

Волинський національний університет  
імені Лесі Українки

# **ФІЗИКА ТА ОСВІТНІ ТЕХНОЛОГІЇ**

Випуск 1



Видавничий дім  
«Гельветика»  
2023

## РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

**Мирончук Галина Леонідівна** – доктор фізико-математичних наук, професор, директор навчально-наукового фізико-технологічного інституту Волинського національного університету імені Лесі Українки (головний редактор);

**Галян Володимир Володимирович** – доктор фізико-математичних наук, доцент, завідувач кафедри експериментальної фізики, інформаційних та освітніх технологій Волинського національного університету імені Лесі Українки;

**Головацький Володимир Анатолійович** – доктор фізико-математичних наук професор, професор кафедри теоретичної фізики та комп'ютерного моделювання Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича;

**Голодюк Лариса Степанівна** – доктор педагогічних наук, доцент, заступник директора з науково-методичної діяльності КЗ «Кіровоградський обласний інститут післядипломної педагогічної освіти імені Василя Сухомлинського»;

**Заболотний Володимир Федорович** – доктор педагогічних наук, професор, завідувач кафедри фізики і методики навчання фізики, астрономії Вінницького державного педагогічного університету імені Михайла Коцюбинського;

**Кажукаускас Вайдотас** – доктор фізико-математичних наук, професор, головний науковий співробітник групи дослідження фотоелектричних явищ Інституту фотоніки та нанотехнологій Вільнюського університету, м. Вільнюс, Литовська Республіка;

**Кевшин Андрій Григорович** – кандидат фізико-математичних наук, доцент, заступник директора з наукової роботи навчально-наукового фізико-технологічного інституту Волинського національного університету імені Лесі Українки;

**Озга Катаржина** – доктор наук, професор Ченстоховського політехнічного університету, м. Ченстохова, Республіка Польща;

**Пясецький Міхал Войцех** – доктор наук, професор Гуманітарно-природничого університету імені Яна Длугоша в Ченстоховій, м. Ченстохова, Республіка Польща;

**Рудиш Мирон Ярославович** – кандидат фізико-математичних наук, доцент, старший науковий співробітник кафедри загальної фізики Львівського національного університету імені Івана Франка;

**Савош Валентин Олексійович** – кандидат педагогічних наук, завідувач відділу фізико-математичних дисциплін Волинського інституту післядипломної педагогічної освіти;

**Сахнюк Василь Євгенович** – кандидат фізико-математичних наук, доцент, завідувач кафедри теоретичної та комп'ютерної фізики імені А.В. Свідзинського Волинського національного університету імені Лесі Українки;

**Сільвейстр Анатолій Миколайович** – доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри фізики і методики навчання фізики, астрономії Вінницького державного педагогічного університету імені Михайла Коцюбинського;

**Сосницька Наталія Леонідівна** – доктор педагогічних наук, професор, завідувач кафедри вищої математики і фізики Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного;

**Трифенова Олена Михайлівна** – доктор педагогічних наук, доцент, доцент кафедри природничих наук та методик їхнього навчання Центральноукраїнського державного педагогічного університету імені Володимира Винниченка

**Хижун Олег Юліанович** – доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу спектроскопії поверхні новітніх матеріалів Інституту проблем матеріалознавства імені І.М. Францевича Національної академії наук України;

**Шигорін Павло Павлович** – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри теоретичної та комп'ютерної фізики імені А.В. Свідзинського Волинського національного університету імені Лесі Українки;

**Юхимчук Володимир Олександрович** – доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач відділу оптики і спектроскопії напівпровідникових і діелектричних матеріалів Інституту фізики напівпровідників імені В.С. Лашкарьова;

**Яцюк Світлана Миколаївна** – кандидат педагогічних наук, доцент, декан факультету інформаційних технологій і математики Волинського національного університету імені Лесі Українки.

Журнал ухвалено до друку Вченою радою  
Волинського національного університету імені Лесі Українки  
**30 березня 2023 р., протокол № 4**

Науковий журнал «Фізика та освітні технології»  
zareestrovano Міністерством юстиції України  
(Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації  
серія KB № 24970–14910P від 30.08.2021 року)

«Фізика та освітні технології» включено до Переліку наукових фахових видань України категорії Б у галузі освіта/ педагогіка (спеціальності 014 – Середня освіта (за предметними спеціальностями); 104 – Фізика та астрономія; 105 – Прикладна фізика та наноматеріали) відповідно до Наказу МОН України № 1290 від 30 листопада 2021 року (додаток 3); Наказу МОН України № 530 від 06 червня 2022 року (додаток 2).

Офіційний сайт видання: [www.journals.vnu.volyn.ua/index.php/physics](http://www.journals.vnu.volyn.ua/index.php/physics)

Статті у виданні перевірені на наявність плагіату за допомогою програмного забезпечення StrikePlagiarism.com від польської компанії Plagiat.pl.

ISSN 2786-5444 (print)  
ISSN 2786-5452 (online)

© Волинський національний університет імені Лесі Українки, 2023

УДК 004.3866:53.05:377.1

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2023-1-1>

**Наталія АНДРЕЄВА**

кандидат технічних наук, доцент, професор, Державний університет телекомунікацій  
вул. Солом'янська, 7, Київ, Україна, 03110

**ORCID ID:** 0000-0002-8384-6647

**SCOPUS-AUTHOR ID:** 57209312908

**Ровіл НАФЄЄВ**

кандидат фізико-математичних наук, доцент, Державний університет телекомунікацій  
вул. Солом'янська, 7, Київ, Україна, 03110

**ORCID ID:** 0000-0003-2721-9718

**SCOPUS-AUTHOR ID:** 57271111000

**Леонід КАПЧЕНКО**

кандидат педагогічних наук, доцент, завідувач навчальної лабораторії «Оптики та фізики твердого тіла» Державний університет телекомунікацій вул. Солом'янська, 7, Київ, Україна, 03110

**Бібліографічний опис статті:** Андреева, Н., Нафеев, Р., Капченко, Л. (2023). Моделирование высокой академической успешности студентов при выполнении лабораторных работ с физики онлайн. *Фізика та освітні технології*, 1, 3–9, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2023-1-1>

## МОДЕЛЮВАННЯ ВИСОКОЇ АКАДЕМІЧНОЇ УСПІШНОСТІ СТУДЕНТІВ ПРИ ВИКОНАННІ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ З ФІЗИКИ ОНЛАЙН

Метою даної роботи є: дослідження впливу когнітивного процесу на успішність студентів при дистанційному виконанні лабораторних робіт з фізики у вищих навчальних закладах, зокрема в галузі телекомунікацій; розроблення і впровадження в навчальний процес алгоритму формування динамічного навчального контенту.

На сьогоднішній день в Україні, як і у всьому світі, в навчальних закладах різного рівня акредитації у зв'язку з можливими надзвичайними обставинами, зокрема такими як карантин, пандемія, військовий стан тощо, змушені впроваджувати дистанційну форму навчання. Значна частина науково-педагогічних працівників адаптуються до викликів «дистанційки».

Перебуваючи в постійному педагогічному пошуку викладачі університету застосовуючи основні критерії (доступність, зрозумілість, максимально можливе пояснення матеріалу, дозованість матеріалу, налагодження дослідницької роботи, практичного виконання завдань) та принципи організації навчання онлайн (результативність, універсальність, оптимальність, гнучкість) власноруч розробляють, як сам навчальний контент, так і навчальну траєкторію з проведення лекційних та практичних занять, забезпечуючи чітке і систематичне здійснення зворотного зв'язку-діалогізації. Зокрема, формують необхідний динамічний навчальний контент з метою проведення лабораторних занять та відповідних експериментальних досліджень «віртуально». Водночас, значної уваги приділяється і когнітивному процесу.

Використано багаторічний досвід авторів з організації і проведення лабораторних занять з фізики, аналіз педагогічної, психологічної і науково-методичної літератури. Аналітичним методом розглянуто сілабус та вплив когнітивного процесу на сумативне оцінювання успішності студентів, статистичним спостереженням узагальнено оцінення викладачами звітів, виконаних студентами лабораторних робіт з оптики та фізики твердого тіла, зокрема дистанційно.

Аналіз результатів дослідження засвідчив, що при впровадженні і реалізації в навчальному процесі вперше розроблених моделей, а саме: формування динамічного навчального контенту та когнітивного процесу (викладач – студент) отримано високий показник як загальної, так і якісної академічної успішності студентів при дистанційному виконанні лабораторних робіт.

Тому, з високою ймовірністю можна стверджувати що, ретельна підготовка викладачами навчального закладу динамічного навчального контенту, адаптивність учасників навчального процесу та стійкий Internet зв'язок забезпечать високу якість здобутих студентами знань онлайн.

**Ключові слова:** дистанційне навчання, лабораторні роботи, динамічний навчальний контент, когнітивний процес, сілабус, сумативне оцінювання, академічна успішність навчання.

**Natalia ANDREEVA**

*Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor, State University of Telecommunications St. Solomyanska, 7, Kyiv, Ukraine, 03110*

**ORCID ID:** 0000-0002-8384-6647

**SCOPUS-AUTHOR ID:** 57209312908

**Rovil NAFEEV**

*Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at the Department of Higher Mathematics, Mathematical Modeling and Physics, State University of Telecommunications, St. Solomyanska, 7, Kyiv, Ukraine, 03110*

**ORCID ID:** 0000-0003-2721-9718

**SCOPUS-AUTHOR ID:** 57271111000

**Leonid KAPCHENKO**

*Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Head of the Educational Laboratory, State University of Telecommunications, St. Solomyanska, 7, Kyiv, Ukraine, 03110*

**To cite this article:** Andreeva, N., Nafeev, R., Kapchenko, L. (2023). Modeliuvannia vysokoi akademichnoi uspishnosti studentiv pry vykonanni laboratornykh robit z fizyky onlain [Modeling of students' high academic performance during completing laboratory work in physics online]. *Physics and Educational Technology*, 1, 3–9, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2023-1-1>

## MODELING OF STUDENTS' HIGH ACADEMIC PERFORMANCE DURING COMPLETING LABORATORY WORK IN PHYSICS ONLINE

*The purpose of this work is to study the influence of the cognitive process on student performance in the remote performance of laboratory work in the course of physics in higher education institutions, in particular in the field of telecommunications; development and implementation of an algorithm for the formation of dynamic educational content in the educational process.*

*Today, in Ukraine as well as around the world, educational institutions of various accreditation levels are forced to introduce distance learning due to possible emergency circumstances, such as quarantine, pandemic, martial law, etc. Much academic staff is adapting to the challenges of distance learning.*

*Being in a constant pedagogical search, university teachers apply the main criteria (accessibility, clarity, maximum possible explanation of the material, dosage of the material, establishment of research work, practical implementation of tasks) and principles of online learning organization (effectiveness, versatility, optimality, flexibility), develop both the educational content and the educational trajectory for lectures and practical classes, providing clear and systematic feedback. In particular, they create the necessary dynamic learning content for the purpose of conducting laboratory classes and relevant experimental research "virtually". At the same time, considerable attention is paid to the cognitive process.*

*The authors' many years of experience organizing and conducting laboratory classes in physics and analyzing pedagogical, psychological, scientific, and methodological literature are used. The authors use the analytical method to examine the syllabus and the influence of the cognitive process on the summative assessment of students' performance, and statistical observation to summarize the teachers' assessment of reports completed by students in laboratory work in optics and solid state physics, including distance learning.*

*The analysis of the study results showed that the introduction and implementation of the newly developed models in the educational process, namely – the formation of dynamic educational content and the cognitive process (teacher-student), a high rate of both general and qualitative student performance in remote laboratory work was obtained.*

*Therefore, it is highly likely that careful preparation of dynamic educational content by teachers of an educational institution, adaptability of participants in the educational process, and a stable Internet connection will ensure the high quality of knowledge acquired by students online.*

**Key words:** distance learning, laboratory work, dynamic learning content, cognitive process, syllabus, summative assessment, academic performance.

**Актуальність проблеми.** Важливою складовою ефективної підготовки майбутніх висококваліфікованих спеціалістів, зокрема в галузі телекомунікацій є лабораторні заняття, які від-

повідно Закону України «Про вищу освіту» у закладах вищої освіти відносяться до одного з основних видів навчальних занять, на яких студенти під керівництвом викладачів прово-

дять натурні, або імітаційні експерименти чи досліди в спеціально обладнаних навчальних лабораторіях з використанням устаткування, пристосованого до умов навчального процесу.

Разом з тим, у зв'язку із надзвичайними обставинами (пандемія, воєнний стан тощо), в яких перебуває Україна, актуальним є розроблення (педагогічних, психологічних і науково-методичних) інноваційних методик проведення лабораторних занять дистанційно, забезпечивши мотиваційну складову щодо здобуття знань при високій академічній успішності студентів університету. Проблемним залишається також, формування динамічного навчального контенту для проведення лабораторних робіт онлайн та відповідних експериментальних досліджень з фізики «віртуально».

**Аналіз останніх публікацій** показав, що багато закордонних та вітчизняних вчених приділяють увагу вивченню дистанційного навчання. Розвитку дистанційної освіти присвячені роботи багатьох науковців, таких як: Б. Блум (Блум, 1950), Ф. Дербі (Дербі, 2020) та інших. Проблеми моделювання дистанційного навчання висвітлені у працях В. В. Олійника (Олійник, 2013), Д. І Сапожника, Л. Б. Демидчук, (Сапожник, Демидчук, 2021), О.О Глазунової Н. В Морзе (Глазунова, Морзе, 2010) моделі організації дистанційного навчання і комунікативних форм навчання знайшли своє науково-практичне відображення Н. А. Андреева, А. І. Воронін, Л. М. Капченко, Р. К. Нафеев, (Андреева, 2022, Воронін, 2012, Капченко, Нафеев, 2022). О.В. Олійник (Олійник, 2009).

**Метою даної роботи** є: розроблення і упрощення в навчальний процес моделей формування навчального контенту і когнітивного процесу (викладач – студент) та дослідження їх впливу на академічну успішність студентів при дистанційному (онлайн) виконанні лабораторних робіт з фізики у вищих навчальних закладах, зокрема в галузі телекомунікацій.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Проведений аналіз методів та принципів організації дистанційного навчання, які використовуються у закладах вищої освіти свідчить, що вони характеризуються наступними ознаками: результативність, універсальність, оптимальність і гнучкість.

При формуванні навчального контенту дистанційного (онлайн) проведення лабораторних

занять на визначеній платформі (забезпечується чітке і систематичне здійснення зворотного зв'язку-діалогізації), дослідниками запропоновані основні критерії: доступність, зрозумілість, максимально можливе пояснення матеріалу, дозованість матеріалу, налагодження дослідницької роботи, практичного виконання завдань.

У своїх працях Олійник О. В. доводить, що «...поняття комунікацій зв'язане з інформаційними обмінами, що існують між людьми в процесі спільної діяльності і спілкування. Комунікація – це акт і процес установаження контактів між суб'єктами взаємодії за допомогою вироблення загального змісту переданої і сприйманої інформації», «...сучасний освітній процес пов'язаний з реалізацією двох основних принципів: проблемності та діалогічності. Наголосимо на діалогізації процесу навчання. Діалог є дієвою формою продуктивної взаємодії тільки в межах змісту, здатного ініціювати активність усіх суб'єктів освітнього процесу. Основна вимога до досліджуваного матеріалу полягає в можливості організації дискусії, діалогу і полілогу з приводу запропонованого змісту. Діалогізація педагогічної взаємодії забезпечує формування емоційно-оцінювального ставлення до змісту освіти... Це такий вплив суб'єкта, який створює умови для взаємодії, основою якого є спілкування» (Олійник, 2009).

Організація навчальної взаємодії між викладачем та студентом дозволяє приєднувати до навчальних завдань різноманітний контент лабораторного заняття: методичні вказівки щодо виконання роботи; відео з покроковим проведенням експерименту; індивідуальні параметри практичних вимірювань; критерії оцінювання тощо.

При проведенні лабораторних робіт студенти виконують всі вказівки, проводять обчислення шуканої фізичної величини, її абсолютної і відносної похибок, акуратні креслення, графіки, малюнки і висновки, оформлюють звіт в письмовому або електронному вигляді. Завершену роботу студенти можуть захистити онлайн, або офлайн, надіславши фото- або відео звіту.

Також зазначається, що: «...комунікативний аспект освітнього процесу передбачає опосередковані та прямі механізми через зміст та форми навчання; комунікації є важливими та необхідними для будь-якої освітньої моделі,

водночас вони визнані головними в моделях дистанційної освіти; сучасні мережеві засоби Інтернету створюють нове освітньо-комунікативне середовище для моделей дистанційної освіти, в якому залишається незмінним зміст, новими стають комунікативні форми навчання» (Олійник, 2009).

Використовуючи поради американської дослідниці Фловєр Дербі (Дербі, 2020), розроблено модель когнітивного процесу (викладач-студент) при дистанційному проведенні лабораторних робіт з фізики та в подальшому сумативного оцінювання результатів роботи. (рис. 1).

У зв'язку із вимушеним проведенням лабораторних занять дистанційно (онлайн), викладачеві вкрай необхідний зворотній зв'язок,

розуміння того, що студентами засвоюються не тільки теоретичний матеріал, але і те, що вони здобувають: вміння досліджувати, аналізувати, інтерпретувати, обґрунтовувати, узагальнювати та оцінювати виконане практично в лабораторії, або «віртуально». Тому, нагальним стало створення дієвого, ефективного механізму формування інноваційного навчального контенту.

Адаптувавши таксономію професора педагогіки Чиказького університету Б. Блума (Б. Блум, 1950), який розділив когнітивний процес (викладач – студент) на шість рівнів, вперше розроблено ієрархічну модель формування навчального контенту з фізики у ЗВО – «Модель когнітивного процесу при дистанційному (онлайн) виконанні лабораторних робіт»,

Дія викладача		Предмет комунікації	Дія студента
Коментуванн	методичних матеріалів	методичні вказівки щодо виконання лабораторної роботи; зразки протоколів та звітів	Розуміння наданих матеріалів
	надісланого контенту	слайди, фотографії установок, приборів, обладнання, фрагментарних (покрокових) відео	
Пояснення очікувань викладача		правила, способи та вимоги: щодо проведення розрахунків, побудови графіків, креслень при підготовці індивідуального звіту проведеного дослідження / експерименту, умови захисту та критерії оцінювання результатів роботи студента	Розуміння правил, способів та вимог
Поділ на етапи		окремі етапи дослідження / експерименту. Слайди, фото, короткі відеоролики та онлайн демонстрації	Засвоєння навчального матеріалу
Наведення прикладів		прикладні зразки робіт з поясненням шляхів усунення можливих помилок. Шляхи застосування визначеної фізичної сутності проведених експериментів в майбутньому на підприємстві	Мисленева симуляція процесів. Уявлення навчального матеріалу або досвіду
Створення доброзичливої атмосфери		підготовлені методичні матеріали доступною (не канцелярною) мовою. Знаходження «поруч» зі студентами в процесі онлайн демонстрації експерименту, ввічливе спілкування доброзичливі відповіді студентам на їх запитання	Визнання людської атмосфери
Донесення умов		політика академічної доброчесності	Розуміння
Приєм звіт		результати проведеного дослідження / експерименту, підготовлений звіт студента	Звітування
Коментування виставлених оцінок			Уявлення оцінювання

Рис. 1. Модель когнітивного процесу

яка містить шість рівнів: знання, розуміння, застосування, аналіз, синтез, оцінка. На кожному з яких визначаються: результати навчання, дії викладача, дії студента і спонукаючи дієслова (когнітивні дії й операції) (рис. 2).

Дослідження успішності студентів проводилось у чотири етапи:

На першому етапі – студенти виконують лабораторні роботи в навчальній лабораторії. При стовідсотковій загальній успішності, якісна успішність становить: відмінно – 13,35%, дуже добре – 66,62%, добре – 5,05%. Відносна середньостатистична якісна успішність студентів при аудиторному виконанні лабораторних робіт склала 85,02%.

Натомість на *другому етапі*, в умовах вимушеного дистанційного (онлайн) навчання, при вибірці 1605 звітів студентів, показник якісної успішності студентів знизився на 2,41% до 82,61% (рис. 3).

Спонукаючим фактором стало запровадження в рамках даного дослідження на третьому і четвертому етапах, розроблених авторських моделей формування динамічного навчального контенту та когнітивного процесу (викладач – студент).

Так, на *третьому етапі* викладачі надають студентам необхідний контент із елементами інтерактивного навчання. При виконанні лабораторних робіт студенти проводять дослідження з ефектом повної або часткової присутності в навчальній лабораторії, готують розрахунки та звіти. Запровадження моделі таксономії контенту лабораторних занять дистанційно (онлайн) (рис. 3) при виборці 2248 звітів та загальній стовідсотковій успішності, якісна успішність склала 84,89%. Різниця показників III і I етапів становить 0,13%. *Четвертий етап* ознаменувався дієвістю розробленої викладачами моделі когнітивного процесу (викладач – студент). Її впровадження при стовідсотковій загальній успішності і при виборці 2498 звітів, найбільш наблизили показники загальної якісної успішності до аудиторного (офлайн) формату проведення лабораторних робіт і становить 84,97%. Різниця в показниках склала всього 0,05 відсотка (табл. 1).

**Висновки та перспективи подальших досліджень.**

Враховуючи вищезазначене можна стверджувати, що при наявності програмного

Рівень	Визначення (результат навчання)	Дія викладача	Дія студента	Спонукаюча термінологія (когнітивні дії й операції)
Оцінка	Робити судження, висновки засновані на критеріях, стандартах	Уточнення, припущення та гармонізація дій студента. Формульальне та сумативне оцінювання	Судження засновані на правилах, критеріях та висновках дистанційно виконаної роботи	Доведіть, порівняйте, виберіть, зробіть висновок, обґрунтуйте, виділіть, перевірте, оцініть
Синтез	Компіляція інформації. Підготовка загального звіту виконаної лабораторної роботи, включаючи заключення, висновки та її онлайн/офлайн захист	Узагальнення, міркування, оцінювання	Узагальнення, формулювання, планування	Сплануйте, складіть, зберіть, узагальніть, створіть, сформулюйте, встановіть, скомпонуйте, згрупуйте, об'єднайте
Аналіз	Розділення (розбиття) інформації (контенту) на складові частини (ознайомлення із теоретичною і мисленевим опануванням практичної) відтворення процесів, складання звіту, його захист	Направляє, досліджує, інформує	Розділяє, обговорює, розкриває, порівнює	Проаналізуйте, оцініть, вичисліть, порівняйте, дослідіть, обсудіть, поясніть, виведіть, виберіть, розділіть, перевірте, співвіднесіть
Застосування	Діяти згідно правил. Використання понять в конкретних ситуаціях при виконанні лабораторної роботи та у подальшому на виробництві	Спостереження, допомога щодо критичного мислення при виконанні лабораторної роботи, аналіз	Виконання лабораторної роботи згідно визначених правил, обґрунтований вибір, вирішення проблем, демонстрація знань	Дослідіть, обґрунтуйте, класифікуйте, модулюйте, покажіть, використайте, вирішіть, знайдіть, оперуйте, інтерпретуйте, завершіть
Розуміння	Розуміння наданої інформації. Власне формулювання проблематики зазначеної лабораторної роботи	Онлайн/офлайн демонстрація покрокового виконання лабораторної роботи. Здійснення співставлення та порівняння	Мисленева симуляція процесів, що відбуваються. Розуміння значення. Пояснення демонстрованого навчального матеріалу або досвіду	Обговоріть, визначте, розкажіть, перетворіть, поясніть, перефразуйте, узагальніть, порівняйте
Знання	Підготовка та формування контенту лабораторного заняття згідно навчальної програми. Направлення студенту навчального контенту засобами Internet	Онлайн / офлайн розповідь, показ, спрямування до розуміння та запам'ятовування теоретичної частини програмного матеріалу	Вивчення отриманого онлайн/офлайн програмного матеріалу. Сприймання, запам'ятовування, розпізнавання	Запам'ятайте, назвіть, виділіть, опишіть, покажіть, перерахуйте, слідуйте, відтворіть

**Рис. 2. Модель таксономії контенту лабораторних занять дистанційно**

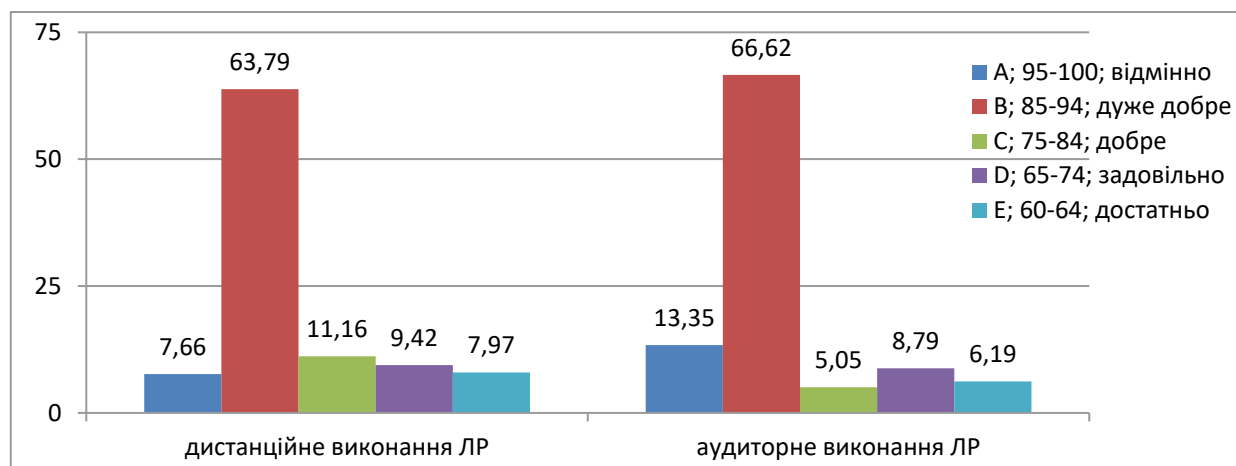


Рис. 3. Відносна середньостатистична успішність студентів

Таблиця 1

**Показники загальної та якісної успішності проведених лабораторних робіт (в аудиторії і дистанційно)**

Етап	Формат проведення лабораторних робіт	Вибірка дослідження (од.)	Успішність (%)				
			Загальна	Якісна			Загальна
				A, 95-100, відмінно	B, 85-94, дуже добре	C, 75-84, добре	
I	Аудиторний (офлайн)	1632	100	13,35	66,62	5,05	<b>85,02</b>
II	Дистанційний (онлайн)	1605	100	7,66	63,79	11,16	<b>82,61</b>
III	Дистанційний (онлайн)	2248	100	7,60	64,02	13,27	<b>84,89</b>
IV	Дистанційний (онлайн)	2498	100	15,78	41,23	27,96	<b>84,97</b>

забезпечення, яке робить навчання захоплюючим та ефективним, необхідного навчального контенту із елементами інтерактивного навчання з ефектом повної або часткової присутності, яке розвиває у студентів критичне мислення, та когнітивного процесу (викладач-студент) забезпечує досягнення високої академічної успішності студентів при вико-

нанні лабораторних робіт з фізики онлайн і є реальним.

Разом з тим, потребує змін, удосконалення форм, методів, методик і технологій навчання, створення імерсивних інтерактивних наукових програм, використання віртуальних наукових стимуляторів, обговорення провідних ідей із колегами, подальшого дослідження й аналізу.

**ЛІТЕРАТУРА:**

1. Андреева Н. О, Нафеев Р. К., Капченко Л. М. Вплив когнітивного процесу на успішність студентів при дистанційному виконанні лабораторних робіт з фізики у ВНЗ The 8 th International scientific and practical conference “Topical issues of modern science, society and education” February 26-28, 2022, Kharkiv, Ukraine. P. 309–316.
2. Воронін А.І. Проблеми когнітивного розвитку студентів у процесі професійного навчання : Наукове видання. Кривий Ріг: ДВНЗ «КНУ», 2012. 112 с.
3. Морзе Н. В., Глазунова О. Г. Моделі ефективного використання інформаційно-комунікаційних та дистанційних технологій навчання у вищому навчальному закладі. URL: file:///C:/Users/TEMP.DUIKT.007/ Downloads/admin,+08mrvshi.pdf (дата звернення: 25.01.2023).
4. Олійник О. В. Моделі дистанційного навчання: комунікативний аспект. *Вісн. Харків. держ. акад. культури : зб. наук. пр. : до 80-річчя Харків. держ. акад. культури*. М-во культури і туризму України, Харків. держ. акад. культури. Харків. 2009. Вип. 28. С. 188–195.
5. Flower Darby. How to be a Better Online Teacher by URL: <https://www.chronicle.com/interactives/advice-online-teaching?cid=cp234> (дата звернення: 26.01.2023).
6. Сапожник Д.І., Демидчук Л.Б. Інформаційно-комунікаційні технології в навчальному процесі закладів вищої освіти. *Вісник Львівського торговельно-економічного університету. Технічні науки*. № 26, Львів : 2021. С. 116-123.



7. Таксономія Б. Блума. URL: <https://pyrogiv.kiev.ua/taksonomiya-bluma-shho-ce-take/> (дата звернення: 26.01.2023).

#### REFERENCES:

1. Andreeva N.O., Naveev R.k., Kapchenko L.M. Vpliv kongnitivnogo procesu na uspichnisty studentiv pri distanziynomu vikonani laboratornih robot z fiziki u VNZ The 8 thInternationals cientific and practical conference “Topical is sues of moderns cience, society and education” February 26-28, 2022, Kharkiv, Ukraine. P. 309–316.

2. Voronin A.I. Problevi kognitivnogo rozvitku studentiv u prozesi profesiyynogo navchany : Naukove bidany / A.I. Voronin. – Krivij Rig : DVNZ <<KNU>>, 2012. – 112 p.

3. Morze N.V., Glazunova O.G. Modeli efektyvnogo vikoriatany informaziyno-komunikaziynih ta distanziynih tehnologiy navchany u vichomu navchalnomu xakladi – Rezhim dostupu : file:///C:/Users/TEMP.DUIKT.007/ Downloads/admin,+08mnmvshi.pdf (data zvernenu: 25.01.2023).

4. Oliynik O.V. Modeli distanziynogo navchany: komunikativniy aspekt / O.V. Oliynik // Visn. Harkiv. derzh.akad. kulturi : zb.nauk. pr. : do 80-richy Harkiv. derzh.akad.kulturi / Harkiv, 2009. – Vip. 28. – S.188-195.

5. Flower Darby. How to be a Better Online Teacher by URL: <https://www.chronicle.com/interactives/advice-online-teaching?cid=cp234> (дата звернення: 26.01.2023) (data zvernenu: 26.01.2023).

6. Sapozhnik D. I. Informaziyno-komunikaziyni tehnologiy w navchalynomu prozesi zakladiv vichoi osviti / D. I. Sapozhnik, D.I. Demidchuk / Visnik Lvivskogo torgivelno-ekonomichnogo universitetu. Tehnichni nauki. № 26, Lviv : 2021 : – S.116-123.

7. Toksonomiy B. Blum (Elektroniy resurs)/ – Rezhim dostupu: <https://pyrogiv.kiev.ua/taksonomiya-bluma-shho-ce-take/> (data zvernenu: 26.01.2023).

УДК 537.612.2, 537.612.3

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2023-1-2>

**Volodymyr HOLOVATSKY**

*Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Department of thermoelectricity and medical physics, Chernivtsi National University, 2 Kotsyubynsky str., Chernivtsi, Ukraine, 58012*

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0002-5573-2562>

**SCOPUS-AUTHOR ID:** 6507899727

**Ihor HOLOVATSKYI**

*PhD student, Chernivtsi National University, 2 Kotsyubynsky str., Chernivtsi, Ukraine, 58012*

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0002-4435-4607>

**SCOPUS-AUTHOR ID:** 57202987360

**Yana HOLOVATSKA**

*Student, Computer Science major, New York University Abu Dhabi, UAE*

**Yaroslav STRUK**

*Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at the Department of Information Technologies and Computer Physics, Chernivtsi National University, 2 Kotsyubynsky str., Chernivtsi, Ukraine, 58012*

**SCOPUS-AUTHOR ID:** 54884488400

**To cite this article:** Holovatsky V., Holovatskyi I., Holovatska Ya., Struk Ya. (2023). Rozrakhunok syly vzaïmodii tsylindrychnykh ta kiltsevykh mahnitiv [Oscillations of the resonant elastic pendulum]. *Physics and Educational Technology*, 1, 10–17, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2023-1-2>

## OSCILLATIONS OF THE RESONANT ELASTIC PENDULUM

*The purpose of this work is to investigate the peculiarities of oscillations of an elastic gravitational pendulum, which performs simultaneous coupled oscillations, like a spring and a mathematical pendulum, with a resonant frequency ratio of these oscillations (2:1). Determine the influence of initial conditions on the formation of stable periodic oscillation modes. Investigate the process of energy transfer from one subsystem to another.*

*On the basis of Lagrangian mechanics, neglecting the damping effect, the equations of motion of the pendulum were obtained and the numerical solutions were investigated using computer simulation. It was established that in such a system there is a periodic process of transfer of vibrational energy from one subsystem to another. It is shown that the amount of energy transferred and the period of this process depend on the initial conditions. The following initial conditions were found, under which complete energy transfer occurs, as well as conditions under which there is no influence of one subsystem on another.*

*The novelty of this work lies in the fact that for the first time a map of stable modes of oscillations is constructed, reflecting their evolution depending on the initial conditions of the oscillating system. Based on this oscillation map, it is possible to predict the main parameters of pendulum oscillations under arbitrary initial conditions. Visual and graphic interpretation of the solutions obtained in this work can be used in the study of other physical processes. The computer model is published and can be used in the educational process.*

**Key words:** elastic pendulum, Lagrange equation, Lissajous figures, resonant oscillations.

**Володимир ГОЛОВАЦЬКИЙ**

*доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри термоелектрики та медичної фізики, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2, м. Чернівці, Україна, 58012*

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0002-5573-2562>

**SCOPUS-AUTHOR ID:** 6507899727

**Ігор ГОЛОВАЦЬКИЙ**

аспірант кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної фізики, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2, м. Чернівці, Україна, 58012

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0002-4435-4607>

**SCOPUS-AUTHOR ID:** 57202987360

**Яна ГОЛОВАЦЬКА**

студентка спеціальності комп'ютерних наук Нью-Йоркського університету в Абу-Дабі, ОАЕ

**Ярослав СТРУК**

доцент кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної фізики, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського 2, м. Чернівці, Україна, 58012

**SCOPUS-AUTHOR ID:** 54884488400

**Бібліографічний опис статті:** Головацький В., Головацький І., Головацька Я., Струк Я. (2023). Розрахунок сили взаємодії циліндричних та кільцевих магнітів. *Фізика та освітні технології*, 1, 10–17, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2023-1-2>

## РЕЗОНАНСНІ КОЛИВАННЯ ПРУЖНОГО ГРАВІТАЦІЙНОГО МАЯТНИКА

*Мета даної роботи – дослідити особливості коливань пружного гравітаційного маятника, який здійснює одночасно зв'язані коливання, як пружинний та математичний маятники, при резонансному співвідношенні частот цих коливань (2:1). Визначити вплив початкових умов на утворення стабільних періодичних мод коливань. Дослідити процес передачі енергії з однієї підсистеми в іншу.*

*На основі механіки Лагранжа, нехтуючи ефектом затухання, отримано рівняння руху маятника та досліджено числові розв'язки за допомогою комп'ютерного моделювання. Встановлено, що у такій системі відбувається періодичний процес передачі енергії коливань з однієї підсистеми в іншу. Показано, що величина енергії, яка передається та період цього процесу залежить від початкових умов. Знайдено такі початкові умови, при яких відбувається повна передача енергії, а також умови, при яких відсутній вплив однієї підсистеми на іншу.*

*Новизна даної роботи полягає у тому, що вперше побудована карта стабільних мод коливань, що відображає їх еволюцію у залежності від початкових умов коливної системи. На основі цієї карти коливань можна прогнозувати основні параметри коливань маятника при довільних початкових умовах. Наглядно-графічна інтерпретація розв'язків, отриманих у даній роботі, може використовуватись при вивченні інших фізичних процесів. Комп'ютерна модель опублікована з відкритим кодом і може використовуватись у навчальному процесі.*

**Ключові слова:** пружний гравітаційний маятник, рівняння Лагранжа, фігури Лісажу, резонансні коливання.

### 1. Introduction

An elastic gravitational pendulum is an example of nonlinearly coupled oscillating systems. Resonant oscillations of this mechanical system are the subject of modern scientific researches because of their similarity to other complex oscillations that are often encountered in physics (Алдошин, Яковлев, 2016).

The first scientific study of an elastic gravitational pendulum was carried out in the work of Witt and Gorelik (Витт, Горелик, 1993). In this work, a system of Lagrange equations in a polar coordinate system was obtained, the analytical solutions of which are unknown. In the absence of the possibility of computer modeling, the authors performed analytical studies of the system of differential equations in the approximation of small fluctuations. The paper assumes the existence of

resonant oscillations with periodic energy transfer from one subsystem to another. It was established that unlike linearly coupled oscillating systems (for example, two mathematical pendulums connected by a spring), where the depth and speed of energy transfer depends on the system parameters, in this problem these values are determined by the initial conditions.

After the first publication, studies of the oscillations of an elastic pendulum were carried out both theoretically (Olsson, 1976; Anisin, Davidovic, Babovic et al, 1993; Christensen, 2004; Lai, 1984; Carretero-Gonzalez, Nunez-Yepe, Salas-Brito, 1994; Sousa, Marcus, Caldas, 2018) and experimentally (Cross, 2017).

The analysis of the scientific literature showed that the conditions for the occurrence of certain modes of oscillation remain insufficiently

researched, and the dependence of the period and magnitude of energy transfer on the initial conditions remains unknown.

In this paper on the basis of numerical solutions of the equation of motion [10], the peculiarities of the elastic pendulum oscillations were studied in the condition of resonance, when the frequency of the mathematical pendulum is twice less than the frequency of the spring pendulum. It is shown that the energy which is periodically transmitted from one oscillatory subsystem to another and the period of this process depend on the initial conditions. The dependence of the period of energy exchange between subsystems and its value on the energy of each subsystem is determined. The stable modes of oscillations and the features of their modification by changing the initial conditions are investigated. It is shown that for small oscillations, in the case when the energy of the gravitational pendulum is twice bigger than the energy of the spring pendulum, each mode of oscillation comes into a stable state in which there is no energy transmission between subsystems. On the coordinate plane of the initial conditions, an oscillation mode map is made, which demonstrates lines of several simple oscillation modes. The period of energy transmission between subsystems is constant along these lines.

## 2. Lagrangian and equations of motion

Consider a pendulum consisting of a mass  $m$  that is hanged on a spring (rubber thread). The length of unstretched spring is  $l_0$ , and  $k$  is its rigidity. The mass  $m$  satisfies the ratio

$$\frac{l}{g} = \frac{4m}{k} \quad (1)$$

that provides the resonance ratio of the frequencies of the gravitational and spring pendulums. that provides the resonance ratio of the gravitational and spring pendulum frequencies. This expression is useless for the calculation of the required mass because rubber thread length depends on the  $m$ . Thus,  $l = l_0 + \Delta l$  and  $\Delta l = mg / k$  from (1) we obtain a useful expression for the creation resonant pendulum.

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l}{3}. \quad (2)$$

The length of the spring  $r(t)$  and the angle of deviation of the pendulum from the equilibrium position  $\varphi(t)$  are chosen as generalized coordinates. The Lagrange function of the elastic pendulum is

$$L = \frac{m\dot{r}(t)^2}{2} + \frac{mr(t)^2\dot{\varphi}^2}{2} - \frac{k(r(t)-l_0)^2}{2} + mgr(t)\cos\varphi, \quad (3)$$

where the first and second terms are the kinetic energy of the translational and rotational motions of the mass  $m$ , the third and fourth terms are the spring and the gravitational potential energies. The system of Lagrange equations is the following

$$\begin{cases} m\ddot{r}(t) - mr\ddot{\varphi}(t)^2 + k(r(t) - l_0) - mg\cos(\varphi(t)) = 0 \\ r(t)\ddot{\varphi}(t) + 2\dot{r}(t)\dot{\varphi}(t) + g\sin\varphi(t) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

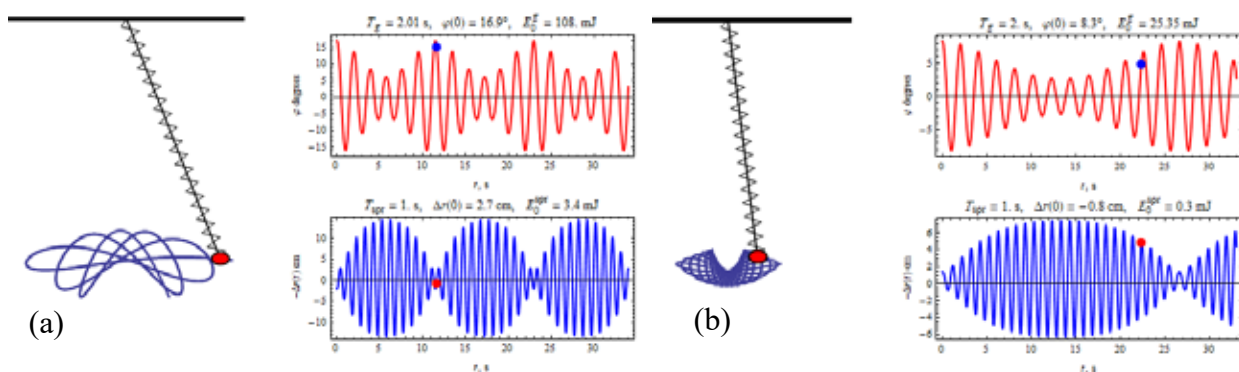
From equations (3) one can see, that gravitational and spring oscillations are coupled in a complicated way. Analytical solutions of the system of the differential equations (4) are unknown. Therefore, the numerical solutions of the problem are investigated in the next section.

## 3. Results of computer modelling

For the study of the resonant elastic pendulum oscillations, a computer model was created in the Wolfram Mathematica and published on the Wolfram Demonstrations Project website (Holovatsky, Holovatska, 2019). This program allows changing the initial conditions in a wide range and studying oscillations of the pendulum. Fig. 1 demonstrates that the amplitude decrease in the gravitational pendulum oscillations is accompanied by the amplitude increase in the spring pendulum oscillations. Thus, the total energy of the system remains unchanged with the friction absence. As a result, the graphs  $\varphi(t)$  and  $\Delta r(t)$  have the form of modulated functions that are similar to the effect of beating frequencies and oscillations of linearly coupled systems. Though, for two linear coupled oscillatory systems, the frequency of energy exchange between subsystems is determined by the system parameters and does not depend on the initial conditions. In the case of an elastic gravitational pendulum, the period of energy exchange can be changed in a wide range by the initial conditions. For example, a decrease in the initial amplitudes of oscillations leads to an increase in the period of energy transfer (Fig. 1).

Studies have shown that the value of the transferred energy between the coupled subsystems ( $\Delta E$ ) at the small initial deviations is determined by the equation

$$\Delta E = |E_0^g - 2E_0^{sp}|, \quad (5)$$



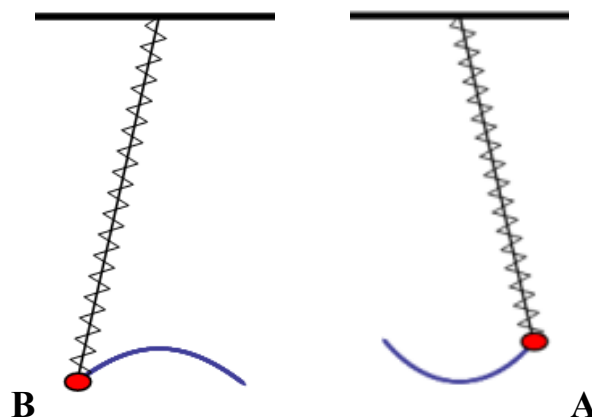
**Fig. 1. Oscillations of a resonant pendulum: a)  $\varphi(0)=16.9^\circ$ ,  $\Delta r(0) = 2.7\text{ cm}$  ; b)  $\varphi(0)=8.3^\circ$ ,  $\Delta r(0) = -0.8\text{ cm}$  .**

where  $E_0^g = mg[1 - \cos \varphi(0)]r(0)$ ,  $E_0^{sp} = k[\Delta r(0)]^2 / 2$  – the energies of the gravitational and spring pendulums at the initial moment of time. As it follows from (5), there are such initial conditions in which there is no energy exchange between subsystems and oscillations of pendulums occur independently. Since, the spring pendulum initial energy can be provided both by tension ( $\Delta r(0) > 0$ ) and compression ( $\Delta r(0) < 0$ ) of the spring, two types of such oscillations are possible (**A** and **B**, Fig. 2).

When changing the initial deviations of the pendulum, there are various stable periodic trajectories of the pendulum oscillations, which are called modes. The existence of stable modes is explained by the fact that when the period of energy exchange becomes a multiple of the period of the gravitational pendulum oscillations ( $T = N \cdot T_g$ ), the system returns to the same state that was in the beginning, and hence the trajectory will repeat. For the mode depicted on Fig. 1a the period of energy exchange  $T = 12c$  ( $T_g = 2\text{ c}$ ,  $N = 6$ ) and on Fig. 1b  $T = 26c$  ( $T_g = 2\text{ c}$ ,  $N = 13$ ). Each of these modes can exist at different values of the initial conditions. In Fig. 3 solid lines show the initial conditions of several oscillation modes. The period of energy transmission between subsystems is constant along these oscillation modes lines. On the inserts of Fig. 3 one can see trajectories, that are typical for these modes.

The simplest oscillation modes are observed at high energies, since then the energy transfer period is small and therefore contains a small number of the gravitational pendulum oscillations ( $N$ ).

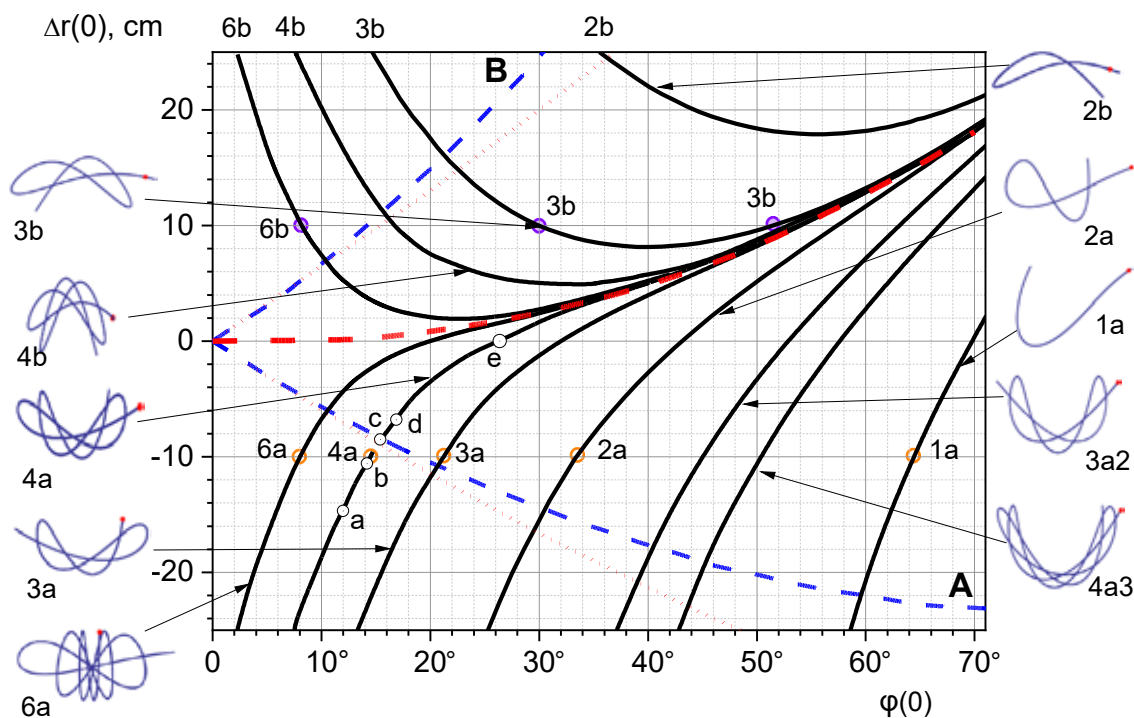
The blue dashed lines in Fig. 3 show stable periodic oscillating states **A** and **B** of the pendulum. The lines of all modes cross one of the dashed lines



**Fig. 2. Stable states of pendulum ( $\Delta E = 0$ )**

**A** or **B**, so each oscillation mode can be in one of these states. Letter “a” or “b” in the name of the mode depict this fact. So, number  $N$  will denote the oscillation modes, and the Latin letters – their modifications. For example 2a, 2b, 3a, 3b,... The Fig. 3 shows only the lines of the initial conditions of the pendulum, which correspond to the modes of oscillations with  $N \leq 6$ . The trajectory of oscillating modes  $N_a$  and  $N_b$  are mirror symmetric to each other.

The mode lines of the type  $N_a$  are monotonic functions but mode lines of the type  $N_b$  are non-monotonic functions. The lines of different modes characterized by the same number  $N$  converge asymptotically with the increase of the initial angle of the pendulum. Thus a region with a high density of lines is formed. The red dashed line in Fig. 3 divides the map of the pendulum's initial condition on the regions oscillation **A** and **B** types. The region near the red line is the region of initial conditions where the oscillations of the pendulum are unstable, and a small change in the initial deviations of the pendulum causes a large change in the



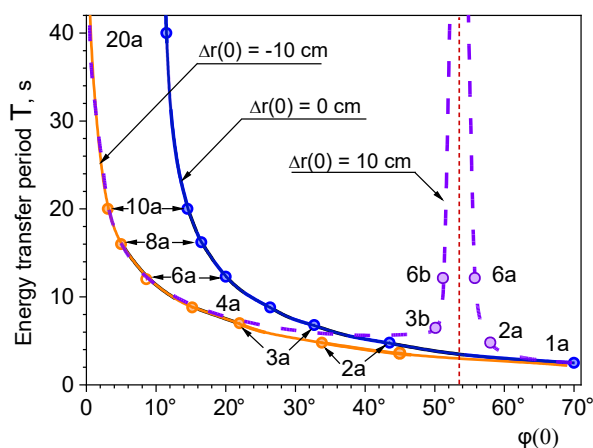
**Fig. 3. Distribution of oscillating modes on the plane of the pendulum initial deviations – solid lines. States A and B – dashed lines.  $E_0^g = 2E_0^{sp}$  – dotted lines**

period of exchange energy and the trajectory of the pendulum.

Beside the described modes  $N_a$  or  $N_b$  there are such periodic modes of oscillation in which subsystems exchange energy several times until the pendulum returns to its original state. For example, in the mode 3a2 subsystems exchange energy twice, and in the mode 4a3 – thrice. The energy transfer period for these modes is equal to  $3/2 T_g$  and  $4/3 \cdot T_g$ , respectively.

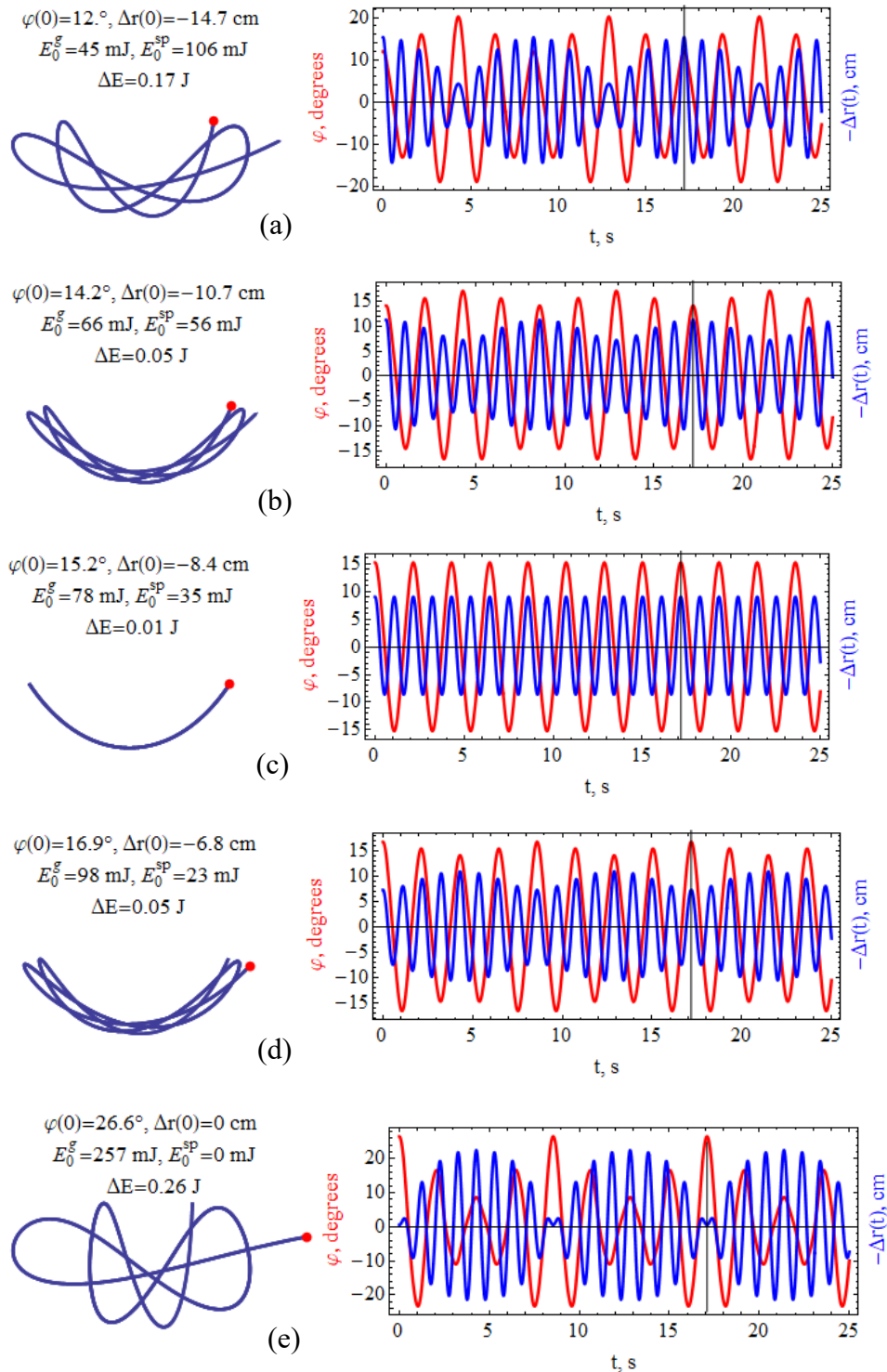
The dependence energy transfer period on the initial angle  $\varphi(0)$  at the different fixed values of  $\Delta r(0)$  is shown in Fig. 4. The energy transfer period at  $\Delta r(0) \leq 0$  monotonically decreases as the initial angle of the pendulum increases. The dependence of the energy transfer period on the initial angle of the pendulum at  $\Delta r(0) > 0$  has a non-monotonic form with a discontinuity at the point belonging to the bifurcation line.

In Fig. 5 on the example of mod 4a it is shown the peculiarities of the trajectories and parameters of pendulum oscillations when changing the initial conditions along the mode line (initial oscillation conditions, corresponding to points a, b, c, d, e, Fig. 3). For points b and d of 4a mode not only energy exchange and full energy are equal (Fig. 5b and Fig. 5d) but also pendulum movements have



**Fig. 4. Dependences energy transfer period on initial angle  $\varphi(0)$  at  $\Delta r(0) = -10 ; 0 ; 10 \text{ cm}$**

the same trajectories. The difference is only in the initial phase of oscillation. In the first case, at the initial moment of time, the spring pendulum energy is transmitted to the gravitational one, whereas in the second case, it is vice versa. Ratio  $E_0^{sp} / E_0^g = 2$  in (3) is a consequence of frequencies ratio. But Fig. 3 shows this ratio is performed for states A and B only at small amplitude of the gravitational pendulum ( $\varphi < 15^\circ$ ). This is due to the dependence of gravitation pendulum frequency on an amplitude of oscillations and due to the approximate division



**Fig. 5. Mode 4a at different initial conditions (depicted on the Fig. 3 by circles a, b, c, d, e)**

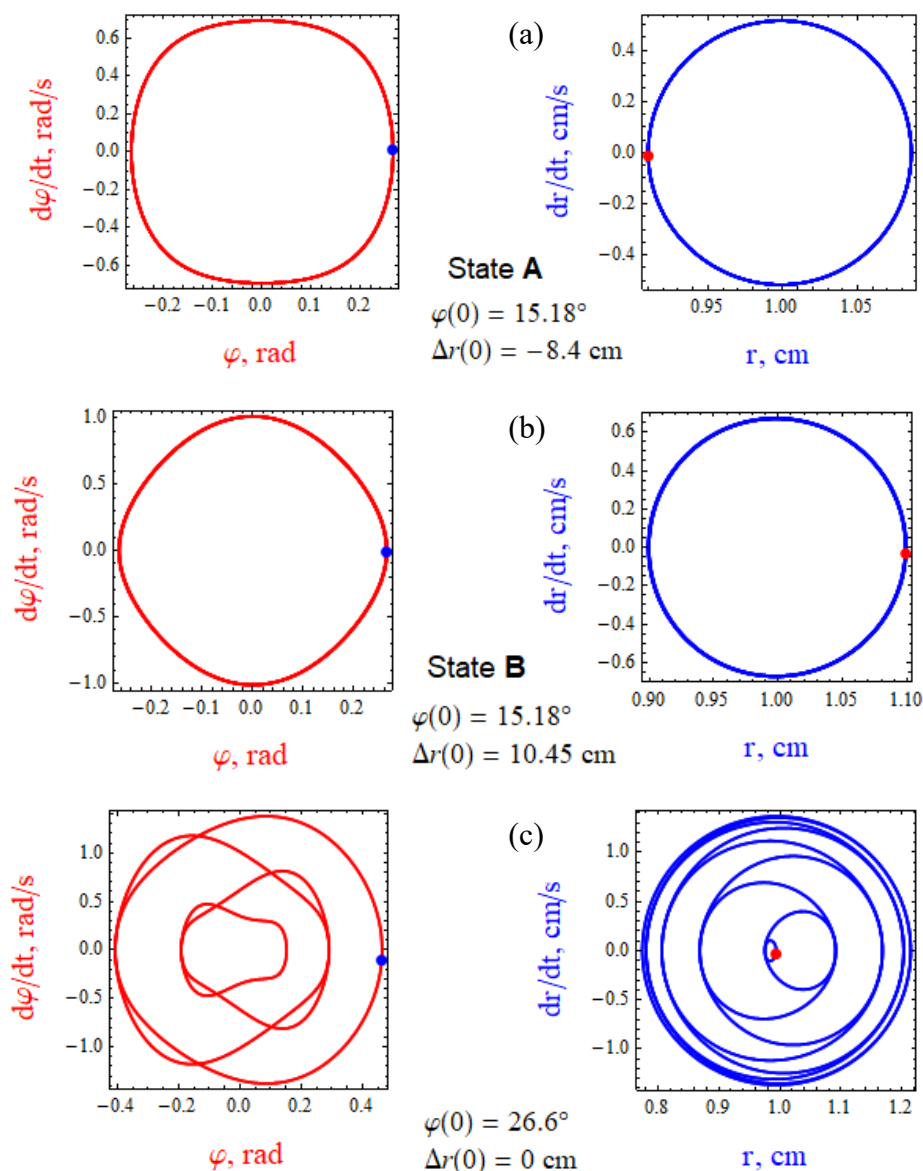
of the full energy into the energies of the subsystems. There is a part of the energy that belongs to both subsystems, which could be called the interaction energy (Anisin, Davidovic, Babovic, 1993).

The phase trajectories of the pendulum oscillations are depicted on Fig. 6. The phase trajectories of pendulum oscillations in states **A** and **B** of 4a and 4b modes are similar to trajectories of

non-interacting subsystems. The phase trajectory of spring oscillations with energy transfer (Fig. 6c) consist of several circles that are internally tangent.

#### SUMMARY

Thus, it was found some peculiarities of the elastic gravitational pendulum oscillations as the result of the motion equation numerical solution. Different oscillation modes are systematized and



**Fig. 6. Phase trajectories: (a) – 4a mode (state A), (b) – 4b mode (state B), (c) – 4b mode (with energy transfer)**

their coupling with the initial conditions is established. The map of the initial conditions of oscillations of an elastic pendulum has been created, which allows to estimate the period of energy transfer and its magnitude based on the initial value of the tension and deflection angle of the pendulum. It was shown that for each oscillating mode a state (**A** or **B**) exists in which there is no energy exchange

between subsystems that carry out independent harmonic oscillations.

It was shown that an increase in the total energy of a pendulum leads to a decrease in the period of energy exchange between subsystems.

The computer model is published with open code in Wolfram Language [10] and can be used in the educational process.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Алдошин Г.Т. Яковлев С.П. Механическая модель колебательного спектра углекислого газа. *Журнал технической физики*. 2016. Т.86. № 12. С. 25–32.
2. Витт А., Горелик Г. Колебания упругого маятника как пример колебаний двух параметрически связанных линейных систем. *ЖТФ*. 1933. Т. III. Вып. 2–3. С. 294–307.
3. Olsson M. Why does a mass on a spring sometimes misbehave. *Am. J. Phys.* 1976. 44. 1211-1212.



4. Anisin B., Davidovic D., Babovic V., Anisin B. On the linear theory of the elastic pendulum *Eur. J. Phys.* 1993. 14, 132-135.
5. Christensen J. An improved calculation of the mass for the resonant spring pendulum *Am J. Phys.* 2004. 72, 818.
6. Lai H. M. On recurrence phenomenon of a resonant spring pendulum *Am. J. Phys.* 1984. 52, 219-223.
7. Carretero-Gonzalez R., Nunez-Yepez N., Salas-Brito A. Regular and chaotic behavior in an extensible pendulum *Eur. J. Phys.* 1994. 15, 139-148.
8. Sousa M. C., Marcus F. A., Caldas I. L., Viana R. L. Energy distribution in intrinsically coupled systems: The spring pendulum paradigm *Physica A*. 2018. 509. 1110
9. Cross R. Experimental investigation of an elastic pendulum *Eur. J. Phys.* 2017. 38, 065004 (9pp).
10. Holovatsky V., Holovatska Y. Oscillations of an elastic pendulum. 2019. URL: <http://demonstrations.wolfram.com/OscillationsOfAnElasticPendulum/>

#### REFERENCES:

1. Aldoshin G T, Yakovlev S P (2015) Analytic Model of Vibrations of a Carbon Dioxide Molecule. *Fermi Resonance Mechanics of Solids*, 50 33-43.
2. Vitt A, Gorelik G (1933) Oscillations of an elastic pendulum as an example of the oscillations of two parametrically coupled linear systems *Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki*, 3 294-307.
3. Olsson M 1976 Why does a mass on a spring sometimes misbehave *Am. J. Phys.* 44 1211-1212.
4. Anisin B., Davidovic D., Babovic V., Anisin B. (1993) On the linear theory of the elastic pendulum *Eur. J. Phys.* 14 132-135.
5. Christensen J 2004 An improved calculation of the mass for the resonant spring pendulum *Am J. Phys.* 72 818.
6. Lai H M 1984 On recurrence phenomenon of a resonant spring pendulum *Am. J. Phys.* 52 219-223.
7. Carretero-Gonzalez R, Nunez-Yepez N, Salas-Brito A 1994 Regular and chaotic behavior in an extensible pendulum *Eur. J. Phys.* 15 139-148.
8. Sousa M C, Marcus F A, Caldas I L, Viana R L 2018 Energy distribution in intrinsically coupled systems: The spring pendulum paradigm *Physica A* 509 1110
9. Cross R. 2017 Experimental investigation of an elastic pendulum *Eur. J. Phys.* 38 065004 (9pp).
10. Holovatsky V., Holovatska Y. 2019. Oscillations of an elastic pendulum. URL: <http://demonstrations.wolfram.com/OscillationsOfAnElasticPendulum/>

УДК 519

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2023-1-3>

**Микола ГОЛОВІН**

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук та кібербезпеки, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі, 13, м. Луцьк, Україна, 43025

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0003-4516-4677>

**Ніна ГОЛОВІНА**

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри експериментальної фізики, інформаційних та освітніх технологій, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі, 13, м. Луцьк, Україна, 43025

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0002-1152-1536>

**Бібліографічний опис статті:** Головін М., Головіна Н. (2023). Використання методу машинного навчання для аналізу динаміки швидкостей виконання практичних завдань з інформатики. *Фізика та освітні технології*, 1, 18–24, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2023-1-3>

**ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ МАШИННОГО НАВЧАННЯ  
ДЛЯ АНАЛІЗУ ДИНАМІКИ ШВИДКОСТЕЙ ВИКОНАННЯ  
ПРАКТИЧНИХ ЗАВДАНЬ З ІНФОРМАТИКИ**

Карантинні обмеження раніше, військові дії тепер актуалізували дистанційне навчання. Важливими моментами стали: управління процесом навчання, фіксація та аналіз результатів навчання великих груп здобувачів освіти. Керування всяким процесом передбачає зворотній зв'язок. Актуальним перспективним напрямком забезпечення зворотного зв'язку у цьому випадку може стати аналіз відповідних статистичних розподілів результатів навчання. У цій роботі в якості наукової методології, що забезпечує згаданий вище аналіз, вибрані методи машинного навчання, а саме: дерево регресій та дерево класифікацій. Метою роботи є дослідження динаміки процесів навчання великих груп здобувачів освіти методами машинного навчання, що реалізується аналізом результатів вимірювань змін швидкостей виконання практичних завдань з інформатики. Наукова новизна цієї роботи полягає у спробі застосування методів машинного навчання до аналізу результатів практичних навчальних дій. Впродовж реалізації досліджень було проведено понад п'яти тисяч відповідних вимірів, написана програма для аналізу цих даних на мові Python з використанням бібліотеки Scikit-Learn. Ця програма представлена в роботі. За допомогою методів машинного навчання проведено аналіз результатів вимірювань швидкостей виконання завдань з інформатики. Графіки, що були отримані, мають гладку форму з незначним вигином, без екстремумів. На графіках фіксуються, значні лінійні фрагменти. У роботі здійснено порівняння отриманих результатів аналізу даних з результатами аналізу цих же даних, проведеного раніше із застосуванням методу моментів. Спостерігається співпадіння споріднених залежностей динаміки зміни швидкостей навчальних дій, отриманих за методом дерева регресій та методом моментів.

**Ключові слова:** методи машинного навчання, дерево регресій, дерево класифікацій, метод моментів, статистичні розподіли, Python, бібліотека Scikit-Learn.

**Mykola HOLOVIN**

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at the Department of Computer Science and Cybersecurity, Volyn National University named after Lesya Ukrainka, 13 Volya ave., Lutsk, Ukraine, 43025

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0003-4516-4677>

**Nina HOLOVINA**

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at the Department of Experimental Physics, Information and Educational Technologies, Volyn National University named after Lesya Ukrainka, 13 Volya ave., Lutsk, Ukraine, 43025

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0002-1152-1536>

**To cite this article:** Holovina N., Holovina N. (2023). Vykorystannia metodu mashynnoho navchannia dlia analizu dynamiky shvydkostei vykonannia praktychnykh zavdan z informatyky [Using the machine learning method to analyze the dynamics of the performance of practical tasks in computer sciences]. *Physics and Educational Technology*, 1, 18–24, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2023-1-3>

## USING THE MACHINE LEARNING METHOD TO ANALYZE THE DYNAMICS OF THE PERFORMANCE OF PRACTICAL TASKS IN COMPUTER SCIENCES

*Covid-19 quarantine restrictions and the war in Ukraine have actualized distance learning more than ever. In these conditions, management of the learning process, recording and analysis of learning results of large groups of education seekers became very important. Management of any process involves feedback. In this case, the analysis of relevant statistical distributions of training results can become a relevant perspective direction of providing feedback. In this work, the methods of machine learning, namely: the regression tree and the classification tree, were selected as a scientific methodology that ensures the above-mentioned analysis. The purpose of the work is to study the dynamics of learning processes of large groups of education seekers using machine learning methods, which is realized by analyzing the results of measuring changes in the speed of performing practical tasks in informatics. The scientific novelty of this work consists of an attempt to apply machine learning methods to the analysis of the results of practical educational activities. In the course of research, more than five thousand relevant measurements were taken. In addition a program was written for the analysis of these data in the Python language using the Scikit-Learn library. This program is presented in the work. With the help of machine learning methods, an analysis of the results of measuring the speed of computer science tasks was carried out. The resulting graphs have a smooth shape with a slight bend, without extremes. Significant linear fragments are fixed on the graphs. The paper compares the results of the data analysis with the results of the analysis of the same data carried out earlier using the method of moments. There is a coincidence of related dependencies of the dynamics of changes in the speed of educational actions, obtained by the regression tree method and the method of moments.*

**Key words:** machine learning methods, regression tree, classification tree, method of moments, statistical distributions, Python, Scikit-Learn library.

**Актуальність проблеми.** При впровадженні в практику освіти дистанційного навчання важливими стають аналіз результатів цього навчання та управління цим процесом. При дистанційному навчанні кількість здобувачів освіти зростає, а процес навчання набуває стохастичного характеру. Якщо при традиційному навчанні вчитель мав справу з групою, яка складалась від десятка до кількох десятків осіб, то при дистанційному навчанні керування може здійснюватись процесом, який включає дії значно більшої кількості суб'єктів навчання. Навчальний матеріал може вимагати такого зворотного зв'язку, коли сотні суб'єктів навчання виконують десятки завдань он-лайн в стислі проміжки часу. У цих умовах інформація, що надходить від суб'єктів навчання складається з тисяч відповідей. При такій лавиноподібній інформаційній складовій навчання, актуальним стає автоматизоване, комп'ютерно-орієнтоване навчання, яке технологічно спирається на імовірнісні стохастичні процеси. У цьому контексті стають цікавими статистичні розподіли результатів навчання.

**Аналіз попередніх досліджень і публікацій.** У роботах (Головін, 2011; Головін, 2018) розглядалися технологічні підвалини навчання, які базувались на аналізі статистичних роз-

поділів швидкостей навчальних дій за оригінальним методом (Головін, 2020), що в свою чергу ґрунтується на відомому методі моментів (Гласс, 1976; Крамер, 1975). У цих роботах досліджувалось, як проявляються когнітивні механізми мислення, характерні для окремих особистостей в процесі навчання великих груп студентів.

Актуальним перспективним напрямком подальшого аналізу статистичних розподілів результатів навчання можуть стати технології, пов'язані з методами машинного навчання, зокрема, методи дерева регресій та дерева класифікацій (Barros, 2011; Hugh, 1998).

**Метою роботи** є дослідження динаміки процесів навчання великих груп здобувачів освіти методами машинного навчання, що реалізується аналізом результатів вимірювань змін швидкостей виконання практичних завдань з інформатики.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Обробка експериментальних даних була реалізована на мові Python із застосуванням бібліотеки Scikit-Learn, яка є однією з найпопулярніших бібліотек машинного навчання на мові Python.

Інформаційною базою цієї роботи були результати навчання великих груп здобува-

чів освіти, що хотіли покращити свої уміння і навички в галузі практичної роботи та відпрацьовували до автоматизму дії, які стосувались роботи з файлами та текстами. В експерименті використовувались два рівноцінних, відкаліброваних за часом виконання пакети завдань. У кожному пакеті завдань було по 15 вправ. Кожне завдання пакету можна було виконати в проміжку часу від кількох хвилин до 15–25 секунд, при сформованих уміннях і навичках. Саме ця динаміка формування умінь та навичок досліджувалась. Необхідно відмітити, що ця база вже оброблювалась методом моментів (Головін, 2011) на предмет проявлення когнітивних механізмів мислення, характерних для окремих особистостей в процесі навчання великої групи.

Завдання мали комплексний характер. У завданнях на роботу з файлами практичні дії реалізовувались в основному через файловий менеджер. Передбачалось, що виконання завдань відбувались в технологіях, що пов'язані, як з буфером обміну, так і з технологією перетаскування. Пакет завдань з текстами мав у своєму складі завдання на копіювання, перенос, знищення, форматування фрагментів текстів, розташованих у різних вікнах і різних файлах. У складі завдань були вправи, що вимагали сортування, на роботу зі списками та таблицями. Навчальні практичні дії можна було здійснювати кількома різними редакторами.

Зрозуміло, що для виконання завдань у першому і в другому пакеті були в значній мірі пов'язані спільними технологіями, хоча і виконувались різними програмними засобами.

Фіксація результатів дій була реалізована через оригінальну програму, що контролювала події в файловій системі комп'ютера.

База даних, в якій концентрувались результати навчання включала інформацію про номер групи, номер студента, номер завдання в пакеті завдань, що виконувався, номер спроби та час виконання. Зрозуміло, що в базі була також інформація про дату і час виконання, а також про те правильно чи не правильно виконане завдання.

Всього в інформаційній базі, що оброблювалась було більше 5 тисяч записів про динаміку зміни швидкості виконання завдань.

Програма, що використовувалась для аналізу динаміки зміни швидкості виконання завдань

була розроблена на мові Python з використанням бібліотеки sklearn (scikit-learn).

На початковому етапі роботи ця програма завантажує інформаційну базу про швидкість виконання завдань впродовж серії послідовних спроб. Результатом роботи програми є графік, що візуалізує динаміку навчання. Надалі саме форма кривої залежності часу (Time) виконання завдань від номеру спроби (N) має піддаватись аналізу.

Програма починається з підключення потрібних бібліотек з відповідними, необхідними для роботи програми методами. Далі з файлу «Learn.csv» читається сама інформаційна база.

```
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as seabornInstance
from sklearn.model_selection import
train_test_split
from sklearn.linear_model import
LinearRegression
from sklearn.tree import
DecisionTreeRegressor
from sklearn import metrics
dataset = pd.read_csv('learn.csv')
```

Після завантаження інформаційної бази виводиться інформація, що характеризує цю базу. Цю роботу виконують наступні рядки.

Рядок `print(dataset.shape)` виводить кількість рядків і стовпчиків у базі, а рядок `print(dataset.describe())` – розширений опис бази.

У нашому випадку, в основній базі 2884 рядків та 5 стовпчиків. Ця база відповідає пакету завдань роботи з файлами (рис. 1, 2а, 3а, 4). База, для пакету завдань роботи з текстами, має 2304 рядків і 5 стовпчиків (рис. 2б, 3б, 4). У стовпчиках обох баз інформація про: номер групи, номер студента, номер завдання, номер спроби «N», та час виконання завдання «Time».

Корисно перед обробкою даних бачити цілісно графік статистичного розподілу. Виведемо його попередньо розташувавши спроби «N» в масиві «X», а час виконання завдань «Time» – в масиві «y».

```
X = dataset['N'].values.
reshape(-1,1)
y = dataset['Time'].values.
```

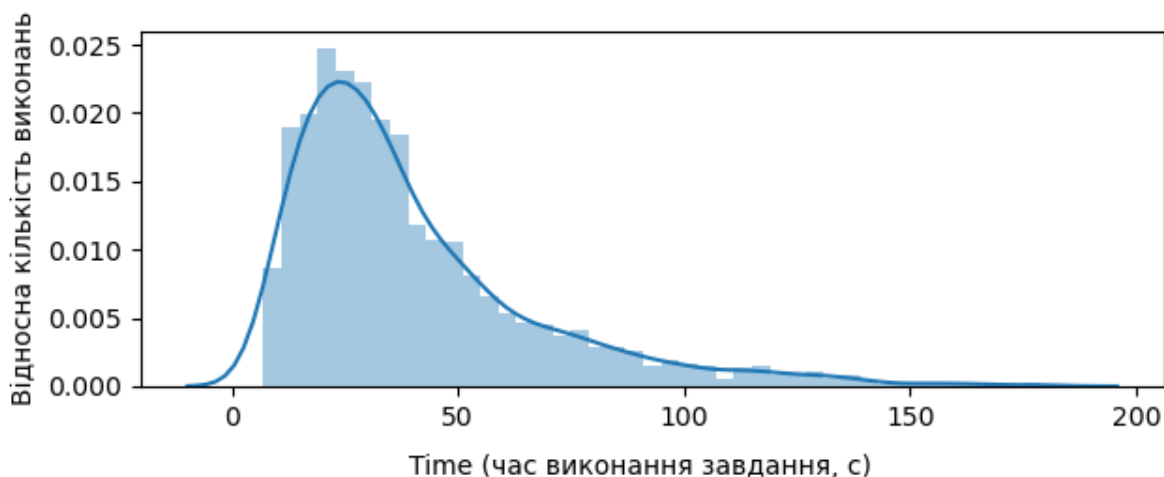


Рис. 1. Розподіл кількості виконаних завдань за часом виконання

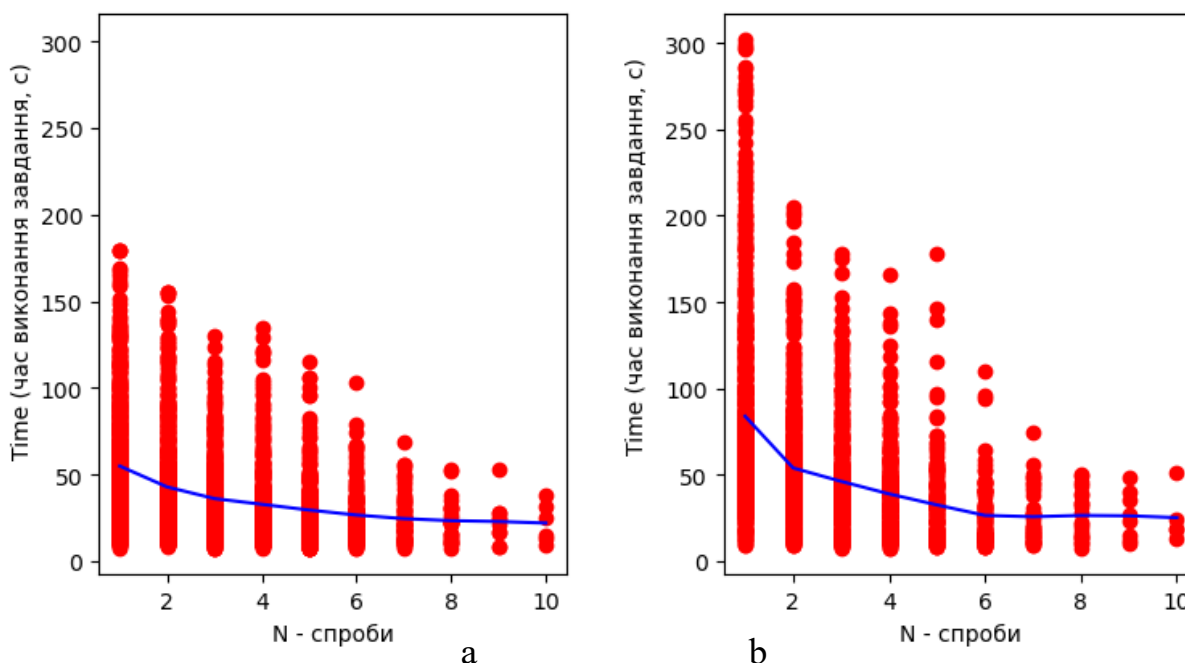


Рис. 2. Лінія динаміки навчання великої групи здобувачів освіти із освоєння пакету завдань роботи з файлами (а); з текстами (б). Лінія була визначена методом дерева регресії (DecisionTreeRegressor)

```

reshape(-1,1)
plt.figure(figsize=(15,10))
plt.tight_layout()
seabornInstance.
distplot(dataset['Time'])
plt.xlabel('Time (час виконання
завдання, с)')
plt.ylabel('Відносна кількість
виконань')
plt.show()

```

У нашому випадку графік має вигляд наближений до нормального (рис. 1). Це свідчить про статистичний, стохастичний, імовірнісний характер вхідних даних. Розділимо вхідні дані кожного пакету експериментальних даних на два набори: навчальний набір 65% та тестовий набір 35%. Змінна `test_size` відповідальна за цей поділ.

```

X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_
split(X, y, test_size=0.35, random_state=0)

```

Після поділу даних на навчальні та тестові набори, було проведено відповідне навчання. Для цього був створений екземпляр класу `DecisionTreeRegressor`, що імпортований з бібліотеки `sklearn`. Проведено тренування викликом методу `fit()` з використанням відповідних вхідних даних.

```
regressor =
DecisionTreeRegressor(random_state=0)
regressor.fit(X,y)
plt.scatter(X, y, color = 'red')
plt.plot(X, regressor.predict(X),
color = 'blue')
plt.title('Залежність часу виконання
завдання від спроби')
plt.xlabel('N - спроби')
plt.ylabel('Time (час виконання
завдання, c)')
plt.show()
```

У результаті роботи цього програмного фрагменту з інформаційними базами, що відповідні динаміці процесу навчання, а саме, засвоєння роботи: з файлами (основна база) та текстами (альтернативна база, для порівняння) отримаємо відповідні графіки на рис. 2а та рис. 2б.

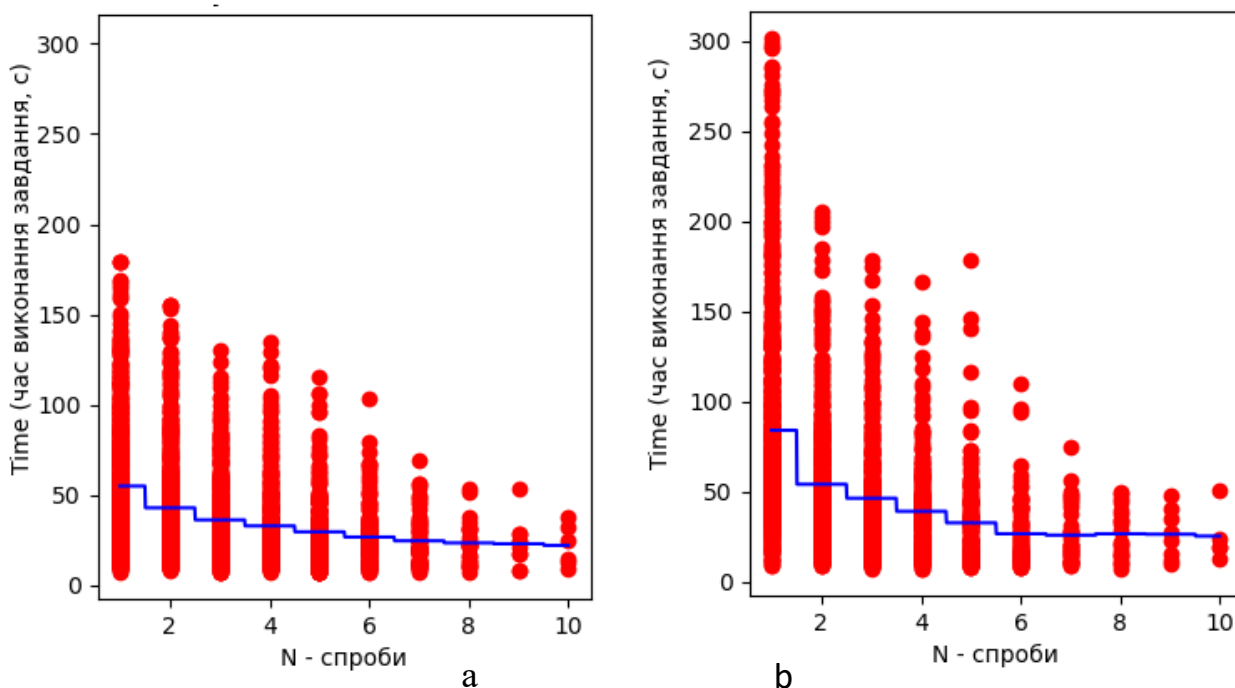
Вертикальні ряди точок вказують на результати швидкості навчальних дій окремих здобувачів освіти в окремих спробах у процесі освоєння роботи відповідно з файлами (рис. 2а) та текстами (рис. 2б).

Видно, що графіки отримані методом дерева регресії мають, з одного боку, різну динаміку змін, а з іншого, багато спільного в сенсі форми відповідних кривих.

Графіки мають гладку форму з незначним вигином, без екстремумів. На обох графіках фіксуються, значні лінійні фрагменти. Обидва графіки в області кінцевих спроб виконання завдань виходять на полицьки. В обох випадках рівень полицьок складає 24 – 22 секунди на виконання окремого завдання в спробі.

Відмінність графіків полягає у різному положенні точок, що відповідні першій спробі виконати завдання. Відповідно різна динаміка змін від початкової до кінцевої спроби.

Лінійний фрагмент лінії дерева регресії спостерігається на рис. 2а в проміжку від 3 до 10 спроби. На рис. 2б можна спостерігати дві лінійні області від 2 до 6 спроби та від 6 до 10. Аналогічні особливості можна побачити на лініях класифікацій представлених відповідно на рис. 3а та рис. 3б. Ці графіки є результатом роботи наступного програмного фрагменту.



**Рис. 3. Лінія динаміки навчання великої групи здобувачів освіти із освоєння пакету завдань роботи з файлами (а); з текстами (б). Лінія була визначена методом дерева класифікацій**

```
X_grid = np.arange(min(X), max(X),
0.01)
X_grid = X_grid.reshape((len(X_grid),
1))
plt.scatter(X, y, color = 'red')
plt.plot(X_grid, regressor.
predict(X_grid), color = 'blue')
plt.title('Залежність часу виконання
завдання від спроби')
plt.xlabel('N - спроби')
plt.ylabel('Time (час виконання
завдання, c)')
plt.show()
```

Автори роботи намагались калібрувати пакет завдань роботи з файлами та текстами таким чином, щоб ці два пакети можна було б використовувати разом. Однак, виявилась цікава особливість: обидва пакети можна вважати однаково каліброваними тільки на кінцевому етапі навчання. В обох випадках на виконання завдань в кінцевих спробах необхідний однаковий час – в середньому порядку двадцяти секунд.

На початкових спробах ці пакети не можна вважати однаково каліброваними. Так, у першій спробі при роботі з файлами в середньому досягається швидкість дій 55 секунд на одне завдання. У випадку роботи з текстами швидкість була на рівні 85 секунд на одне завдання в першій спробі. Це суттєво більше ніж в першому випадку. Метод машинного навчання дозволяє порівнювати фактичні дані з прогнозованими. Такий аналіз проведено і він дав хорошу кореляцію.

Отримані дані корелюють з аналізом, що був проведений іншим методом у роботі (Головін, 2011), де аналізувались ті ж самі експериментальні дані, що і в поточній роботі. Досліджувалась динаміка зміни моментів розподілів швидкостей дій в різних спробах. Тут необхідно пояснити, що статистичний контур, зображений на рис. 1 може бути представлений сукупністю гаусоподібних контурів, змішених один відносно одного в шкалі швидкостей виконання завдань. Зрозуміло, що контур розділу, відповідний початковій спробі, буде знаходитись в області повільних дій, а контур кінцевої спроби – в області більш швидких дій. Саме динаміка зміни положень цих контурів і їх форми досліджу-

валась у згаданій роботі. Зокрема, перший момент – центр тяжіння розподілу, змінювався від спроби до спроби так, як показано на рис. 4.

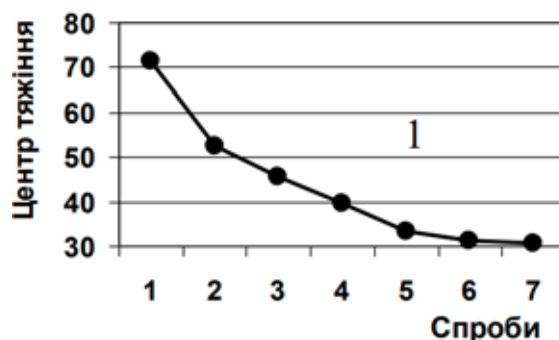


Рис. 4. Динаміка зміни першого моменту, центру тяжіння розподілу, від спроби до спроби

При порівнянні рис. 2b та рис. 4. видно, що спостерігаються співпадіння характерних особливостей цих залежностей. Кут залежностей при переході від спроби 1 до спроби 2 більший, ніж при переході від спроби 2 до спроби 3,4,5. Видно також, що спостерігається співпадіння лінійностей цих залежностей на проміжку 2-5 спроб.

#### Висновки і перспективи подальших досліджень

Проведено експеримент та аналіз застосування методів машинного навчання: лінійна регресія, регресія дерева рішень для дослідження результатів вимірювань швидкостей виконання завдань з інформатики. Порівняння прогнозованих та фактичних даних дало хорошу кореляцію.

Отримані графіки мають експоненціальну гладку форму з незначним вигином, без екстремумів. На обох графіках фіксуються, значні лінійні фрагменти. Обидва графіки в області кінцевих спроб виконання завдань виходять на полицьки. В обох випадках рівень полицьок складає 24 – 22 секунди на виконання окремого завдання в спробі. Аналіз процесу навчання великої групи здобувачів освіти зручно здійснювати через оцінку трансформації форми кривих динаміки навчання. Так, на початковому етапі навчання нахил кривої більший, ніж в центральній частині. Це свідчить про більш швидке набуття умінь та навичок на початковому етапі навчання. Вихід на полицьку в кінцевих спробах свідчить про сформовані уміння

та навички. Центральна лінійна частина кривої, що охоплює найбільшу кількість спроб, відображає типову швидкість процесу навчання на рутинному його етапі.

Наведені вище статистичні дослідження дають змогу виявити найзагальніші закономірності навчання, які проявляються тільки як консолідований результат діяльності великої групи учнів. Цей результат не може бути отриманий під час аналізу навчальних дій окремих індивідумів.

Спостерігається співпадіння споріднених залежностей динаміки зміни швидкостей навчальних дій, отриманих за методом дерева регресій та методом моментів.

Проведені дослідження відкривають перспективу для подібної обробки результатів навчання у більш складних розділах інформатики, наприклад, в програмуванні. Тут можна досліджувати швидкість формування стандартних програмних конструкцій, зокрема таких як вкладені цикли та розгалуження.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Головін М.Б. Дослідження процесів навчання на основі аналізу моментів статистичних розподілів швидкостей навчальних дій (на матеріалах вивчення інформатики). *Психологічні перспективи*. Луцьк, 2011. В. 18. С. 62–72. URL: <https://evnuir.vnu.edu.ua/bitstream/123456789/1743/1/Holovin.pdf>
2. Головін М.Б., Головіна Н. А., Головіна Н. М. Модельний розгляд пізнавальних процесів супутніх навчальному програмуванню. *Психологічні перспективи*. Луцьк, 2018. В. 31. С. 57 – 70. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ppst\\_2018\\_31\\_7](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ppst_2018_31_7)
3. Головін М.Б., Головіна Н. М., Гузачов Д.М., Головіна Н.А. Метод моментів як інструмент комп'ютерної діагностики навчальної діяльності. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. Луцьк: Вид-во ЛНТУ, 2020. В. 38. С. 67-78. URL: <https://evnuir.vnu.edu.ua/bitstream/123456789/19700/1/moment.pdf>
4. Гласс Дж. *Статистические методы в педагогике и психологии*. М.: Прогресс, 1976. 494 с.
5. Крамер Г. *Математические методы статистики*. М.: Мир, 1975. 648 с.
6. Barros R. C., Cerri R., Jaskowiak P. A., Carvalho A. C. P. L. F. A bottom-up oblique decision tree induction algorithm. *Proceedings of the 11th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA 2011)*. 2011. С. 450–456. ISBN 978-1-4577-1676-8. doi:10.1109/ISDA.2011.6121697
7. Hugh A. Chipman, Edward I. George, Robert E. McCulloch. Bayesian CART model search. *Journal of the American Statistical Association*. 1998. Т. 93, В. 443. С. 935–948. doi:10.1080/01621459.1998.10473750
8. Бібліотека Scikit-Learn [https://scikit-learn.org/dev/whats\\_new/v0.20.html](https://scikit-learn.org/dev/whats_new/v0.20.html)

#### REFERENCES:

1. Holovin M.B. (2011). Doslidzhennia protsesiv navchannia na osnovi analizu momentiv statystychnykh rozpodiliv shvydkostei navchalnykh dii (na materialakh vvychnennia informatyky) [The study of learning processes based on the analysis of the moments of statistical distributions of the speed of learning actions (on the materials of the study of informatics)]. *Psykhologichni perspektyvy*. Lutsk, 2011. V. 18. S. 62 – 72. URL: <https://evnuir.vnu.edu.ua/bitstream/123456789/1743/1/Holovin.pdf>
2. Holovin M.B., Holovina N. A., Holovina N. M. (2018). Modelnyi rozghliad piznavalnykh protsesiv suputnykh navchalnomu prohramuvanniu [Model consideration of cognitive processes associated with educational programming]. *Psykhologichni perspektyvy*. Lutsk. V. 31. S. 57–70. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ppst\\_2018\\_31\\_7](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ppst_2018_31_7)
3. Holovin M.B., Holovina N. M., Huzachov D.M., Holovina N.A. (2020). Metod momentiv yak instrument komp'uternoї diahnostryky navchalnoi diialnosti [The method of moments as a tool for computer diagnostics of educational activity]. *Komp'uterno-intehrovani tekhnolohii: osvita, nauka, vyrobnytstvo*. Lutsk: Vyd-vo LNTU, 2020. V. 38. S. 67-78. URL: <https://evnuir.vnu.edu.ua/bitstream/123456789/19700/1/moment.pdf>
4. Hlass Dzh. *Statisticheskie metody v pedagogike i psihologii* [Statistical methods in pedagogy and psychology]. М.: Prohress, 1976. 494 s.
5. Kramer H. *Matematicheskie metody statistiki* [Mathematical methods of statistics]. М.: Myr, 1975. 648 s.
6. Barros R. C., Cerri R., Jaskowiak P. A., Carvalho A. C. P. L. F. A bottom-up oblique decision tree induction algorithm. *Proceedings of the 11th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA 2011)*. 2011. S. 450–456. ISBN 978-1-4577-1676-8. doi:10.1109/ISDA.2011.6121697
7. Hugh A. Chipman, Edward I. George, Robert E. McCulloch. Bayesian CART model search. *Journal of the American Statistical Association*. 1998. Т. 93, V. 443. S. 935–948. doi:10.1080/01621459.1998.10473750
8. Biblioteka Scikit-Learn [https://scikit-learn.org/dev/whats\\_new/v0.20.html](https://scikit-learn.org/dev/whats_new/v0.20.html)



УДК 37.091.33-027.22:537]:37.018.43  
DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2023-1-4>

**Галина МИРОНЧУК**

доктор фізико-математичних наук, професор, директор навчально-наукового фізико-технологічного інституту, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі 13, м. Луцьк, Україна, 43025

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0002-9088-3825>

**SCOPUS-AUTHOR ID:** 36245422900

**Сергій ПАНКЕВИЧ**

аспірант кафедри експериментальної фізики, інформаційних та освітніх технологій, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі 13, м. Луцьк, Україна, 43025

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0002-5715-2107>

**Бібліографічний опис статті:** Мирончук, Г., Панкевич С. (2023). Особливості проведення лабораторної роботи з електрики засобами хмаро орієнтованих технологій. *Фізика та освітні технології*, 1, 25–34, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2023-1-4>

## ОСОБЛИВОСТІ ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ З ЕЛЕКТРИКИ ЗАСОБАМИ ХМАРО ОРІЄНТОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

В статті пропонується ознайомитися з можливістю проведення демонстраційної та лабораторної роботи з фізики на прикладі організації роботи по перевірці законів послідовного та паралельного з'єднання. Ця концепція може бути реалізована з допомогою хмарних технологій чи доступних інтернет ресурсів з можливостями подальшої обробки отриманих результатів. Цей проект може бути успішно використаний педагогами будь яких навчальних закладів і рівнів освіти для проведення лабораторних робіт здобувачами освіти школи, коледжу або іншого навчального закладу. Лабораторна робота, яка є однією з форм навчання, і яка є однією з точних і надійних методів оцінювання практичних знань, умінь та навиків, може бути використана в умовах дистанційного навчання або карантину, як наприклад при карантині, який введено 2020 року для запобігання поширенню коронавірусної хвороби COVID-19. Наведено приклад виконання експерименту з використанням інтернет симуляції. Результати проведеного педагогічного експерименту переконливо доводять, що використання хмарних технологій є потужним інструментом та ефективним засобом навчання учнів та студентів.

**Ключові слова:** демонстрація, лабораторна робота з фізики, демонстраційний набір, навчальна панель, цифрова лабораторія, інтернет симуляція, дистанційне навчання, карантин.

**Galyna MYRONCHUK**

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Director of the Educational and Scientific Institute of Physics and Technology, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0002-9088-3825>

**SCOPUS-AUTHOR ID:** 36245422900

**Serhii PANKEVYCH**

Postgraduate Student, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0002-5715-2107>

**To cite this article:** Myronchuk G., Pankevych S. (2023). Osoblyvosti provedennia laboratornoi roboty z elektryky zasobamy khmaro oriientovanykh tekhnolohii. [Features of conducting laboratory work on electricity by means of cloud-oriented technologies]. *Physics and Educational Technology*, 1, 25–34, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2023-1-4>

## FEATURES OF CONDUCTING LABORATORY WORK ON ELECTRICITY BY MEANS OF CLOUD-ORIENTED TECHNOLOGIES

*The article offers an introduction to the possibility of conducting demonstration and laboratory work in physics using the example of organizing work to verify the laws of serial and parallel connection. This concept can be implemented using cloud technologies or available Internet resources with the possibility of further processing of the obtained results. This project can be successfully used by teachers of any educational institutions and levels of education to conduct laboratory work by students of a school, college or other educational institution. Laboratory work, which is one of the forms of learning and which is one of the accurate and reliable methods of assessing practical knowledge, skills and abilities, can be used in conditions of distance learning or quarantine, such as during the quarantine introduced in 2020 to prevent the spread of the coronavirus disease of COVID-19. An example of an experiment using Internet simulation is given. The results of the conducted pedagogical experiment convincingly prove that the use of cloud technologies is a powerful tool and an effective means of teaching pupils and students.*

**Key words:** demonstration, laboratory work in physics, demonstration set, educational panel, digital laboratory, Internet simulation, distance learning, quarantine.

**Вступ.** З 24 лютого 2022 року в Україні запроваджено військовий стан, що значною мірою позначається і на навчальному процесі. Повітряні тривоги не дозволяють повністю забезпечити офлайн навчання, але й проведення онлайн уроків може бути перерваним. В таких умовах особливо важко забезпечити проведення лабораторних робіт з фізики в навчальних закладах. Свої корективи в освітній процес привніс запроваджений з 12 березня 2020 року карантин для усіх закладів освіти. Відповідне рішення Уряд ухвалив, 11 березня 2020 року. МОН рекомендувало закладам освіти розробити заходи щодо проведення занять за допомогою дистанційних технологій.

Здавалося, ситуація безнадійна, проте в Україні уже не перший рік впроваджується світовий освітній бренд STEM-освіта (Science, Technology, Engineering, Mathematics), що сприяє посиленню інтелектуального розвитку дітей та якісному навчанню природничих та інженерно-технічних дисциплін (Концепція управління процесами формування природничо-наукової компетентності, 2021). Сучасні вимоги до підготовки фахівців спонукають до її модернізації шляхом впровадження нових освітніх технологій, в тому числі впровадження STEM-напряму (Панкевич, 2020). Цей напрямок потребує професіоналів у нових галузях і передбачає поєднання природничо-математичних та інженерних наук (Мартинюк, 2019; Martyniuk, Martyniuk, Muzyka, 2020; Pylypenko, 2020).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Згідно з постулатами концепту нової української школи, сучасний вчитель повинен не просто доносити інформацію до учня, а фор-

мувати компетентності, які будуть використовуватись ним у майбутньому (Нова українська школа, 2016). Отож, якщо теоретичні та практичні заняття можна було реалізувати з допомогою відео конференцій або використання підручників чи їх електронних аналогів, то для проведення поточної або підсумкової атестації потрібно було використовувати сторонні інтернет ресурси, такі як, наприклад, освітній проект «На урок», який містить величезну базу тестових завдань з кожного шкільного предмету (Освітній проект «На урок» для вчителів).

Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 13 січня 2021 року № 131-р передбачено реалізацію низки заходів щодо реалізації Концепції розвитку природничо-математичної освіти (STEM-освіти) до 2027 року, пов'язаних із формуванням та розвитком дослідницьких та інженерних навичок, винахідництва, підприємництва, раннього професійного самовизначення, популяризація науково-технічних та інженерних професій (Розпорядження Кабінету Міністрів України від від 13 січня 2021 р. № 131-р).

Деякі аспекти впровадження STEM-освіти розглядали Національна інженерна академія та Національна дослідницька рада (National Academy of Engineering and National Research Council, 2014) (Інтеграція STEM як важлива інновація сучасної освітньої парадигми), Ю-Тзу Лін, Мін Цан Ванг і Чен Чінг Бу (Lin, Wang, Wu, 2019) (розробка та впровадження міжпредметного навчання STEM), Ірина Сліпукхіна (особливості застосування мультипредметного підходу в навчанні STEM, інженерних методів у природничій освіті) (Slipukhina, Polishchuk, Mienailovb 2020), Валентина

Шарко (методика викладання природничо-математичних дисциплін у середніх та вищих навчальних закладах з використанням освітніх технологій STEM) (Шарко, 2016). Освітню робототехніку та ігрове навчання досліджували Наталія Морзе та Оксана Струтинська (Morze, Strutynska, 2022), Ефрансія Цагкарakis, Стаматіос Пападакіс та Майкл Калогіанакіс (Papadakis, Kalogiannakis, 2019; Tzagkaraki, Papadakis, Kalogiannakis, 2021).

Тому, в період карантину та війни закладами освіти використовуються принципово нові форми навчання (Мартинюк, Мирончук, Панкевич, 2022). Одним з таких є дистанційне навчання, яке базується на формі змішаного навчання – це освітня концепція, за якої студент здобуває знання як самостійно онлайн, так і особисто з викладачем. Такий підхід дає змогу поєднувати традиційні методики та сучасні технології (Bilousova, Gryzun, Zhytienova, 2021).

Сукупність хмарних сервісів теж розширюється доволі швидко. Школа, як і наукові інституції, може використовувати такі технології доволі широко. Більше того, такий підхід має низку переваг (Why many schools are 'up in the air' about cloud computing). Використання хмарних технологій у процесі навчання фізики, уже розглядалось науковцями з України та світу, зокрема, ця проблема була описана у роботах Максима Хомутенка (Хомутенко, 2016), Валерія Бикова, Марії Шишкіної та ін (Martyniuk, Martyniuk, Pankevych et al, 2021).

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Проблему розвитку мислення здобувачів освіти не можна закрити засвоєнням розумових дій, оскільки вміння теоретично розмірковувати про певну систему дій ще не забезпечує вміння виконати ці ж дії реально. Завершальним етапом у розвитку розумових операцій є не становлення розумової дії, а реалізація цієї дії в практичній діяльності. Тому навчання фізики передбачає залучення здобувачів до виконання ними лабораторних робіт. Під лабораторними роботами розуміють таку організацію навчального фізичного експерименту, при якій кожен працює з приладами чи установками.

Дидактична роль лабораторних робіт надзвичайно велика. Сприймання при виконанні лабораторних робіт засновані на більшій і різноманітнішій кількості чуттєвих вражень

і стають глибшими і повнішими порівняно із сприйманнями при спостереженні демонстраційного експерименту. При виконанні лабораторних робіт здобувачі освіти навчаються користуватись фізичними приладами як знаряддями експериментального пізнання, набувають навичок практичного характеру. Виконання лабораторних робіт сприяє поглибленню знань з певного розділу фізики, набуттю нових знань, ознайомленню з сучасною експериментальною технікою, розвитку логічного мислення. Лабораторні роботи мають також важливе виховне значення, оскільки вони дисциплінують дітей, привчають їх до самостійної роботи, прищеплюють навички лабораторної культури.

Такі переваги успішно реалізують концепцію Нової української школи (Zhorova, Kokhanovska, Khudenko, 2022), консолідує навчальний процес, а отже забезпечують якісне формування основних ключових компетентностей випускника навчального закладу. Метою статті є окреслення концепції проведення фізичного експерименту з використанням хмарних сервісів як інструментів реалізації дистанційного навчання в системі STEM-освіти.

Розглянемо приклад інструкції до виконання лабораторної роботи з фізики «Дослідження електричного кола з послідовним з'єднанням провідників».

**Мета роботи:** експериментально перевірити, що в разі послідовного з'єднання двох провідників справджуються співвідношення:

$$I = I_1 = I_2, U = U_1 + U_2, R = R_1 + R_2. \quad (1)$$

**Обладнання:** навчальна панель з електрики (вольтметр, амперметр, вимикач  $S1$  або  $S4$ , два резистори ( $R1, R2, R3, R4$ ), з'єднувальні проводи), джерело струму.

**Вказівки до роботи:**

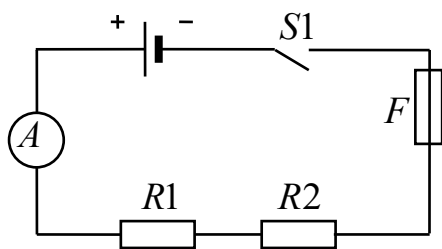
Підготовка до експерименту

1. Перш ніж виконувати роботу, переконайтеся, що ви знаєте вимоги безпеки під час роботи з електричними колами.

2. Накресліть схему електричного кола, що складається з джерела струму, двох резисторів і вимикача, з'єднаних послідовно.

3. Складіть і запишіть план проведення експерименту. Якщо вагаєтеся, то скористайтеся планом, наведеним нижче.

**Порядок виконання роботи:**

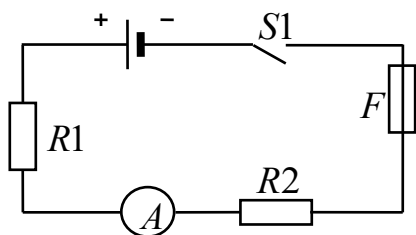


**Рис. 1. Схема електричного кола. Крок 1**

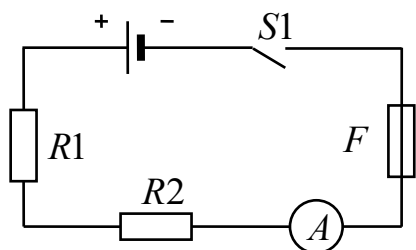
Дослід 1. Порівняння сили струму в різних ділянках кола, яке містить послідовне з'єднання провідників.

1. Складіть електричне коло за схемою:

2. Виміряйте силу струму, увімкнувши амперметр спочатку між джерелом струму і першим резистором ( $I_1$ ) (рис. 1), потім між резисторами ( $I_2$ ) (рис. 2), а потім між ключем і другим резистором ( $I$ ) (рис. 3). Накресліть в зошиті схеми відповідних електричних кіл.



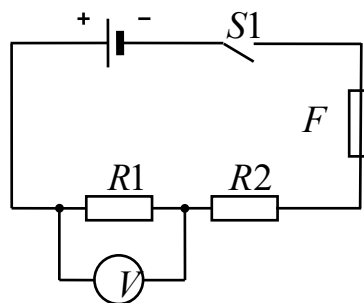
**Рис. 2. Схема електричного кола. Крок 2**



**Рис. 3. Схема електричного кола. Крок 3**

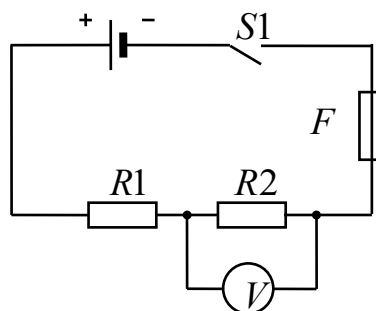
3. Результати вимірювань занесіть до табл. 1 і зробіть висновок.

Дослід 2. Порівняння загальної напруги на ділянці кола, яка складається з послідовно з'єднаних резисторів, і суми напруг на окремих резисторах.

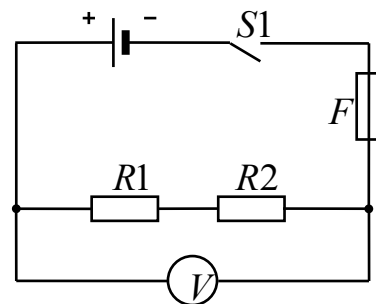


**Рис. 4. Схема вимірювання напруги. Крок 1**

1. У колі, складеному для проведення досліду 1, виміряйте напругу спочатку на першому резисторі ( $U_1$ ) (рис. 4), потім на другому резисторі ( $U_2$ ) (рис. 5), а потім на обох резисторах ( $U$ ) (рис. 6). Накресліть схеми відповідних електричних кіл.



**Рис. 5. Схема вимірювання напруги. Крок 2**



**Рис. 6. Схема вимірювання напруги. Крок 3**

2. Результати вимірювань занесіть до табл. 2. Закінчіть заповнення таблиці та зробіть висновок.

Використовуючи результати дослідів 1 і 2, обчисліть опір першого резистора ( $R_1$ ), другого резистора ( $R_2$ ) та опір ділянки кола, яка містить обидва резистори ( $R$ ).

Таблиця 1

	$I_1, A$	$I_2, A$	$I, A$	Висновок
1				

Таблиця 2

	$U_1, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$U, \text{В}$	$(U_1 + U_2), \text{В}$	Висновок

Таблиця 3

	$R_1, \text{Ом}$	$R_2, \text{Ом}$	$R, \text{Ом}$	$(R_1 + R_2), \text{Ом}$	Висновок

2. Результати обчислень занесіть до табл. 3. Закінчіть заповнення таблиці, зробіть висновок.

**Аналіз експерименту та його результатів:**

Проаналізувавши експеримент і його результати, зробіть висновок, у якому зазначте:

1) які співвідношення для послідовно з'єднаних провідників ви перевіряли та які результати одержали;

2) які чинники могли вплинути на точність отриманих вами результатів.

Це скорочена версія інструкції до наборної роботи, яка адаптована для використання цифрової панелі.

Отож, щоб забезпечити виконання такої роботи в умовах дистанційного навчання ми скористаємося освітнім сайтом університету Колорадо, який має величезний набір симуляцій з фізики, де студент може як завгодно змінювати параметри електронних компонентів (опір резисторів, напругу на джерелі живлення...) та

конструкцію електричної схеми (Лабораторія електрики: постійний струм – віртуальна лабораторія).

Доречі, цей сервіс українізований. Переходячи за посиланням <https://phet.colorado.edu/uk/simulations/circuit-construction-kit-dc-virtual-lab> ми потрапляємо на стартову сторінку симуляції (рис. 7).

Натискаючи на значок запуску симуляції переходимо до вікна параметрів, де ми бачимо зліва набір інструментів, таких як провідник, батарейка, опір, перемикач і з правого боку вимірювальні цифрові прилади та елементи відображення. (рис. 8).

Завданням викладача буде лише надати кожному здобувачу набору певних параметрів електричного кола: напруга батарейки та номінали опорів. Навіть при групі в 20-30 чоловік це небагато варіантів. Тим більше, можна змінювати лише якийсь один параметр.

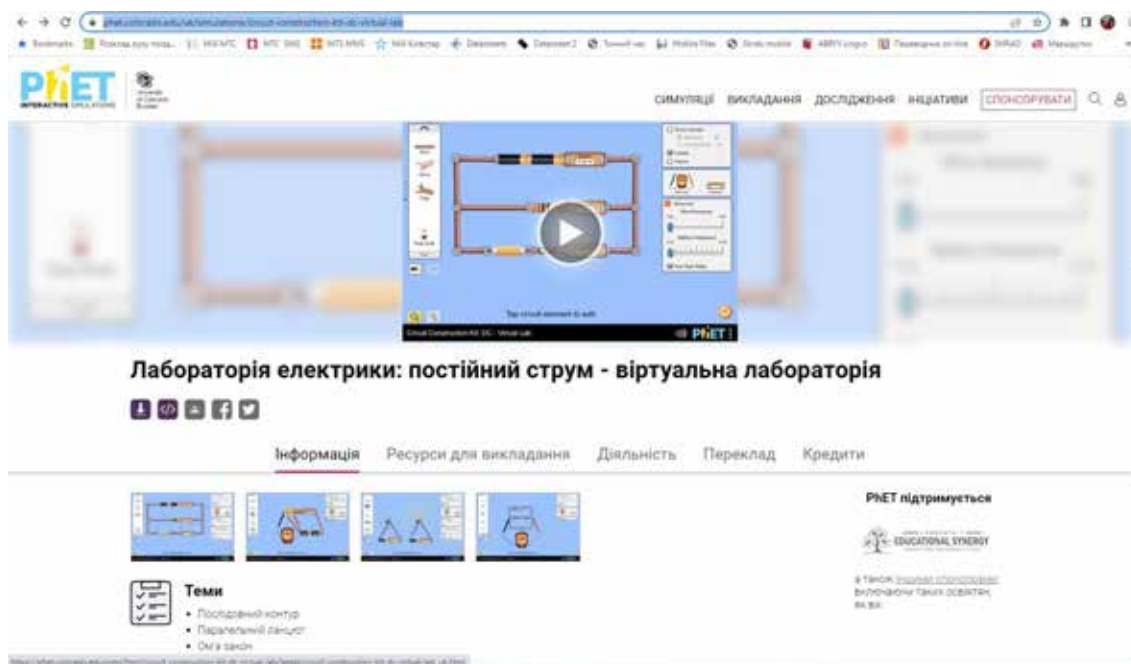


Рис. 7. Стартова сторінка симуляції



Рис. 8. Робоче поле симуляції



Рис. 9. Встановлення параметрів опорів

Роботу треба починати з складання електричного кола. В симуляції роль провідників відіграє **Дріт**. Спершу на робоче поле ми рекомендуємо перенести два опори, батареяку та перемикач, а тоді їх з'єднати провідниками, які мають властивість «примагнічуватися» до контактів (рис. 9). Складаємо коло за схемою (рис. 1), і лише тоді встановлюємо параметри (вибираючи елемент), задані викладачем. Опір можна змінювати в межах

від 0 до 120 Ом, а напругу від 0 до 120 Вольт. Натиснувши на елемент **Ключ**, ми замикаємо коло, і в колі встановлюється струм, який навіть візуально демонструється. Перенісши вольтметр з лівої сторони на робочу область, ми можемо провести вимірювання напруги контактами на різних ділянках кола за прикладом (рис 4, 5 та 6).

Далі всі значення заносимо в таблицю і проводимо відповідні розрахунки.

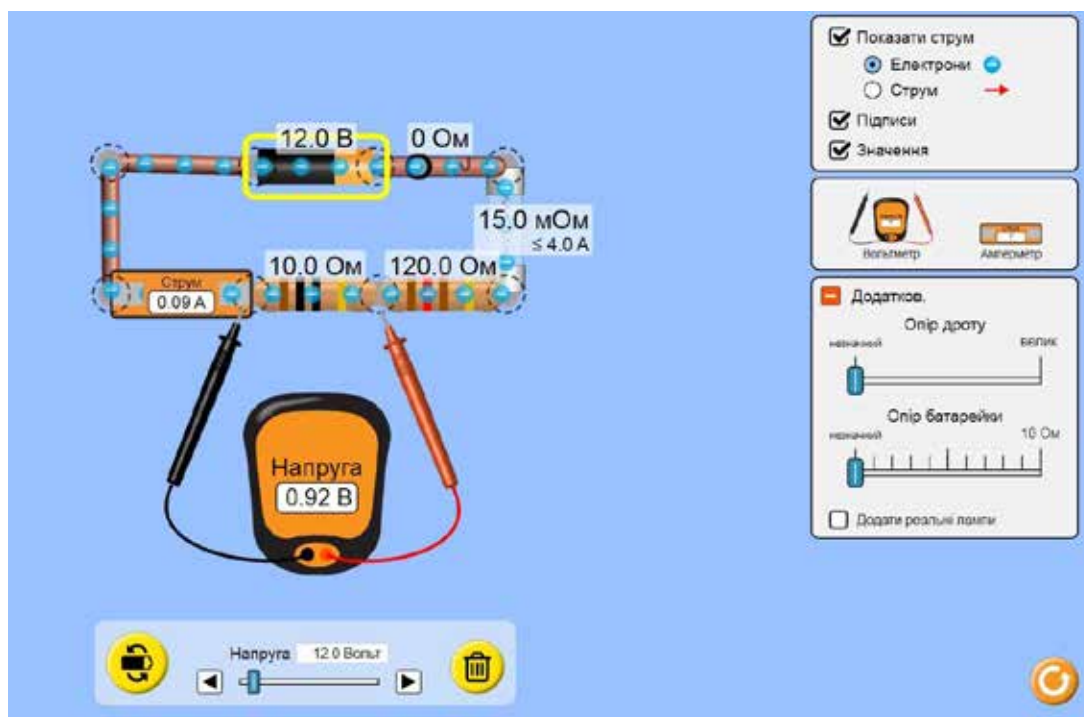


Рис. 10. Вимірювання напруги та встановлення додаткових параметрів опорів

Ще однією корисною функцією в цій симуляції є додаткове меню зліва, позначене зеленим хрестиком (рис. 10). Розкриваючи його, ми можемо додатково встановити опір провідників та джерела струму, значення яких може впливати на результат віртуальної лабораторної роботи.

Внісши всі необхідні вимірювання в табл. 2 і зробивши обрахунки ми завершуємо виконання лабораторної роботи. За необхідності можна прикріпити фото проведеного експерименту і складеного електричного кола.

**Висновки і перспективи подальших досліджень.** Отже, розроблений нами методичний проект та технічний інструментарій відповідає виконанню організаційно-методичних вимог

в рамках реалізації STEM освіти. Підготовка здобувачів освіти за запропонованою нами методикою використання інтернет симуляцій підвищує рівень умінь здійснювати постановку експериментаторської проблеми та шукати шляхи її розв'язання, що забезпечує формування предметної та цифрової компетентності.

Запропоноване дослідження успішно пройшло апробацію в Луцькій філії фахового медичного коледжу «Монада», і показало, що запропонована нами методика проведення лабораторної роботи з використанням хмарних технологій підвищує ефективність засвоєння навчального матеріалу і формування фахової компетентності в студентів медичного профілю.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Концепція управління процесами формування природничо-наукової компетентності майбутнього педагога фізико-технологічного профілю в STEM-орієнтованому навчальному середовищі. С. 104-108. <https://science.kpnu.edu.ua/wp-content/uploads/2021/09/1-1.pdf>
2. Мартинюк О.С. Тривимірне прототипування як складник STEMтехнологій у конструктивно-технічній і науково-дослідній роботі студентів та учнів. Збірник наукових праць Кам'янець-Подільського національного університету імені Івана Огієнка. Серія педагогічна / [редкол.: П. С. Атаманчук (голова, наук. ред.) та ін.]. Кам'янець-Подільський : Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, 2019. Вип. 25 : Управління інформаційно-навчальним середовищем як концептуальна основа результативності фізико-технологічної освіти. С. 61-64. URL: <http://ped-series.kpnu.edu.ua/article/view/189486>.
3. Мартинюк, О., Мирончук, Г., Панкевич, С. Організаційно-методичні умови використання цифрових лабораторій у системі впровадження освітнього напрямку STEM. Фізика та освітні технології. 2022. (1), 34-40. <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-4>

4. Межуєва І. Ю. Тестування як форма контролю знань, умінь, навичок. Переваги і недоліки. *Молодий вчений*. 2017. № 9. С. 394-398
5. Нова українська школа. Концептуальні засади реформування середньої школи. Ухвалено рішенням колегії МОН 27.10.2016. URL: <https://mon.gov.ua/storage/app/media/zagalna%20serednya/nova-ukrainska-shkola-compressed.pdf>
6. Освітній проект «На урок» для вчителів. URL: <https://naurok.com.ua>
7. Панкевич С.С. Особливості проведення тестування з фізики засобами хмаро орієнтованих технологій в закладах медичного профілю. Збірник наукових праць Кам'янець-Подільського національного університету імені Івана Огієнка. Серія педагогічна / [редкол.: С.В. Оптасюк (голова, наук. ред.) та ін.]. Кам'янець-Подільський : Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка, 2020. Випуск 26
8. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 13 січня 2021 р. № 131-р «Про затвердження плану заходів щодо реалізації Концепції розвитку природничо-математичної освіти (STEM-освіти) до 2027 року», 2021. URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-zatverdzhennya-planu-zahodiv-sh-a131r>.
9. Хомутенко М. Віртуальний фізичний експеримент в хмаро орієнтованому навчальному середовищі. *Наукові записки Кіровоградського державного педагогічного університету імені Володимира Винниченка. Серія : Проблеми методики фізико-математичної і технологічної освіти*. 2016. Вип. 9(3). С. 175-179.
10. Шарко В. Модернізація системи навчання учнів STEM-дисциплін як методична проблема. *Наукові записки Кіровоградського державного педагогічного університету імені Володимира Винниченка. Серія : Проблеми методики фізико-математичної і технологічної освіти*. 2016. Вип. 10(3). С. 160-165. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/nz\\_pmfm\\_2016\\_10\(3\)\\_37](http://nbuv.gov.ua/UJRN/nz_pmfm_2016_10(3)_37).
11. Bilousova, L., Gryzun, L. and Zhytienova, N., 2021. Interactive methods in blended learning of the fundamentals of UI/UX design by pre-service specialists. *Educational technology quarterly*. Available from: <https://doi.org/10.55056/etq.34>.
12. Lin, Y.T., Wang, M.T. and Wu, C.C., 2019. Design and Implementation of Interdisciplinary STEM Instruction: Teaching Programming by Computational Physics. *The Asia-Pacific Education Researcher*, 28(1), pp.77–91. Available from: <https://doi.org/10.1007/s40299-018-0415-0>.
13. Martyniuk, O.O., Martyniuk, O.S. and Muzyka, I.O., 2020. Formation of informational and digital competence of secondary school students in laboratory work in physics. In: S.O. Semerikov and M.P. Shyshkina, eds. *Proceedings of the 8th Workshop on Cloud Technologies in Education (CTE 2020)*, Kryvyi Rih, Ukraine, December 18, 2020. CEUR-WS.org, CEUR Workshop Proceedings, vol. 2879, pp.366–383. Available from: <http://ceur-ws.org/Vol-2879/paper20.pdf>.
14. Martyniuk, O.O., Martyniuk, O.S., Pankevych, S. and Muzyka, I., 2021. Educational direction of STEM in the system of realization of blended teaching of physics. *Educational Technology Quarterly* [Online], 2021(3), pp.347–359. Available from: <https://doi.org/10.55056/etq.39> [Accessed 28 November 2022].
15. Morze, N. and Strutynska, O., 2022. Model of the Competences in Educational Robotics. *Proceedings of the 1st Symposium on Advances in Educational Technology – Volume 2: AET. INSTICC, SciTePress*.
16. National Academy of Engineering and National Research Council, 2014. *STEM Integration in K-12 Education: Status, Prospects, and an Agenda for Research*. Washington, DC: The National Academies Press. Available from: <https://doi.org/10.17226/18612>.
17. Papadakis, S. and Kalogiannakis, M., 2019. Evaluating the effectiveness of a game-based learning approach in modifying students' behavioural outcomes and competence, in an introductory programming course. A case study in Greece. *International journal of teaching and case studies*, 10(3), pp.235–250. Available from: <https://doi.org/10.1504/IJTCS.2019.102760>.
18. Pylypenko, O., 2020. Development of critical thinking as a means of forming STEM competencies. *Educational dimension*, 55(3), p.317–331. Available from: <https://doi.org/10.31812/educdim.v55i0.3955>.
19. Slipukhina I., Polishchuk A., Mienaiilov S., Opolonets O. and Soloviov T. (2020). Methodology of M. Montessori as the Basis of Early Formation of STEM Skills of Pupils. In *Proceedings of the 1st Symposium on Advances in Educational Technology – Volume 1: AET*, ISBN 978-989-758-558-6, pages 211-220. DOI: 10.5220/0010922500003364
20. Tzagkaraki, E., Papadakis, S. and Kalogiannakis, M., 2021. Exploring the Use of Educational Robotics in Primary School and Its Possible Place in the Curricula. In: M. Malvezzi, D. Alimisis and M. Moro, eds. *Education in & with Robotics to Foster 21st-Century Skills*. Cham: Springer International Publishing, pp.216–229 URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-77022-8\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-030-77022-8_19).
21. Why many schools are 'up in the air' about cloud computing/Education Technology: веб-сайт. URL: <https://edtechnology.co.uk/Article/why-many-schools-are-up-in-the-air-about-cloud-computing>
22. Zhorova, I., Kokhanovska, O., Khudenko, O., Osypova, N. and Kuzminska, O., 2022. Teachers' training for the use of digital tools of the formative assessment in the implementation of the concept of the New Ukrainian School. *Educational technology quarterly*, 2022. Available from: <https://doi.org/10.55056/etq.11>.



23. Лабораторія електрики: постійний струм – віртуальна лабораторія. URL: <https://phet.colorado.edu/uk/simulations/circuit-construction-kit-dc-virtual-lab>

#### REFERENCES:

1. Kontsepsiia upravlinnia protsesamy formuvannia pryrodnycho-naukovoï kompetentnosti maibutnoho pedahoha fizyko-tekhnologichnoho profilu v STEM-orientovanomu navchalnomu seredovyshchi. – S. 104-108. <https://science.kpnu.edu.ua/wp-content/uploads/2021/09/1-1.pdf>
2. Martyniuk O.S. Tryvymirne prototypuvannia yak skladnyk STEMtekhnologii u konstruktyvno-tekhničnii i naukovo-doslidnii roboti studentiv ta uchniv. Zbirnyk naukovykh prats Kamianets-Podil'skoho natsionalnoho universytetu imeni Ivana Ohiiienka. Seriiia pedahohichna / [redkol.: P. S. Atamanchuk (holova, nauk. red.) ta in.]. Kamianets-Podil'skyi : Kamianets-Podil'skyi natsionalnyi universytet imeni Ivana Ohiiienka, 2019. Vyp. 25 : Upravlinnia informatsiino-navchalnym seredovyshchem yak kontseptualna osnova rezultatyvnosti fizyko-tekhnologichnoi osvity. S. 61-64. URL: <http://ped-series.kpnu.edu.ua/article/view/189486>.
3. Martyniuk, O., Myronchuk, H., Pankevych, S. (2022). Orhanizatsiino-metodychni umovy vykorystannia tsyfrovyykh laboratorii u systemi vprovadzhennia osvithnoho napriamu STEM. *Fizyka ta osvithni tekhnologii*, (1), 34–40. <https://doi.org/10.32782/pet-2022-1-4>
4. Mezhuieva I. Yu. / Testuvannia yak forma kontroliu znan, umin, navychok. Perevahy i nedoliky / *Molodyi vchenyi*. – 2017. – № 9. – S. 394-398
5. Nova ukrainska shkola. Kontseptualni zasady reformuvannia serednoi shkoly. Ukhvaleno rishenniam kolehii MON 27.10.2016. URL: <https://mon.gov.ua/storage/app/media/zagalna%20serednya/nova-ukrainska-shkola-compressed.pdf>
6. Osvitnii proekt «Na urok» dlia vchyteliv.–URL: <https://naurok.com.ua>
7. Pankevych S.S. Osoblyvosti provedennia testuvannia z fizyky zasobamy khmaro oriientovanykh tekhnologii v zakladakh medychnoho profilu. Zbirnyk naukovykh prats Kamianets-Podil'skoho natsionalnoho universytetu imeni Ivana Ohiiienka. Seriiia pedahohichna / [redkol.: S.V. Optasiuk (holova, nauk. red.) ta in.]. Kamianets-Podil'skyi : Kamianets-Podil'skyi natsionalnyi universytet imeni Ivana Ohiiienka, 2020. Vypusk 26
8. Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 13 sichnia 2021 r. № 131-r «Pro zatverdzhennia planu zakhodiv shchodo realizatsii Kontsepsii rozvytku pryrodnycho-matematychnoi osvity (STEM-osvity) do 2027 roku», 2021. URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-zatverdzhennya-planu-zahodiv-sh-a131r>.
9. Khomutenko M. Virtualnyi fizychnyi eksperyment v khmaro oriientovanomu navchalnomu seredovyshchi / M. Khomutenko // *Naukovi zapysky [Kirovohrad'skoho derzhavnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Vynnychenka]*. Seriiia : Problemy metodyky fizyko-matematychnoi i tekhnologichnoi osvity. – 2016. – Vyp. 9(3). – S. 175-179.
10. Sharko V. Modernizatsiia systemy navchannia uchniv STEM-dystsyplin yak metodychna problema / V. Sharko // *Naukovi zapysky [Kirovohrad'skoho derzhavnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Vynnychenka]*. Seriiia : Problemy metodyky fizyko-matematychnoi i tekhnologichnoi osvity. – 2016. – Vyp. 10(3). – S. 160-165. – Rezhym dostupu: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/nz\\_pmf\\_2016\\_10\(3\)\\_37](http://nbuv.gov.ua/UJRN/nz_pmf_2016_10(3)_37).
11. Bilousova, L., Gryzun, L. and Zhytienova, N., 2021. Interactive methods in blended learning of the fundamentals of UI/UX design by pre-service specialists. *Educational technology quarterly*. Available from: <https://doi.org/10.55056/etq.34>.
12. Lin, Y.T., Wang, M.T. and Wu, C.C., 2019. Design and Implementation of Interdisciplinary STEM Instruction: Teaching Programming by Computational Physics. *The Asia-Pacific Education Researcher*, 28(1), pp.77–91. Available from: <https://doi.org/10.1007/s40299-018-0415-0>.
13. Martyniuk, O.O., Martyniuk, O.S. and Muzyka, I.O., 2020. Formation of informational and digital competence of secondary school students in laboratory work in physics. In: S.O. Semerikov and M.P. Shyshkina, eds. *Proceedings of the 8th Workshop on Cloud Technologies in Education (CTE 2020)*, Kryvyi Rih, Ukraine, December 18, 2020. CEUR-WS.org, CEUR Workshop Proceedings, vol. 2879, pp.366–383. Available from: <http://ceur-ws.org/Vol-2879/paper20.pdf>.
14. Martyniuk, O.O., Martyniuk, O.S., Pankevych, S. and Muzyka, I., 2021. Educational direction of STEM in the system of realization of blended teaching of physics. *Educational Technology Quarterly* [Online], 2021(3), pp.347–359. Available from: <https://doi.org/10.55056/etq.39> [Accessed 28 November 2022].
15. Morze, N. and Strutynska, O., 2022. Model of the Competences in Educational Robotics. *Proceedings of the 1st Symposium on Advances in Educational Technology – Volume 2: AET. INSTICC, SciTePress*.
16. National Academy of Engineering and National Research Council, 2014. *STEM Integration in K-12 Education: Status, Prospects, and an Agenda for Research*. Washington, DC: The National Academies Press. Available from: <https://doi.org/10.17226/18612>.
17. Papadakis, S. and Kalogiannakis, M., 2019. Evaluating the effectiveness of a game-based learning approach in modifying students' behavioural outcomes and competence, in an introductory programming course. A case study in

Greece. *International journal of teaching and case studies*, 10(3), pp.235–250. Available from: <https://doi.org/10.1504/IJTCS.2019.102760>.

18. Pylypenko, O., 2020. Development of critical thinking as a means of forming STEM competencies. *Educational dimension*, 55(3), p.317–331. Available from: <https://doi.org/10.31812/educdim.v55i0.3955>.

19. Slipukhina I., Polishchuk A., Mienailov S., Opolonets O. and Soloviov T. (2020). Methodology of M. Montessori as the Basis of Early Formation of STEM Skills of Pupils. In *Proceedings of the 1st Symposium on Advances in Educational Technology – Volume 1: AET*, ISBN 978-989-758-558-6, pages 211-220. DOI: 10.5220/0010922500003364

20. Tzagkaraki, E., Papadakis, S. and Kalogiannakis, M., 2021. Exploring the Use of Educational Robotics in Primary School and Its Possible Place in the Curricula. In: M. Malvezzi, D. Alimisis and M. Moro, eds. *Education in & with Robotics to Foster 21st-Century Skills*. Cham: Springer International Publishing, pp.216–229 URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-77022-8\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-030-77022-8_19).

21. Why many schools are 'up in the air' about cloud computing/Education Technology: веб-сайт. URL: <https://edtechnology.co.uk/Article/why-many-schools-are-up-in-the-air-about-cloud-computing>

22. Zhorova, I., Kokhanovska, O., Khudenko, O., Osypova, N. and Kuzminska, O., 2022. Teachers' training for the use of digital tools of the formative assessment in the implementation of the concept of the New Ukrainian School. *Educational technology quarterly*, 2022. Available from: <https://doi.org/10.55056/etq.11>.

23. <https://phet.colorado.edu/uk/simulations/circuit-construction-kit-dc-virtual-lab>

УДК 538.9

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2023-1-5>**Людмила СОЛЯНИК**

кандидат хімічних наук, старший науковий співробітник, Інститут колоїдної хімії та хімії води імені А.В. Думанського Національної академії наук України, Вернадського Академіка бул, 42, м. Київ, Україна, 03142

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0002-2661-9392>**SCOPUS-AUTHOR ID:** 36903008700

**Бібліографічний опис статті:** Соляник, Л. (2023). Механізм реакцій електронного переносу на міжфазовій межі електрод-розтоп. *Фізика та освітні технології*, 1, 35–39, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2023-1-5>

## МЕХАНІЗМ РЕАКЦІЙ ЕЛЕКТРОННОГО ПЕРЕНОСУ НА МІЖФАЗОВІЙ МЕЖІ ЕЛЕКТРОД-РОЗТОП

В роботі проведено квантово-хімічний розрахунок реакцій чотирьох- електронного переносу заряду з поверхні електроду на електрохімічно активні комплекси ніобіє- та танталовмісних розтопів. Розглянуто можливість переносу 4-х електронів як в одну стадію, так і поетапного. Виявлено, що для чистих гептафтороніобатів та гептафторортанталатів вигідним є поетапний механізм переносу електронів, тобто по одному електрону, а для електрохімічно активних комплексів – гептафтороніобатів та гептафторортанталатів літій, кальцію і магнію, пріоритетним є одноетапний перенос заряду, поряд з можливістю реалізації поетапного процесу. Вперше було включено до такого розгляду температурний фактор середовища, в якому перебігають процеси електровідновлення. У рамках квантово-механічної теорії елементарного акту переносу заряду в полярних і неполярних середовищах з застосуванням сучасних квантово-хімічних методів розрахунку досліджено гетерогенні реакції переносу електрона, що супроводжуються суттєвою перебудовою густини заряду реагуючих частинок. В даній роботі перенос електрона представлено як квантовий перехід між двома поверхнями потенціальної енергії з певним електронним станом на прикладі гептафтороніобата літій та розраховано час життя в перехідному стані цієї частинки у двох альтернативних випадках – при одноетапному переносі заряду та при поетапному. Отримані в цілому результати електрохімічних вимірювань та результати розрахунків геометричних, енергетичних, зарядових характеристик ЕАК та їх інтермедіатів у розтопах дають можливість розширити існуючі уявлення про механізм електродних процесів, дозволяючи зробити висновок про те, що перенос електронів в одну стадію може бути звичайною стадією в електродних реакціях і завжди розглядатися як один із варіантів при аналізі механізмів електродних процесів (за умови, що частка не виходить із каналу реакції).

**Ключові слова:** характеристики переносу заряду, електрод, розтоп, час життя інтермедіатів.

**Ludmila SOLYANIK**

PhD in Chemistry, Senior Researcher, A.V. Dumansky Institute of Colloid and Water Chemistry, 42 Vernadsky Academician Avenue, Kyiv, 03142, Ukraine

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0002-2661-9392>**SCOPUS-AUTHOR ID:** 36903008700

**To cite this article:** Solyanik, L. (2023). Mekhanizm reaktsii elektronnoho perenosu na mizhfazovii mezhi elektrod-roztop [The mechanism of electron transfer reactions at the electrode-melt interface]. *Physics and Educational Technology*, 1, 35–39, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2023-1-5>

## THE MECHANISM OF ELECTRON TRANSFER REACTIONS AT THE ELECTRODE-MELT INTERFACE

In the paper, a quantum-chemical calculation of reactions of four-electron charge transfer from the electrode surface to electrochemically active complexes of niobium- and tantalum-containing melts was carried out. The possibility of transferring 4 electrons both in one stage and in successive stages is considered. It was found that for pure heptafluoroniobates and heptaphototortantalates, a stepwise mechanism of electron transfer is beneficial, i.e. one electron at a time, and for electrochemically active complexes – lithium, calcium and magnesium heptafluoroniobates and heptaphototortantalates, one-step charge transfer is a priority, along with the possibility of implementing a stepwise

*process. For the first time, the temperature factor of the environment in which electroregeneration processes take place was included in such consideration. Within the framework of the quantum-mechanical theory of the elementary act of charge transfer in polar and non-polar media, heterogeneous reactions of electron transfer, accompanied by a significant rearrangement of the charge density of the reacting particles, were investigated using modern quantum-chemical calculation methods. In this work, electron transfer is presented as a quantum transition between two potential energy surfaces with a certain electronic state using the example of lithium heptaphotoniobate, and the life time in the transition state of this particle is calculated in two alternative cases – with one-stage charge transfer and with stepwise charge transfer. The overall results of electrochemical measurements and the results of calculations of geometric, energy, and charge characteristics of EAC and their intermediates in melts provide an opportunity to expand the existing understanding of the mechanism of electrode processes, allowing us to conclude that the transfer of electrons in one stage can be a common stage in electrode reactions and always be considered as one of the options when analyzing the mechanisms of electrode processes (provided that the particle does not exit the reaction channel).*

**Key words:** Characteristics of charge transfer, electrode, melt, lifetime of intermediates.

**1. Актуальність проблеми.** Виявлений 4-х електронний перенос заряду в реакціях електровідновлення електрохімічно активних комплексів (ЕАК) на електроді трактується як одностадійний. Це базується на тому, що перш за все, поляризація таких систем (навіть зі швидкостями поляризації аж до 10 В/с) не дозволяла виявити стадійність сумарного багатоелектронного процесу або через здійснення таких процесів в дуже вузькому інтервалі потенціалів і неможливості використання для цих цілей недосконалих сучасних хроновольтамперометричних методів, або дійсно такі процеси перебігають в одну стадію. Тому необхідно провести квантовохімічний розрахунок стадійності таких процесів.

## 2. Аналіз останніх досліджень і публікацій.

До теперішнього часу, незважаючи на прогресивне розширення експериментальних і теоретичних методів дослідження, проблема стадійності електродних реакцій залишається відкритою. Були спроби визначити альтернативу стадійності перебігу електродних реакцій для розтопів зі вмістом карбонатів, нітратів, боратів та титанатів методами напівемпіричних квантовохімічних розрахунків і хроновольтамперометрії (Соловьев, 1998). Неемпіричними методами квантової хімії вивчено процеси стадійності для розтопів зі вмістом вольфраматів та молібдатів, однак без врахування температурних поправок, які можуть відігравати в цих процесах вирішальну роль (Соловйов, Черненко, 2009; Бут, 2011). Дослідження, спрямовані на прояснення цих питань для розтопів зі вмістом ніобію та танталу досі не проводилися, однак, для фізики і хімії поверхні, для фізичної хімії сольових систем й, взагалі, для оптимізації багатьох технологічних процесів та прогнозування максимальної ефективності при залу-

ченні розплавлених солей вивчення механізму переносу заряду з поверхні електроду на електрохімічно активні комплекси є досить важливим питанням.

**Основні результати.** У відповідності з моделлю Маркуса (Marcus, 1965), енергія активації може бути представлена таким чином:

$$E^{\ddagger} = \frac{(\Delta H_{if} + E_s)^2}{4E_s}, \quad (1)$$

де  $\Delta H_{if} = E_z - E_0$  – тепловий ефект, який може бути одержаний квантовохімічним методом як різниця між повними енергіями ЕАК в перехідному та рівноважному стані при переносі заряду з поверхні електроду. Враховуючи, що енергію активації  $E^{\ddagger}$  з точністю до деякого множника ототожнюють з активаційним бар'єром висотою  $\delta$ , в роботі проведено розрахунок активаційних бар'єрів 4-електронного одно- і постадійного переносу заряду в реакціях відновлення електрохімічно активних ніобіє- і танталовмісних комплексів.

Порівняльний аналіз розрахованих величин активаційних бар'єрів відновлення ЕАК ніобіє- і танталовмісних розтопів при одностадійному та послідовному переносі заряду дозволяє встановити пріоритет одностадійного 4-електронного переносу для ЕАК  $\{M_n^{m+}[Nb(Ta)F_7]^{2-}\}_{(mn-2)+}$  (табл. 1).

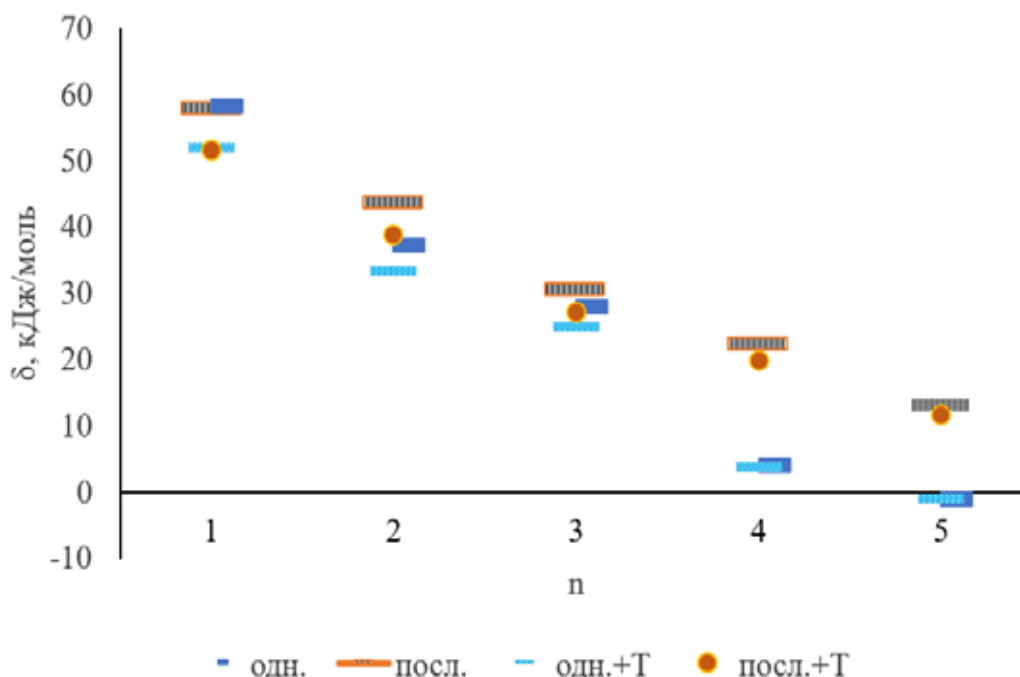
Оскільки при проведенні електрохімічних вимірювань виділення металу відбувалося в температурному діапазоні  $T=900-1250$  К, в даній роботі додатково проведено розрахунок активаційних бар'єрів одно- та постадійного 4-х електронного відновлення з урахуванням температури  $T=1023$  К (рис. 1).

Як показав аналіз результатів розрахунку, залучення температурного фактору до розгляду

Таблиця 1

**Величини активаційних бар'єрів  $\delta$ , кДж/моль при I – одночасному, II – послідовному приєднанні 4-х електронів)**

ЕАК	n	X=Nb		X=Ta	
		I	II	I	II
$\text{XF}_7^{2-}$	0	91,02	72,41	92,840	73,858
$\{\text{Li}_n^+[\text{XF}_7]^{2-(n-2)+}\}$	1	58,34	58,02	59,507	59,180
	2	37,41	43,68	38,158	44,554
	3	30,03	30,58	30,631	31,192
	4	4,24	2,226	4,325	2,271
	5	-1,036	1,307	-1,057	1,333
$\{\text{Ca}_n^{2+}[\text{XF}_7]^{2-(2n-2)+}\}$	1	44,18	62,47	45,064	63,719
	2	33,89	43,21	34,568	44,074
	3	-1,046	0,918	-1,067	0,936
	4	-1,643	-0,456	-1,676	-0,465
$\{\text{Mg}_n^{2+}[\text{XF}_7]^{2-(2n-2)+}\}$	1	46,18	51,93	47,104	52,969
	2	23,18	31,21	23,644	31,834
	3	-1,807	0,614	-1,843	0,626
	4	-2,381	-1,593	-2,429	-1,625



**Рис. 1. Залежність активаційних бар'єрів відновлення від координаційного числа 3С-катионів n при одночасному та послідовному приєднанні електронів**

активаційних бар'єрів відновлення дозволяє підтвердити пріоритет одностадійного переносу заряду в реакціях електровідновлення ЕАК.

Додатково було проведено оцінку часу життя інтермедіатів, що утворюються при приєднанні електронів в рамках теорії Бора:

$$\frac{\hbar}{\Delta E} = \tau, \quad (2)$$

де  $\Delta E = |E^*z - Ez|$ ,  $E^*z$  та  $Ez$  – енергії системи у станах, що відповідають координатам частинки  $X^*z$  та  $Xz$  у перехідному та в рівноважному стані відповідно.

Оскільки одночасний перенос електронів відбувається в дуже короткому часовому інтервалі, коли ядра фактично нерухомі (при послідовному переносі інтермедіат, що утворюється після переносу одного електрона, має певний час, хоч і незначний, для дисоціації, перш ніж другий

електрон буде перенесений), то знаходження різних енергетичних, зарядових та геометричних характеристик частинок повинні мати істотне значення для фізико-хімічних властивостей продуктів електрохімічних реакцій.

Аналіз розрахованих значень часового інтервалу  $\tau$  (рис. 2), вказує на те, що електронний перенос відбувається досить швидко, порівняно з частотами коливань ядер (відповідний часовий період  $10^{-13}$  с) для частинок, що розглядаються. В даному випадку згідно з принципом Франка-Кондона, який широко застосовується в теорії елементарного акта переносу заряду, часовий інтервал досить короткий, і ядра не встигають змінити своє положення при переносі кожного електрона. Це дозволяє інтерпретувати одночасний перенос електронів, як послідовний процес, що відбувається у дуже вузькому інтервалі часу. Так, розрахований час життя у відповідності з (2), вказує на існування ЕАК при реалізації реакції  $Nb(IV) + 4e \rightarrow Nb$  з часом життя  $\tau = 7,5 \cdot 10^{-15}$  с, в той час, як послідовний процес приєднання електронів передбачає існування інтермедіатів з меншим часом життя – до  $1,2 \cdot 10^{-15}$  с. Слід зазначити, що час життя є лише оцінкою порядку величини, без існування інтермедіату зі стабільною проміжною валентністю, що є необхідною умовою для реалізації послідовного переносу електронів. Останнє підтверджує реальність здійснення двох альтернативних шляхів перебігу реакції приєднання електронів: одночасного та послідовного.

Проведене моделювання спрямованості  $red|ox$  реакцій на міжфазній межі електрод-розтоп дозволяє встановити, що катіонний склад розтопу збільшує реакційну здатність ЕАК шляхом зниження величин активаційних бар'єрів електровідновлення.

**3. Висновки.** Розраховані величини часу життя інтермедіатів, отриманих при послідовному приєднанні електронів вказує на здійснення двох альтернативних шляхів перебігу реакції приєднання електронів: одночасного та послідовного, не виключаючи пріоритетної можливості переносу заряду в одну стадію.

Таким чином, вплив катіонного складу розтопу на процеси електровідновлення, розвиваючи фундаментальний принцип катіонного каталізу, не тільки визначає спрямованість багатоелектронних процесів та засоби управління цими процесами, а й дає можливість розширити існуючі уявлення про механізм електродних процесів. Виявлений пріоритет переносу заряду в одну стадію для ЕАК відкриває додаткові можливості управління макроскопічними властивостями отриманих продуктів і вказують як на значимість окремих стадій елементарного акту, так і на можливість керування структурою отримуваних продуктів за умови, що сума виявлених мікро-ефектів достатня для реалізації якісно нових макрохарактеристик продуктів електродної реакції (теплопровідність, електропровідність тощо).

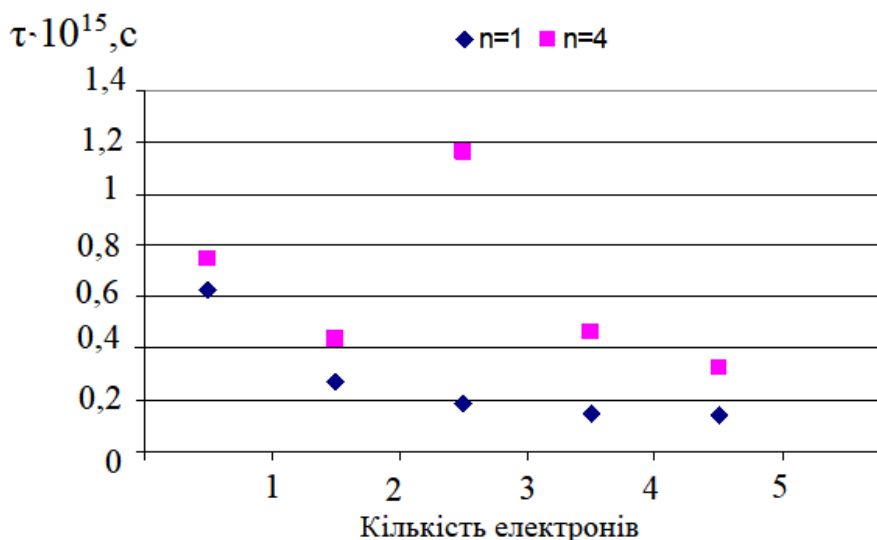


Рис. 2. Чисельна оцінка часового інтервалу ( $\tau \cdot 10^{15}, c$ ) послідовного приєднання 5-ти електронів для частинки  $\{Li_3^+[NbF_6]^{2-}\}^+$

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Соловьев В. В. Теоретические принципы многоэлектронных процессов восстановления и формирования ЭАЧ в ионных расплавах : дис. д-ра хим. наук : 02.00.04. Київ. 1998. 356 с.
2. Соловйов В.В., Черненко Л.О. Електрохімічно активні частки та багатоелектронний перенос заряду у вольфраматовмісних розтопах. *Монографія*. П.: ПолтНТУ, 2009. 162 с.
3. Бут Е.Ф. Многоэлектронные процессы переноса заряда и электрохимически активные комплексы в ионных молибдатсодержащих расплавах: дис... к-та хим. наук: 02.00.04. Бут Е.Ф. К., 2011. 145 с.
4. Marcus R.A. On theory of electron-transfer reactions. Unified treatment for homogenous and electrode reactions. *J. Chem. Phys.* 1965. V. 43(2). P.679-701. <https://doi.org/10.1063/1.1696792>

#### REFERENCES

1. Solov'ev V. V. (1998) Theoretical principles of multielectron processes of reduction and formation of EAP in ionic melts, Cand. dr. chem. Sciences: 02.00.04. / Solovyov V.V. K. 356 p. [in Russian].
2. Solovyov V.V., Chernenko L.O. (2009) Electrochemically active parts and rich electronic charge transfer in tungstate roses. Monograph. P.: PoltNTU. 162 p. [in Russian].
3. But E.F. (2011) Multi-electron processes of charge transfer and electrochemically active complexes in ionic molybdate-containing melts: a-ref chem. Sciences: 02.00.04. But E.F. K. 145 p. [in Russian].
4. R.A. Marcus. On theory of electron-transfer reactions. Unified treatment for homogenous and electrode reactions. *J. Chem. Phys.* 1965. V. 43(2). P.679-701. <https://doi.org/10.1063/1.1696792>

UDC 535.326:539.05:539.1.074.4:621.385.6

DOI <https://doi.org/10.32782/pet-2023-1-6>

**Petro TROKHIMCHUCK**

*Ph.D., Associate Professor Associate Professor at Department of A.V. Svidzynskiy's Theoretical and Computer Physics, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Volya Ave., Lutsk, Ukraine, 43025*

**ORCID ID:** 0000-0003-2737-0506

**SCOPUS-AUTHOR ID:** 8383601100

**To cite this article:** Trokhimchuck, P. (2023). Do pytannia pro pryrodu ta modeliuvannia zarodkoutvorennia ta krystalizatsii [To question about nature and modeling the processes of nucleation and crystallization]. *Physics and Education Technology*, 1, 40–46, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2023-1-6>

## TO QUESTION ABOUT NATURE AND MODELLING THE PROCESSES OF NUCLEATION AND CRYSTALLIZATION

*The main problems of nature and modelling the nucleation and crystallization are discussed. Two aspects of this problem: thermodynamical and electrodynamic, are discussed. Nucleation processes are classed as heterogeneous or homogeneous. Main thermodynamic theories and models of thermodynamic nucleation and crystallization, including Stranski-Krastanow model, are analyzed. It is shown, that these theories are explained the classic crystallization processes and methods, including Kiropoulos method, Chochralsky method, Bridgman-Stockbarger method, methods of zonal crystallization, growing with solution mixture. Vitaliy Stafeev electrostatic phason model, cascade theories of excitation of corresponding chemical bonds (coordination numbers) are represented electromagnetic models. Vitaliy Stafeev model allow to estimate minimal sizes of new phases – phasons and may be used for continuous and pulse regimes of nucleation and crystallizations. Cascade theories allow to explain the laser-induced pulses phase transformations. In this case we can have new phases with an increase in the degree of order (irradiation of the unstable or metastable structures), as well as with a decrease in the degree of order (irradiation of the stable structures). Examples of the use of these theories to describe phase changes during laser irradiation of silicon, germanium, indium antimonide, and indium arsenide are given. These theories may be used for all possible matter: from neorganic to biological. The problem of saturation is on of central problem of these theories. This problem has two ways of resolution. For thermodynamical theories and models it is saturation of solutions and dynamic of change this saturation. For electromagnetic theories and models it is the saturation of excitation and intensity of this excitation. The perspective of development and application these methods are discussed.*

**Key words:** nucleation, crystallization, V. Stafeev model, Stranski-Krastanow model, saturation, Relaxed Optics, cascade models, modeling.

**Петро ТРОХИМЧУК**

*кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри теоретичної та комп'ютерної фізики імені А. В. Свідзинського, Волинський національний університет імені Лесі Українки, просп. Волі, 13, м. Луцьк, Україна, 43025*

**ORCID ID:** 0000-0003-2737-0506

**SCOPUS-AUTHOR ID:** 8383601100

**Бібліографічний опис статті.** Трохимчук, П. (2023). До питання про природу та моделювання зародкоутворення та кристалізації. *Фізика та освітні технології*, 1, 40–46, doi: <https://doi.org/10.32782/pet-2023-1-6>

## ДО ПИТАННЯ ПРО ПРИРОДУ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЗАРОДКОУТВОРЕННЯ ТА КРИСТАЛІЗАЦІЇ

*Обговорюються основні проблеми природи та моделювання зародкоутворення та кристалізації. Обговорюються два аспекти цієї проблеми: термодинамічний і електродинамічний. Процеси зародження класифікуються як гетерогенні або гомогенні. Проаналізовано основні термодинамічні теорії та моделі термодинамічного зародкоутворення та кристалізації, включаючи модель Странського-Крастанова. Показано, що ці теорії пояснюють класичні процеси та методи кристалізації, включаючи метод Кіропулоса, метод Чохральського, метод Бріджмена-Стокбаргера, методи зонної кристалізації, вирощування кристалів з рідких розчинів. Електромагнітні моделі представлені електростатичною фазною моделлю Віталія Стафеева,*



каскадними теоріями збудження відповідних хімічних зв'язків (координаційних чисел). Модель Віталія Стафєєва дозволяє оцінити мінімальні розміри нових фаз – фазонів і може бути використана для неперервного та імпульсного режимів зародкоутворення та кристалізації. Каскадні теорії дозволяють пояснити фазові перетворення під впливом лазерних імпульсів. У цьому випадку ми можемо мати нові фази як зі збільшенням ступеня впорядкованості (опромінення нестабільних або метастабільних структур), так і зі зниженням ступеня впорядкованості (опромінення стабільних структур). Наведено приклади використання цих теорій для опису фазових змін під час лазерного опромінення кремнію, германію, антимоніду індію та арсеніду індію. Ці теорії можна використовувати для всіх можливих середовищ: від неорганічних до біологічних. Проблема насичення є однією з центральних проблем цих теорій. Ця проблема має два шляхи вирішення. Для термодинамічних теорій і моделей це насичення розчинів і динаміка зміни цього насичення. Для електромагнітних теорій і моделей це насиченість збудження та інтенсивність цього збудження. Обговорено перспективи розвитку та застосування цих методів.

**Ключові слова:** зародкоутворення, кристалізація, модель В. Стафєєва, модель Странського-Крастанова, насичення, релаксаційна оптика, каскадні моделі, моделювання.

## INTRODUCTION

In modern Physical Chemistry the **nucleation**, the initial process that occurs in the formation of a crystal from a solution, a liquid, or a vapour, in which a small number of ions, atoms, or molecules become arranged in a pattern characteristic of a crystalline solid, forming a site upon which additional particles are deposited as the crystal grows (Markov, 2017). That is why thermodynamic theories of nucleation and crystal growth were initially developed.

In this work, we will analyze the theories and models that are successfully used and can be used in the creation of new technologies for the miniaturization of elements of optoelectronic systems.

A typical representative of such a theory is the Stransky-Krastanow theory (Bauer, 1958; Stranski, 1938). These theories qualitatively explain the results of the main methods of growing crystals: melt, solution and gas transport methods.

However, with the development of micro and nanotechnologies, the problem of estimating the minimum sizes of the formed new phases has become relevant. That is why Vitaly Stafeev's theory of phasons appeared (Stafeev, 2005).

With the development of laser technologies, it became necessary to create models and theories of nucleation and crystallization that take into account the irradiation regimes. This is how cascade models of laser-generated phase transformations appeared (Trokhimchuck, 2016).

For example, a two-dimensional crystal lattice was used for indium antimonide and indium arsenide. The cascade model of the excitation of the corresponding chemical bonds in the excitation saturation mode made it possible to explain the laser-induced defect formation in these materials (Trokhimchuck, 2016).

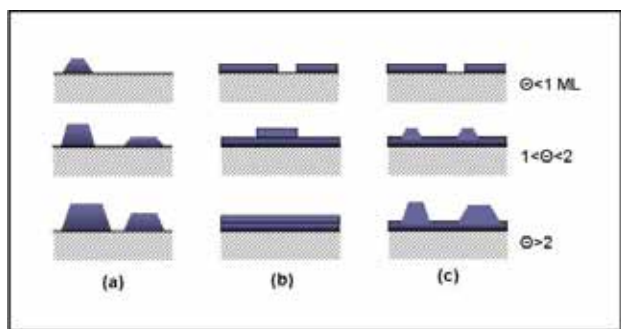
The cascade model, which was built for silicon and germanium based on their phase diagram, where coordination numbers were taken into account, made it possible to explain the laser-induced cascades of phase transformations with a decrease in the order of symmetry of the crystal lattice and to explain the corresponding experimental results (Trokhimchuck, 2016).

## STRANSKI-KRASTANOV MODEL

Stranski–Krastanow growth (Stranski, 1938) is one of the three primary modes by which thin films grow epitaxially a crystal surface or interface. Also known as 'layer-plus-island growth', the SK mode follows a two step process: initially, complete films of adsorbates, up to several monolayers thick, grow in a layer-by-layer fashion on a crystal substrate. Beyond a critical layer thickness, which depends on strain and the chemical potential of the deposited film, growth continues through the nucleation and coalescence of adsorbate 'islands'. Volmer–Weber, and Frank–van der Merwe mechanisms were systematically classified as the primary thin-film growth processes (Bauer, 1958; Markov, 2017). Since then, SK growth has been the subject of intense investigation, not only to better understand the complex thermodynamics and kinetics at the core of thin-film formation, but also as a route to fabricating novel nanostructures for application in the microelectronics industry.

The growth of epitaxial (homogeneous or heterogeneous) thin films on a single crystal surface depends critically on the interaction strength between adatoms and the surface. While it is possible to grow epilayers from a liquid solution, most epitaxial growth occurs via a vapor phase technique such as molecular beam epitaxy (MBE). In Volmer–Weber (VW) growth, adatom–adatom interactions are stronger than those of the adatom with the surface, leading to the formation of three-di-

mensional adatom clusters or islands. Growth of these clusters, along with coarsening, will cause rough multi-layer films to grow on the substrate surface. Antithetically, during Frank–van der Merwe (FM) growth, adatoms attach preferentially to surface sites resulting in atomically smooth, fully formed layers. This layer-by-layer growth is two-dimensional, indicating that complete films form prior to growth of subsequent layers (Bauer, 1958; Markov, 2017). Stranski–Krastanow growth is an intermediary process characterized by both 2D layer and 3D island growth. Transition from the layer-by-layer to island-based growth occurs at a critical layer thickness which is highly dependent on the chemical and physical properties, such as surface energies and lattice parameters, of the substrate and film (Bauer, 1958; Markov, 2017). Fig. 1 is a schematic representation of the three main growth modes for various surface coverages.



**Fig. 1. Cross-section views of the three primary modes of thin-film growth including (a) Volmer–Weber (VW: island formation), (b) Frank–van der Merwe (FM: layer-by-layer), and (c) Stranski–Krastanov (SK: layer-plus-island). Each mode is shown for several different amounts of surface coverage,  $\Theta$**

Determining the mechanism by which a thin film grows requires consideration of the chemical potentials of the first few deposited layers (Bauer, 1958; Markov, 2017). A model for the layer chemical potential per atom has been proposed by Markov (Markov, 2017) as:

$$\mu(n) = \mu_{\infty} + [\varphi_a - \varphi'_a(n) + \varepsilon_d(n) + \varepsilon_e(n)], \quad (1)$$

where  $\mu_{\infty}$  is the bulk chemical potential of the adsorbate material,  $\varphi_a$  is the desorption energy of an adsorbate atom from a wetting layer of the same material,  $\varphi'_a(n)$  the desorption energy of an adsorbate atom from the substrate,  $\varepsilon_d(n)$  is the per

atom misfit dislocation energy, and  $\varepsilon_e(n)$  the per atom homogeneous strain energy. In general, the values of  $\varphi_a$ ,  $\varphi'_a(n)$ ,  $\varepsilon_d(n)$ , and  $\varepsilon_e(n)$  depend in a complex way on the thickness of the growing layers and lattice misfit between the substrate and adsorbate film.

In the limit of small strains,  $\varepsilon_d(n) \ll \mu_{\infty}$ , the criterion for a film growth mode is dependent on  $\frac{d\mu}{dn}$ .

- VW growth:  $\frac{d\mu}{dn} < 0$  (adatom cohesive force

is stronger than surface adhesive force), (2)

- FM growth:  $\frac{d\mu}{dn} > 0$  (surface adhesive force

is stronger than adatom cohesive force). (3)

SK growth can be described by both of these inequalities. While initial film growth follows an FM mechanism, i.e. positive differential  $\mu$ , non-trivial amounts of strain energy accumulate in the deposited layers. At a critical thickness, this strain induces a sign reversal in the chemical potential, i.e. negative differential  $\mu$ , leading to a switch in the growth mode. At this point it is energetically favorable to nucleate islands and further growth occurs by a VW type mechanism (Bauer, 1958). A thermodynamic criterion for layer growth similar to the one presented above can be obtained using a force balance of surface tensions and contact angle.

#### STAFEEV PHASON MODEL

The problem of the creation new phase centers (phasons) is represented in Stafeef model (Stafeev, 2005). It is electrostatic theory.

Experimental data (Stafeev, 2005) shown that phasons are mono dispersive particles. Its sizes are depended from properties of its matter and environment of its formation. New condensed phase centers may be generated under vaporation, on substrate, in gas or liquid environment and directly in solid state. Under change of chemical compound phasons change its sizes in jumping way. For various matters minimal sizes of phasons are changed from 1 to 20 nm (Stafeev, 2005). Nanoparticles with these sizes are observed in soli state. It is structural defects – clusters (Stafeev, 2005). In some environment crystallization centers are covered by shell, its form stands more lock-in. Its nanoparticles are analogous to special “atoms” – small bricks of new matter (Stafeev, 2005). It may be included in solution, including solid, and created own condensed matter. For objects of little sizes, classical thermodynamical approaches and charac-

teristics (surface energy a.o.) cannot be used. However, must be existed some physical characteristics of matter and environment, which are determined minimal sizes of phasons.

As rule take into account, that nanoparticles are neutral (Stafeev, 2005). But investigations in region of phase transitions were shown that new phase centers (phasons) must be have electrical charge. For example (Stafeev, 2005), between growth ice layer from water may be generated sufficiently great (decathlons and hundreds Volts) difference of electrical potentials. Under phase transitions in liquid crystals great difference of electrical potentials is observed (Stafeev, 2005).

Atoms is determined the properties of chemical elements, molecules – chemical properties of substance. Must be existed structural unit that determine physical and other properties of condensed phases of substance. Last is depended not only from state of substrate but from its phase. Phasons may be completed from comparatively small numbers of molecules. Some quantitative threshold must be existed. Beginning from this threshold molecular cluster is transformed to thermodynamically stable phasons (Stafeev, 2005).

One of the important parameter of any phase is electrochemical potential. Therefore on its border with another phase junction difference of electrical potentials, which is stipulated of difference of electrochemical potentials, must be generated. It may be realized only in presence in each with contact phase's electrical charges with opposite signs. Cluster of bound molecules may be thermodynamically stable center of new phase after formation of proper junction difference of potentials only.

Minimal size of phason is determined from condition, that unit electrical charge  $q$  in environment with electrical constant  $\varepsilon$  on its capacity  $c$  is provided the generation of necessary junction difference of potentials  $\varphi = q/\varepsilon c$ . Center of new phase with minimal sizes was called phason (Stafeev, 2005). These centers may be having various forms. For simplification of further analysis we allow that center of new phase is spherical capacitor with diameter  $d_0$ . For this suggestion (Stafeev, 2005):

size of phason –  $d_0 = 3,6/\varepsilon\varphi, nm$ ;

number molecules in phason –  $n_f = 10^2 \pi \rho d_0^3/M$ ;

mobility –  $\mu = \varepsilon\varphi/6\pi\eta = 5,3 \times 10^{-7} \varepsilon\varphi/\eta, cm^2/V \times s$ ;

diffusive coefficient –  $D = 4,6 \times 10^{-11} \varepsilon\varphi T/\eta, cm^2/s$ ,

where  $\varphi$  in Volts;  $q$  in Coulomb;  $\eta$  viscosity in Poissons;  $N$  – Avogadro number;  $T$  – temperature;  $M$  – molecular weight;  $\rho$  is density of phason substrate in  $g/cm^3$ .

Diameter, mobility and diffusive coefficient of phasons are determined of electric constant of surrounding environment and difference of electrochemical potentials.

Sign of difference of electrochemical potentials is determined the sign of charge of center of new phase. For vacuum and gas, the role of difference of electrochemical potentials has energy of chemical affinity to electron (or proton) atoms and molecules of phason substrate  $w$ . For positive sign of affinity to electron phason charge will be negative, for positive to proton – positive. Knowledge of phason size allow estimating the affinity to electron (proton) its substance or difference of electrochemical potentials phason and substance of basic phase.

Phasons may be creating more large clusters – polyphasons. It must be quantized on sizes  $d = nd_0$ , where  $n = 1, 2, 3 \dots$

#### CASCADE MODELS OF STEP-ON-STEP SATURATED EXCITATION OF CORRESPONDING CHEMICAL BONDS

For modeling in cascade model were used two-dimensional picture the crystal lattice  $A_3B_5$  (Fig. 1 a) (Trokhimchuck, 2016) and phase diagram of Si (Fig. 1 b) (Trokhimchuck, 2016).

The profiles of the distribution the photostimulated donor centers in subsurface layers  $InSb$  and  $InAs$  are may be have various form (Trokhimchuck, 2016).

The samples of p-type conductivity are irradiated. For intensity of irradiation  $I_0 > 0,01 J \cdot cm^{-2}$  for  $InSb$  and  $I_0 > 0,012 J \cdot cm^{-2}$  for  $InAs$  the n-layers on p-type materials are created. For intensity of irradiation  $I_0 < 0,1 J \cdot cm^{-2}$  for  $InSb$  and  $I_0 < 0,16 J \cdot cm^{-2}$  for  $InAs$  the profiles of the distribution of donor centers are represented the Buger-Lambert law (law of absorption the light in homogeneous media). For further increasing the irradiated intensity the profiles of the concentration donor centers have diffusion nature. The visible destruction of the irradiated semiconductor melting, the change of the surface color) had place for  $I_0 > 0,3 J \cdot cm^{-2}$  for  $InSb$  and  $I_0 > 0,5 J \cdot cm^{-2}$  for  $InAs$ . This effect has oriental character (Trokhimchuck, 2016). For crystallographic direction  $\{111\}$  the process of the creation damages is more effective as for direction  $\{110\}$ .

Analogous results were received for the indium arsenide too. Time and energy characteristics of these processes on may be estimated with the help of next way. In further we'll use two-dimensional representation of crystal lattice *InSb* (Fig.7). Bond 1 is corresponded to band gap and has value 0,18 eV, bond 2 – 1,95 eV and bond 3 – 2,15 eV (Trokhimchuck, 2016). For *InAs* bond 1 has value 0,36 eV, bond 2 – 3,8 eV and bond 3 – 4,2 eV (Trokhimchuck, 2016).

For these crystals the energy of these bonds are equaled the energy of band gap  $E_g$  (0,18 eV for *InSb* and 0,36 eV for *InAs* at room temperature). On Fig. 2 a) this bond is signed as 1. For this bond ions *In* and *Sb* (or *In* and *As*) are placed on minimal distance (the sum of proper covalent radiuses). Other chemical bonds in this crystal symmetry have more long sizes. With geometrical point of view in crystal direction {111} the cross section of effective interaction the light quantum with bond 1 is more effective than for direction {110}. The angle among bond 1 and direction {110} is 37,5°. Quanta of ruby laser in linear regime of the irradiation are not interacted with another bonds practically because it energies are less than energy of this bond. The correlation of effective square of bond 1 for directions {110} and {111} is explained the proper experimental data (Trokhimchuck, 2016).

Straight method of the estimation the energetic characteristics this processes may be realized in the next way. Energy of “disruption” of chemical bonds of one type is equalled

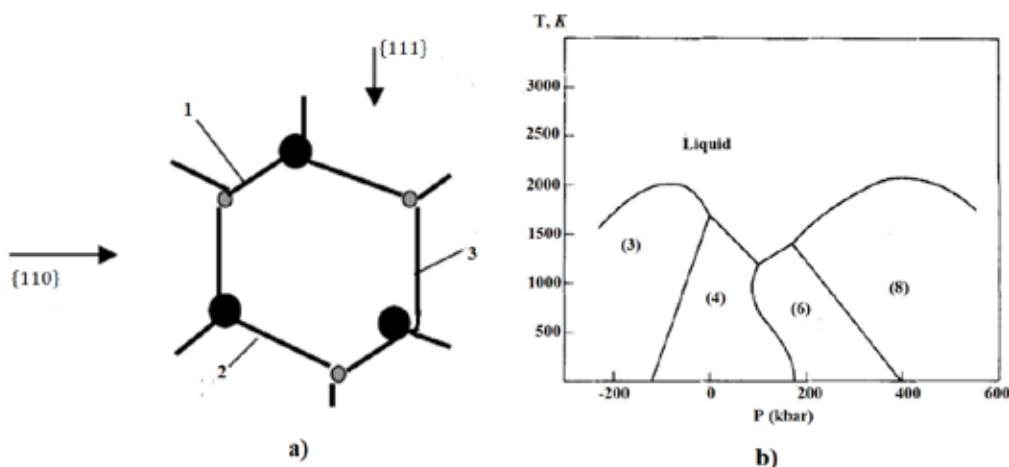
$$E_{di} = N_i E_i, \quad (4)$$

where  $N_i$  – a density of proper bonds;  $E_i$  – energy of a disruption (ionization) one bond.

For the *InSb*  $N_1 = N_2 = N_3 = \frac{N_0}{2}$  and are equaled  $1.4 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ ,  $E_1 = E_g = 0.18 \text{ eV}$  and therefore  $E_{d1} = N_1 E_g = 403.2 \text{ J/cm}^3$  and  $E_{d2} = N_2 E_2 = 4368 \text{ J/cm}^3$ . Surface density of irradiation may be determined with the help of next formula (Trokhimchuck, 2016)

$$E_{sis} = \frac{E_{di}}{\alpha_i}, \quad (5)$$

where  $\alpha_i$  – proper absorption factor, for the first bonds of *InSb*  $\alpha_1 = 2 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-1}$ , for second –  $\alpha_2 \sim 10^5 \text{ cm}^{-1}$ . Second absorption factor is nonlinear and take into account the effect of blooming. For *InSb* these values are next  $E_{s1s} = 0.002 \text{ J/cm}^2$  and  $E_{s2s} = 0.04368 \text{ J/cm}^2$ . These values must be multiplied on 2 (with including reflection) and therefore real values are next  $E_{s1sr} = 0.004 \text{ J/cm}^2$ ,  $E_{s2sr} = 0.08797 \text{ J/cm}^2$  and  $E_{sr(2)} \approx 0.092 \text{ J/cm}^2$ . Energy of “disruption” of third chemical bonds (Fig.4.4) is equalled  $E_{d3} = N_3 E_3 = 4816 \text{ J/cm}^3$ . If  $\alpha_3 \sim 10^5 \text{ cm}^{-1}$  we have  $E_{s2s} = 0.04816 \text{ J/cm}^2$  and  $E_{s3sr} = 0.096 \text{ J/cm}^2$ . Summary surface density of energy of three bonds is equalled  $E_{sr(3)} \approx 0.188 \text{ J/cm}^2$ . Value  $E_{sr(2)} \approx 0.092 \text{ J/cm}^2$  is represented of maximal distribution n-centers in subsurface region



**Fig. 2. a) Two-dimensional picture the crystal lattice  $A_3B_5$  (including *InSb* and *InAs*) the cubic symmetry. Bond 1 is pure covalent; b) a schematic phase diagram for *Si(CN)*. The coordination numbers (CN) of the various phases are indicated**

and  $E_{\Sigma r(3)} \approx 0.188 J/cm^2$  – “thermal diffusive” case (Trokhimchuck, 2016).

The fact is that this radiation leads to phase modifications of the pure material. The use of CO<sub>2</sub> laser radiation leads to annealing of defects and crystallization of ion-implanted layers. Moreover, the irradiation modes (impulse or stationary) do not matter, the main role is played by the integral dose. That is, in this case, we have photochemical processes (Trokhimchuck, 2016).

Now we show the using of cascade model for the explanation experimental data of laser-induced phase transformations in silicon, germanium, carbon and titanium. It was called as case the structural phases (Trokhimchuck, 2016).

The question about the influence of saturation of excitation on effects of RO may be represented as process of transitions between stable and metastable phases too. Now we'll estimate the influence of parameters of irradiation (including spectral) on irreversible changes and transformations in *Si* and *Ge*. Spectral dependences of absorbance of various structural modification of *Si* are represented in (Trokhimchuck, 2016). Now we'll be estimated intensities of eximer, Ruby and Neodymium laser irradiation (wavelengths of irradiation are 0,248  $\mu m$ , 0,69  $\mu m$  and 1,06  $\mu m$  properly of silicon and germanium, which are necessary for the creation of proper irreversible changes in irradiated semiconductor. As shown in (Trokhimchuck, 2016), absorbance of the Neodymium laser radiation in silicon is equaled 100  $cm^{-1}$ , second harmonic of Neodymium laser – 10<sup>4</sup>  $cm^{-1}$ , eximer laser – 10<sup>6</sup>  $cm^{-1}$ .

Crystal semiconductors *Si* and *Ge* have, basically, the structure of diamond. Volume atomic density of elementary lattices may estimate according to formula [19]

$$N_a = \frac{\rho N}{A}, \quad (6)$$

where  $\rho$  – density of semiconductor,  $N$  – Avogadro number,  $A$  – a weight of one gram-atom. For *Si*  $N_{aSi} = 5 \cdot 10^{22} cm^{-3}$ , and for *Ge*  $N_{aGe} = 4.4 \cdot 10^{22} cm^{-3}$ .

But *Si* and *Ge* may be crystallized in lattices with hexagonal, cubic, trigonal and monoclinic symmetry. Phase diagram of *Si* as function of coordination number is represented on Fig. 1 b) (Trokhimchuck, 2016).

Coordination number (CN) 8 is corresponded of diamond lattice, CN 6 – hexagonal lattice, (CN) 4 and (CN) 3 – other two lattices (trigonal and monocline). It should be noted that melting temperatures of these phases are various. Volume density of CN is equaled  $CN \cdot N_a$ . For diamond symmetry of lattice this value is  $8N_a$ . In other words, a change in the coordination number is not necessarily related to a change in type of crystal syngonia. Thus, the coordination numbers 8 and 6 can correspond to two different cubic symmetries, and at the same time, CN 6 corresponds to hexagonal syngonia (Boky, 1971), which corresponds to the corresponding experimental data (Trokhimchuck, 2016).

Roughly speaking, transition from one phase to another for regime of saturation of excitation may be modeled as one-time breakage of proper numbers of chemical bonds, which are corresponded to the difference of CN of proper phases. For example, two bonds breakage is caused the phase transition from diamond to hexagonal structure. One bond breakage in the regime of saturation is caused to generation of laser radiation.

Results of calculation of volume and surface densities of energy, which are necessary for breakage of proper number of bonds in regime of saturation of excitation, are represented in (Trokhimchuck, 2016) and they allow us to explain the corresponding experimental data.

## CONCLUSIONS

1. Stranski-Krastanow thermodynamic model of nucleation and crystallization is analyzed.

2. Electrostatic Stafeev phason theory is represented. This theory allow to estimate minimal sizes of phasons.

3. Cascade models of excitation the corresponding chemical bonds or coordination numbers in the regime of saturation allow to explain laser-induced phase transformations for various regimes of irradiation.

## BIBLIOGRAPHY:

1. Bauer E. Phänomenologische Theorie der Kristallabscheidung an Oberflächen. I. Zeitschrift für Kristallographie. 1958; 110: 372–394.
2. Бокий Г. Б. Кристаллохимия. Москва: Наука, 1971. 400 с.

3. Markov I. V. *Crystal Growth for Beginners: Fundamentals of Nucleation, Crystal Growth, and Epitaxy*. Singapore: World Scientific, 2017. 632 p.
4. Стафеев В. И. Элементарные структурные единицы конденсированных фаз и соответствующие им электрические явления. *Прикладная физика*. № 4, 2005; 4: 31–38.
5. Stranski I. N., Krastanow L. *Zur Theorie der orientierten Ausscheidung von Ionenkristallen aufeinander*. *Abhandlungen der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Klasse IIb*. Akademie der Wissenschaften, Wien, 1938; 146: 797–810.
6. Trokhimchuck P. P. *Relaxed Optics: Modelling and Discussions*. Saarbrücken: Lambert Academic Press, 2016. 250 p.

#### REFERENCES:

1. Bauer, E. (1958) *Phänomenologische Theorie der Kristallabscheidung an Oberflächen I*. *Zeitschrift für Kristallographie*. Vol.110, pp. 372–394.
2. Boky G. B. (1971) *Crystal chemistry*. Moscow: Nayka, 400 (In Russian)
3. Markov, I. V. (2017) *Crystal Growth for Beginners: Fundamentals of Nucleation, Crystal Growth, and Epitaxy*. Singapore: World Scientific, 632 p.
4. Stafeev, V. I. (2005) *Elementary structural units of condensed phases and its proper electrical phenomena*. *Applied Physics*, No.4, pp. 31–38. (In Russian)
5. Stranski I. N., Krastanow L. (1938) *Zur Theorie der orientierten Ausscheidung von Ionenkristallen aufeinander*. *Abhandlungen der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Klasse IIb*. Akademie der Wissenschaften, Wien, vol. 146, pp. 797–810.
6. Trokhimchuck, P. P. (2016) *Relaxed Optics: Modelling and Discussions*. Saarbrücken: Lambert Academic Press, 250 p.

## ЗМІСТ

<b>Наталія АНДРЕЄВА, Ровіл НАФЄЄВ, Леонід КАПЧЕНКО</b> МОДЕЛЮВАННЯ ВИСОКОЇ АКАДЕМІЧНОЇ УСПІШНОСТІ СТУДЕНТІВ ПРИ ВИКОНАННІ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ З ФІЗИКИ ОНЛАЙН.....	3
<b>Volodymyr HOLOVATSKY, Ihor HOLOVATSKYI, Yana HOLOVATSKA, Yaroslav STRUK</b> OSCILLATIONS OF THE RESONANT ELASTIC PENDULUM.....	10
<b>Микола ГОЛОВІН, Ніна ГОЛОВІНА</b> ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ АНАЛІЗУ ДИНАМІКИ ШВИДКОСТЕЙ ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНИХ ЗАВДАНЬ З ІНФОРМАТИКИ.....	18
<b>Галина МИРОНЧУК</b> ОСОБЛИВОСТІ ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ З ЕЛЕКТРИКИ ЗАСОБАМИ ХМАРО ОРІЄНТОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ.....	25
<b>Людмила СОЛЯНИК</b> МЕХАНІЗМ РЕАКЦІЙ ЕЛЕКТРОННОГО ПЕРЕНОСУ НА МІЖФАЗОВІЙ МЕЖІ ЕЛЕКТРОД-РОЗТОП.....	35
<b>Petro TROKHIMCHUCK</b> TO QUESTION ABOUT NATURE AND MODELLING THE PROCESSES OF NUCLEATION AND CRYSTALLIZATION.....	40

## CONTENTS

<b><i>Natalia ANDREEVA, Rovil NAFEEV, Leonid KAPCHENKO</i></b> MODELING OF STUDENTS' HIGH ACADEMIC PERFORMANCE DURING COMPLETING LABORATORY WORK IN PHYSICS ONLINE.....	3
<b><i>Volodymyr HOLOVATSKY, Ihor HOLOVATSKYI, Yana HOLOVATSKA, Yaroslav STRUK</i></b> OSCILLATIONS OF THE RESONANT ELASTIC PENDULUM.....	10
<b><i>Mykola HOLOVIN, Nina HOLOVINA</i></b> USING THE MACHINE LEARNING METHOD TO ANALYZE THE DYNAMICS OF THE PERFORMANCE OF PRACTICAL TASKS IN COMPUTER SCIENCES.....	18
<b><i>Galyna MYRONCHUK</i></b> FEATURES OF CONDUCTING LABORATORY WORK ON ELECTRICITY BY MEANS OF CLOUD-ORIENTED TECHNOLOGIES.....	25
<b><i>Ludmila SOLYANIK</i></b> THE MECHANISM OF ELECTRON TRANSFER REACTIONS AT THE ELECTRODE-MELT INTERFACE.....	35
<b><i>Petro TROKHIMCHUCK</i></b> TO QUESTION ABOUT NATURE AND MODELLING THE PROCESSES OF NUCLEATION AND CRYSTALLIZATION.....	40



## НОТАТКИ

# ФІЗИКА ТА ОСВІТНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Випуск 1

Коректура • Ірина Миколаївна Чудеснова

Комп'ютерна верстка • Наталія Сергіївна Кузнецова

Формат 60x84/8. Гарнітура Times New Roman.

Папір офсет. Цифровий друк. Ум. друк. арк. 5,81. Замов. № 0623/373. Наклад 300 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»

65101, Україна, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1

Телефон +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08

E-mail: [mailbox@helvetica.ua](mailto:mailbox@helvetica.ua)

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 7623 від 22.06.2022 р.