

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Електротехнічний факультет
Кафедра «Електропривод і автоматизація промислових установок»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання лабораторних і самостійних занять з дисципліни
«ОСНОВИ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ СКЛАДНИХ ЕЛЕКТРО
МЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ТА КОМПЛЕКСІВ»

Частина 5

«Моделювання електромагнітних та електромеханічних процесів в електроприводі з пружним ланцюгом тиристорного перетворювача по оптимізаційним критеріям»

для студентів спеціальності G3 «Електрична інженерія»
всіх форм навчання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ до виконання лабораторних і самостійних занять з дисципліни «Основи наукових досліджень складних електромеханічних систем та комплексів» Частина 5 - «Моделювання електромагнітних та електромеханічних процесів в електроприводі з пружним ланцюгом тиристорного перетворювача по оптимізаційним критеріям» Спеціальності G3 «Електрична інженерія» всіх форм навчання. Укл. В.В. Зіновкін, проф., д.т.н.; М.Л. Антонов, доц., к.т.н.; Ю.О. Крисан, доц., к.т.н.; – Запоріжжя. НУ «ЗП», 2026. – 19 с.

Укладачі:

В.В. Зіновкін, проф., д.т.н.;
М.Л. Антонов, доц., к.т.н.
Ю.О. Крисан, доц., к.т.н.;

Рецензент:

А.Є.Казурова, доц., к.т.н.

Відповідний за випуск:

А.В. Пирожок, доц., к.т.н.

Затверджено на засіданні кафедри ЕПА
Протокол №5 від 04.02 2026 р.

Рекомендовано до видання НМК ЕТФ
Протокол № 7 від 19.02 2026 р.

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Робота №1. Побудова оптимальних комп'ютерних моделей складних електромеханічних систем	5
1.1 Завдання для дослідження.....	6
1.2 Похідні дані для проведення дослідження.....	6
1.3 Порядок проведення дослідження.....	7
1.4 Представлення графічних залежностей	7
1.5 Аналіз отриманих результатів	8
1.6 Формування висновків і рекомендацій.....	9
1.7 Оформлення і захист роботи.....	9
2 Робота №2. Моделювання електроприводу з пружною механічною ланкою і регуляторами в зворотних зв'язках	10
2.1 Завдання для дослідження.....	10
2.2 Похідні дані для проведення дослідження.....	10
2.3 Порядок проведення дослідження.....	11
2.4 Представлення графічних залежностей	11
2.5 Аналіз отриманих результатів	12
2.6 Формування висновків і рекомендацій.....	12
2.7 Оформлення і захист роботи.....	13
3 Робота №3. Побудова оптимізаційних комп'ютерних моделей електромеханічних систем з послідовним корегуючим пристроєм..	14
3.1 Завдання для дослідження.....	14
3.2 Похідні дані для проведення дослідження.....	15
3.3 Порядок проведення дослідження.....	15
3.4 Представлення графічних залежностей	15
3.5 Аналіз отриманих результатів.....	16
3.6 Формування висновків і рекомендацій.....	16
3.7 Оформлення і захист роботи.....	17
Перелік джерел посилання.....	18

ВСТУП

Дисципліна «Основи наукових досліджень складних електромеханічних систем та комплексів» спеціальності G3 «Електрична інженерія» призначена для більш досконалого засвоєння інженерних методів розрахунку та експериментального дослідження електромагнітних та електромеханічних процесів, що відбуваються в складних електромеханічних системах та комплексах під час різних режимів навантаження.

Вона є складовою підготовки магістрів і спеціалістів денної та заочної форм навчання та сприяє кваліфікованому виконанню самостійних та лабораторних робіт.

В методичних вказівках розглянуто практичні методи моделювання перехідних електромагнітних та електромеханічних процесів в тиристорному асинхронному електроприводі [1].

При побудові комп'ютерних моделей використано сучасні методологічні підходи та фізико-математичні теорії і методи дослідження складних електромеханічних систем в поєднанні із засобами мікропроцесорної техніки і автоматизації [2].

В якості прикладу розглянуто послідовність аналізу та інженерного розрахунку отримання оптимальних коефіцієнтів відповідних регуляторів складної електромеханічної системи.

Приведено структурну схему послідовного коригуючого пристрою на базі двох операційних підсилювачів, що забезпечує максимальну швидкодію приводу.

Наведено криві перехідних процесів систем приводів.

Отримані навички моделювання електромагнітних та електромеханічних процесів можуть бути використанні при виконанні курсових та самостійних робіт і при виконанні дипломного проектування за спеціальністю.

Методичні вказівки призначено для виконання аудиторних лабораторних робіт можливо та самостійних занять.

1 РОБОТА №1.

ПОБУДОВА ОПТИМАЛТНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ МОДЕЛЕЙ СКЛАДНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

При виконанні роботи необхідно скористатись теоретичними основами та методами експериментального дослідження в поєднанні із фізичними процесами, що відбуваються при функціонуванні складних електромеханічних систем як в режимах номінального навантаження так і при можливих перевантаженнях та впливах зовнішніх факторів.

Особливу увагу доцільно надавати теоретичним положенням та аналітичним зв'язкам між електромагнітними і електромеханічними параметрами в залежності від режимів механічного навантаження та впливах несприятливих факторів.

Електромагнітні процеси збуджуються безпосередньо прикладеними до об'єкту струмами і напругою промислової частоти. Ці параметри строго нормовані для кожного електроприводу і називаються номінальними. Відповідно до вимог нормативно-технічної документації допускається короткочасне перевантаження об'єкта рівні яких також обмежені [3].

Електромеханічні процеси відбуваються внаслідок перетворення електричної енергії в механічну шляхом оберткової частоти ротору електричного двигуна відповідного електроприводу. При виконанні механічної роботи в електроприводі відбувається перерозподіл електромагнітних і електромеханічних процесів які суттєво впливають на технічний стан електроприводу в цілому. Тому, при виконанні роботи необхідно чітко представляти, послідовність і взаємні зв'язки між сукупністю електромагнітних та електромеханічних процесів [4].

Режими механічного перевантаження електропривода призводять до дуже небезпечного стану об'єкта в цілому – режиму короткого замикання, що може призвести до аварійного виходу із ладу електричного двигуна [5].

При захисті отриманих результатів моделювання необхідно чітко формулювати відповідні висновки та пояснити отримані залежності між цими параметрами. Особливу увагу необхідно приділяти перехідним процесам та їх фізичному тлумаченню [6].

1.3 Порядок проведення дослідження

Допускається проявити самостійні пропозиції щодо проведення більш ретельного дослідження нестационарних електромагнітних процесів, наприклад, при перевищенні магнітного потоку в магнітній системі двигуна, при перевищенні механічного навантаження відносно дозовлених нормативно-технічною документацією.

Відповідно до методологічної послідовності подати відповідні рівні струму і напруги при промисловій частоті на схему. Впевнитись, що схема відпрацьовує відповідно до очікуваного процесу.

У випадку не відповідності до очікуваного процесу ретельно перевірити і перебрати всі елементи схеми та повторити запуск схеми.

Допускається поєднати схеми, що приведені на рис.1.1 та 2.1 та виконати і привести відповідні дослідження.

1.4 Представлення графічних залежностей

Після отримання відповідних графічних залежностей за прикладом рис.1.2 і рис.1.3 ретельно оцінити та перевірити відповідність отриманих результатів очікуваним.

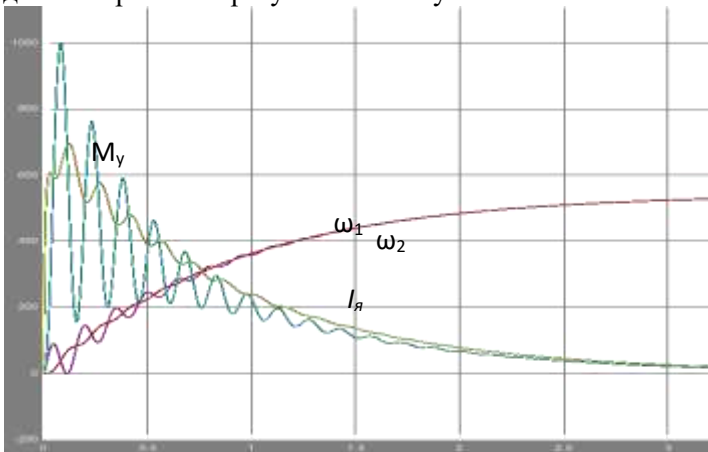


Рисунок 1.2 – Перехідні процеси електромеханічної системи з пружною ланкою електроприводу при зворотних зв'язках по струму якоря і обертовій швидкості двигуна при ступінчастому управлінні

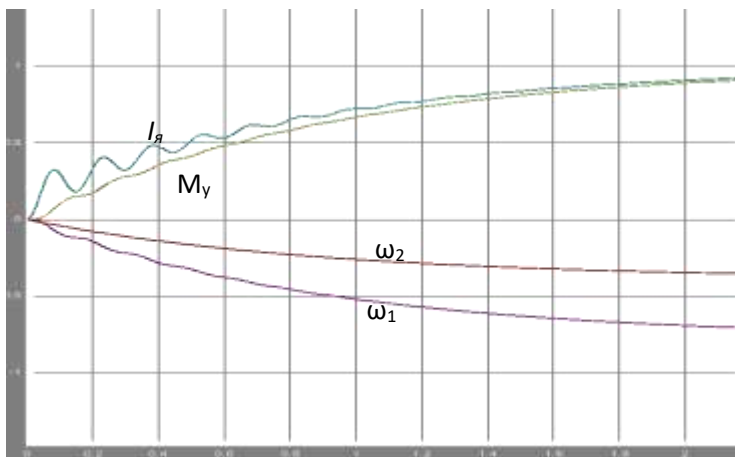


Рисунок 1.3 – Перехідні процеси пружного електроприводу при зворотних зв'язках тільки по струму якоря і швидкості двигуна при накиді (раптовому зростанні потужності) навантаження

1.5 Аналіз отриманих результатів

При отриманні графічних залежностей впевнитись, що вони відповідають дійсним електромагнітним процесам, що відбуваються при роботі електромеханічної системи і особливо електричного двигуна.

Доцільно відзначити, що перехідні процеси електромеханічної системи з пружною ланкою електроприводу при зворотних зв'язках тільки по струму якоря і обертовій швидкості двигуна при ступінчастому управлінні мають доволі складні і нестабільні значення параметрів на початковій стадії. Сталий режим встановлюється через 1,5 – 2,0 с, що призводить до перевантаження двигуна. При постійних таких режимах терміни надійності будуть зменшуватись.

Перехідні процеси пружного електроприводу при наявності зворотних зв'язків тільки по струму якоря і швидкості двигуна в момент накиду потужності механічного навантаження відзначаються меншими коливаннями, що сприяє більшій надійності в процесі реальної роботи.

1.6 Формування висновків і рекомендацій

При формуванні висновків необхідно звернути увагу на вплив всіх зворотних зв'язків на відображення електромагнітних і електромеханічних процесів і їх відповідність очікуваному або реальному. Особливо необхідно відзначити їх вплив при відображенні перехідних процесів. Їх впровадження призводить до значного покращення відображення перехідних процесів при пружних коливаннях.

Важливе значення такий підхід комп'ютерного моделювання набуває при визначенні оптимальних режимів навантаження при живленні електротехнологій та порушенні показників якості електричної енергії.

1.7 Оформлення і захист роботи

Отримані результати дослідження приводяться у вигляді письмового пояснення із приведенням схем, графічних залежностей, коментарів та рекомендацій щодо перехідних процесів, перевантаження, покращення проведення дослідження.

При цьому необхідно чітко і впевнено пояснити отримані результати та до яких наслідків можуть призвести постійні порушення номінальних параметрів навантаження електромеханічних систем.

Дослідження перехідних електромагнітних процесів виконувати скориставшись наступними даними: $T1 = 1,5с.$; $T2 = 10с.$; $TЯ = 0,01с.$; $Tс = 4 \cdot 10^{-4}с.$; $Kе = 0,92$; $Kя = 14$; $Kн = 50$; $\omega 0 = 66с^{-1}$ і значеннями коефіцієнтів регуляторів $R1 = 16,2$; $R2 = 0,04$; $R3 = 3,3$ і $R4 = 0,01$.

2.3 Порядок проведення дослідження

Відповідно до послідовності подати відповідні збуджуючі параметри - рівні струму і напруги промислової частоти на схему. Впевнитись, що схема відпрацьовує відповідно до очікуваного процесу.

У випадку не відповідності до очікуваного процесу ретельно перевірити і перебрати всі елементи схеми та повторити запуск схеми.

Значно покращується оцінювання знань студента при прояві самостійної ініціативи щодо ускладнення комп'ютерної моделі та її відповідності складній електромеханічній системі.

Допускається поєднати схеми, що приведені на рис.1.1 та 2.1 та виконати і привести відповідні дослідження.

2.4 Представлення графічних залежностей

Після отримання відповідних графічних залежностей за прикладом рис.2.2 і рис.2.3 ретельно оцінити та перевірити відповідність отриманих результатів очікуваним.

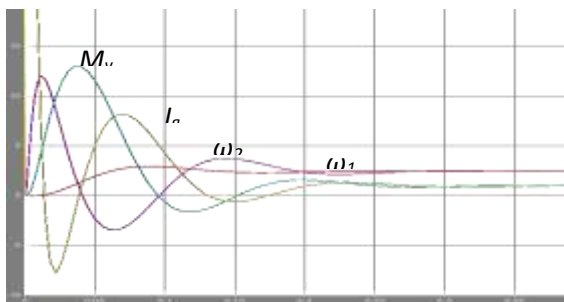


Рисунок 2.2 – Перехідні процеси пружного електроприводу при всіх зворотних зв'язках при керуючому впливі

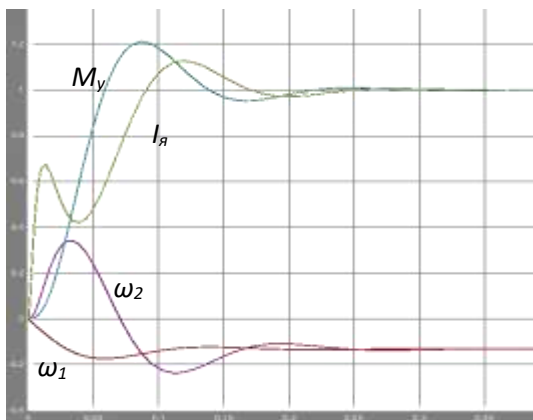


Рисунок 2.3 – Перехідні процес пружного електроприводу при всіх зворотних зв'язках при накиді навантаження

2.5 Аналіз отриманих результатів

Впевнитись, що отримані графічні залежності відповідають дійсним електромагнітним процесам, що відбуваються роботі електричного двигуна.

Доцільно відзначити, що перехідні процеси електромеханічної системи мають доволі складні і нестабільні значення параметрів на початковій стадії. Сталий режим встановлюється через 2,0 – 2,5 с.

Перехідні процеси мають доволі складні залежності не тільки по електричним параметрам, а по формуванню нестационарних електромагнітних процесів в електричному двигуні, як визначального елемента електроприводу [7].

2.6 Формування висновків і рекомендацій

При формуванні висновків необхідно звернути увагу на узгодженість між електромагнітними і електромеханічними процесами та їх відповідності реальним.

Особливо необхідно відзначити тривалість перехідних процесів. Вони призводить до погіршення роботи електричного двигуна та термінів надійної роботи.

Важливо відзначити ефективність математичного і

комп'ютерного моделювання при визначені оптимальних режимів навантаження.

2.7 Оформлення і захист роботи

Оформлення результатів дослідження приводяться у письмовому вигляді із приведенням доказових матеріалів - схем, графічних залежностей, коментарів та рекомендацій щодо перехідних процесів, перевантаження, покращення проведення дослідження. При чіткому і впевненому поясненні отриманих результатів.

РОБОТА №3

ПОБУДОВА ОПТИМІЗАЦІЙНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ МОДЕЛЕЙ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ З ПОСЛІДОВНИМ КОРЕГУЮЧИМ ПРИСТРОЄМ

Негативною рисою оптимізації перехідних процесів по критерію Кальмана-Фробеньюса є складність вимірювання пружного моменту і кутової швидкості для складних електромеханічних систем і механізмів. Проте оцінити величини M_y і ω_2 можна шляхом використання за допомогою фільтру Кальмана-Бьюси який побудовано на базі еталонної моделі механічної частини електроприводу. Схема спостерігача містить чотири інтегратори і три операційних підсилювача, що дозволяє виконати відповідні дослідження не тільки складних електромеханічних систем [8].

3.1 Завдання для дослідження

У пакеті MATLAB Simulink побудувати модель електроприводу тиристора з послідовним пристроєм, що коректує, на базі двох операційних підсилювачів відповідно до рис. 3.1.

Побудувати графіки і сформулювати відповідні висновки і інженерні рекомендації.

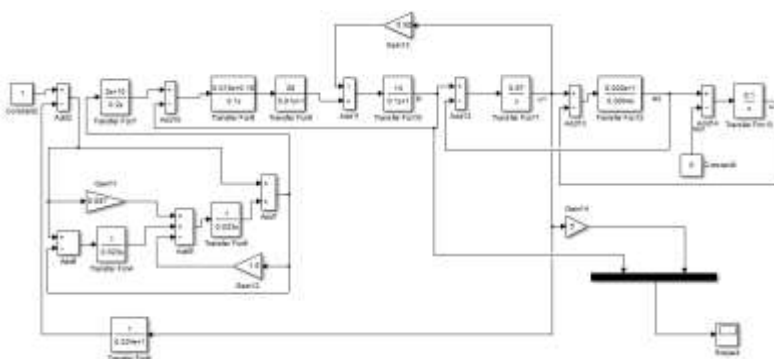


Рисунок 3.1 – Комп'ютерна модель пружного тиристорного електроприводу з підлеглою і послідовною ланкою, що коректує по швидкодії

3.2 Похідні дані для проведення дослідження

Для моделювання перехідних електромагнітних процесів даного електроприводу визначаємо наступний перехідний коефіцієнт [9]:

$$K = P^* \cdot C^* \cdot R_{-1} = \begin{vmatrix} 530,5601 & 7596 & 539,4802 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0,7045 & 17,2854 & 0,7285 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 2158 \\ 0 \\ 2,9 \end{vmatrix},$$

Тобто: $K_1 = -0,2344$; $K_2 = 2158$; $K_3 = 2,9$.

3.3 Порядок проведення дослідження

Подати відповідні збуджуючі параметри - рівні струму і напруги промислової частоти на схему. Впевнитись, що схема відпрацьовує відповідно до очікуваного процесу.

Допускається поєднати схеми, що приведені на рис.1.1 та 2.1 та виконати і привести відповідні дослідження.

3.4 Представлення графічних залежностей

Після отримання відповідних графічних залежностей за прикладом рис.3.2 і рис.3.3 оцінити та перевірити відповідність отриманих результатів очікуванім.

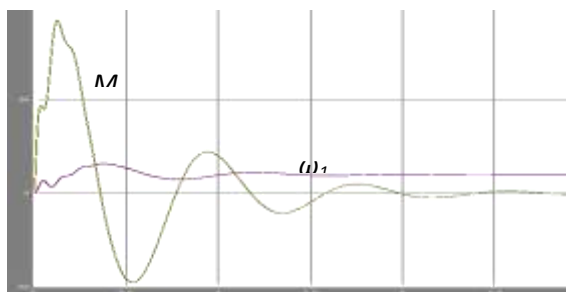


Рисунок 3.2 - Перехідні процеси пружного електроприводу з точною настройкою корекції при ступінчастій дії по управлінню

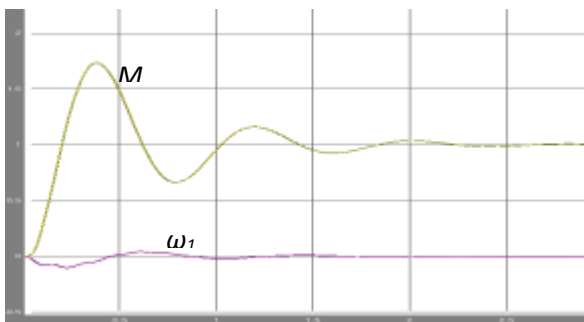


Рисунок 3.3 - Перехідні процеси пружного електроприводу з точною настройкою корекції при ступінчастій дії по навантаженню.

3.5 Аналіз отриманих результатів

Впевнитись, що отримані графічні залежності відповідають дійсним електромагнітним процесам, що відбуваються роботі електричного двигуна.

Доцільно відзначити, що перехідні процеси електромеханічної системи мають доволі складні і нестабільні значення параметрів на початковій стадії. Сталий режим встановлюється через 2,0 – 2,5 с.

Перехідні процеси мають доволі складні залежності не тільки по електричним параметрам, а по формуванню нестационарних електромагнітних процесів в електричному двигуні, як визначального елемента електроприводу [10].

3.6 Формування висновків і рекомендацій

При формуванні висновків необхідно звернути увагу на узгодженість між електромагнітними і електромеханічними процесами та їх відповідності реальним.

Особливо необхідно відзначити тривалість перехідних процесів. Вони призводить до погіршення роботи електричного двигуна та темпів надійної роботи.

Важливо відзначити ефективність математичного і комп'ютерного моделювання при визначенні оптимальних режимів навантаження.

3.7 Оформлення і захист роботи

Оформлення результатів дослідження приводяться у письмовому вигляді із приведенням доказових матеріалів - схем, графічних залежностей, коментарів та рекомендацій щодо перехідних процесів, перевантаження, покращення проведення дослідження. При чіткому і впевненому поясненні отриманих результатів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Методичні вказівки до виконання лабораторних і самостійних занять з дисципліни «Основи наукових досліджень складних електромеханічних систем та комплексів». Ч. 3. Моделювання електромагнітних процесів електропривода з пружним ланцюгом тиристорного перетворювача по оптимізаційним критеріям / уклад.: В. В. Зіновкін, Ю. О. Крисан. Запоріжжя: ЗНТУ, 2018. 48 с.

2. Zinovkin V., Antonov M., Krysan Y. The study of non-stationary electromagnetic processes in synchronous electric drive. International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES 2017). Kremenchuk, 2017. P. 148–151.

3. Леонтьєв П. В. та ін. Теорія автоматичного керування : навч. посіб. Суми : Сумський державний університет, 2024. 296 с. URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/97189> (дата звернення: 10.08.2026).

4. Гуров А. П., Ольшевський С. І., Черно О. О., Бугрім Л. І. Теорія автоматичного керування: навч. посіб. Миколаїв : Національний університет кораблебудування, 2018. URL: <https://eir.nuos.edu.ua/items/c6d19b91-5ad4-4563-a13d-5b3960e55d85>

5. Марченко А. А., Гулий В. С. Теорія автоматичного керування. Комп'ютерний практикум: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. URL: <https://ela.kpi.ua/items/40b17431-d0a6-42bf-9387-eb408c1bfbf3>

6. Толочко О. І. Теорія автоматичного керування. Математичні методи та програмування в MATLAB для теорії керування : навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. URL: <https://ela.kpi.ua/items/2cb5a885-eec3-4b52-bf9d-bb218ce48929>

7. Гайденок Ю.А. Теорія автоматичного керування. Комп'ютерний практикум : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. URL: <https://ela.kpi.ua/items/edac02be-d940-4fd4-a566-7c8b782b89a2>

8. Іносов С. В., Соболевська Т. Г. Теорія автоматичного керування: метод. вказівки до лабор. і практ. робіт. Київ: КНУБА, 2024. URL: <https://repository.knuba.edu.ua/items/82da287f-a9d2-43e9-8f9a-1e8d7f7dc136>

9. Мірошник М. А., Лістровий С. В., Клименко Л. А. Теорія автоматичного керування, штучний інтелект і автоматизація процесу

прийняття рішення : навч. посіб. Харків : УкрДУЗТ, 2019. URL: <https://dspace.onua.edu.ua/items/d64933de-004c-4977-a0bf-68c744eede6f>

10. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування: підручник. Київ: Либідь, 2007. 656 с. URL: <https://uareferats.com/index.php/book/details/336>