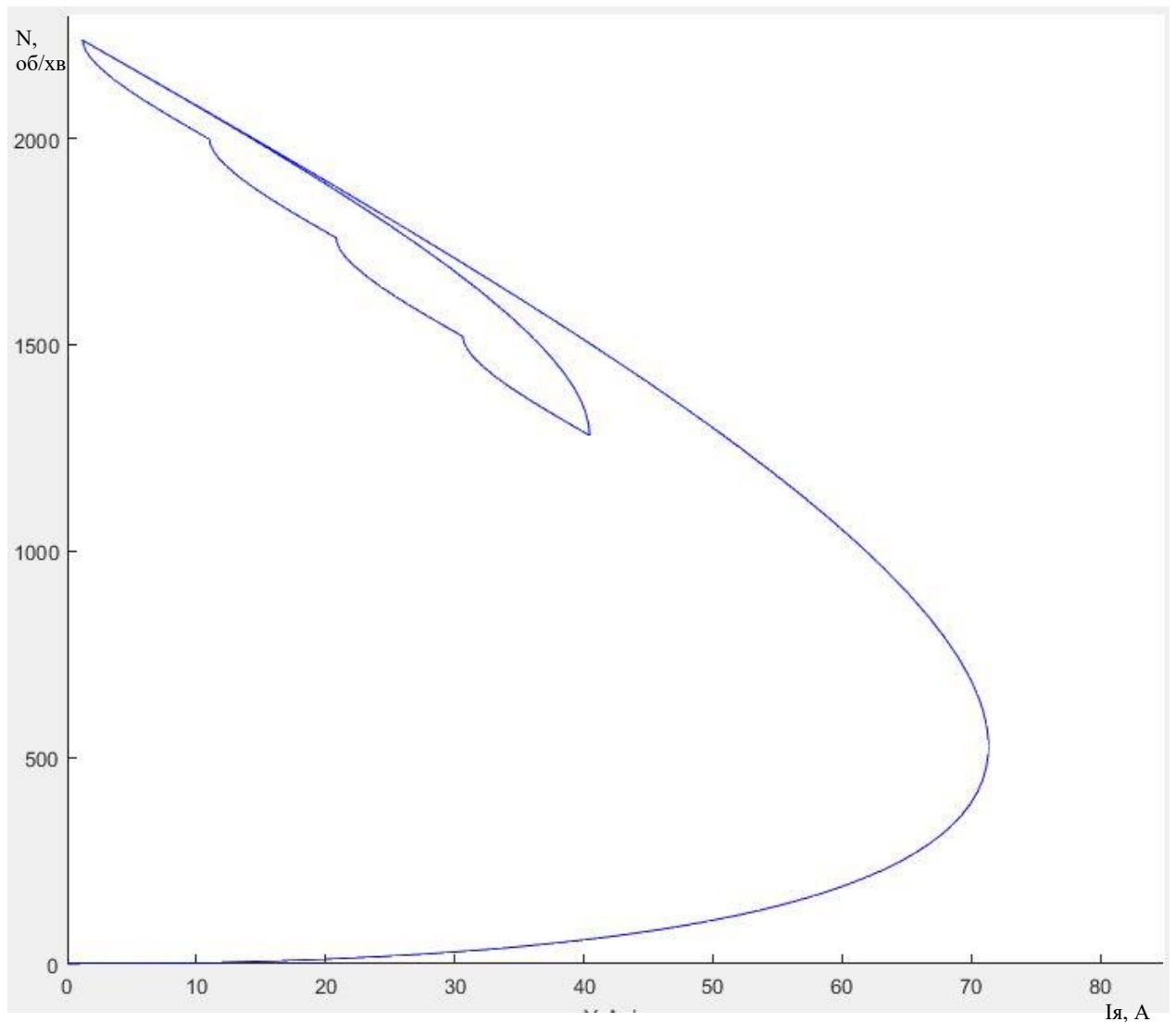


Рисунок 1.3 Електромеханічна характеристика двигуна.

На електромеханічній характеристиці двигуна відображена залежність числа обертів на хвилину від струму якоря. Після 500 об/хв характеристика майже лінійна, двигун без навантаження набирає частоту обертів більше ніж номінальна. При навантаженні двигуна відбувається спадання обертів та зростання струму якоря. Після від'єднання навантаження двигун знов розганяється до максимальних обертів холостого ходу.

Експеримент 2.

Визначення електромеханічних характеристик двигуна постійного струму при зміні опору в колі якоря.

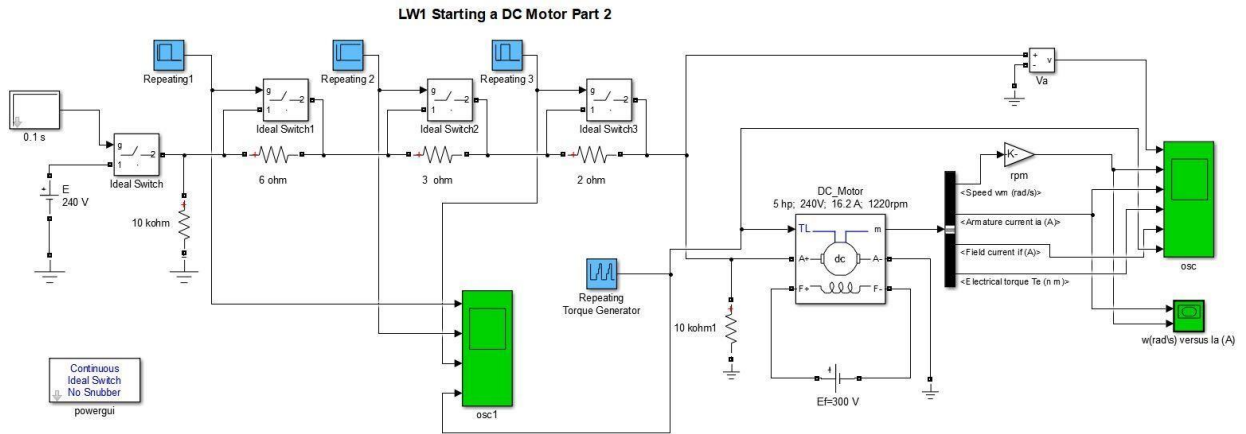


Рисунок 1.4 Схема моделі для визначення електромеханічних характеристик при зміні опору в колі якоря.

Права частина схеми залишається без змін, змінилося коло живлення якоря. Для зміни струму живлення якоря, до схеми додано три послідовно з'єднанні резистори, які можуть шунтуватися керованими перемикачами (Ideal Switch 1, 2, 3).

Розглянемо роботу перемикачів в часі. Для наочності, розглянемо роботу перемикачів на діаграмах осцилографа OSC1 (Рисунок 1.5).

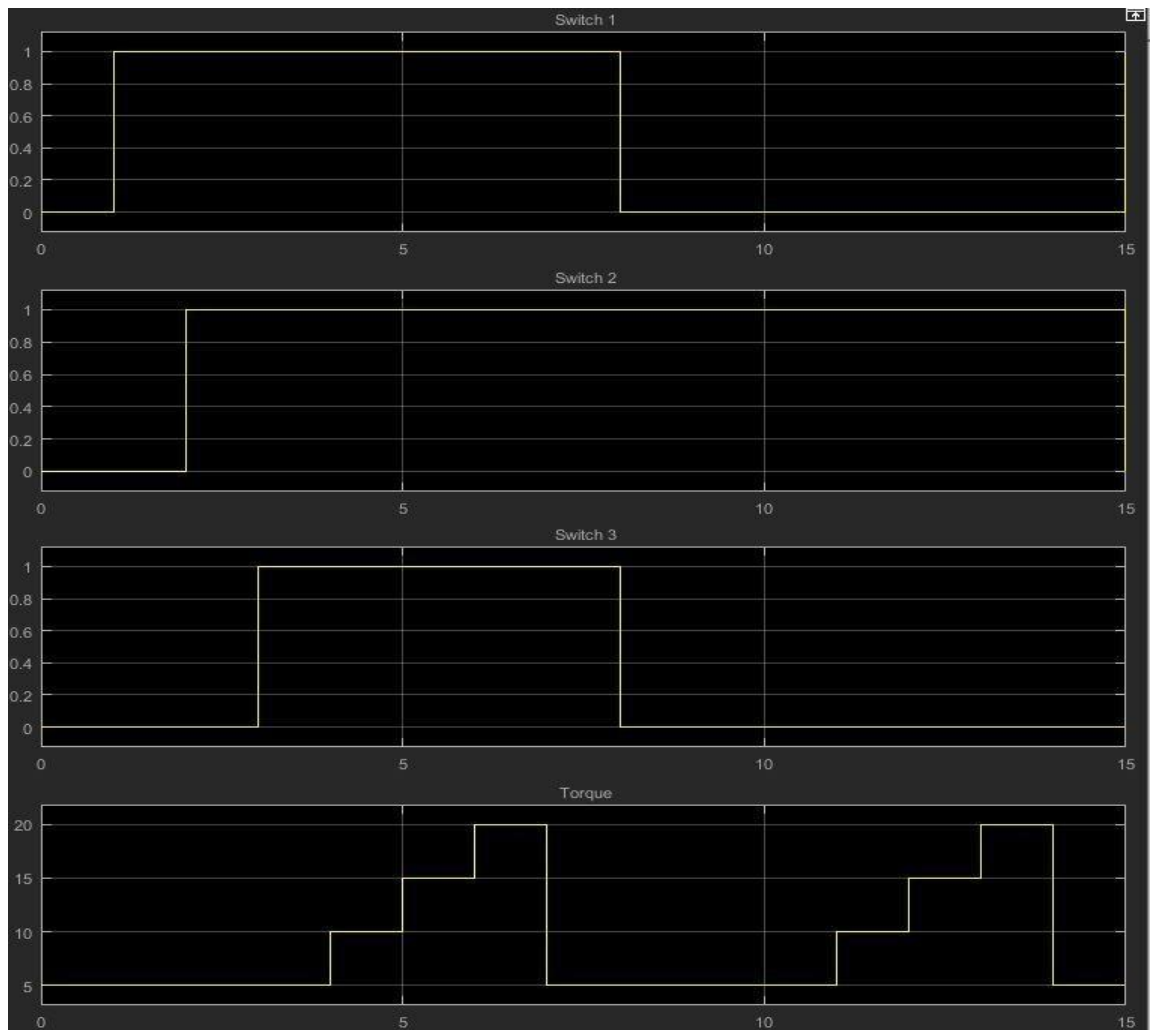


Рисунок 1.5 Діаграми перемикання керованих вимикачів.

Для плавного запуску двигуна, та зменшення пускового струму, на першому етапі моделювання всі перемикачі розімкнуті. В процесі старту двигуна, перемикачі по черзі вмикаються і шунтують резистори з інтервалом одна секунда. Таким чином опір в колі якоря ступінчасто знижується до нуля. Далі проходить ступінчасте навантаження двигуна, для визначення його природної характеристики. Після цього знімається шунтування резистора 3 Ом (Switch 2) і далі проводиться ступінчасте навантаження с таким же моментом.

Час моделювання складає 15 секунд.

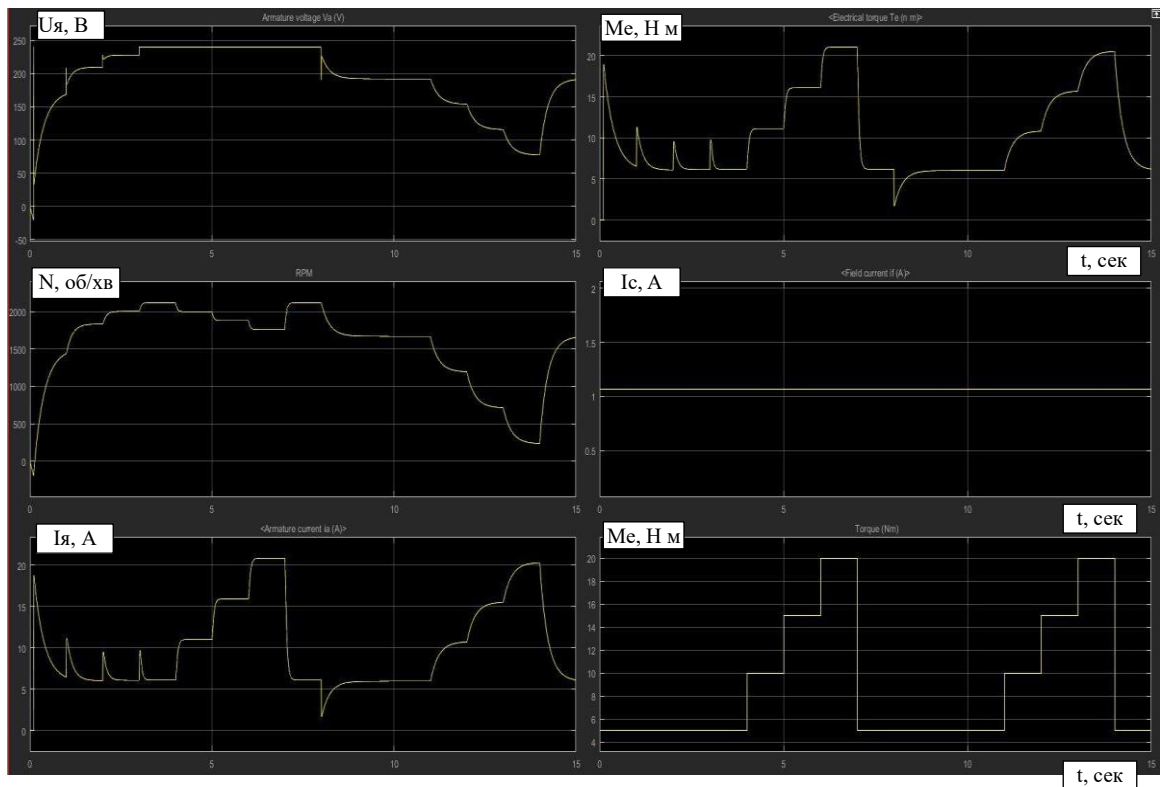


Рисунок 1.6 Результати моделювання.

На рисунку 1.6 наведені результати моделювання. На діаграмах відображено зміна в часі напруги якоря, обертів на хв, струму якоря, електричного моменту двигуна, струм в колі збудження та значення моменту яким навантажується двигун. Двигун навантажується в 2 етапи при різних значеннях опору в колі якоря.

Розглянемо стартовий процес двигуна. На старті ми відбувається плавний пуск за рахунок під'єднання 3 резисторів (6+3+2) Ом загалом 11 Ом потім шунтування резистора 6 Ом, 3 Ом і 2 Ом. При шунтуванні резисторів відбувається викиди струмів в колі якоря, а також зміна швидкості набору обертів без навантаження.

На першому етапі навантаження при роботі двигуна при живленні якоря на пряму від джерела живлення відбувається збільшення струму якоря та електромагнітного моменту пропорційно моменту навантаження та зменшення обертів ротора. Далі при вимиканні 2 перемикача в коло живлення якоря вмикається резистор 3 Ом, при цьому відбувається стрибок струму від'ємної

полярності та плавне зменшення обертів. Далі при навантаженні відбувається більш сильне зменшення обертів, а також з'являється провал в напрузі живлення якоря. Електричний момент двигуна майже по формі повторює форму зміни струму в обмотках якоря, струм в обмотці збудження не змінюється.

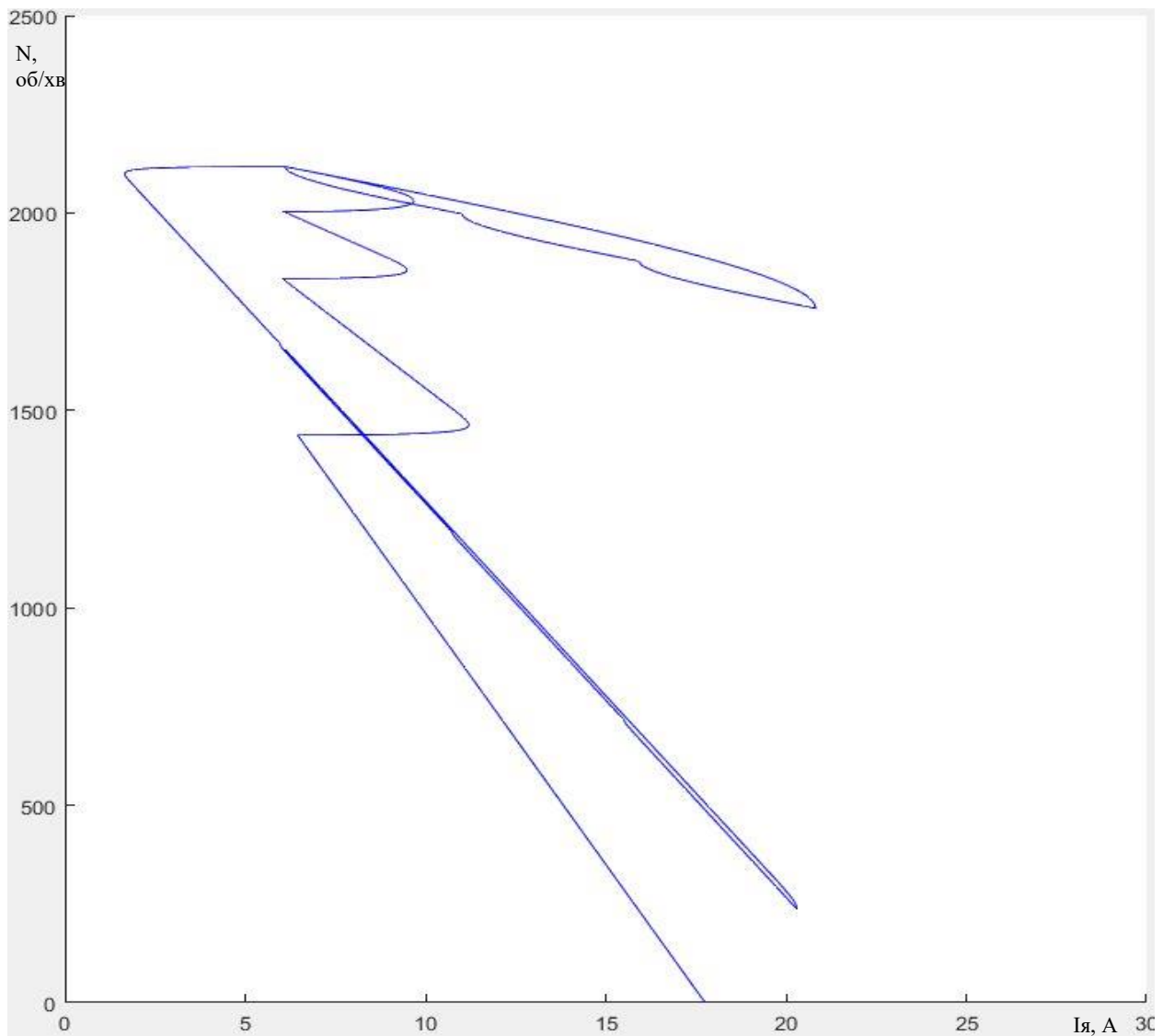


Рисунок 1.7 Електромеханічні характеристики двигуна

На електромеханічній характеристики двигуна (рисунок 1.7) видна розгінна характеристика. Вона є лінійною, на першому етапі при шунтуванні наступного резистора відбувається стрибок струму та подальше збільшення обертів, при шунтуванні наступного резистора відбувається ще більший

стрибок струму та ще більше збільшення обертів після шунтування останнього резистора, двигун виходить на номінальні оберти при навантаженні 5 н'ютон на метр, після цього відбувається навантаження двигуна з живленням якоря двигуна безпосередньо від джерела живлення. Далі відбувається включення резистора 3 Ом в коло живлення якоря, після цього відбувається падіння струму та обертів. Далі при навантаженні двигуна з резистором в колі живлення якоря, отримаємо реостатну характеристику двигуна. Після відключення навантаження, оберти повертаються до максимальних для навантаження 5 н'ютон на метр. Таким чином отримано 2 характеристики двигуна це природня характеристика, електромеханічна яку мали в попередньому експерименті та реостатна характеристика при підключенні якоря через резистор номіналом 3 Ом.

Експеримент 3.

Визначення електромеханічної характеристики при зміні струму збудження.

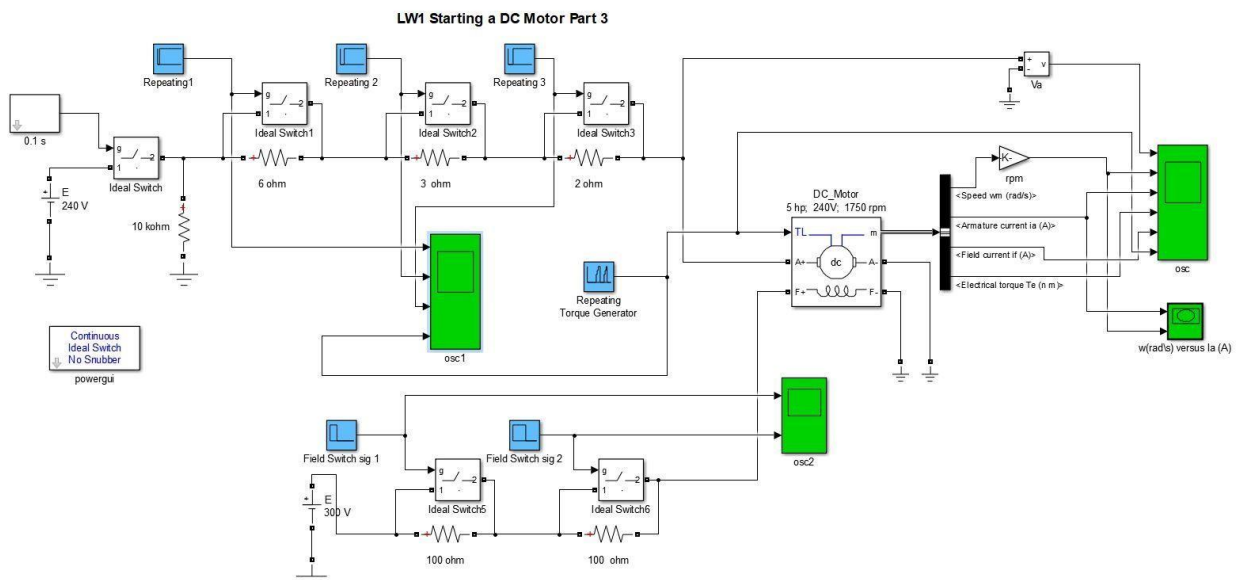


Рисунок 1.8 Схема моделі для визначення електромеханічної характеристики при зміні струму збудження.

Відносно попередньої схеми схема живлення обмотки збудження внесені 2 резистора номіналом 100 Ом які шунтуються керованими перемикачами. В часі перемикачі на першому етапі шунтують резистори, потім по черзі вмикають ці резистори в коло живлення обмотки збудження. (Рисунок 1.9)

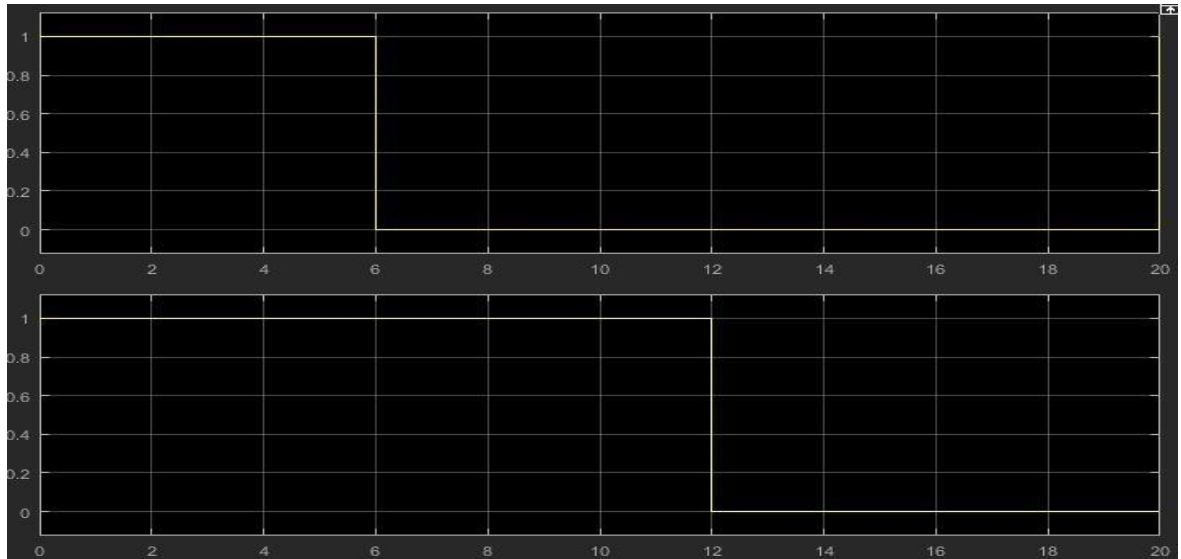


Рисунок 1.9 Діаграми перемикання керованих вимикачів в колі ОЗ.

На першому етапі резистори вимикається з кола живлення якоря по черзі, це потрібно для плавного запуску двигуна, далі двигун працює безпосередньо підключений до джерела живлення 240В.

На початку моделювання відбувається плавний запуск двигуна, та він переходить в природній режим роботи. Природній режим роботи відбувається при живленні обмотки збудження від номінальної напруги 300В та живлення обмотки якоря від напруги 240В. Двигун без навантаження набирає оберти до 2200 на хвилину. Далі в коло живлення обмотки збудження вмикається резистор з номіналом 100 Ом, при цьому струм обмотки живлення зменшується, а оберти двигуна без навантаження підіймаються до 3000 об/хв.

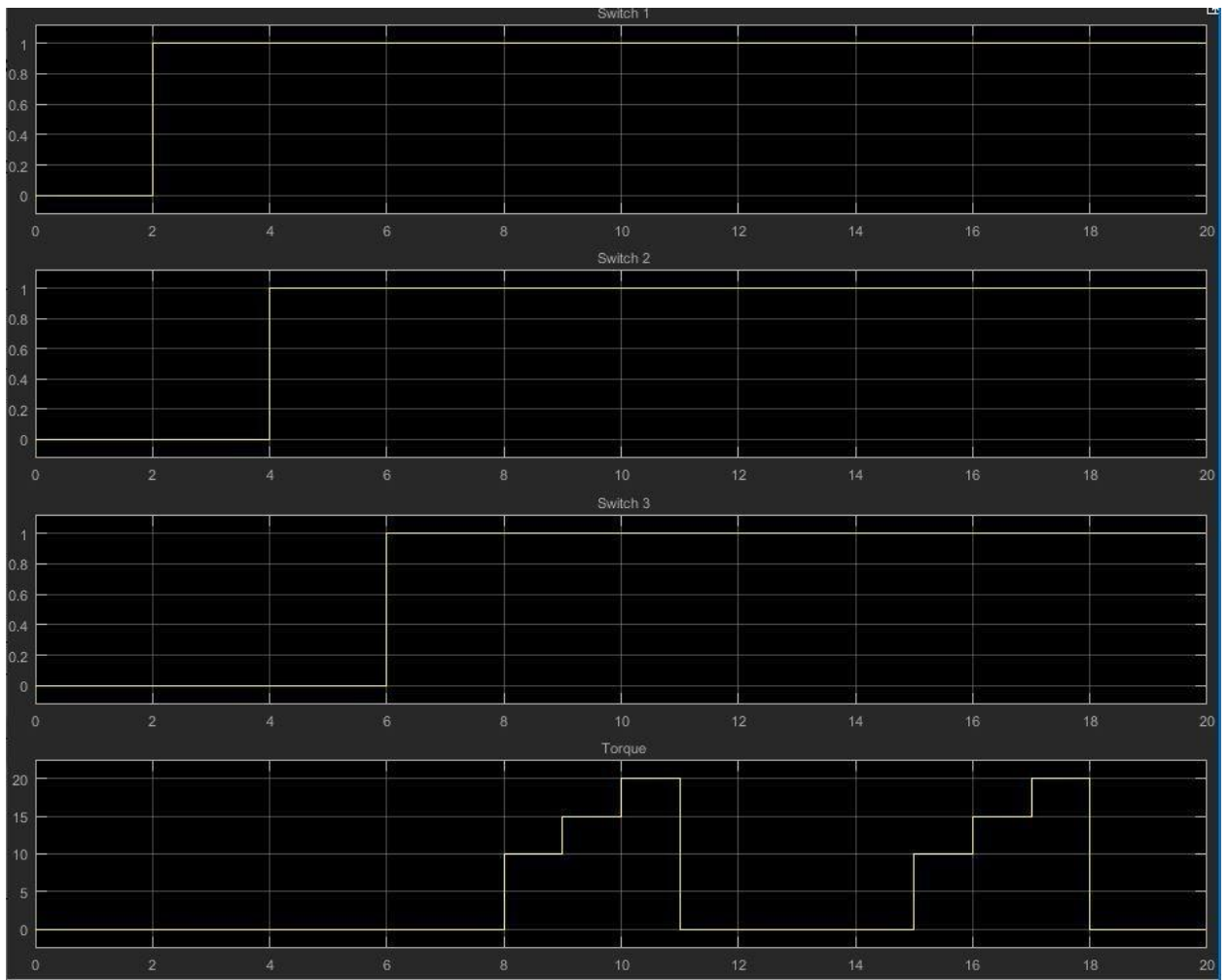


Рисунок 1.10 Діаграми перемикання керованих вимикачів в колі якоря.

На восьмій секунді моделювання, при збільшенні моменту навантаження на двигун, оберти зменшуються, зростає струм в обмотках якоря та зростає електричний момент двигуна. На дванадцятій секунді моделювання, струм в колі живлення обмотки збудження зменшується введенням ще одного послідовного резистора номіналом 100 Ом. При цьому без навантаження двигун ще більше збільшує оберти. При навантаженні на 12 секунді струм кола якоря ще більше збільшується, а електромагнітний момент двигуна при цьому майже не змінюється. при вимиканні навантаження оберти знову збільшуються до 3000 обертів на хвилину.

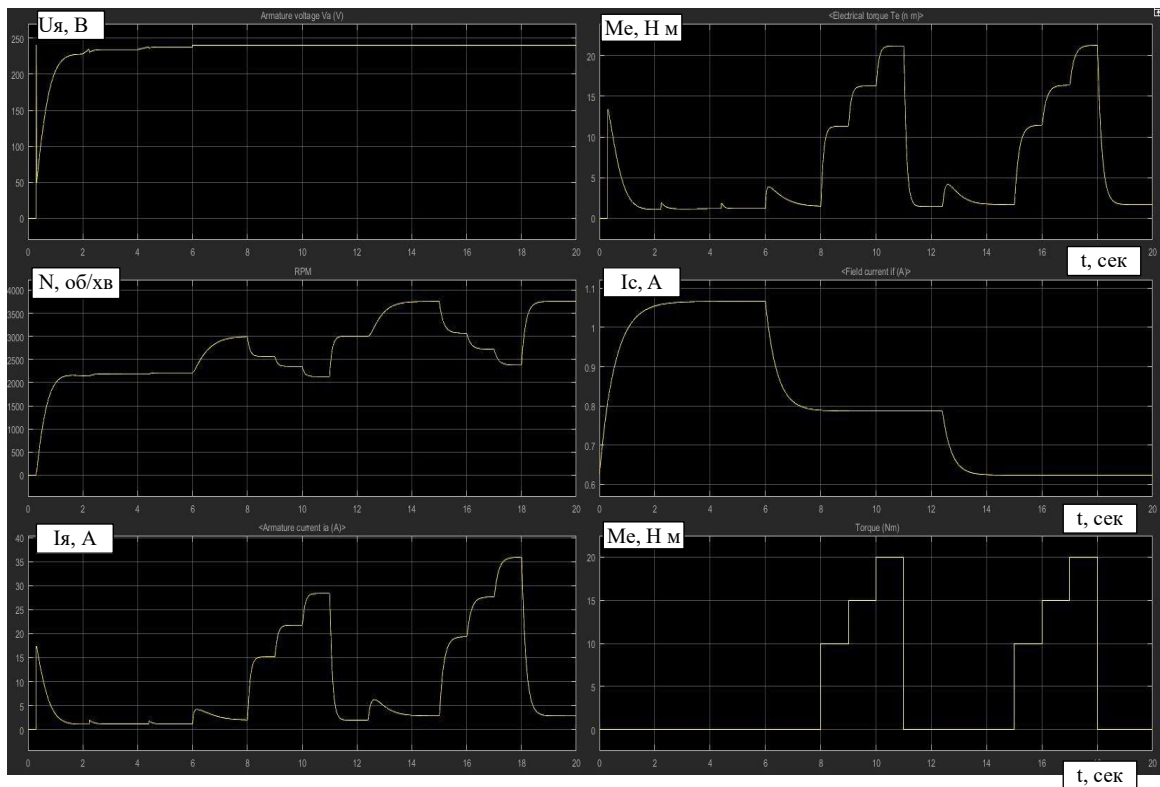


Рисунок 1.11 Результати моделювання.

На електромеханічній характеристиці двигуна (Рисунок 1.12) видно, що після розгону двигуна холостого ходу при зменшенні струму внесенням резистора 100 Ом в коло живлення обмотки збудження відбувається зміщення характеристики в сторону збільшення обертів. Після введення ще одного резистора 100 Ом (загальний опір дорівнює 200 Ом), відбувається переміщення характеристики в сторону збільшення обертів та збільшення струму якоря.

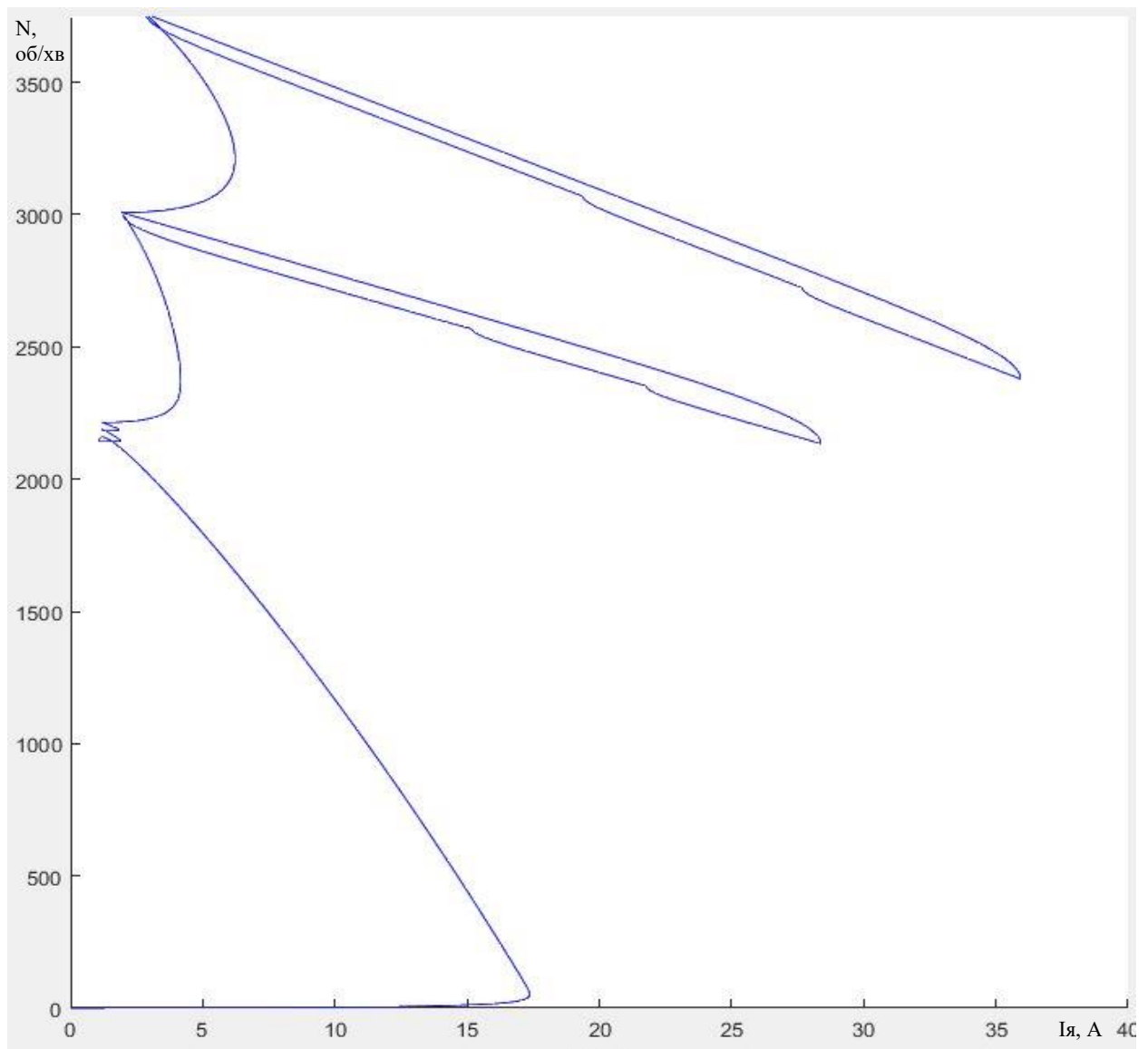


Рисунок 1.12 Електромеханічна характеристика двигуна.

Запитання для самоконтролю

1. Обґрунтувати можливі способи регулювання швидкості двигуна постійного струму.
2. Визначити, який із способів регулювання швидкості має переваги над іншими за жорсткістю характеристик.
3. Пояснити, чому при збільшенні моменту навантаження на валу двигуна зменшується його швидкість.

4. Пояснити, яким чином в експериментальній установці створюється момент навантаження на валу досліджуваного двигуна.
5. Обґрунтувати, чому під час вмикання двигуна під напругу відбувається кидок струму якоря?
6. Під час роботи двигуна під номінальним навантаженням пропав струм збудження. Що буде з моментом двигуна і струмом якоря і чому?

Лабораторна робота 2

ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПРИ ЗМІНІ НАПРУГИ ЯКОРЯ

Метою роботи є визначення електромеханічних характеристик електропривода постійного струму при зміні напруги якоря.

Основні теоретичні положення

Способи регулювання швидкості можуть бути обґрунтованими за допомогою рівняння електричної рівноваги кола якоря двигуна:

$$U_{\text{я}} = I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}} + E_{\text{я}}, \quad (2.1)$$

де $U_{\text{я}}$ – напруга живлення кола якоря, В;

$I_{\text{я}}$ – струм у колі якоря, А;

$R_{\text{я}}$ – опір кола якоря, Ом;

$E_{\text{я}}$ – електрорушійна сила обмотки якоря (проти-ЕРС), що визначаються за формулою:

$$E_{\text{я}} = c \cdot \Phi \cdot \omega_{\text{я}}, \quad (2.2)$$

де c – конструктивна стала двигуна; Φ – магнітний потік обмотки збудження; $\omega_{\text{я}}$ – кутова швидкість якоря, рад/с.

З формул (2.1) і (2.2) витікає формула залежності швидкості від параметрів електропривода

$$\omega = \frac{U - IR}{k\Phi}, \quad (2.3)$$

За формулою (2.3) можна сформулювати три способи регулювання швидкості:

1. зміною напруги якоря;
2. зміною опору кола якорю;
3. зміною струму збудження (магнітного потоку).

Одним з головних показників оцінки способів регулювання є величина *жорсткості* електромеханічних характеристик, що забезпечує електропривод як сукупність двигуна і регулювальних пристроїв відповідно до даного способу регулювання.

Природною електромеханічною характеристикою двигуна називають таку, яку отримують при безпосередньому вмиканні кіл якоря і збудження двигуна на напругу номінального значення. А характеристики, отримані одним із способів регулювання, називають *штучними* або *регулювальними*.

Порядок виконання роботи

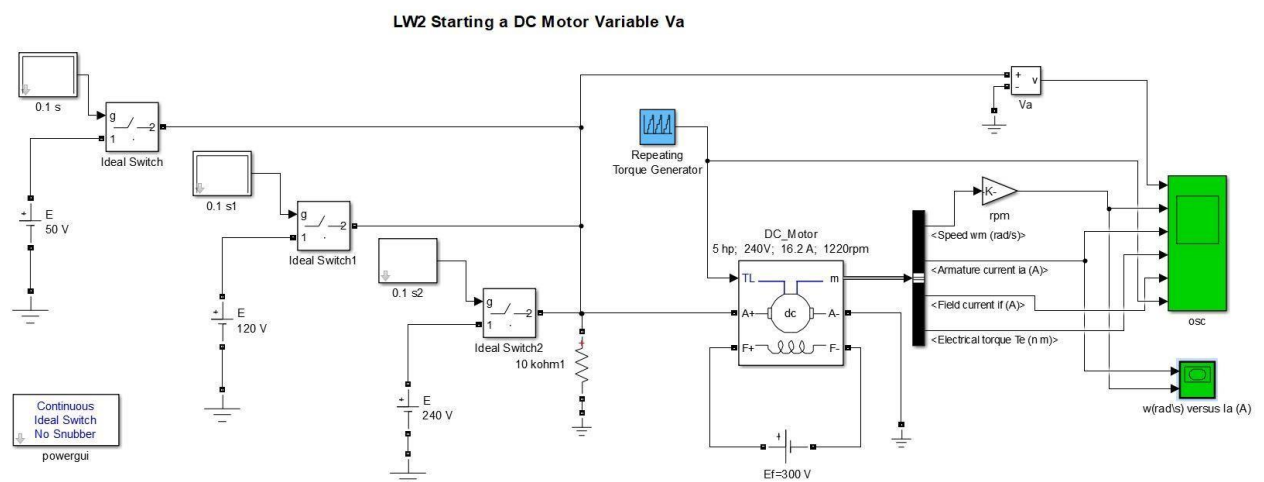


Рисунок 2.1 Модель в Simulink для визначення електромеханічних характеристик електроприводу постійного струму при зміні напруги якоря.

Схема від попередньої роботи відрізняється схемою живлення кола якоря. В моделі використовується той самий двигун. Обмотка збудження живиться від

джерела напруги 300В, використовуються ті самі вимірювачі для вимірювання частоти обертів напруги вимірювання струму якоря двигуна, вимірювання струму обмотки збудження та вимірювання електромагнітного моменту. Для живлення кола якоря використовується три джерела напруги 70,140,240 вольт, які від'єднуються по черзі в часі. Також в часі змінюється навантаження на вал двигуна. Час моделювання становить 19 секунд.

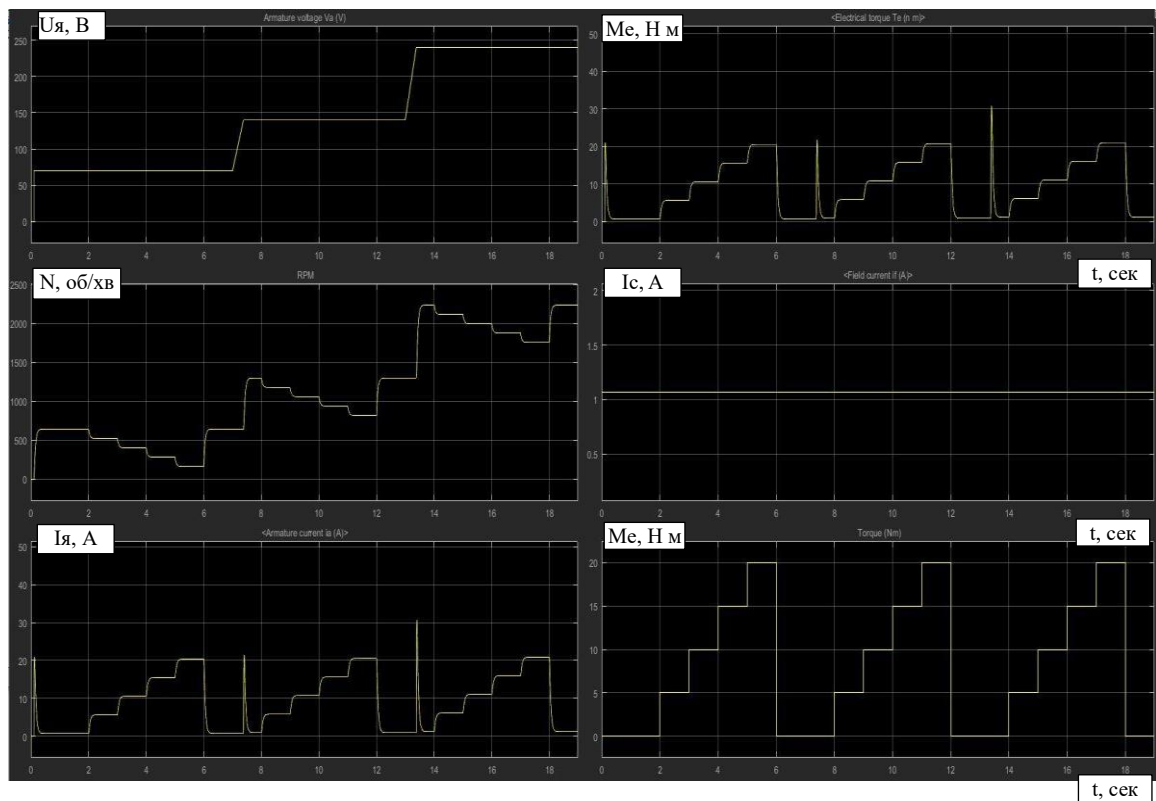


Рисунок 2.2 Результати моделювання.

На діаграмі напруги живлення якоря видно, що спочатку під'єднується джерело 70В потім на 7 секунд під'єднується замість нього джерело 140В потім на 13 секунд під'єднується джерело 240В. При старті двигуна без навантаження спостерігається викид струму майже до 20А та поступово зменшується майже до пів ампера. При роботі без навантаження, двигун набирає оберти майже 600 об/хв при напрузі 70В, далі подається навантаження сходами з кроком 5Нм. При зростанні навантаження, пропорційно зростає струм, а оберти падають зворотно пропорційно. Електромеханічний момент також зростає пропорційно зі струмом. На 6 секунд відбувається зменшення навантаження на вал двигуна

до 0. При цьому одразу відбувається зменшення струму якоря і також набирання обертів до обертів холостого ходу при напрузі 70 В. Далі відбувається збільшення напруги до 140В і повторюється цикл такого ж самого навантаження з кроном 5 Нм. При цьому струм якоря збільшується на такими ж сходами як і при 70В. Електромагнітний момент також пропорційний струму якоря який дорівнює попередньому циклу при напрузі 70В. Далі напруга збільшується на 13 секунд до 240В. При цьому на холостому ходу оберти збільшуються до 2200 об/хв та після навантаження також пропорційно навантаженню спадають. При цьому струм збільшується пропорційно навантаженню та електромагнітний момент збільшується пропорційно струму.

З цього можна зробити висновок, що що струм якоря не залежить від прикладеної напруги. Від напруги живлення якоря залежать тільки оберти якоря. Оберти також залежать від навантаження: чим більше навантаження тим більше зменшуються оберти пропорційно навантаженню. Струм обмотки збудження залишається незмінним протягом всього часу вимірювання.

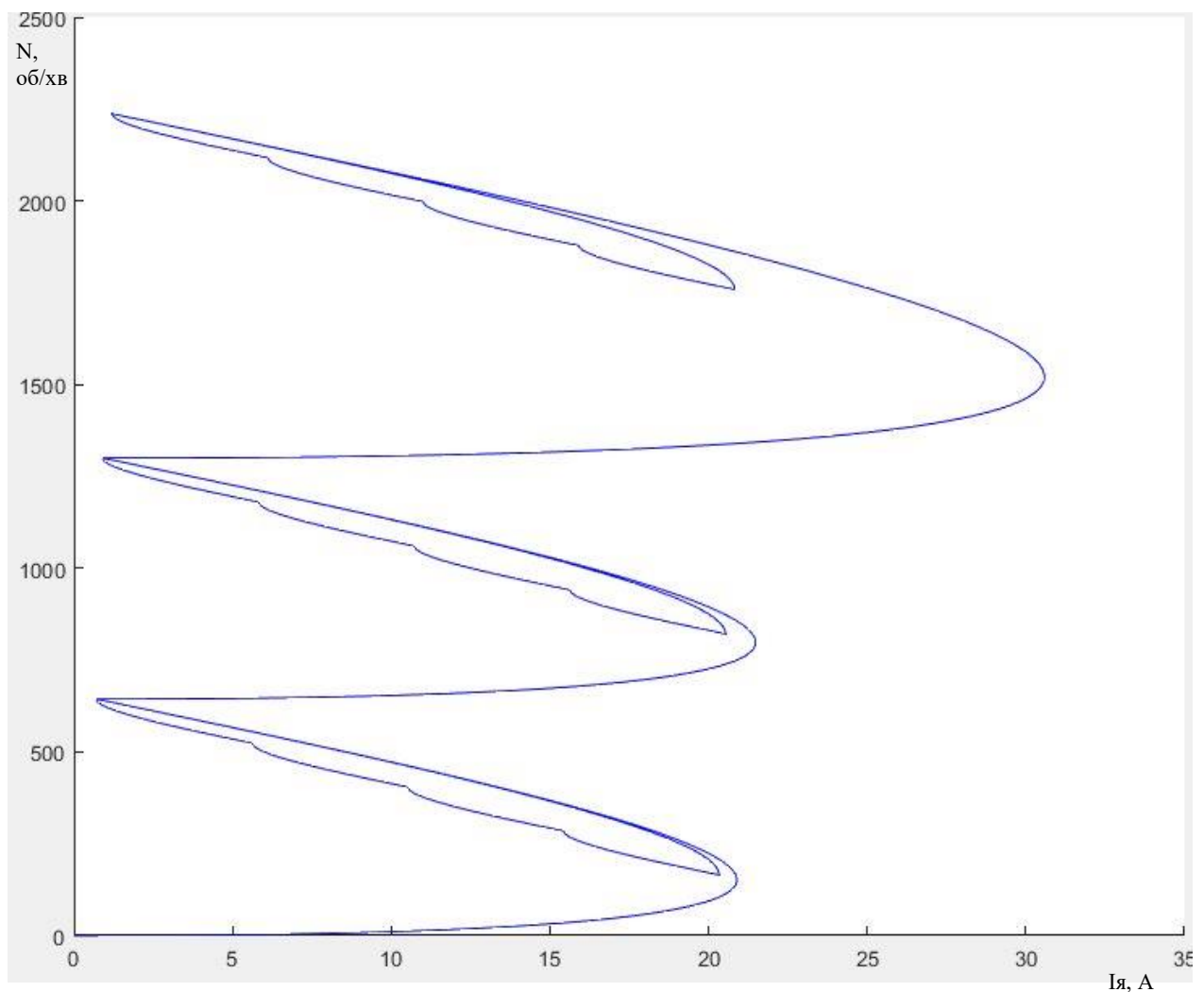


Рисунок 2.3 Електромеханічні характеристики двигуна.

На рисунку 2.3 наведено отримана залежність обертів від струму якоря. Завдяки інерції якоря можна побачити плавні перехідні процеси при розгоні завдяки збільшенню напруги якоря. Нижня петля це розгін до 600 обертів при напрузі 70 В, потім розгін майже до 1300 обертів при напрузі 140 В та останній розгін на холостому ході до 2250 обертів при напрузі 240В.

При навантаженні можна побачити лінійні характеристики двигуна. Можна сказати що це природні характеристики двигуна. При кожному рівні напруги характеристики двигуна мають однаковий кут нахилу це означає що жорсткість цих характеристик однакова.

З цього можна зробити висновки, що при живленні кола якоря безпосередньо від джерела напруги, жорсткість електромеханічних характеристик при зміні напруги живлення не змінюється.

Запитання для самоконтролю

1. Обґрунтувати можливі способи регулювання швидкості двигуна постійного струму.
2. Визначити, який із способів регулювання швидкості має переваги над іншими за жорсткістю характеристик.
3. Пояснити, чому при збільшенні моменту навантаження на валу двигуна зменшується його швидкість.
4. Пояснити, яким чином в експериментальній установці створюється момент навантаження на валу досліджуваного двигуна.
5. Обґрунтувати, чому під час вмикання двигуна під напругу відбувається кидок струму якоря?
6. Обґрунтувати, чому при визначенні електромеханічних характеристик при зміні напруги якоря першим вмикають вимикач якоря, а потім обмотки збудження.
7. Під час роботи двигуна під номінальним навантаженням пропав струм збудження. Що буде з моментом двигуна і струмом якоря і чому?

Лабораторна робота 3

ЕЛЕКТРОПРИВОД ПОСТІЙНОГО СТРУМУ В ГАЛЬМІВНИХ РЕЖИМАХ

Метою роботи є визначення електромеханічних характеристик електропривода постійного струму в гальмівних режимах.

Основні теоретичні положення

Досить часто в сучасних електроприводах необхідно швидко й точно зупинити механізм або змінити напрямок його руху. Швидкість і точність, з якими будуть пророблені ці операції, у багатьох випадках визначають продуктивність механізму, а іноді і якість вироблюваного продукту.

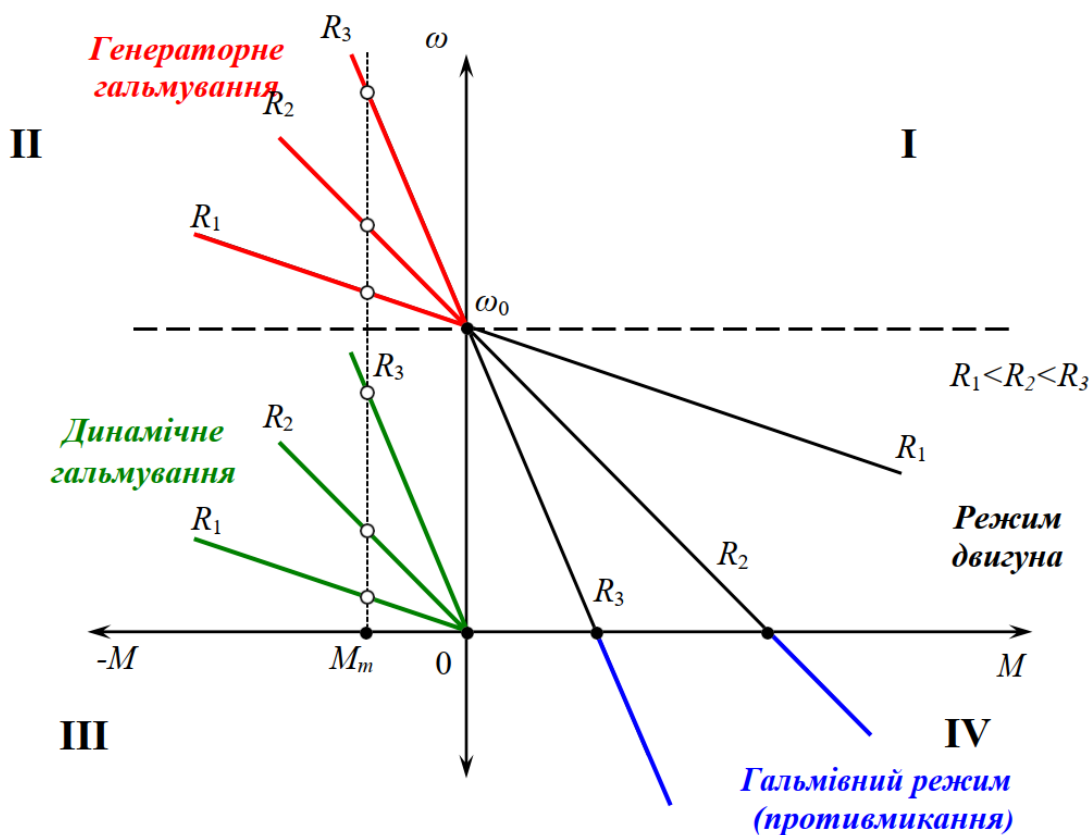


Рисунок 3.1 – Механічні характеристики двигуна постійного струму незалежного збудження при різних режимах роботи

Під час гальмування або зміни напрямку руху (реверса) електродвигун працює в гальмовому режимі на одній з механічних характеристик відповідному здійснюваному способу гальмування. Графічне зображення механічних характеристик двигуна незалежного збудження для різних режимів роботи представлено на рис. 3.1. Тут, крім ділянки характеристик, що відповідають рушійному режиму (квадрант I), показані ділянки характеристик у квадрантах II й IV, що характеризують три можливих способи генераторного електричного гальмування, а саме:

- 1) гальмування з віддачою енергії в мережу (рекуперативне);
- 2) динамічне гальмування;
- 3) гальмування противмиканням.

Кожен гальмовий режим є генераторним, тому що енергія надходить у машину з валу, перетворюється в електричну й або віддається в мережу, або затрачається на нагрівання елементів якірного кола, які володіють активним опором, і розсіюється в навколишнє середовище.

Динамічне гальмування відбувається при відключенні якоря двигуна від мережі й замиканні його на резистор, тому іноді його називають реостатним гальмуванням, рис. 3.2. Обмотка збудження при цьому повинна залишатися приєднаною до мережі. Режим динамічного гальмування також відповідає роботі машини як генератор.

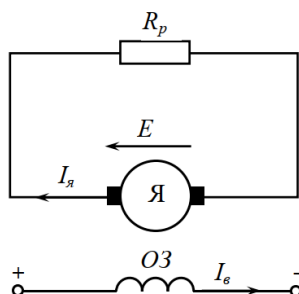


Рисунок 3.2 – Схема включення двигуна постійного струму незалежного збудження при динамічному гальмуванні

При динамічному гальмуванні, механічна енергія, що надходить із валу, у вигляді кінетичної енергії, запасеної у двигуні й механізмі, перетвориться в електричну. Однак ця енергія не віддається в мережу, а виділяється у вигляді теплоти в опорах ланцюга якоря.

Внаслідок того, що ЕРС двигуна зберігає при гальмуванні такий же знак, як й у руховому режимі, а напруга ззовні до якоря не прикладається, струм якоря визначається по формулі:

$$I = \frac{-E}{R}, \quad (3.1)$$

де R – опір якорного кола.

Гальмовий момент при динамічному гальмуванні, може бути виражений рівністю:

$$-M_m = k\Phi I = -k^2 \frac{\Phi^2}{R} \omega, \quad (3.2)$$

При $\Phi = \text{const}$ отримаємо:

$$\omega = M_m \frac{R}{c^2}. \quad (3.3)$$

Програма роботи

В роботі потрібно виконати два експерименти:

1. Визначення електромеханічних характеристик при динамічному гальмуванні.
2. Визначення електромеханічних характеристик при гальмуванні противмиканням.

Дослідження проводяться за допомогою середовища моделювання Simulink (сімулінк), що входить до складу MathLab.

Експеримент 1.

Визначення електромеханічних характеристик при динамічному гальмуванні.

Розглянемо схему моделі в середовищі Simulink для визначення електромеханічних характеристик електроприводу постійного струму при динамічному гальмуванні.

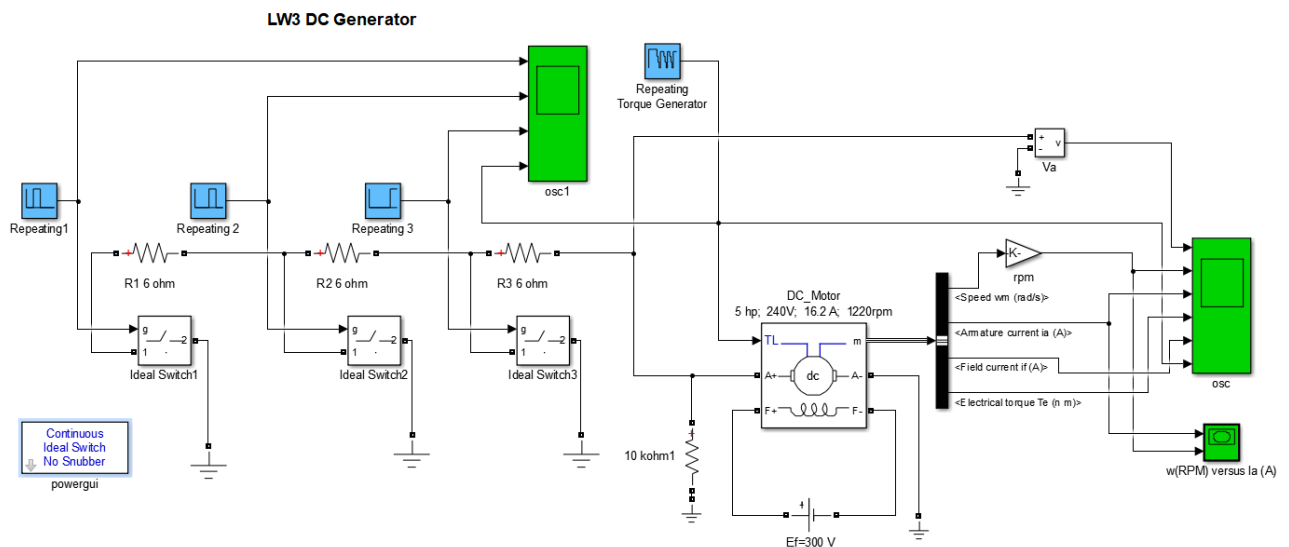


Рисунок 3.3 Модель для визначення електромеханічних характеристик при динамічному гальмуванні.

В схемі використовується двигун який використовувався в попередніх лабораторних роботах. В схему включено набір осцилографів для опрацювання результатів моделювання. В якості навантаження генератора використовується три резистори номіналом 6 Ом які повинні підключатись в коло якоря по черзі протягом певного часу. На початковому етапі підключенні 3 резистори, потім 2 а в кінці 1 резистор, відповідно опір в колі якоря складає 18, 12 та 6 Ом. Час моделювання складає 20 секунд.

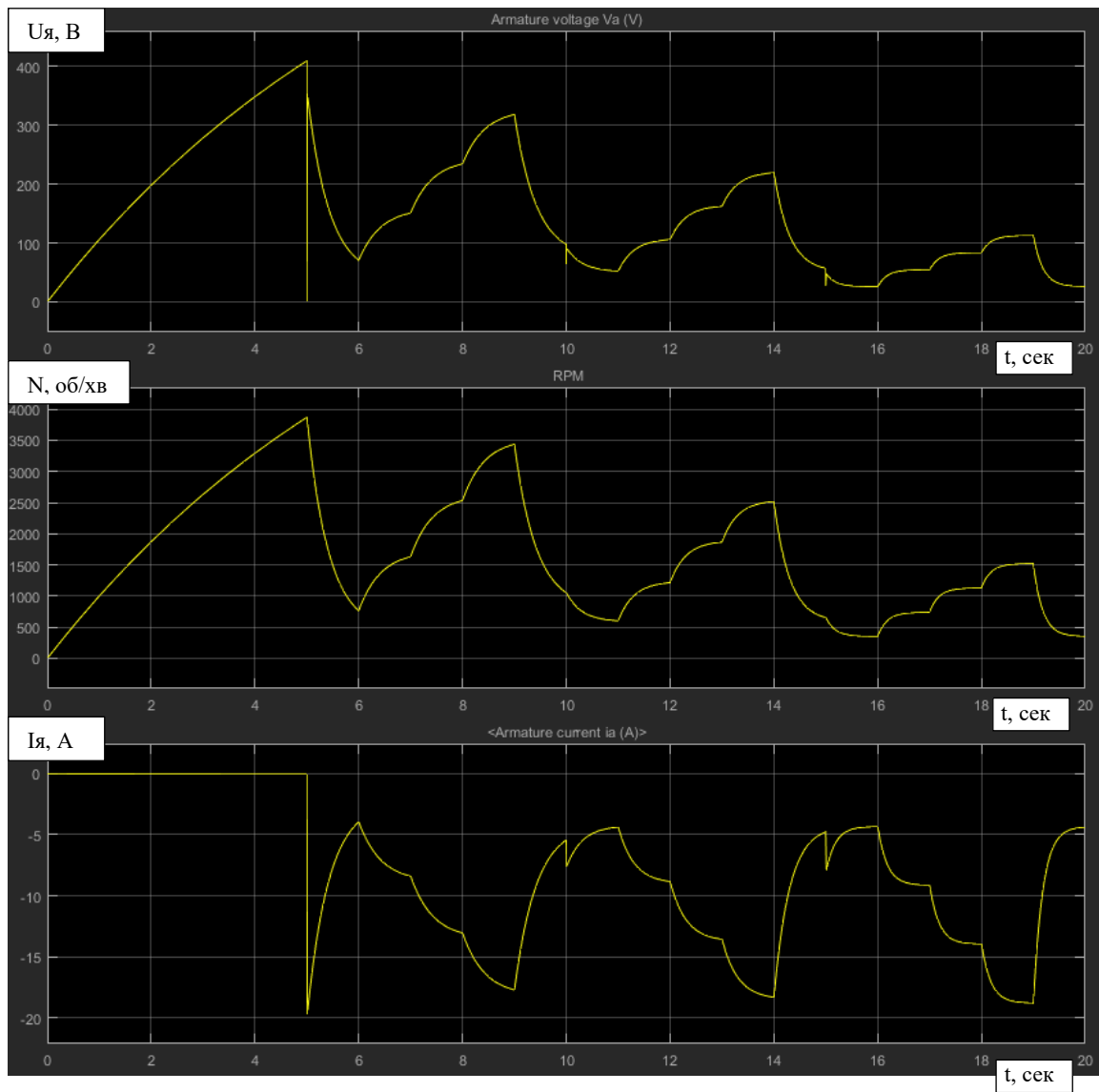


Рисунок 3.4 Часові діаграми обертів, напруги та струму якоря.

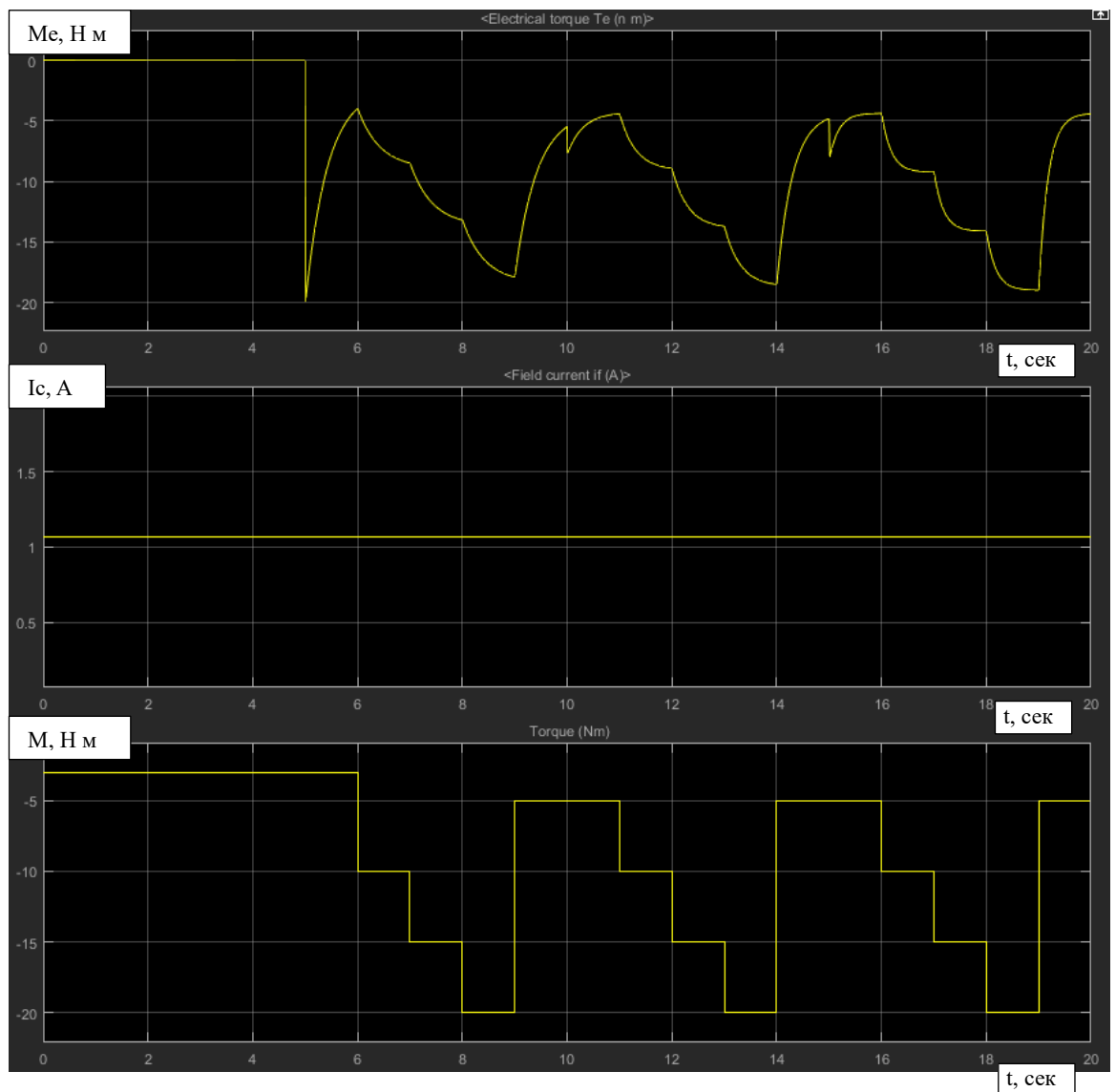


Рисунок 3.5 Часові електромагнітного моменту, моменту навантаження та струму обмотки збудження.

В перші 5 секунд резистори відключені, струм якоря дорівнює 0, електромагнітний момент також дорівнює 0. На початку моделювання двигуну надається від'ємний момент -2.5 Нм, при цьому двигун набирає оберти, та відповідно і напруга якоря зростає до 400 В. На 5 секунді під'єднуються 3 резистори, відбувається падіння обертів та від'ємний стрибок струму і падіння напруги на якорі майже до 80 В. Двигун починає збавляти оберти, після цього на 6 секунді сходами збільшується крутний момент. Максимальний крутний момент досягає -20 Н м, відбувається зростання обертів, зростання струму якоря

і електро-механічного моменту. Струм обмотки збудження залишається постійним на протязі всього експерименту.

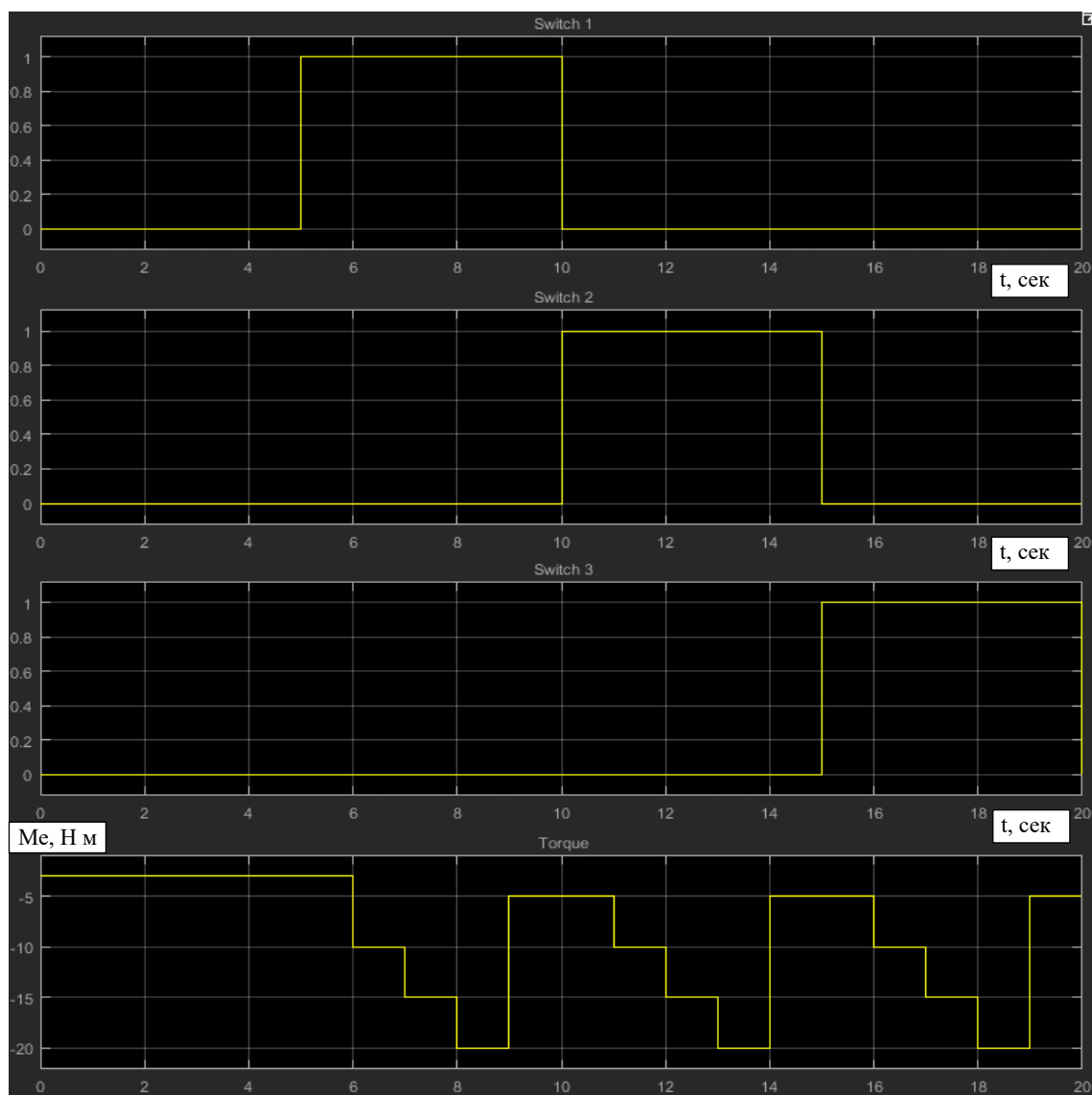


Рисунок 3.6 Часові діаграми вмикання перемикачів та змінення прикладеного до двигуна крутного моменту.

Далі від'єднується 1 резистор і спостерігається падіння обертів, падіння струму. На 9 секунд прикладений до двигуна момент знову зменшується до 5 Н м це призводить до зменшення обертів до 1000 об/хв та зменшення струму до -5А далі на 10 секунд від'єднується 2 резистор і відбувається невеликий скачок струму і поподальше зменшення обертів і зменшення струму при гальмуванні. Далі знову прикладається більший момент сходами до -20 Н м при цьому відбувається зростання обертів до 2500 об/хв зростання струму майже до -18А

та зростання напруги що трохи більше 200В. При під'єднанні резисторів 6 Ом, на 15 секунді відбувається зростання обертів до 1500 об/хв. Зростання напруги близько до 110В при максимальному крутному моменті, прикладеному до двигуна та майже те саме зростання струму якоря. Також пропорційно зростає і електромеханічний момент.

Розглянемо отримані електромеханічні характеристики двигуна при динамічному гальмуванні. Номограма залежності обертів двигуна від струму якоря на номограмі зображено 3 характеристики отримані при різному опорі в колі якоря. При зменшенні опору якоря, зменшується кут нахилу характеристики. При зменшенні кута нахилу характеристики, збільшується жорсткість характеристик двигуна.

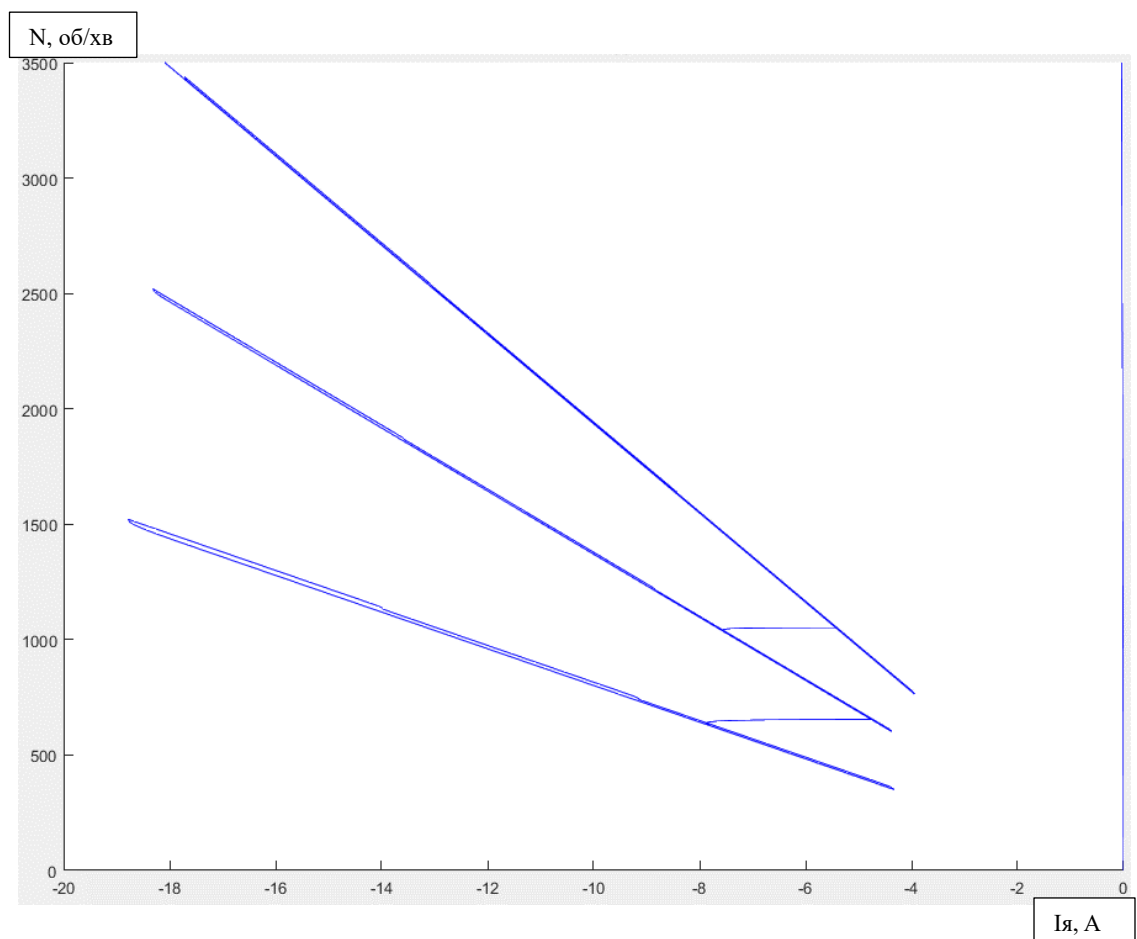


Рисунок 3.7 Залежність струму якоря від обертів при електродинамічному гальмуванні.

Експеримент 2.

Визначення електромеханічних характеристик при гальмуванні противмиканням.

На рисунку 3.8 наведено схему моделі в сімюлінк для визначення електромеханічних характеристик привода постійного струму при гальмуванні противмиканням. Схема підключення двигуна з незалежним збудженням та ввімкненням в коло якоря резистора 5 Ом. Час моделювання складає 4 секунди.

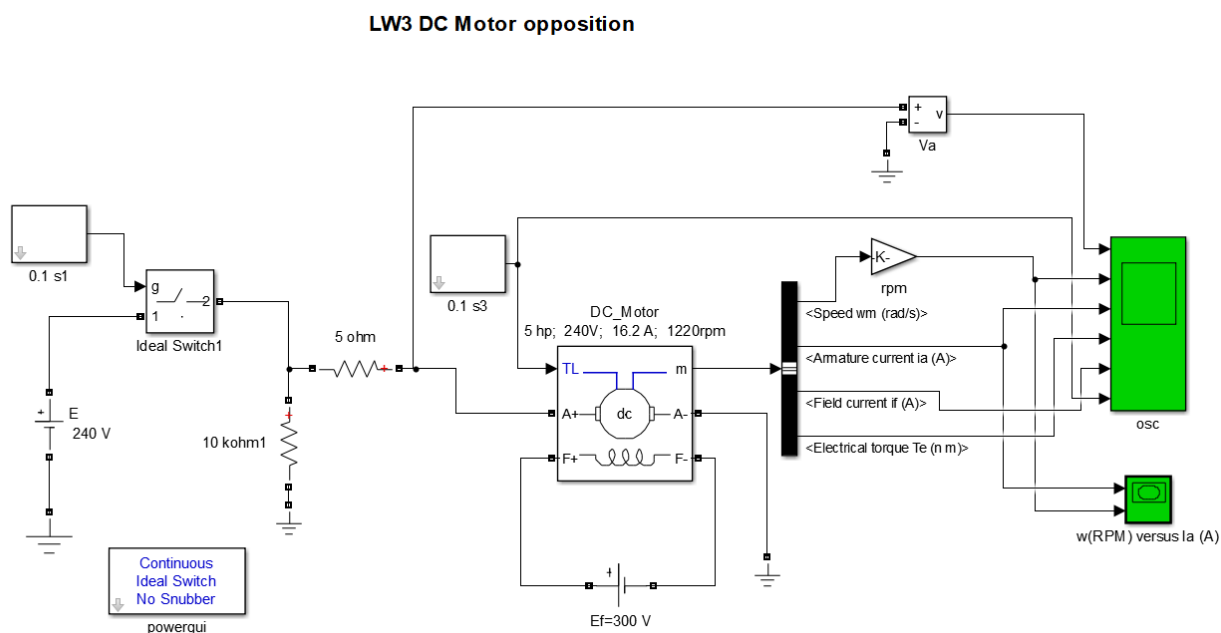


Рисунок 3.8 Схема моделі для визначення електромеханічних характеристик привода постійного струму при гальмуванні противмиканням.

На початку моделювання двигун не навантажений на двигун подається номінальна напруга 240В при старті двигуна є невеликий стрибок струму в колі живленні якоря, двигун набирає оберти на холостому ході і працює трохи більше 2000 об/хв пропорційно зростає

напруга якоря. На 2 секунді моделювання на двигун подається велике навантаження майже 60 Нм спостерігається різке зменшення обертів двигуна спочатку до 0 потім в від'ємну область. Це означає, що двигун починає обертатися в іншому напрямку та при цьому зростання струму якоря пропорційно зростає електромагнітний момент двигуна. Напруга якоря двигуна пропорційно спадає спочатку до 0 потім в від'ємну область і стабілізується на -50В.

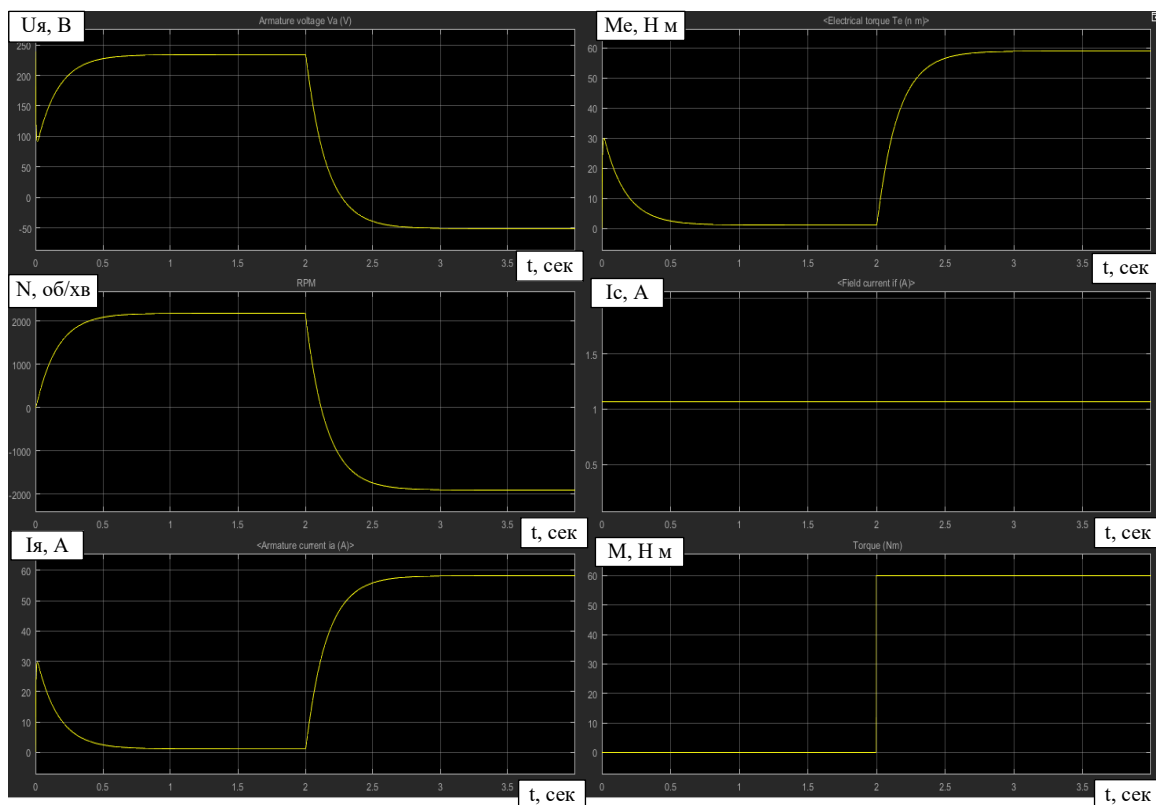


Рисунок 3.9 Часові діаграми обертів, напруги та струму якоря.

Розглянемо отримані електромеханічні характеристики двигуна в режимі противовмикання. На цій залежності ми бачимо розгін двигуна на холостому ході та його роботу на холостому ході обертах 2000 об/хв далі при під'єднанні великого навантаження на двигун оберти починають лінійно спадати та виходять в від'ємну область в режим гальмування проти вмиканням.

Запитання для самоконтролю

1. Пояснити, в яких випадках двигун постійного струму незалежного збудження може перейти в режим рекуперативного гальмування та в режим гальмування противмиканням?
2. У чому полягає фізична суть режиму динамічного гальмування?
3. Чому в режимі динамічного гальмування гальмівний момент двигуна зменшується із зменшенням швидкості?
4. Чому в режимі противмикання гальмівний момент збільшується із збільшенням швидкості?
5. Порівняти переваги і недоліки режимів противмикання і динамічного гальмування.
6. Чому при збільшенні опору в колі якоря гальмівні моменти зменшуються?
7. Написати рівняння електричної рівноваги двигуна для відповідних режимів і пояснити їх фізичну суть.

Лабораторна робота № 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПОСЛІДОВНОГО ЗБУДЖЕННЯ.

Метою роботи є дослідження та побудова за експериментальними даними характеристик двигуна постійного струму послідовного збудження у рушійному та гальмівному режимах.

Основні теоретичні відомості

Рівняння швидкісної характеристики двигуна з послідовним збудженням має вигляд, аналогічний двигуну з незалежним збудженням. Механічна характеристика $\omega=f(M)$ двигуна послідовного збудження не має точного аналітичного виразу, тому що залежність магнітного потоку від струму якоря $\phi=f(I_a)$ аналітично не виражається. Тому заводом для серії двигунів, що випускається, даються так звані універсальні характеристики залежності частоти обертання і моменту від струму (рис. 4.1).

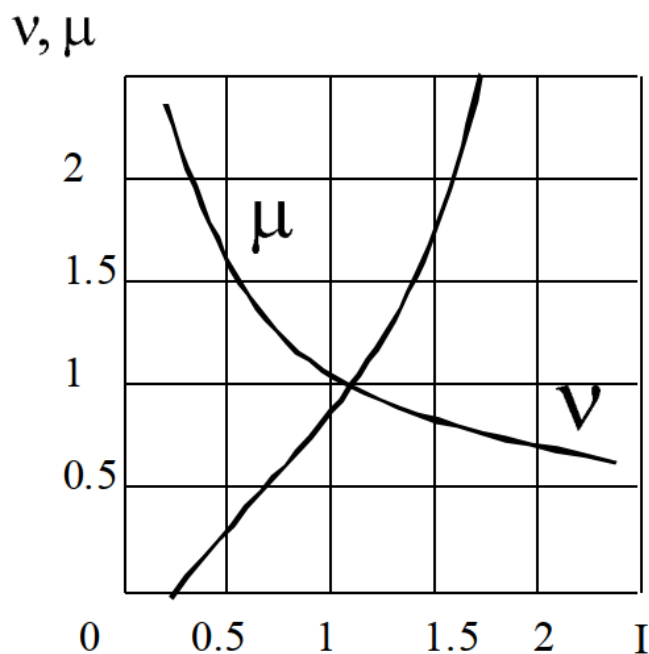


Рисунок 4.1 – Універсальні характеристики двигуна постійного струму.

Найпростішим способом регулювання частоти обертання є зміна опору якорного кола. Відповідні характеристики для різних значень R_d показані на рис. 4.2. На цьому самому рисунку зображені характеристики для режиму електродинамічного гальмування із самозбудженням. Цей вид робочого аварійного гальмування використовується для зупинки підйомного обладнання і для обмеження швидкості опускання вантажу з відмовою в роботі гальма.

Для одержання жорстких характеристик і можливості стійкої роботи двигуна з невеликими статичними моментами застосовується шунтування якоря. Завдяки наявності шунтувального контуру є можливість протікання струму в обмотці збудження за відсутності останнього в колі якоря.

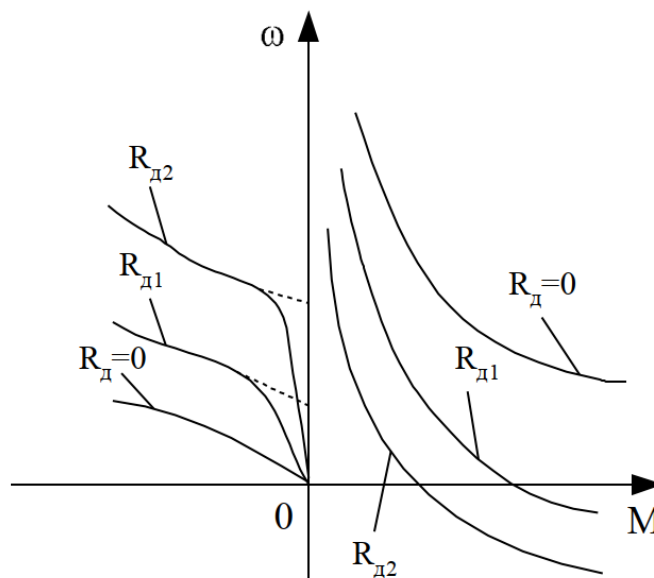


Рисунок 4.2 – Характеристики ДПТ ПВ зі зміною R_d та під час електродинамічного гальмування

Частота обертання холостого ходу:

$$\omega_0 = \frac{UR_{шя}}{k\phi(R_{шя} + R_{оз} + R_d)}.$$

Магнітний потік з ідеальним холостим ходом визначається за кривою намагнічування для струму:

$$I_0 = \frac{U}{(R_0 + R_{шя} + R_{оз})}.$$

Шунтування обмотки збудження призводить до зменшення магнітного потоку машини, а отже, із заданим моментом навантаження – до збільшення частоти обертання двигуна (рис. 3.3).

Залежність частоти обертання двигуна від струму якоря

$$\omega = \frac{U - I_{я} \frac{R_{я} + R_{шз} + R_{оз}}{R_{шз} + R_{оз}}}{k\phi}.$$

Значення магнітного потоку визначається з кривої намагнічування для струму збудження:

$$I_z = \frac{I_{я} R_{шз}}{R_{шз} + R_{оз}}.$$

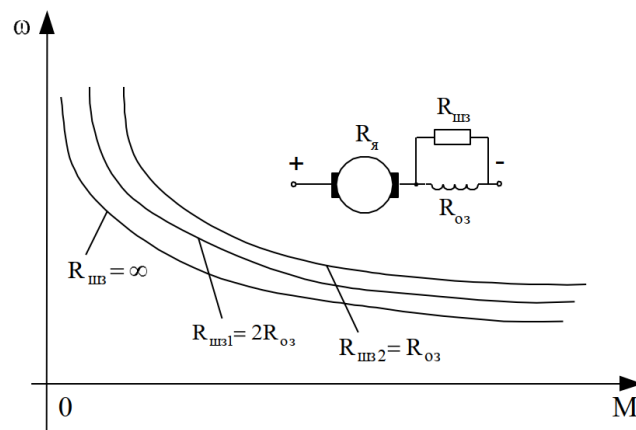


Рисунок 4.3 – Характеристики ДПТ ПВ під час шунтування обмотки Збудження

Програма роботи

В роботі потрібно виконати моделювання для визначення електро механічних характеристик електроприводу постійного струму послідовного збудження.

Дослідження проводяться за допомогою середовища моделювання Simulink (сімулінк), що входить до складу MathLab.

В моделі використовується такий самий двигун як і в попередніх роботах. Для обмеження пускового струму, в колі якоря використовуються послідовно підключені резистори. Вони підключаються на старті двигуна, а після розгінну шунтуються перемикачами. Паралельно обмотці збудження підключені шунтуючі резистори. Один резистор 1000 Ом підключено постійно, а резистори 60 і 40 Ом підключаються керованими перемикачами.

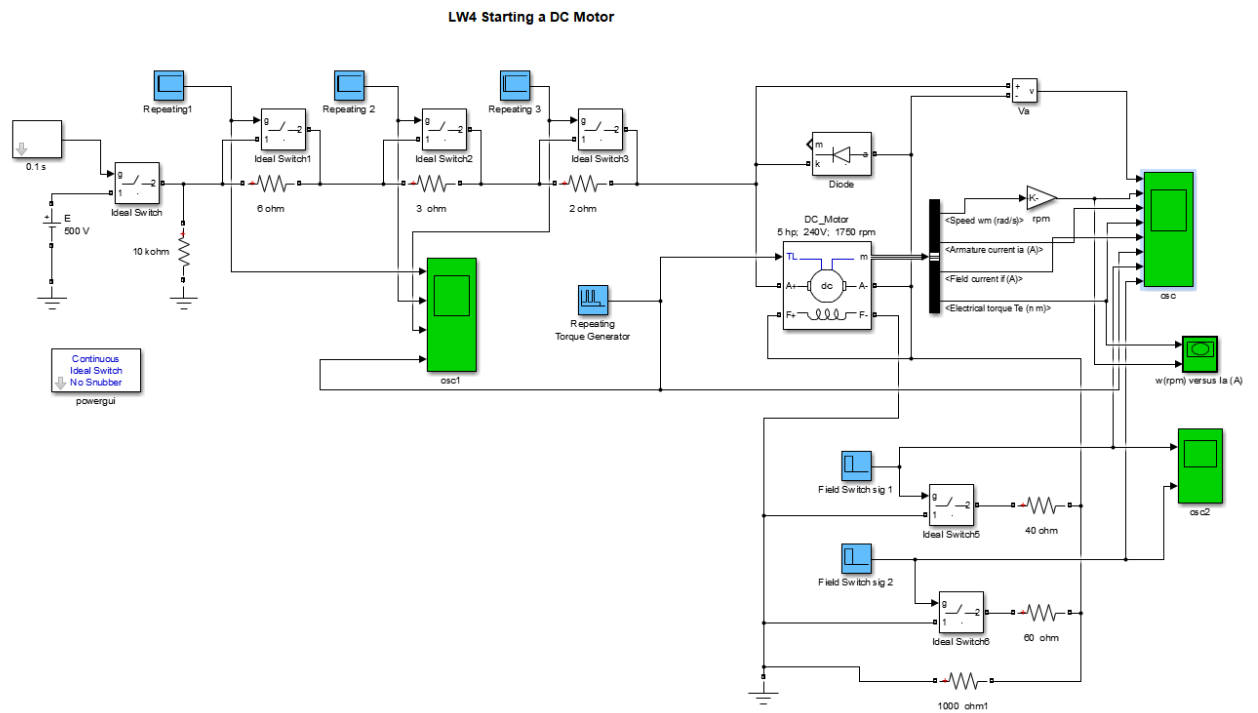


Рисунок 4.4 – Модель для визначення електромеханічних характеристик електроприводу постійного струму послідовного збудження.

Час моделювання складає 35 секунд (Рисунки 4.5, 4.6). Моделювання починається з подачі загальної напруги 500 В та навантаженням 3 Н м. На діаграмі 4.6 наведений час увімкнення резисторів шунтування обмотки збудження. Червоним кольором показано шунтування резисторів 60 Ом а блакитним кольором показано шунтування 40 Ом.

На початковому етапі двигун набирає оберти. На першому етапі моделювання увімкнуті обидва шунтуючих резистори 40 та 60 Ом, загальний опір шунтуючого опору становить 23 Ом.

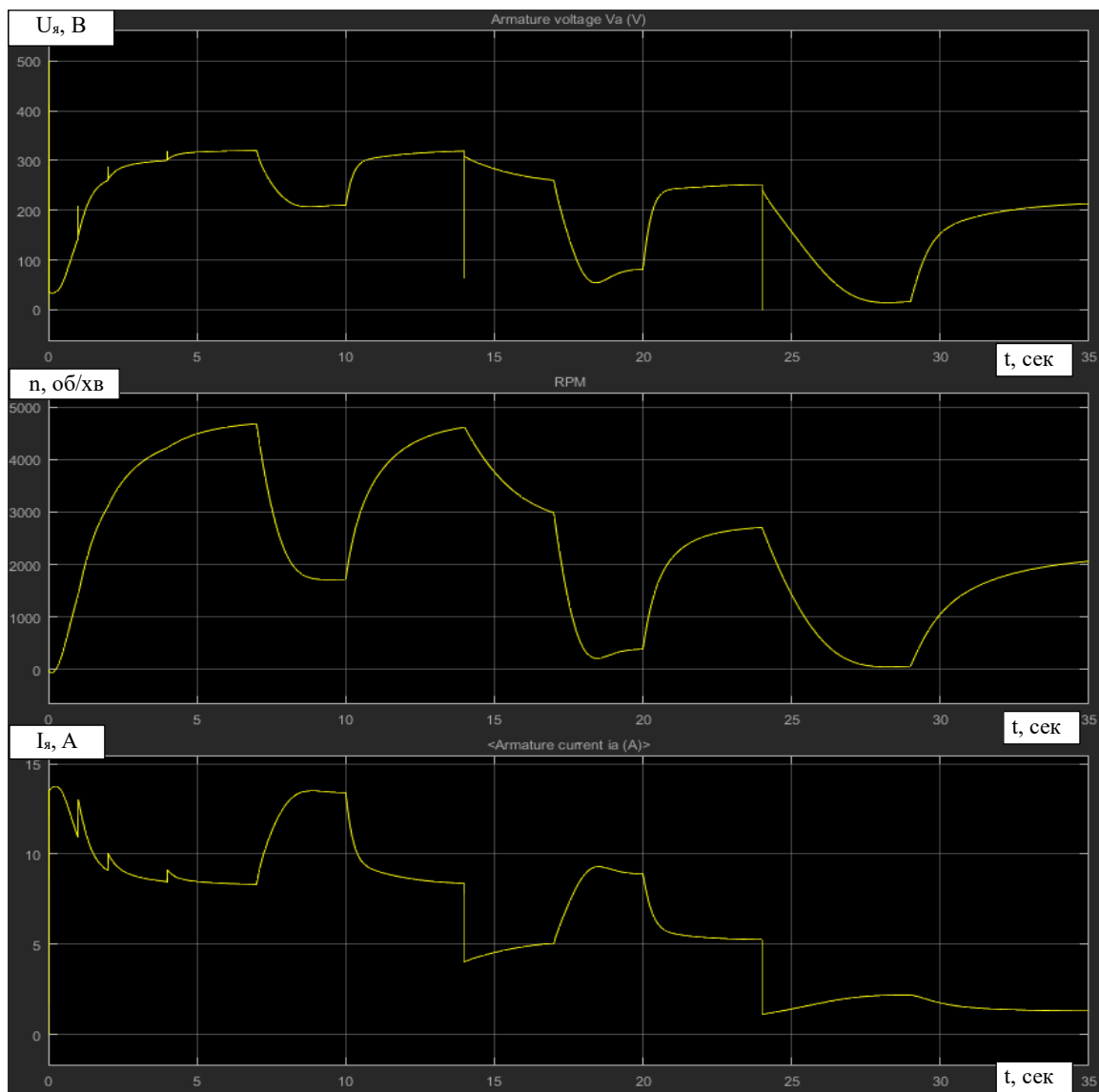


Рисунок 4.5 – Часові діаграми обертів, напруги та струму якоря.

На шостій секунді моделювання вводиться навантаження 12 Н м. При цьому відбувається падіння обертів до 1800 об/хв, та зростання струму якоря. Також зростання струму відбувається і в колі обмотки збудження. Також відбувається падіння напруги на якорі, та зростання електромагнітного моменту.

На 10 секунді навантаження змінюється до 3 Н м і відбувається зростання обертів до 4500 об/хв та зменшення струму якоря. На 14 секунді від'єднується резистор номіналом 40 Ом, опір шунтування після цього складає 56 Ом. При цьому відбувається різке зменшення струму в колі якоря, а струм в обмотці збудження починає зростати.

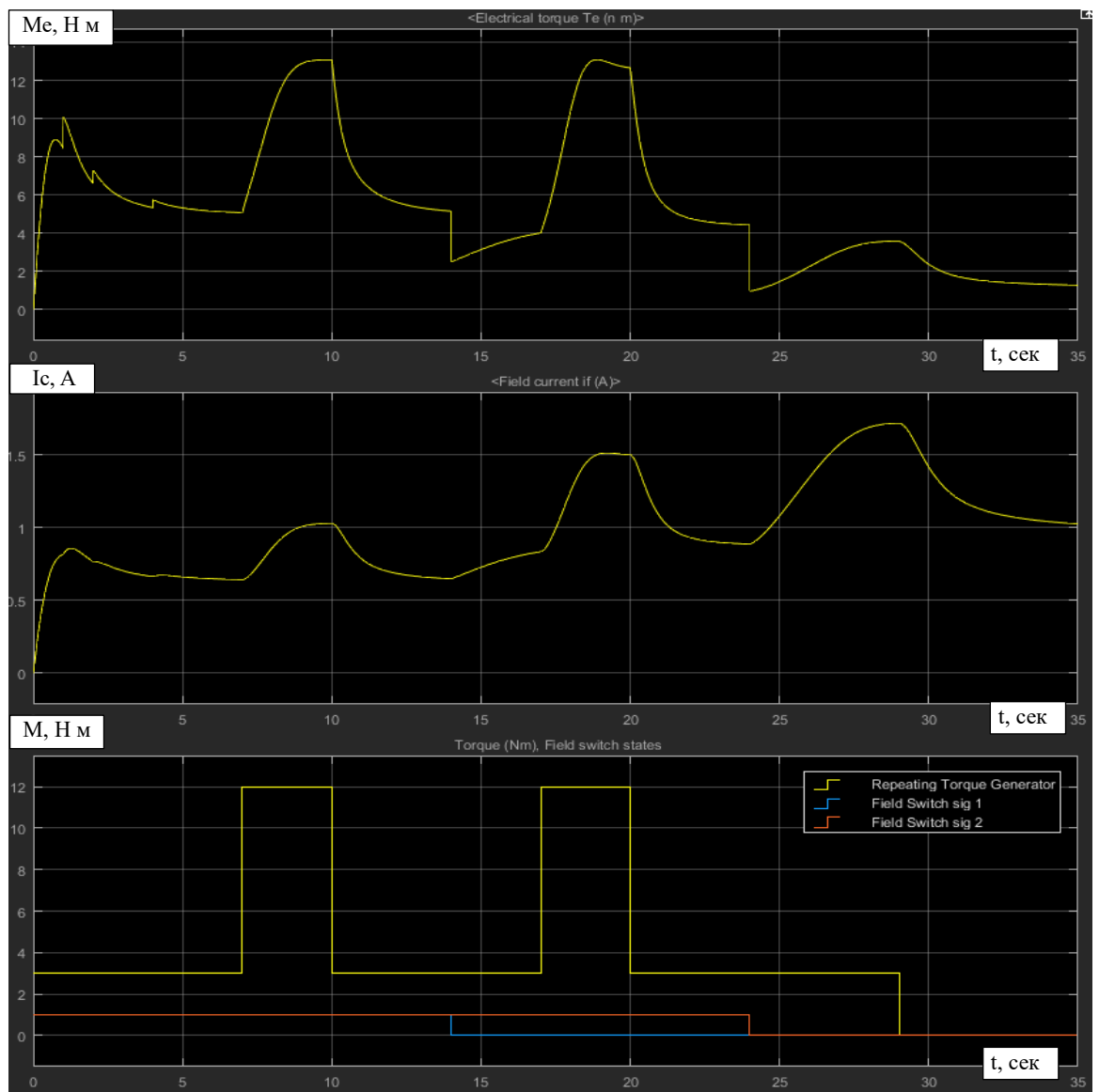


Рисунок 4.6 – Часові електромагнітного моменту, моменту навантаження, струму обмотки збудження та перемикачів навантаження.

На 17 секундi знов навантаження 12 Н м. При цьому відбувається зростання струму якоря та зменшення обертiв майже до нуля. При цьому відбувається підвищення струму в обмотцi збудження i збільшення електромагнітного моменту. Після зменшення навантаження до 3 Н м, струм якоря i в обмотки збудження зменшуються, а оберти збільшуються. При від'єднанні резистора 60 Ом, шунтуючий опір обмотки збудження складає 1000 Ом. При цьому відбувається зменшення обертiв практично до нуля та невелике

зростання струму якоря, при цьому струм обмотки збудження значно збільшується, електромагнітний момент при цьому невеликий. Після відімкнення навантаження повністю, струм в колі якоря незначно зменшується, а оберти значно збільшуються.

На рисунку 4.7 наведено отримані електромеханічні характеристики двигуна постійного струму послідовного збудження при зміні опору шунтування обмотки збудження. На діаграмі побудовано залежність електромагнітного моменту від обертів. На діаграмі спостерігається поведінка двигуна при покроковому шунтуванні пускових резисторів в колі якоря, зміні опору шунтування обмотки збудження та змінення механічного навантаження на вал двигуна.

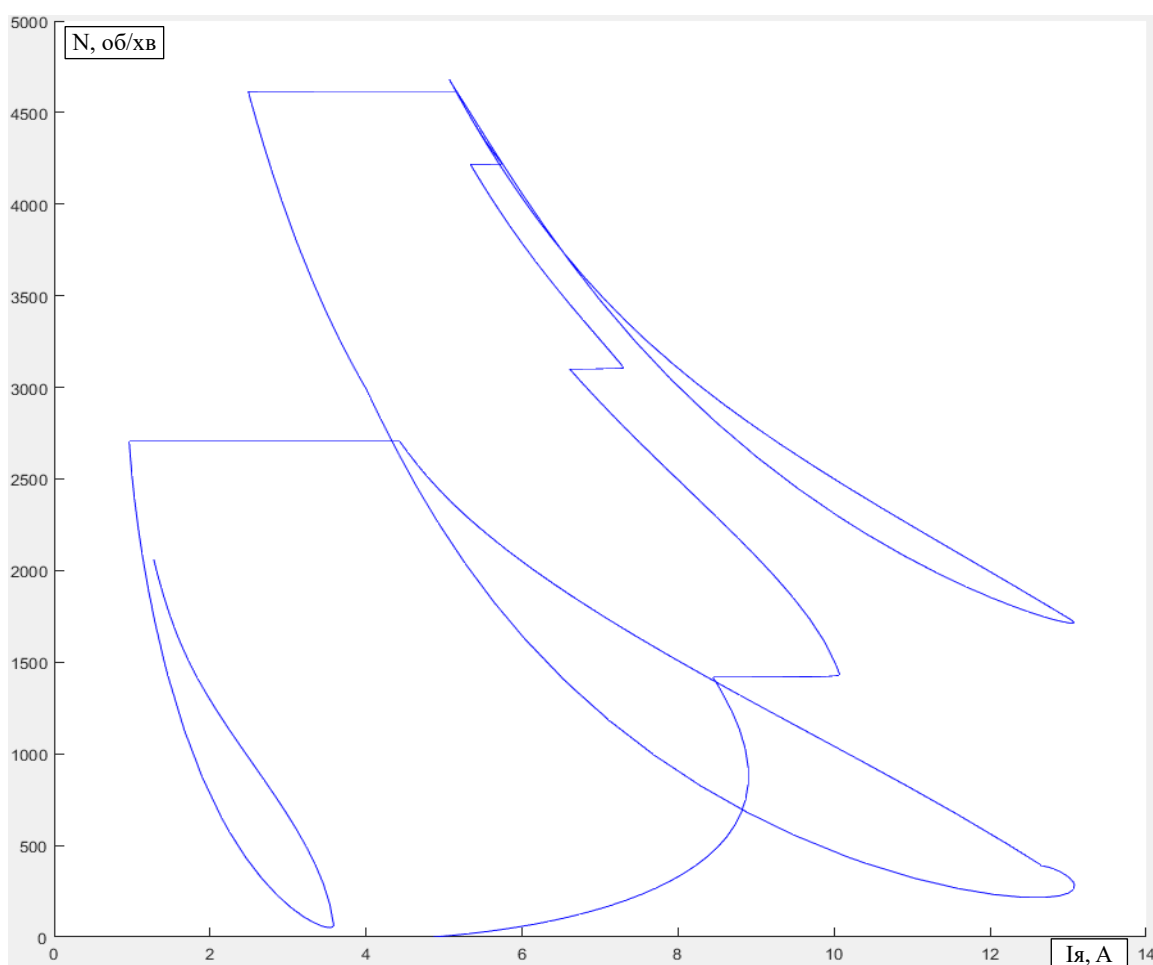


Рисунок 4.7 – Отримані електромеханічні характеристики електродвигуна.

Контрольні питання

1. Особливості роботи двигуна послідовного збудження.
2. Розрахунок механічних характеристик двигуна послідовного збудження.
3. Особливості роботи двигуна під час шунтування якоря, обмотки збудження. Розрахунок характеристик у цих режимах роботи.
4. Особливості електродинамічного гальмування двигуна із самозбудженням.
5. Які характеристики називаються робочими і універсальними робочими характеристиками двигунів з послідовним збудженням? Як їх досягають?
6. Викладіть методику побудови природньої механічної характеристики двигуна з послідовним збудженням за універсальними робочими характеристиками.
7. На діаграмі отриманих електромеханічних характеристик електродвигуна постійного струму послідовного збудження вказати та прокоментувати характерні крапки зміни режимів роботи.

ЛІТЕРАТУРА

1. Теорія електроприводу транспортних засобів: підручник / [А.В. Гнатов, Щ.В. Аргун, І.С. Трунова]. – Х.: ХНАДУ, 2016 – 292 с.
2. Моделювання електроприводів: Навч. посібник / Л.Д. Костинюк, В.І. Мороз, Я.С. Паранчук. - Львів: Видавництво Національного Університету «Львівська політехніка», 2004.- 404 с.
3. А. А. Видмиш, Л. В. Ярошенко. Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1. / Навчальний посібник. – Вінниця: ВНАУ, 2020. – 387 с.
4. Теорія електроприводу: [метод. вказів. до лаб. робіт та самостійної роботи] / А. В. Гнатов, Щ.В. Аргун. – Х. : ХНАДУ, 2021 – 65 с.
5. Hayes J. G., Goodarzi G. A. Electric powertrain: energy systems, power electronics and drives for hybrid, electric and fuel cell vehicles. – 2018.
6. Hughes A., Drury B. Electric motors and drives: fundamentals, types and applications. – Newnes, 2019. – 483 p.
7. Розрахунок робочих параметрів і характеристик режимів пуску і гальмування електропривода з асинхронним двигуном: метод. вказів. до курсового проекту / [А. В. Гнатов, Щ.В. Аргун]. – Х. : ХНАДУ, 2021 – 36 с.
8. Гнатов, А. В. Теорія електроприводу : курс лекцій [Електронний ресурс] / А. В. Гнатов; М-во освіти і науки України, Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т. - Харків, 2021. - 97 с. Ч. 2. https://dSPACE.khadi.kharkov.ua/dSPACE/bitstream/123456789/4836/1/KL_teor_elektropr_gnatov_21.pdf.
9. Теорія електроприводу: Методичні вказівки до практичних занять для студентів денної форми навчання що навчаються за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / [А. В. Гнатов, Щ.В. Аргун]. – Х. : ХНАДУ, 2020 – 75 с.
10. Гнатов, А. В. Теорія електроприводу : конспект лекцій [Електронний ресурс] / А. В. Гнатов ; М-во освіти і науки України, Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т. - Харків, 2020. - 144 с. Ч.1 : Механічні характеристики електропривода постійного та змінного струму https://dSPACE.khadi.kharkov.ua/dSPACE/bitstream/123456789/4837/1/KL_teor_elektropr_gnatov_20.pdf.