

**Р. П. МИГУЩЕНКО, О. Ю. КРОПАЧЕК, К. Р. МИГУЩЕНКО, О. М. ФІНОГЕНОВ,  
К. Д. КОЦКАЛО**

### **МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ У МЕХАНІЧНОМУ РОБОТІ**

В статті розглянута практична наукова задача, яка полягає у оптимізації процесів подолання перешкод механічним роботом при русі по пересічній місцевості. Задача вирішувалась за рахунок ідентифікації, створення і аналізу математичної моделі технологічного процесу подолання перешкоди при висі на перекладині роботом за допомогою механічних важелів, з подальшим проведенням математичного та імітаційного моделювання. В статті сформовані схеми зміщення реального технологічного процесу на основі передачі електричних сигналів в електричному колі, розглянуті і проаналізовані електричні параметри математичних моделей у вигляді лінійних диференціальних рівнянь першого і другого порядку, визначені недоліки, які впливають на надмірне розгойдування механічного робота, встановлені кореляції між електричними параметрами схеми заміщення і реальними механічними параметрами робота при веденні ним визначеної механічної дії при подоланні перешкод, наведені пропозиції щодо оптимізації вказаних дій і сформульовані завдання для подальших досліджень.

Натурні досліди, які були проведені на реальному механічному роботі, при виконанні ним тестової вправи, виявили наявність затухаючих коливань амплітуди з часом. Отримані дані дозволили сформувати схему технічну модель такого технологічного процесу у вигляді послідовного електричного  $RLC$ -кола. Розгляд і аналіз диференціального рівняння, що описує поведінку параметрів в  $RLC$ -колі у вигляді диференціального рівняння другого порядку, підтвердив адекватність математичної моделі. Для усунення коливальних процесів при виконанні технологічного процесу механічним роботом, була розглянута схема технічна модель у вигляді  $RL$ -кола. Така схема технічна модель дозволила понизити порядок диференціального рівняння і сформувати математичну модель у вигляді лінійного диференціального рівняння першого порядку. Розв'язок такого рівняння методом варіації змінних зі знаходження аналітичних виразів для загального і частинного рішень, дозволило здійснити імітаційне моделювання технологічної дії подолання перешкоди при висі на перекладині механічного робота за допомогою механічних важелів. Імітаційне моделювання показало, що перехідний процес, при використанні такої моделі, є аперіодичним експоненціальним процесом. Це вказує на шкідливість наявності реактивного елементу  $C$  у математичній моделі і його усунення спроможне вирішити поставлену практичну наукову задачу.

Виявлення відповідності між отриманою математичною моделлю електричної схеми заміщення і загальним рівнянням механіки для поступального руху, а також параметрами цих рівнянь, дозволило надати рекомендації щодо усунення параметру  $C(\varphi)$  фізичний зміст якого полягає у варіації жорсткості підвісу і сильно залежить від довжини підвісу.

**Ключові слова:** механічний робот, схема технічна модель, математична модель, диференціальне рівняння, коливальний процес, аперіодичний процес

### ***R. MYGUSHCHENKO, O. KROPACHEK, K. MYGUSHCHENKO, O. FINOHENOV, K. KOTSKALO*** **MODELING OF PROCESSES IN MECHANICAL ROBOTICS**

The article addresses a practical scientific problem involving the optimization of obstacle-overcoming processes by a mechanical robot moving over rough terrain. The problem is approached through the identification, construction, and analysis of a mathematical model of the technological process of obstacle overcoming during bar suspension by the robot using mechanical levers, followed by mathematical and simulation modeling.

The article presents substitution schemes of the real technological process based on the transmission of electrical signals within an electrical circuit. It also examines and analyzes the electrical parameters of mathematical models in the form of first- and second-order linear differential equations. Deficiencies affecting excessive oscillations of the mechanical robot are identified, and correlations are established between the electrical parameters of the substitution circuit and the real mechanical parameters of the robot during the execution of a defined mechanical action for overcoming obstacles. Proposals for optimizing these actions are provided, and directions for further research are formulated.

Experimental trials conducted on a physical mechanical robot during a test exercise revealed the presence of damped oscillations in amplitude over time. The collected data enabled the development of a circuit-technical model of this technological process in the form of a series RLC electrical circuit. The analysis of the differential equation describing the behavior of parameters in the RLC circuit, expressed as a second-order differential equation, confirmed the adequacy of the mathematical model.

To eliminate oscillatory processes during the robot's operation, a circuit-technical model in the form of an RL circuit was considered. This model reduced the order of the differential equation, resulting in a mathematical model represented by a first-order linear differential equation. The solution to this equation using the method of variation of parameters, along with the derivation of analytical expressions for both the general and particular solutions, enabled simulation modeling of the technological action of obstacle overcoming during bar suspension by the robot using mechanical levers.

The simulation modeling demonstrated that the transient process in this case is an aperiodic exponential process. This indicates the detrimental effect of the reactive element  $C$  in the mathematical model, and its removal can effectively resolve the stated practical scientific problem.

Establishing the correspondence between the resulting mathematical model of the electrical substitution circuit and the general equation of translational mechanical motion, as well as the parameters of these equations, made it possible to provide recommendations for eliminating the parameter  $C(\varphi)$ , whose physical meaning lies in the variation of suspension stiffness and which is strongly dependent on suspension length.

**Key words:** mechanical robot, circuit-technical model, mathematical model, differential equation, oscillatory process, aperiodic process

**Вступ.** Сучасні засоби роботизованої техніки все більш широко впроваджуються в життєдіяльність людини як на промисловому рівні, так і на рівні буденного життя. Роботи різного призначення та технологічного наповнення уже широко представлені в різних галузях виробництва і експлуатації промислового обладнання, де присутність людини є вкрай небезпечною. Це, в першу чергу, стосується військової сфери, сфер, де виникають шкідливі викиди під час роботи промислового обладнання, сфер, де доступ людини є неможливим з різного роду технологічних причин.

В якості базового, для досліджень, був обраний робот [1], зовнішній вигляд якого показано на рис. 1. Представлений робот оснащений рядом електромеханічних приводів [2], електронним блоком [1], низкою механічних вузлів (рис. 2). Його основним завданням є запуск літальних апаратів (дронів). Проте, на розглядуваний робот накладаються і інші функціональні вимоги. Серед таких є просування по пересічній місцевості, подолання перешкод, стабілізація горизонтального положення при запуску дронів тощо.

Відлагодження рухів роботів часто відбувається на відповідних змаганнях з робототехніки. Базовий робот дослідження, який виконаний учасниками гуртка з робототехніки школи Лінкольн Парк, приймав участь у таких змаганнях в штаті Іллінойс, США [2]. Авторами даних досліджень вже був виконаний аналіз недоліків функціонування досліджуваного робота, була підведена теоретична база щодо функціонування деяких приводів робота, були сформульовані рекомендації, які покращують працездатність робота. Проте, подальша робота з удосконалення функціонування окремих вузлів досліджуваного технічного об'єкту не є завершеною, автори продовжили свої дослідження.

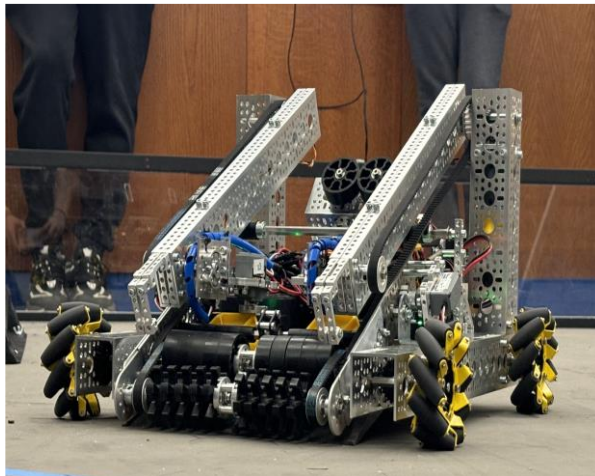


Рис. 1 – Досліджуваний робот

Під час подолання зовнішніх перешкод при просуванні робота по пересічній місцевості, представлений робот (рис. 1) використовує механічні важелі. Сам процес подолання вказаних перешкод продемонстровано на рис. 2, а, б.

а)



б)

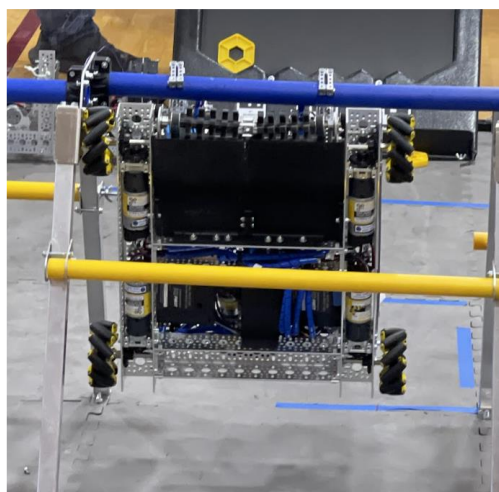


Рис. 2 – Подолання перешкод роботом

Коливальні процеси, якими супроводжуються процеси подолання перешкод, негативно впливають на рухи робота і чіткість виконання поставлених завдань. Зокрема це стосується запуску дронів. Самі коливальні рухи є рухами з сильним затуханням і можуть бути описані відповідними диференційними рівняннями. Наявність математичної моделі у вигляді диференційних чи інших рівнянь дозволяє здійснити додаткове вивчення процесів що пов'язані з функціонуванням роботів, в тому числі, завдяки математичному або імітаційному моделюванню.

**Мета дослідження, постановка задачі.** Метою досліджень в статті є формування і дослідження математичної моделі об'єкта дослідження – механічного робота в режимі подолання перешкод при русі по пересічній місцевості.

Для досягнення мети необхідно:

- провести натурні експерименти з об'єктом дослідження;

- сформуванати аналітичну схему заміщення;
- розробити і дослідити математичну модель процесу;
- надати рекомендації для оптимізації конструкції механічного робота;
- поставити задачі для подальших досліджень.

**Аналіз математичної моделі другого порядку.** При натурних дослідженнях були зняті характеристики коливальних рухів робота при висі, за допомогою механічних важелів, на перекладені. Дані і їх графічне зображення показані в табл. 1 та на рис. 3. Зважаючи на парусність, центр ваги, довжину підвісу – коливальний рух може бути описаним у вигляді [3]:

$$J_x \frac{d^2\varphi}{dt^2} + b(t) \frac{d\varphi}{dt} + C(\varphi)\varphi = 0, \tag{1}$$

$\varphi$  – кут коливання;  
 $b(t)$  – коефіцієнт опору середовища;  
 $C(\varphi)$  – коефіцієнт жорсткості.

Таблиця 1

Час, сек	Відхилення, см
0	5.474
0.2	-3.796
0.4	0.620
0.6	0.967
0.8	-0.160
1.0	0,012

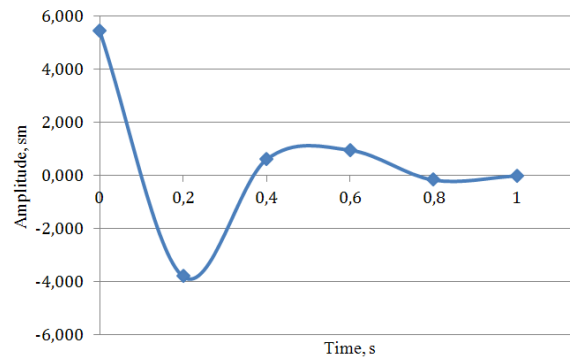


Рис. 3 – Механічні коливання

Для аналітичного розгляду описаного процесу доцільно сформуванати відповідну схему заміщення [4]. Така схема, з електричними елементами, показана на рис. 4.

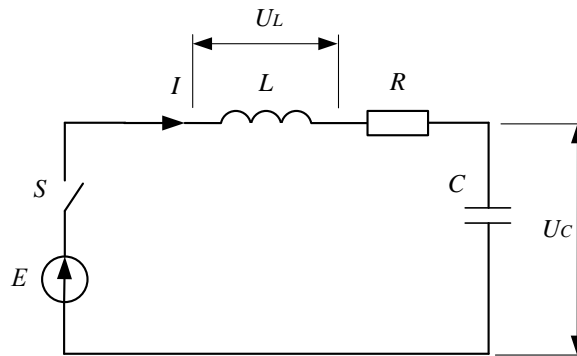


Рис. 4 – Схема заміщення коливального механічного процесу

Схема заміщення на рис. 4 відтворює коливальні затухаючі рухи робота і містить активні та реактивні елементи [5]. З [6] така схема заміщення може бути описаною диференційним рівнянням вигляду:

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int idt = E, \tag{2}$$

де  $L$  – значення індуктивності котушки;  
 $C$  – значення ємності конденсатора;  
 $i$  – миттєве значення електричного струму;  
 $R$  – значення опору резистора;  
 $E$  – напруга джерела живлення;  
 $t$  – час.

Рівняння (2), на відміну від (1), містить електричні параметри, але існує висока кореляція між електричними і механічними параметрами, які описують вказані коливальні процеси. В даних дослідженнях автори спирались на розгляд коливальних процесів через електричні параметри.

Зважаючи на [7]

$$i = C \frac{u_C}{dt}, \quad u_C = \frac{1}{C} \int i dt,$$

де  $u_C$  – миттєве значення падіння напруги на конденсаторі  $C$   
 рівняння (2) можна записати у вигляді:

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{di}{dt} + \frac{1}{LC} = 0. \quad (3)$$

Для зручності, а це співпадає з інженерною практикою, рівняння (3) можна записати у вигляді характеристичного рівняння, використовуючи перетворення Лапласа [8]. Тоді отримаємо:

$$p^2 + \frac{R}{L} p + \frac{1}{LC} = 0. \quad (4)$$

Рішення рівняння (4) по електричному струму представляється у вигляді:

$$i = \frac{E}{L(p_1 - p_2)} e^{p_1 t} - \frac{E}{L(p_1 - p_2)} e^{p_2 t} = \frac{E}{L(p_1 - p_2)} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}),$$

а, зважаючи на [7]:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad \delta = \frac{R}{2L}, \quad \omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L}}, \quad \beta = \arctg \frac{\frac{R}{2L}}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L}}},$$

вираз для електричного струму встановлюється як:

$$i = \frac{E}{\omega L} e^{-\delta t} \sin(\omega t),$$

що демонструє коливальні процеси всієї системи взагалі.

**Аналіз математичної моделі першого порядку.** Для виключення механічних коливань, які несуть негативні явища в роботу механічного робота, можливий розгляд диференційного рівняння, яким описується процес подолання перешкод при русі по пересічній місцевості, у вигляді диференційного рівняння першого порядку. Для цього авторами була використана схема заміщення, що представлена на рис. 5.

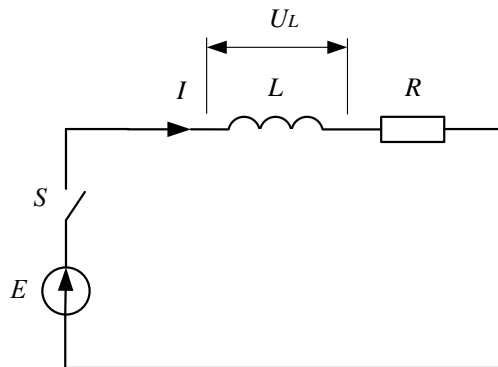


Рис. 5 – Схема заміщення процесів в механічному роботі

Диференційне рівняння, яке описує процеси в механічному роботі, для схеми заміщення на рис. 5 має вигляд:

$$L \frac{di}{dt} + iR = E. \quad (5)$$

Формула (5) описує процеси в схемі, зображеній на рис. 5, є базовою для опису RL-електричних кіл [6] і являє собою лінійне неоднорідне диференціальне рівняння першого порядку.

Розглянемо відповідне однорідне рівняння до (5) [9]:

$$L \frac{di}{dt} + iR = 0.$$

Розділяємо змінні:

$$L \frac{di}{dt} = -iR, \quad \frac{di}{i} = -\frac{R}{L} dt.$$

Інтегруємо та логарифмуємо:

$$\int \frac{di}{i} = -\frac{R}{L} \int dt,$$

$$\ln|i| = -\frac{R}{L} t + c.$$

За визначенням логарифма:

$$i = e^{-\frac{R}{L} t} \cdot e^c.$$

Приймаємо  $e^c = c$ . Тоді:

$$i = ce^{-\frac{R}{L} t}.$$

Отже, отримано розв'язок однорідного рівняння.

Методом варіації довільної сталої шукаємо розв'язок відповідного неоднорідного рівняння:

$$i(t) = c(t) \cdot e^{-\frac{R}{L} t}.$$

Знайдемо  $\frac{di}{dt}$ :

$$\frac{di}{dt} = c' e^{-\frac{R}{L} t} - \frac{R}{L} c e^{-\frac{R}{L} t}.$$

Підставимо  $i$  та  $\frac{di}{dt}$  в початкове рівняння (5):

$$L \left( c' e^{-\frac{R}{L} t} - \frac{R}{L} c e^{-\frac{R}{L} t} \right) + c R e^{-\frac{R}{L} t} = E.$$

Розкриємо дужки:

$$L c' e^{-\frac{R}{L} t} - R c e^{-\frac{R}{L} t} + c R e^{-\frac{R}{L} t} = E,$$

$$L c' e^{-\frac{R}{L} t} = E.$$

Розділяємо змінні:

$$c' = \frac{dc}{dt},$$

$$L \frac{dc}{dt} e^{-\frac{R}{L} t} = E,$$

$$\frac{dc}{dt} = \frac{E}{L} e^{\frac{R}{L} t}.$$

Інтегруємо:

$$\int dc = \frac{E}{L} \int e^{\frac{R}{L} t} dt,$$

$$\int dc = \frac{E}{L} \cdot \frac{L}{R} \int e^{\frac{R}{L} t} dt.$$

Тоді

$$c(t) = \frac{E}{R} e^{\frac{R}{L} t} + A,$$

де  $A$  – константа.

Розв'язок шукаємо у вигляді:

$$i(t) = c(t)e^{-\frac{R}{L}t}. \quad (6)$$

Підставляємо в (6) отримане  $c(t)$ :

$$i(t) = \left( \frac{E}{R} e^{\frac{R}{L}t} + A \right) e^{-\frac{R}{L}t}.$$

Тоді

$$i(t) = \frac{E}{R} + Ae^{-\frac{R}{L}t}, \quad (7)$$

де  $\frac{E}{R}$  – частковий розв’язок неоднорідного диференціального рівняння;

$Ae^{-\frac{R}{L}t}$  – загальний розв’язок неоднорідного диференціального рівняння.

Розв’язком рівняння (5) у загальному вигляді (7) є миттєве значення електричного струму  $i$ , який протікає в електричному колі RL (рис. 5) і має дві складові [10]:

$$i = i_1 + i_2,$$

де  $i_1 = \frac{E}{R}$  – значення електричного струму, яке встановлюється після завершення перехідних процесів;

$i_2 = Ae^{-\frac{R}{L}t}$  – значення електричного струму під час перехідного процесу.

Щоб визначити сталу  $A$  вільної складової у (7), необхідно використати початкові умови.

Початкові умови визначаються з законів комутації [6]. У законах комутації вводяться поняття:

$i(0-)$  – миттєве значення електричного струму в електричному колі (рис. 5) безпосередньо перед замиканням ключа  $S$  у певний момент часу  $t$ ;

$i(0+)$  – миттєве значення електричного струму в електричному колі (рис. 5) одразу після замикання ключа  $S$  у певний момент часу  $t$ .

Відповідно до першого закону комутації [6]:

$$i(0-) = i(0+).$$

Оскільки до замикання ключа  $S$  (при  $t = 0$ ) електричний струм в RL-електричному колі (рис. 5) відсутній, тобто дорівнював 0, то:

$$i(0-) = i(0+) = 0,$$

а це означає, що одразу після замикання ключа  $S$  електричний струм в RL-електричному колі:

$$i(t) = 0.$$

Тоді вираз (7) можна записати так:

$$i(t) = i(0+) = i(0-) = \frac{E}{R} + Ae^{-\frac{R}{L}t} \Big|_{t=0} = \frac{E}{R} + Ae^{-\frac{R}{L} \cdot 0} = \frac{E}{R} + Ae^0,$$

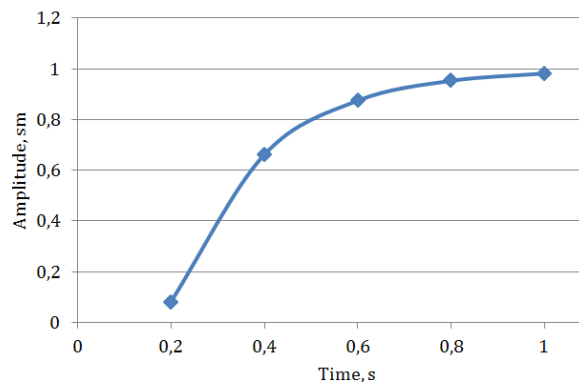
$$i(0+) = \frac{E}{R} + A,$$

$$A = i(0+) - \frac{E}{R} = -\frac{E}{R}.$$

Остаточно вираз (7) набуває такого вигляду:

$$i = \frac{E}{R} - \frac{E}{R} e^{-\frac{R}{L}t}. \quad (8)$$

На основі (8) очевидно, що для схеми заміщення на рис. 5 процеси переходять із коливального характеру в аперіодичні [11]. Імітаційне моделювання (8) наведено на рис. 6.

Рис. 6 – Реалізація переходного процесу в  $RL$ -контурі

**Висновок і подальші дослідження.** Проведені дослідження дозволяють оцінити вплив параметрів математичної моделі на характер процесів, які відбуваються у реальному технічному об'єкті.

При дослідженнях стало очевидним, що наявність електричної ємності в схемі заміщення реального технічного об'єкту призводить до підвищення порядку математичної моделі, а це, в свою чергу, призводить до виникнення коливальних процесів. Для переведення технічного об'єкту з коливального в аперіодичний режим необхідно позбутись ємності.

Зважаючи на високий рівень схожості математичних моделей (1) і (3) стає очевидним, що в реальному механічному роботі необхідно позбутись змінної  $C(\varphi)$ , фізичний зміст якої полягає в жорсткості підвісу і сильно залежить від довжини підвісу.

Таким чином, подальші натурні досліди із варіацією довжини механічних важелів та введення додаткових вузлів, які підвищують жорсткість механічних важелів, – це стратегія подальших досліджень з розглядуваним технічним об'єктом.

#### Список літератури:

1. Мигущенко Р. П. Дослідження властивостей механічного робота на прикладі фізичного маятника / Р.П. Мигущенко, О. Ю. Кропачек, В. М. Балєв, К. Р. Мигущенко, О. М. Фіногенов // Вісник НТУ «ХПІ». – 2024. – № 1 (9). С. 3 – 12.
2. Mygushchenko R. Study of transient characteristics of electrical circuits in robotics / R. Mygushchenko, O. Kropachek, G. Suchkov, V. Baliev, K. Mygushchenko, K. Kotskalo // 5th IEEE KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week, Kharkiv. – 2024.
3. Цасюк В. В. Теоретична механіка : навчальний посібник. – Київ : ЦУЛ, 2004. – 402 с.
4. Dale E. Seborg. Process Dynamics and control, international student version, 3rd Edition / Dale E. Seborg, Thomas F. Edgar, Duncan A. Mellichamp, Francis J. Doyle III. – Wiley, 2012. – 476 p.
5. Мигущенко Р. П. Дослідження параметрів коливального об'єкту / Р. П. Мигущенко, О. Ю. Кропачек, К. Д. Коцкало, О. М. Фіногенов // Матеріали Міжнародної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». – Харків, 2024.
6. Мякшина И. Г. Текст лекций по ТОЕ : для студентов физико-технического факультета по специальности «Инженерная электрофизика» / И. Г. Мякшина, Е. Г. Глебова. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2007. – 348 с.
7. Кучерук І. М. Загальний курс фізики : навчальний посібник. Т.2. Електрика і магнетизм / І. М. Кучерук, І. Т. Горбачук, П. П. Луцик. – Київ : Техніка, 2006. – 465 с.
8. Байда Е. И. Решения задач электромеханики в прикладных пакетах программ : учеб.-метод. пособие / Е. И. Байда, О. Ю. Кропачек. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2017. – 180 с.
9. Филиппов А. Ф. Введение в теорию дифференциальных уравнений / А. Ф. Филиппов. – М., 2007. – 240 с.
10. Шегедин О. І. Теоретичні основи електротехніки / О. І. Шегедин, В. С. Маляр. – Львів : Магнолія плюс, 2004. – 168 с.
11. Збірник задач з теоретичних основ електротехніки. Частина 1: навч. посібник / А. Ю. Воробкевич, В. С. Маляр, Р. Я. Совин, М. О. Соколовський, П. Г. Стахів, О. І. Шегедин ; за ред.: Воробкевича А. Ю., Шегедина О. І. – Київ : Магнолія плюс, 2004. – 224 с.

#### Bibliography (transliterated):

1. Myhushchenko R.P. Doslidzhennia vlastyvostei mekhanichnoho robota na prykladi fizychnoho maiatnyka / R.P. Myhushchenko, O.Iu. Kropachek, V.M. Baliev, K.R. Myhushchenko, O.M. Finohenov // Visnyk NTU «KhPI». – 2024. – № 1 (9). S. 3 – 12.
2. Mygushchenko R. Study of transient characteristics of electrical circuits in robotics / R. Mygushchenko, O. Kropachek, G. Suchkov, V. Baliev, K. Mygushchenko, K. Kotskalo // 5th IEEE KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week, Kharkiv. – 2024.
3. Tsasiuk V.V. Teoretychna mekhanika: Navchalnyi posibnyk. – K.: TsUL, 2004. – 402 s.
4. Dale E. Seborg. Process Dynamics and control, international student version, 3rd Edition / Dale E. Seborg, Thomas F. Edgar, Duncan A. Mellichamp, Francis J. Doyle III. – Wiley, 2012. – 476 p.
5. Myhushchenko R.P. Doslidzhennia parametriv kolyvalnoho ob'iektu / R.P. Myhushchenko, O.Iu. Kropachek, K.D. Kotskalo, O.M. Finohenov // Materialy Mizhnarodnoi konferentsii «Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia». – Kharkiv, 2024.

6. Myakshina I.G. Tekst lektsiy po TOE dlya studentov fiziko-tehnicheskogo fakulteta po spetsialnosti «Inzhenernaya elektrofizika» / I.G. Myakshina, E.G. Glebova – Harkov: NTU «HPI», 2007. – 348 s.
7. Kucheruk I.M. Zahalnyi kurs fizyky: Navchalnyi posibnyk. T.2. Elektryka i mahnyetizm / I.M. Kucheruk, I.T. Horbachuk, P.P. Lutsyk.– Kyiv: Tekhnika, 2006. – 465 s.
8. Bayda E.I. Resheniya zadach Elektromehaniki v prkladnIh paketah programm: ucheb.-metod. posobie / E.I. Bayda, O.Yu. Kropachek – Harkov: NTU «HPI», 2017. – 180 s.
9. Filippov A.F. Vvedenie v teoriyu differentsialnyh uravneniy / A.F. Filippov – M., 2007. – 240 s.
10. Shehedyn O.I. Teoretychni osnovy elektrotekhniki / O.I. Shehedyn, V.S. Maliar – Lviv: Mahnoliia plus, 2004. – 168 s.
11. Zbirnyk zadach z teoretychnykh osnov elektrotekhniki. Chastyna 1: navch. posibnyk / A.Iu. Vorobkevych, V.S. Maliar, R.Ia. Sovyn, M.O. Sokolovskiy, P.H. Stakhiv, O.I. Shehedyn. Za redpksiieiu Vorobkevycha A.Iu., Shehedyna O.I. – Kyiv : Mahnoliia plus, 2004. – 224 s.

Надійшла (received) 10.01.2025

*Відомості про авторів / About the Authors*

**Мигущенко Руслан Павлович (Mygushchenko Ruslan)** – доктор технічних наук, професор, проректор Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: +38-099-40-22-885; e-mail: [mrp1@ukr.net](mailto:mrp1@ukr.net), ORCID: 0000-0002-3287-9772.

**Кропачек Ольга Юрївна (Kropachek Olga)** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри теоретичних основ електротехніки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: +38-067-79-5678-0; e-mail: [kropachek@ukr.net](mailto:kropachek@ukr.net), ORCID: 0000-0001-5899-0252.

**Мигущенко Катерина Русланівна (Mygushchenko Kateryna)** – студентка Caltech, м. Пасадена; тел.: +38-099-484-32-88; e-mail: [katyamig06@gmail.com](mailto:katyamig06@gmail.com), ORCID: 0009-0009-5928-6975.

**Фіногенов Олексій Михайлович (Finohenov Oleksii)** – аспірант кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: +38-066-821-60-21; e-mail: [alexey.finohenov@gmail.com](mailto:alexey.finohenov@gmail.com), ORCID: 0009-0008-6707-8511.

**Коцкало Кирило Дмитрович (Kotskalo Kyrylo)** – студент кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: +38-095-345-31-43; e-mail: [kyrylo.kotskalo@cit.khpi.edu.ua](mailto:kyrylo.kotskalo@cit.khpi.edu.ua) .