

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-75-22>

УДК 681.1, 681.5, 621.8

ІОНОВ Павло

Хмельницький національний університет

МАЙДАН Павло

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-3319-8730>

maidanp@khmnu.edu.ua

МАКАРИШКІН Денис

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-3447-811X>

makaryshkin@ukr.net

СОКОЛАН Юлія

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-0273-5719>

sokolan.julia@gmail.com

ФОРКУН Юрій

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-7906-4191>

forkynjv@khnu.km.ua

МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ БЕЗКОНТАКТНОГО ПРИВОДУ

Загально відомо, що промислові роботи (ПР) - багатофункціональні механічні пристосування, що складаються із механічної руки та програмованої системи керування, які можуть бути використані для переміщення різних об'єктів - деталей, інструментів, матеріалів або спеціалізованих пристроїв, шляхом використання різноманітних запрограмованих рухів у різних технологічних процесах (ТП).

ПР можуть замінити людину-робітника там, де потрібна важка фізична праця, в умовах підвищеної вологості чи надмірної температури, вібрації, шуму, радіоактивності чи забруднення повітря та вибухонебезпечності. Такі ПР є перепрограмованими автоматичними машинами з можливістю виконувати рухові функції, подібні до рухів людини-робітника, для об'єктів або технологічного оснащення [1-4].

Система ПР може містити у собі будь-які пристрої або давачі сигналів, необхідні для виконання ПР поставлених задач, а також упорядкування та моніторингу інтерфейсів зв'язку.

ПР, як правило, використовують для виконання небезпечних, неприємних чи частоповторюваних задач. Вони володіють багатьма різними функціями, такими як вантажно-розвантажувальні роботи, завантаження та вивантаження верстатів, дугове зварювання, монтаж, зварювання тертям, розпилення або фарбування.

Ключові слова: мехатроніка, промисловий робот, вентильний двигун, безконтактний привід, моделювання, система автоматичного керування, цифровий двійник, MATLAB, SIMULINK.

IONOV Pavlo, MAIDAN Pavlo, MAKARYSHKIN Denys, SOKOLAN Julia, FORKUN Yurii
Khmelnytskyi National University

MODELING OF AN AUTOMATIC SPEED CONTROL SYSTEM FOR A CONTACTLESS DRIVE

It is well known that industrial robots (IR) are multifunctional mechanical devices consisting of a mechanical arm and a programmable control system that can be used to move various objects - parts, tools, materials or specialized devices - by using a variety of programmed movements in different technological processes (TP).

They can replace human workers where heavy physical labor is required, in conditions of high humidity or excessive temperature, vibration, noise, radioactivity or air pollution, and explosion hazards. Such IRs are reprogrammable automatic machines with the ability to perform motor functions similar to those of a human worker for objects or technological equipment [1-4].

The IR system can include any devices or signal sensors necessary for the IR to perform its tasks, as well as to organize and monitor communication interfaces.

IRs are usually used to perform dangerous, unpleasant, or repetitive tasks. They have many different functions, such as handling, loading and unloading machines, arc welding, assembly, friction welding, spraying, or painting.

Key words: mechatronics, industrial robot, valve motor, contactless drive, modeling, automatic control system, digital twin, MATLAB, SIMULINK.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Тенденція розширення існуючого парку ПР на сучасному етапі розвитку виробництва викликана цілою низкою об'єктивних чинників. За звичай, це підвищення загальної продуктивності виробництва при збереженні високої якості продукції та здатність швидко реагувати на зміни ринку споживання [1-4].

Серйозними стимулами інвестування у автоматизацію виробництва та використання ПР є наступні:

- звільнення працівників від монотонної, інтенсивної та важкої роботи на виробництві;
- відсутність достатньої кількості кваліфікованої робочої сили для виробництва;
- безперервне зниження витрат на використання ПР на тлі постійного зростання витрат на оплату праці кваліфікованих робітників;
- можливість часткового покращення екологічної ситуації та зниження шкідливого впливу виробництва на здоров'я працівників, наприклад від ТП зварювання;
- підвищення загальної точності виконання технічних операцій та підвищення кінцевої якості готового продукту;
- можливість використання встановленого технологічного обладнання в три зміни або 24 години 7 днів на тиждень, 365 днів на рік.

Перехід до роботизованого контролю, що заснований на використанні програмованих логічних контролерів (або PLC) надасть наступні переваги: - загальна програмна документація; - загальна методологія програмного резервного копіювання/відновлення; - загальні програмні інтерфейси; - загальні елементи керування програмування (програме забезпечення (ПЗ), кабелі тощо) [1-4].

Аналіз досліджень та публікацій

Вентильні електродвигуни (ВД) [5], які використовують у складі електроприводів та систем керування (СК) ПР, вимагають, за звичай, стабілізації або виконання регулювання швидкості обертання. У більшості випадків для цього використовують загальний принцип керування за відхиленням керованої величини, відповідно з яким задане значення швидкості обертання електродвигуна Ω_s порівнюється із фактичним вимірним значенням швидкості обертання Ω_T і тоді обраховане відхилення (помилка) швидкості обертання $\Delta\Omega = \Omega_s - \Omega_T$ посилюється та перетворюється в керуючий (задаючий) вплив електродвигуна [5].

В якості математичної моделі електроприводу з ВД будемо використовувати математичний опис узагальненої електричної машини та спеціальних вузлів підсилювально-перетворювального пристрою. Будучи, так би мовити, проміжною ланкою між експериментальними та теоретичними дослідженнями, моделювання дає змогу усунути труднощі, якими характеризуються проведення справжніх досліджень.

Виконуючі порівняння із теоретичними дослідженнями, моделювання ВД полегшує оцінку впливу реакції якоря, нелінійностей та можливих перешкод в електромеханічних пристроях, насичення магнітного кола; спрощує розрахунок характеристик за наявності кіл корекції та аналіз СК за наявності декількох постійних часу (більше двох) [5, 6].

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: моделювання СК швидкістю безконтактного приводу ПР на основі PLC, для виконання необхідних аналітичних досліджень роботи системи в якості цифрового двійника.

Виклад основного матеріалу

На рисунку 1 представлено загально відому векторну діаграму двофазного синхронного електромеханічного перетворювача (СЕМП) у системах координат α, β та d, q (причому вісь d спрямована за віссю збудження ротора (та збігається із напрямком вектору потоку Φ_r). Система d, q виконує обертання проти годинникової стрілки відносно системи α, β із заданою кутовою швидкістю ω .

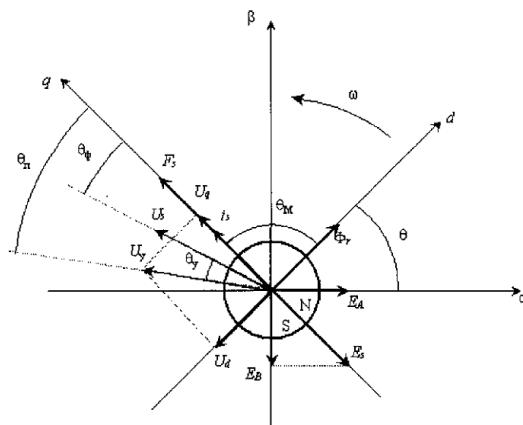


Рис. 1. Загальний вигляд векторної діаграми СЕМП

За необхідності спрямувати вектор сили струму статора I_s за напрямком осі q , вектор напруги U_s повинен бути спрямований з випередженням на деякий кут θ , що характеризує відставання сили струму від напруги в ланцюзі із наявністю індуктивності. В ВД вектор напруги статора U_s формується електронним підсилювально-перетворювальним пристроєм, що складається із підсилювачів потужності (ПП) фаз та перетворювача координат (ПК) [5, 6].

Під час роботи двофазного СЕМП із постійними магнітами розташованими на роторі та взаємно перпендикулярними фазами А та В статорної обмотки у складі ВД, керування здійснюється електронним підсилювально-перетворювальним пристроєм, що формує фазні напруги за будь-яким заданим законом.

ПК - це спеціалізований пристрій для обчислення, що реалізує рівняння перетворення величин із рухомої системи координат, пов'язаної з ротором, у нерухому, пов'язану зі статором [5, 6]. Функцію ПК можливо реалізувати, при цьому ПК реалізує наступний алгоритм:

$$\begin{aligned} U_\alpha &= k_{ПК} \cdot \left[-U_q \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{3} + \Theta\right) - \sin\left(\frac{4\pi}{3} + \Theta\right) \right] \\ U_\beta &= k_{ПК} \cdot \left[U_q \cdot \sin \Theta \right], \end{aligned} \quad (1)$$

де $k_{ПК}$ - постійний коефіцієнт передачі ПК.

ПП - підсилювач, що працює в даному випадку в режимі посилення сигналу напруги (інвертора напруги) та описується за допомогою постійного коефіцієнту передачі за величиною напруги k_{PA} . З урахуванням даного коефіцієнта рівняння фазної напруги мають наступний вигляд:

$$\begin{aligned} U_A &= k_{PA} \cdot U_\alpha; \\ U_B &= k_{PA} \cdot U_\beta. \end{aligned} \quad (2)$$

Таким чином, підсилювально-перетворювальний пристрій можливо охарактеризувати деяким коефіцієнтом передачі згідно із формулою:

$$k_A = k_{PA} \cdot k_{PC}. \quad (3)$$

Підсилювально-перетворювальний пристрій може бути охарактеризовано за кожним каналом, як, наприклад, динамічну ланку першого порядку за допомогою використання еквівалентної сталої часу T_e , що обумовлює зсув фаз $\theta_y = \tan \omega \cdot T_e$ між векторами величини напруги керування U_c та величини напруги на статорі U_{st} , а також деяким коефіцієнтом передачі k_A .

Виконавши підстановку рівнянь (1) в систему рівнянь (2) та враховуючи величини запізнювання, що зумовлені сумарною інерційністю як ПК так і ПП, виконаємо запис диференціальних рівнянь для величин фазних напруг ВД у нерухомій α, β системі координат [5, 6]:

$$T_y \cdot \frac{dU_A}{dt} + 1,73 \cdot U_A = -U_q \cdot k_y \cdot \left[\sin\left(\frac{2\pi}{3} + \Theta\right) - \sin\left(\frac{4\pi}{3} + \Theta\right) \right]; \quad (4)$$

$$T_y \cdot \frac{dU_B}{dt} + U_B = k_y \cdot \left[U_q \cdot \sin \Theta \right]. \quad (5)$$

Запишемо рівняння для сил струму статорних обмоток:

$$\sin\left(\frac{2\pi}{3} + \Theta\right) - \sin\left(\frac{4\pi}{3} + \Theta\right) = \cos \Theta; \quad (6)$$

$$2 \cdot T_\phi \cdot \frac{di_A}{dt} + i_A = \frac{1}{2 \cdot R} \left(1,73 \cdot U_A + C_E \cdot \Omega \cdot \left[\sin\left(\frac{2\pi}{3} + \Theta\right) - \sin\left(\frac{4\pi}{3} + \Theta\right) \right] \right); \quad (7)$$

$$2 \cdot T_{\varphi} \cdot \frac{di_B}{dt} + i_B = \frac{1}{R} (U_B - C_E \cdot \Omega \cdot \sin(\Theta)). \quad (8)$$

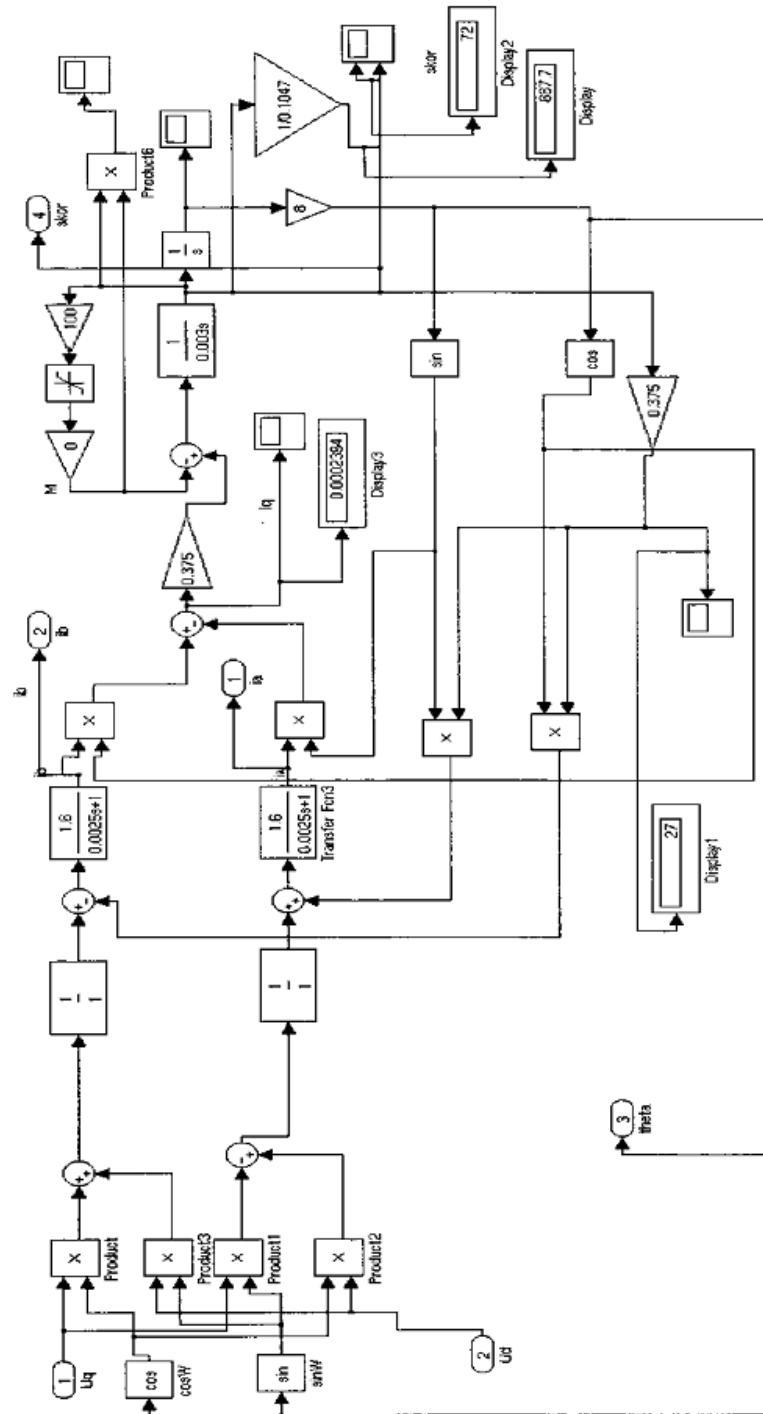


Рис. 2. Розроблена модель двофазного ВД

Тоді рівняння для визначення величини крутного моменту буде мати наступний вигляд:

$$\sin\left(\frac{2\pi}{3} + \Theta\right) - \sin\left(\frac{4\pi}{3} + \Theta\right) = \cos \Theta; \quad (9)$$

$$M = C_M \cdot (i_B \cdot \sin \Theta - i_A \cdot \cos \Theta). \quad (10)$$

Рівняння рівноваги моментів прикладених до валу електродвигуна матиме наступний вигляд:

$$\frac{J \cdot d\Omega}{dt} = M - M_B, \quad (11)$$

де θ_0 - початковий кут виставки давача положення ротора; k_A - коефіцієнт передачі підсилювально-перетворювальний пристрій; i_A, i_B - сила струму у фазах A, B ; U_d, U_q - величина напруги на входах d, q ; U_a, U_b - величина напруги у фазах A, B ; C_M - коефіцієнт моменту; M_B - момент навантаження з боку дії сили збурення; J - момент інерції ротора із урахуванням дії навантаження.

Для побудови комп'ютерної моделі електроприводу із ВД будемо використовувати програмний пакет MATLAB [7, 8] тому використовуючи систему рівнянь (1-11), в додатку SIMULINK було розроблено модель двофазного ВД на базі СЕМП типу ДБМ 150-4-0,6-2 [5, 6] зі схемою векторного керування (див. рис. 2).

Модель БМП із векторним керуванням наведено на рисунку 3.

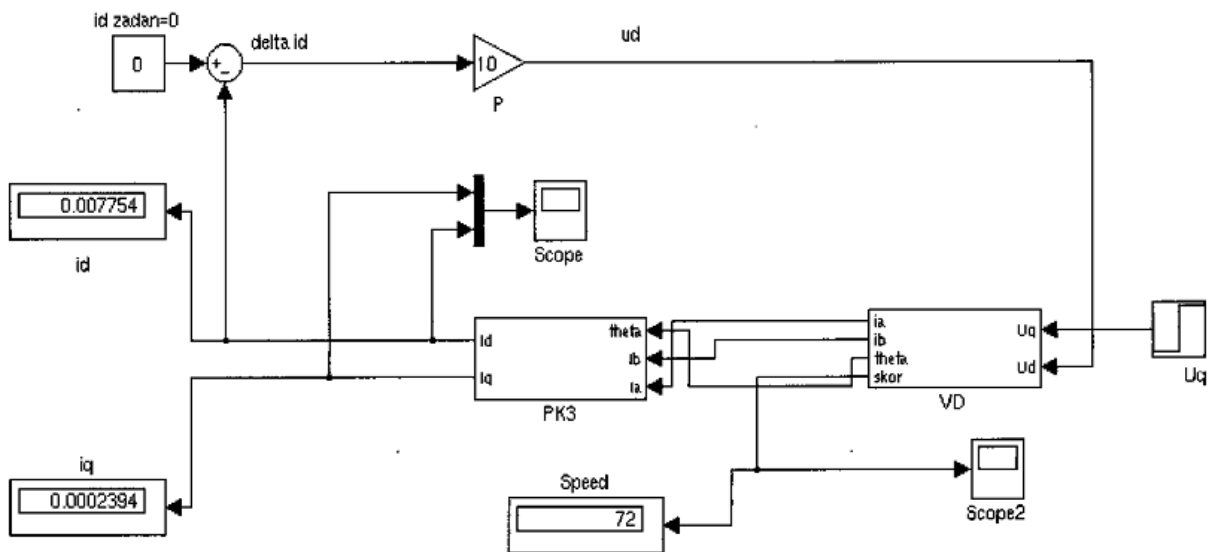


Рис. 3. Розроблена модель безконтактного приводу з векторним керуванням

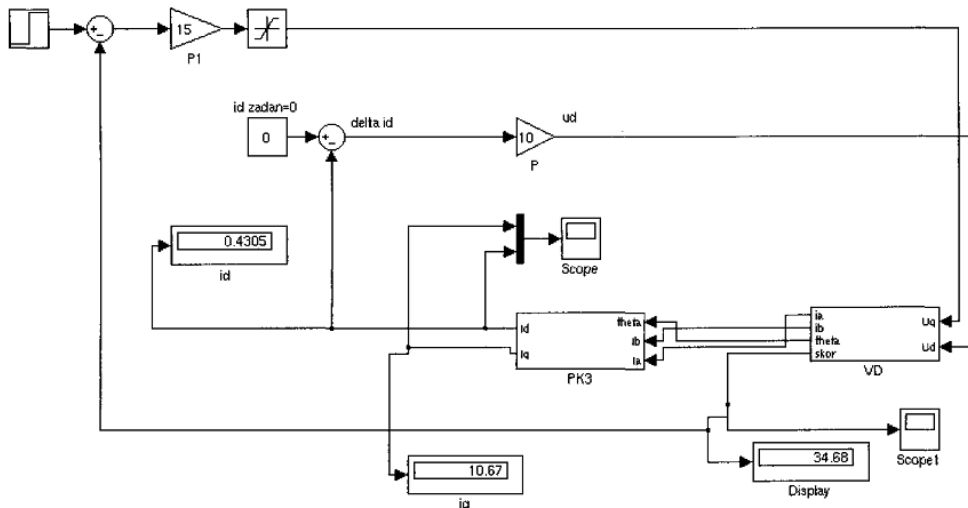


Рис. 4. Розроблена модель СК швидкістю БМП з векторним керуванням

Модель СК швидкістю БМП із векторним керуванням наведена на рисунку 4. Задана швидкість обертання на вході системи дорівнює половині величини швидкості обертання холостого ходу. Разом із моментом навантаження, що дорівнює чверті значення пускового крутного моменту ($M_{w.p.} = 4 \text{ Н*м}$), ці

значення швидкості обертання та крутного моменту визначають робочу точку на механічні характеристики СК.

Швидкість обертання зі входу порівнюється з результативною швидкістю обертання та далі надходить на регулятор швидкості (РШ). Коефіцієнт РШ $k_{rs} = 15$ підбрано експериментальним шляхом та забезпечує допустимі перехідні процеси СК швидкістю обертання, а також найменше падіння значення швидкості обертання відносно заданого значення швидкості обертання. У схемі також використовується обмежувач, що обмежує величину напруги U_q (не вище 27 В постійного струму). Блок VD являє собою ВД (див. рис. 3) та блок СТ - ПК. Регулятор R2 та його коефіцієнт підбрано експериментальним шляхом у процесі виконання моделювання схеми векторного керування.

Після аналізу отриманих характеристик системи очевидно, що перерегулювання становить приблизно 52%, показник коливання знаходиться на рівні $M = 1.52$. Отже, запропонована СК задовольняє встановленим вимогам тому, що показник коливальності нижчий, ніж задане значення $M = 1.7$ [7, 8].

Можна зробити висновок, що, згідно із отриманими результатами моделювання, розроблена СК швидкістю БМП забезпечує зменшення більш ніж у 7 разів падіння швидкості обертання під час зростання номінального моменту навантаження порівняно із нерегульованим приводом. Отже, дана система дає змогу підвищити якість роботи. Це моделювання доводить, що отримана в результаті СК швидкістю БМП функціональна та задовольняє встановленим технічним вимогам.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Відповідно до результатів розрахунків та моделювання СК швидкістю ВД, можна зробити наступні висновки:

- СК швидкістю ВД зі схемою векторного керування, функціональність якої було змодельовано в програмному пакеті MATLAB, може ефективно компенсувати вплив постійних часу, що призводить до механічних характеристик ВД, близьких до ідеальних;
- векторне керування призводить до поліпшення динаміки всього приводу з ВД, що пояснюється підвищенням лінійності механічні характеристики електродвигуна;
- перехідні процеси СК швидкістю обертання БМП із обраними параметрами регуляторів контуру струму та швидкості задовольняють встановленим вимогам технічного завдання за показника коливальності $M = 1.52$, що не перевищує заданого значення показника $M = 1.7$;
- розроблена СК швидкістю БМП забезпечує величину падіння швидкості обертання ВД під час зростання номінального моменту навантаження в 7 разів меншу, ніж при використанні системи без схеми керування швидкістю обертання, що дає змогу підвищити якість роботи.

Література

1. Робототехнічні системи: проектування і моделювання [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології» / М. М. Поліщук, М.М. Ткач; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Електронні текстові дані (1 файл: 41,6 Мбайт). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. - 112 с.
2. Tin Lun Lam, Yangsheng Xu. Tree Climbing Robot: Design, Kinematics and Motion Planning. Springer Heidelberg, New York, 2012. - 178p.
3. Auke Ijspeert, Carlo Menon. Modelisation and Simulation of Climbing Robots. Master Project, Simon Ruffieux, Simon Fraser University, 2008.- 21p.
4. Синтез робототехнічних систем в машинобудуванні / [Л.Є.Пелевін, К. І. Почка, О. М. Гаркавенко та ін.]. – К.: Інтерсервіс, 2016. – 258 с.
5. Електричні машини і трансформатори : навч. посібник / М. О. Остащевський, О. Ю. Юр'єва; за ред. В. І. Мілих. – Харків : ФОП Панов А. М., 2017. – 452 с. ISBN 978-617-7541-11-9.
6. Островерхов, М. Я. Електричні машини та електропривод [Електронний ресурс]: розрахункова робота для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», спеціалізації «Автоматизація хіміко-технологічних процесів і виробництв» / М. Я. Островерхов ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 466,01 Кбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 76 с. (доступ за посиланням <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/22742>)
7. Matlab Documentation. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: - <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/control>
8. Simulink Documentation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/simulink>

References

1. Robototekhnichni systemy: proektuvannia i modeliuvannia [Elektronnyi resurs]: navch. posib. dlia stud. spetsialnosti 126 «Informatsiini systemy ta tekhnolohii» / M. M. Polishchuk, M.M. Tkach; KPI im. Ihoria Sikorskoho. Elektronni tekstovi dani (1 fail: 41,6 Mбайт). Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2021. - 112 s.

2. Tin Lun Lam, Yangsheng Xu. Tree Climbing Robot: Design, Kinematics and Motion Planning. Springer Heidelberg, New York, 2012. - 178p.
3. Auke Ijspeert, Carlo Menon. Modelisation and Simulation of Climbing Robots. Master Project, Simon Ruffieux, Simon Fraser University, 2008.- 21p.
4. Syntez robototekhnichnykh system v mashynobuduvanni / [L.Ie.Pelevin, K. I. Pochka, O. M. Harkavenko ta in.]. – K.: Interservis, 2016. – 258 s.
5. Elektrychni mashyny i transformatory : navch. posibnyk / M. O. Ostashevskiy, O. Yu. Yurieva; za red. V. I. Milykh. – Kharkiv : FOP Panov A. M., 2017. – 452 s. ISBN 978-617-7541-11-9.
6. Ostroverkhov, M. Ya. Elektrychni mashyny ta elektropryvod [Elektronnyi resurs]: rozrakhunkova robota dlia studentiv spetsialnosti 151 «Avtomatyzatsiia ta kompiuterno-intehrovani tekhnolohii», spetsializatsii «Avtomatyzatsiia khimiko-tekhnolohichnykh protsesiv i vyrobnytstv» / M. Ya. Ostroverkhov ; KPI im. Ihoria Sikorskoho. – Elektronni tekstovi dani (1 fail: 466,01 Kbait). – Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2018. – 76 s. (dostup za posylanniam <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/22742>).
7. Matlab Documentation. [Elektronnyi resurs]. - Rezhym dostupu: - <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/control>
8. Simulink Documentation [Elektronnyi resurs]. - Rezhym dostupu: - <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/simulink>