



DOI 10.31110/2413-1571-2023-038-4-010

УДК 537: 004.94: 37.016

КОМП'ЮТЕРНА МОДЕЛЬ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ У ВІРТУАЛЬНОМУ ФІЗИЧНОМУ ПРАКТИКУМІ

USE OF COMPUTER SIMULATION IN STUDYING CIRCUITS OF DIRECT CURRENT

Варфоломій САВЧУК

Дніпровський національний університет
 імені Олеся Гончара, Україна
 varfolomey44@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-6324-7567>

Олена РОМАНЕЦЬ ✉

Дніпровська академія неперервної освіти, Україна
 elena.romanetc@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0002-5439-3749>

Varfolomii SAVCHUK

Oles Honchar Dnipro National University, Ukraine
 varfolomey44@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-6324-7567>

Olena ROMANETC ✉

Dnipro Academy of Continuing Education, Ukraine
 elena.romanetc@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0002-5439-3749>

АНОТАЦІЯ

Формулювання проблеми. Вивчення та закріплення навчального матеріалу з фізики базується на експериментах. Останні, в умовах дистанційного навчання, досить важко реалізувати. Сучасні інформаційні технології дозволяють здійснити таку реалізацію. В статті в якості прикладу розглянуто використання комп'ютерної симуляції при вивченні кола постійного струму в умовах дистанційного навчання.

Матеріали і методи. Постановка проблеми та її вирішення спирається на матеріали навчальних програм з фізики для 10-11 класів загальноосвітніх навчальних закладів, програми з фізики бакалаврського рівня для закладів вищої освіти з фізико-технічних спеціальностей та спеціальності 014.08., матеріали науково-педагогічних та науково-методичних джерел, в яких розглядаються питання, дотичні до проведеного дослідження. Були використані також матеріали ресурсів з комп'ютерних симуляцій, зокрема з сайту інтерактивних симуляцій phet.

Результати. Аналіз використаних матеріалів визначив комплекс експериментальних робіт фізичного практикуму з електрики, варіативність завдань у яких надавала можливість використовувати їх в різних форматах навчання (як в старших класах середньої загальноосвітньої школи, так і на молодших курсах бакалаврського рівня). Із застосуванням комп'ютерної симуляції з сайту інтерактивних симуляцій phet в якості прикладу розглянуто навчальний експеримент «Дослідження постійного струму, корисної потужності та к. к. д. джерела струму».

Висновки. Використання інтерактивної симуляції при вивченні теми «Закон Ома для повного кола. Потужність постійного струму» дозволяє змодельовувати зазначений фізичний експеримент і використати його результати для обґрунтування низки теоретичних положень за темою, що вивчається. Розроблене методичне забезпечення виконання експерименту дозволяє використовувати його на різних рівнях навчання фізики. Перспективним є створення комплексу лабораторних робіт за різними розділами курсу загальної фізики, що базуються на використанні комп'ютерних симуляцій, та розробка методичного забезпечення їх виконання.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: комп'ютерна модель; віртуальний фізичний практикум; phet-симуляції; самостійна робота; домашні завдання; коло постійного струму; корисна потужність.

ABSTRACT

Formulation of the problem. Studying and consolidating educational material in physics is based on experiments. The latter are rather difficult to implement in the conditions of distance learning. Modern information technologies allow such implementation. In the article, as an example, the use of computer simulation in the study of a direct current circuit in the conditions of distance learning is considered.

Materials and methods. The formulation of the problem and its solution is based on the materials of physics curricula for grades 10-11 of general educational institutions and bachelor's level physics programs for institutions of higher education in physical and technical specialties and specialist 014.08., materials of scientific-pedagogical and scientific-methodical sources, in which issues related to the conducted research are considered. Materials from resources on computer simulations, in particular from the phet interactive simulations site, were also used.

The results. The analysis of the materials used determined a complex of experimental works of the physical workshop on electricity, the variability of the tasks in which provided the opportunity to use them in different educational formats (both in senior classes of secondary comprehensive schools and in junior courses of the bachelor's level). Using a computer simulation from the phet interactive simulation site as an example, an educational experiment on the topic "Investigation of direct current, useful power and efficiency of a current source" was considered.

Conclusions. The use of interactive simulation when studying the topic "Ohm's law for a complete circle. The power of direct current" allows you to simulate the specified physical experiment and use its results to justify a number of theoretical propositions on the topic being studied. The developed methodological support for the experiment allows its use at various levels of physics education. It is promising to create a complex of laboratory works for various sections of the general physics course, based on the use of computer simulations, and to develop methodological support for their implementation.

KEYWORDS: computer simulations; Phet-simulations; independent work; homework; physical experiment; direct current; useful power.

ВСТУП

Постановка проблеми. Освітня політика України, як частини Європейського союзу, базується на ключових принципах безперервної сучасної освіти. Серед них одним з основних є той, за яким освітні системи повинні адаптуватися до сучасних умов, враховувати перспективи розвитку технологій, устрій суспільного життя й орієнтуватися саме на них у своєму розвитку. В сучасних умовах традиційне навчання, що базується на очному відвідуванні навчальних закладів за

Савчук В., Романець О. Комп'ютерна модель кола постійного струму у віртуальному фізичному практикумі. *Фізико-математична освіта*, 2023. Том 38. № 4. С. 68-73. DOI: 10.31110/2413-1571-2023-038-4-010

Для цитування:

Савчук В., & Романець, О. (2023). Комп'ютерна модель кола постійного струму у віртуальному фізичному практикумі. *Фізико-математична освіта*, 38(4), 68-73. <https://doi.org/10.31110/2413-1571-2023-038-4-010>

For citation:

Savchuk, V., & Romanetc, O. (2023). Use of computer simulation in studying circuits of direct current. *Physical and Mathematical Education*, 38(4), 68-73. <https://doi.org/10.31110/2413-1571-2023-038-4-010>

Savchuk, V., & Romanetc, O. (2023). Kompjutersna model kola postoinoho strumu u virtualnomu fizychnomu praktykumi [Use of computer simulation in studying circuits of direct current]. *Fizyko-matematyczna osvita – Physical and Mathematical Education*, 38(4), 68-73. <https://doi.org/10.31110/2413-1571-2023-038-4-010>

певних причин може бути недоступним, отже дистанційне навчання є однією з альтернативних форм організації освітнього процесу. Специфіка дисципліни «Фізика» зрозуміло полягає в тому, що вивчення та закріплення навчального матеріалу повинно базуватися на експериментах і лабораторних роботах, без яких вона стає суто формальною. Запобіганню (в рамках дистанційного навчання) формалізації процесу навчання, може допомогти комп'ютерне моделювання фізичних явищ та процесів.

В статті показано як демонстраційний експеримент та лабораторна робота з теми «*Дослідження постійного струму, корисної потужності та к. к. д. джерела струму*» можуть бути реалізовані за допомогою PhET симуляцій.

Аналіз актуальних досліджень. Використання комп'ютерного моделювання при викладанні природних дисциплін, і фізики зокрема, є актуальним, особливо в сьогоденні. Дослідження з цього напрямку проводять як вітчизняні, так і зарубіжні науковці.

Потенціал комп'ютерного моделювання та комп'ютерних ігор для покращення науково обґрунтованого навчання досліджується, зокрема в монографії «Вивчення природничих наук через комп'ютерні ігри та моделювання» (Honey & Hilton, 2011). Вплив комп'ютерного моделювання на навчання досліджувався ще на початку XXI століття з використанням різних моделей навчання. Зокрема, «система симуляційного навчання була реалізована на основі... трьох моделей, і відмінності між симуляційним навчанням і традиційним лабораторним навчанням були досліджені в контексті вивчення фізики» (Chang et al., 2008). Однією з важливих цілей подібних досліджень стало «вивчення ефективності використання віртуальних експериментів на рівні досягнень студентів та їх практичних навичок, а також їх поглядів на застосування віртуальних експериментів у лабораторії загальної фізики» (Hamed & Aljanazrah, 2020). Застосування освітніх інновацій з використанням онлайн-технологій особливо актуалізувалося в світовому освітньому просторі в період пандемії COVID 19. В українському освітньому просторі ця проблема не втрачає актуальності у зв'язку з гострою необхідністю дотримування соціальної дистанції під час війни, яка триває вже не перший рік. Стан розвитку навчального комп'ютерного моделювання, його сучасних можливостей при викладанні фізики досліджують М.В. Головка, С.Ю. Крижановський, В.М. Мацюк (Головка та ін., 2015). В публікаціях низки дослідників розглядаються різноманітні аспекти комп'ютерного моделювання, застосування комп'ютерних симуляцій в практиці навчання фізики. Досліджуються вплив віртуального фізичного експерименту на вдосконалення професійних компетентностей (Федчишин та ін, 2023), аналізуються методичні основи використання phet-симуляцій (Федчишин та ін, 2022), формується методика застосування комп'ютерних симуляцій для виконання домашніх завдань з молекулярної фізики (Мястковська & Пшембаєв, 2016) та проведення лабораторних робіт з фізики (Подласов & Матвійчук, 2023), при вивченні атомної фізики (Слободяник, 2019).

Огляд сучасних публікацій, присвячених з'ясуванню впливу віртуальних лабораторій на викладання і саморегульоване навчання, засвідчив актуальність цього напрямку в освіті та виявив низку позитивних можливостей для досягнення якісного викладання і навчання (Govender, 2023). Більшість досліджень, порівнюючи ефективність традиційного викладання фізики з навчанням із використанням комп'ютерних симуляцій, доводять, що під час застосування відповідних комп'ютерних програм учнями (студентами) поліпшується розуміння фізичних концепцій, іде оволодіння навичками експериментальної роботи. Використання інтерактивних симуляцій збільшує інтерес до предмету та робить навчання цікавішим та підвищує мотивацію вивчення, що особливо важливо для середньої школи (Honey & Hilton, 2011; Головка та ін., 2015; Федчишин та ін, 2023; Подласов & Матвійчук, 2023).

Мета статті. За відповідною Phet симуляцією розробити та методично проаналізувати лабораторну роботу за темою «Дослідження струму, корисної потужності та к.к.д. джерела струму» в межах програми стандарт та профіль середньої загальноосвітньої школи та в рамках навчального плану спеціальності «014.08 Фізика. Середня освіта». Визначити можливості застосування відповідної симуляції в навчальному процесі за віртуальною формою навчання.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

В рамках даної теми проведено аналіз відповідного пласту науково-методичної літератури з метою узагальнення результатів вітчизняного та зарубіжного досвіду роботи, з'ясовано існуючі підходи, відкриті проблеми та переваги використання симуляцій під час навчального процесу. Проведено аналіз концептуальних підходів до використання комп'ютерних симуляцій при викладанні фізики, задля розуміння переваг і обмежень що накладають саме симуляції, їхньої ролі у стимулюванні творчого мислення та осмисленні фізичних закономірностей процесів у ланцюгах постійного струму при вивченні зазначеної теми.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Перед розглядом основної теми, хочемо зазначити, що використання інтерактивних моделей не може замінити проведення експериментів з реальним устаткуванням, і якщо є можливість вибору, завжди треба надавати перевагу реальному об'єктам і приладам (звісно це не стосується явищ і процесів, які не можливо відтворити в рамках шкільного експерименту). Відсутність при навчанні навичок роботи з лабораторним устаткуванням в умовах реального експерименту зменшує можливості учням отримати той досвід роботи з фізичними приладами, ті можливості врахування зовнішніх факторів при проведенні та плануванні експерименту, отримати вищий рівень фізичної взаємодії з об'єктами, який надається під час традиційних експериментів, що може зменшити їх розуміння та сприйняття фізичних концепцій. Тож комп'ютерне моделювання відіграє допоміжну роль у викладанні (особливо у середній школі), коли формування навичок у учня іншими засобами є недоступним. Цьому аспекту приділено зокрема увагу в роботі (Подласов & Матвійчук, 2023). В той же час використання інтерактивних моделей надає інші можливості, які позитивно впливають на процес навчання. Деякі з них випливають з аналізу можливостей розглянутої (в якості прикладу) симуляції.

Основні принципи використання комп'ютерних моделей в навчальному процесі зазначені у роботі (Мястковська & Пшембаєв, 2016):

«1) модель певного фізичного явища необхідно використовувати лише в тому випадку, коли немає змоги провести експеримент або коли явище проходить дуже швидко й за ним не можливо простежити детально;

2) комп'ютерна модель повинна допомагати розібратися в деталях явища, що досліджується, або відігравати роль ілюстрації умови задачі, що пропонується для розв'язку;

3) у результаті роботи з моделлю учні повинні виявити як якісні, так і кількісні залежності між величинами, що характеризують дане явище.

4) під час роботи з моделлю необхідно пропонувати учням завдання».

Відносно першого пункту зазначимо, що особливої актуальності використання комп'ютерних моделей набуває в умовах сьогодення, коли більшість навчальних закладів вимушена проводити заняття в режимі онлайн.

До останнього пункту можна додати, що за умови дистанційного навчання, у учнів повинні бути прописані чіткі (або додані відео) інструкції роботи з моделлю, на які вони можуть спиратися під час виконання роботи. Дослідження показують, що самостійна «гра» з моделями, без чіткої мети і мотивації, буде певний час цікавою, але не приводить до покращеного розуміння навчального матеріалу. Використання комп'ютерних симуляцій без відповідного супроводу викладачем, може викликати в учнів зміщення уваги до графіків та анімації, що може призвести до втрати основного академічного фокусу та збільшення часу на розваги замість активного навчання.

З поміж інших ресурсів з комп'ютерних симуляцій, що творені на основі різних програмних середовищ наприклад: «JavaLab», «Exploration Series», «MOZAIK education», «Go-Labz», вирізняється сайт Інтерактивних симуляцій PhET – проект University of Colorado Boulder для створення і використання безкоштовних інтерактивних симуляцій з математики і наук про природу (<https://phet.colorado.edu/uk/simulations/circuit-construction-kit-ac-virtual-lab>). Проект був заснований у 2002 році лауреатом Нобелівської премії Карлом Віманом. Сайт містить інтерактивні симуляції, що спонукають учнів до досліджень, а також методичний супровід всіх симуляцій, включно з розробками уроків від викладачів з усього світу. Великою перевагою ресурсу, є можливість працювати з симуляціями в режимі off-line та мінімальні вимоги до програмного забезпечення. Слід зазначити, що Інститутом інформаційних технологій і засобів навчання Національної академії педагогічних наук України було створено інтернет-ресурс «Шкільний навчальний експеримент із сайтом симуляцій PHET» (<https://ukrainephet.blogspot.com/>), в якому розміщено різноманітні ресурси, такі як рекомендації щодо використання симуляцій, лабораторні роботи та роботи шкільного практикуму, розробки домашніх експериментальних завдань та настанови для проведення демонстраційного навчального експерименту для природничої освітньої галузі. Однак дану тему можна і необхідно розширювати і як приклад розглянемо проведення лабораторного практикуму за темою «Експериментальне дослідження залежності струму у ланцюзі постійного струму. Корисна потужність і коефіцієнт корисної дії джерела струму в залежності від опору навантаження». Слід зазначити, що згідно з програмою (Фізика. Навчальні програми для загальноосвітніх навчальних закладів. Фізика. 10–11 класи) тему «Робота та потужність електричного струму, теплова дія струму» вивчають детально у 11 класі в рамках теми «Електродинаміка», хоча початкові відомості вводять вже у 8 класі. Детально аналіз корисної потужності з визначенням максимальної потужності і відповідних параметрів кола вивчають саме в «профільному» рівні навчання фізики, а також на молодших курсах вищих навчальних закладів при викладанні фундаментальної дисципліни «Загальна фізика» (Електрика та магнетизм. Лабораторний практикум).

Розглянемо основні можливості симуляції «Лабораторія електрики: постійний струм - віртуальна лабораторія» (https://phet.colorado.edu/sims/html/circuit-construction-kit-dc-virtual-lab/latest/circuit-construction-kit-dc-virtual-lab_uk.html).

За рекомендацією сайту симуляцію доцільно використовувати для таких задач: дослідження основних понять електрики; початкові навички застосування електровимірвальних приладів, створення простіших кіл, дослідження електропровідності різноманітних матеріалів, вивчення закону Ома та застосування правил Кірхгофа.

Метою ж пропонованої лабораторної роботи на базі даної симуляції є дослідження експериментальної залежності струму у колі постійного струму від зовнішнього та внутрішнього опорів, а також визначення корисної потужності і коефіцієнту корисної дії джерела струму від опору навантаження та з'ясування на основі графіка відповідної функціональної залежності особливостей розподілу потужності джерела між джерелом і зовнішнім колом (навантаженням).

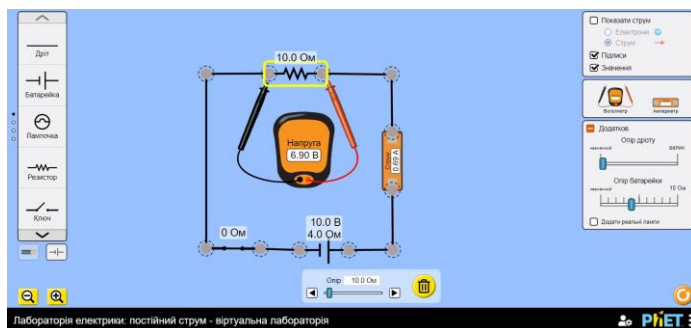


Рис. 1. Принципова схема кола постійного струму з послідовно з'єднаними елементами

Схема установки зображена на рис. 1. (скріншот симуляції лабораторної роботи). Вона складається з послідовно з'єднаних джерела струму, опору зовнішньої ділянки ланцюга, що може змінюватися за величиною, та вимикача. Для вимірювання сили струму і напруги використовуються відповідно амперметр та вольтметр, позначені на скріншоті. Їх можна під'єднати для вимірювання струму у ланцюзі з послідовно з'єднаними його елементами, та для вимірювання напруги на зовнішньому опорі. На панелі справа знаходиться елемент керування, який дозволяє обирати опір джерела струму. Знизу панелі знаходяться елемент керування, що дозволяє змінювати опір R зовнішньої ділянки ланцюга. Значення

опорів R та r можна змінювати за допомогою повзунків на шкалах значень цих опорів з певним кроком. Дані вимірювань здобувачі освіти заносять в таблицю, зразок якої наведений нижче. За отриманими експериментальними даними будуються й аналізуються графіки залежностей, що характеризують закони постійного струму. В наведеному прикладі експерименту ЕРС джерела - 10 Вольт; внутрішній опір $r = 4$ Ом; опір R навантаження будемо змінювати за допомогою повзунка (рис. 1 внизу) в межах від 1-го до 20-ти Ом з кроком 1 Ом.

Таблиця 1

Експериментальні дані, отримані при зміні зовнішнього опору R

R	r	R+r	I	I ²	P _{кор} =I ² R	η	ε
Ом	Ом	Ом	А	А ²	Вт	%	В
1	4	5	2,00	4	4	20	10
2	4	6	1,67	2,79	5,58	33	10
3	4	7	1,43	2,04	6,13	43	10
4	4	8	1,25	1,56	6,25	50	10
5	4	9	1,11	1,23	6,16	56	10
6	4	10	1	1,00	6,00	60	10
...

Для математичної обробки результатів вимірювання, пропонується побудувати, використовуючи програму Excel, графіки залежності: струму від загального опору кола (R+r), корисної потужності та к.к.д. від опору зовнішньої ділянки кола R.

На Рис. 2 згідно закону Ома спостерігаємо **нелінійну залежність сили струму від опору**. Звичайно це впливає з самої формули, оскільки опір стоїть у знаменнику $I = \epsilon / (R+r)$.



Рис. 2. Залежність сили струму від опору в колі постійного струму

Графік на Рис. 3 представляє **нелінійну залежність P_{кор}(R)**. Маємо доволі важливий результат, на особливостях якого необхідно акцентувати увагу здобувачів освіти. Саме в момент, коли опір навантаження зрівнюється з опором джерела струму R=r=4, корисна потужність набуває максимального значення. $P_{кор} = I^2 R = \epsilon^2 R / (R+r)^2$.



Рис. 3. Залежність корисної потужності від опору навантаження (опору зовнішньої ділянки кола постійного струму)

Такий результат, отриманий за експериментальними даними, можна обґрунтувати теоретично. У класі, що працює за профільною програмою, або для студентів молодших курсів, що навчаються за бакалаврською програмою, необхідно показати, що досліджуючи $P_{кор} = I^2 R = \epsilon^2 R / (R+r)^2$ на екстремум, можна теоретично з'ясувати, що корисна потужність має максимум саме при $R = r$; максимальне значення корисної потужності дорівнює:

$$P_{кор}^m = \epsilon^2 / 4r.$$

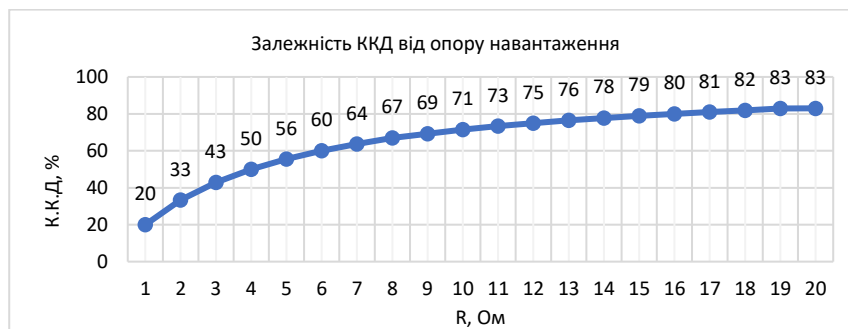


Рис. 4. Залежність ККД від опору навантаження (опору зовнішньої ділянки кола постійного струму)

Покажемо для порівняльного аналізу характеру взаємовідносин між к.к.д та максимальною корисною потужністю, яка віддається у зовнішнє коло, є графік залежності ККД від опору навантаження, що наочно демонструє **нелінійну залежність ККД від опору навантаження**. $\eta = P_{\text{кор}}/P = I^2 R/I \varepsilon = IR/\varepsilon = IR/(R + r) = R/(R + r) = 1/(1 + r/R)$, $P_{\text{кор}}^m = \varepsilon^2/4r$, к.к.д. у цьому випадку дорівнює $\eta = 0,5$ або $\eta = 50\%$, що ми й бачимо на графіку.

Порівняння графіків залежності к.к.д. та корисної потужності, отриманих при використанні даної симуляції, дає можливість створити чітке уявлення учнів (студентів), що одночасно отримати максимальну корисну потужність і максимальний к.к.д. неможливо. В електроенергетичній галузі бажаним є високий к.к.д. Його можна досягти, збільшуючи опір зовнішньої частини кола порівняно з внутрішнім опором джерела. На цьому треба акцентувати увагу здобувачів освіти при експериментальній перевірці закону Ома для повного кола.

Зазначений віртуальний фізичний експеримент був успішно застосований при викладанні в онлайн-режимі відповідної теми на першому курсі студентам фізико-технічних спеціальностей ДНУ імені Олеса Гончара.

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

Дидактичні можливості віртуального експерименту розширюють можливості обґрунтування теоретичних положень, що формуються у процесі викладання досить складних тем з фізики. Для їхнього засвоєння важливим і необхідним є демонстраційний або лабораторний експеримент, який під час дистанційного навчання (або при обмеженості матеріально-технічної бази навчального закладу) не може бути застосований. Розглянута в статті можливість використання однієї з віртуальних симуляцій з сайту Phet при вивченні теми «Закон Ома для повного кола. Потужність постійного струму», дозволяє змоделювати зазначений фізичний експеримент і використати його результати для обґрунтування низки теоретичних положень за темою, що вивчається.

Перспективи подальших досліджень, на наш погляд, полягають перш за все в створенні комплексу лабораторних робіт за різними розділами курсу загальної фізики, що базуються на використанні комп'ютерних симуляцій, та розробці методичного забезпечення їх виконання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Govender, R. (2023). Teaching and learning using virtual labs: Investigating the effects on students' self-regulation. *Cogent Education*, 10(1), 2172308. <https://doi.org/10.1080/2331186X.2023.2172308>
- Hamed, Gh., Aljanazah, Ahm. (2020). The Effectiveness of Using Virtual Experiments on Students' Learning in the General Physics Lab. *Journal of Information Technology Education: Research*, 19, 977–996. <https://doi.org/10.28945/4668>
- Honey, M. A., & Hilton, M. L. (Eds.). National Research Council. (2011). *Learning Science Through Computer Games and Simulations*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/13078>. <http://www.ics.uci.edu/~wscacchi/GameLab/Recommended%20Readings/Learning-ScienceGames-2011.pdf>
- Лабораторія електрики: постійний струм – віртуальна лабораторія. phet.colorado.edu. https://phet.colorado.edu/sims/html/circuit-construction-kit-dc-virtual-lab/latest/circuit-construction-kit-dc-virtual-lab_uk.html
- Chang, K. E., Chen, Y. L., Lin, H. Y., & Sung, Y. T. (2008). Effects of learning support in simulation based physics learning. *Computers & Education*, 51 (4), 1486–1498.
- Головко, М. В., Крижановський, С. Ю., & Мацюк, В. М. (2015). Моделювання віртуального фізичного експерименту для систем дистанційного навчання в загальноосвітній і вищій педагогічній школах. *Інформаційні технології і засоби навчання*, 47(3), 36–48.
- Електрика та магнетизм. Лабораторний практикум: методичний посібник для організації самостійної роботи студентів фізичних спеціальностей (2015) / укл. В. М. Здешиц, В. П. Ржепецький. Кривий Ріг.
- Інтерактивні моделювання. Веб-сайт Університету Колорадо. phet.colorado.edu. <https://phet.colorado.edu/uk/simulations/circuit-construction-kit-ac-virtual-lab>
- Мястковська, М. О., & Пшембаєв, І. М. (2016). Використання phet-симуляцій для виконання домашніх завдань з молекулярної фізики. *Збірник наукових праць Кам'янець-Подільського національного університету імені Івана Огієнка. Серія педагогічна*, 22, 204–207.
- Подласов, С. О., & Матвійчук, О. В. (2023). Особливості проведення лабораторних робіт з фізики в технічному університеті під час дистанційного навчання. *ITLT*, 93 (1), 152–162
- Слободяник, О.В. (2019). Комп'ютерні симуляції при вивченні атомної фізики у закладах загальної середньої освіти. *Наукові записки, Серія: Педагогічні науки*, 179, 228 с. Кривиницький: РВВ ЦДПУ ім. В. Винниченка.
- Федчишин, О., Мохун, С., & Чопик, П. (2022). Методичні основи використання phet-симуляцій у процесі вивчення фізики. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: педагогіка*, 1(1), 16–24. <https://doi.org/10.25128/2415-3605.22.1.2>

13. Федчишин, О., Мохун, С., & Чопик, П. (2023). Віртуальний фізичний експеримент як засіб вдосконалення фахових компетентностей здобувачів освіти в умовах дистанційного навчання. *Фізико-математична освіта*, 38(2), 50–55. <https://doi.org/10.31110/2413-1571-2023-038-2-008>
14. Фізика. Навчальні програми для загальноосвітніх навчальних закладів. Фізика. 10–11 класи. <https://mon.gov.ua/storage/app/media/zagalna%20serednya/programy-10-11-klas/2018-2019/fizika-10-11-avtorskij-kolektiv-pid-kerivnicztvom-lokteva-vm.pdf>

REFERENCES (TRANSLATED AND TRANSLITERATED)

1. Govender, R. (2023). Teaching and learning using virtual labs: Investigating the effects on students' self-regulation. *Cogent Education*, 10(1), 2172308. <https://doi.org/10.1080/2331186X.2023.2172308>
2. Hamed, Gh., Aljanazrah, Ahm. (2020). The Effectiveness of Using Virtual Experiments on Students' Learning in the General Physics Lab. *Journal of Information Technology Education: Research*, 19, 977–996. <https://doi.org/10.28945/4668>
3. Honey, M. A., & Hilton, M. L. (Eds.). National Research Council. (2011). Learning Science Through Computer Games and Simulations. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/13078>. <http://www.ics.uci.edu/~wscacchi/GameLab/Recommended%20Readings/Learning-ScienceGames-2011.pdf>
4. Laboratoriia elektryky: postiyniy strum – virtualna laboratoriia [Laboratory of electricity: direct current - virtual laboratory]. *phet.colorado.edu*. https://phet.colorado.edu/sims/html/circuit-construction-kit-dc-virtual-lab/latest/circuit-construction-kit-dc-virtual-lab_uk.html
5. Chang, K. E., Chen, Y. L., Lin, H. Y., & Sung, Y. T. (2008). Effects of learning support in simulation based physics learning. *Computers & Education*, 51 (4), 1486–1498.
6. Holovko, M. V., Kryzhanovskiy, S. Yu., & Matsiuk, V. M. (2015). Modeliuvannya virtualnogo fizychnogo eksperymentu dlia system dystantsiinoho navchannia v zahalnoosvitnii i vyshchii pedahohichnii shkolakh [Simulation of a virtual physical experiment for distance learning systems in general education and higher pedagogical schools]. *Informatsiini tekhnologii i zasoby navchannia – Information technologies and teaching aids*, 47(3), 36–48 (in Ukrainian).
7. Elektryka ta mahnetyzm. Laboratornyi praktykum: metodychnyi posibnyk dlia orhanizatsii samostiinoi roboty studentiv fizychnykh spetsialnosti [Electricity and magnetism. Laboratory practicum: methodical guide for organizing independent work of students of physical specialties] (2015) / ukl. V. M. Zdeschychts, V. P. Rzhpetskyi. Kryvyi Rih. (in Ukrainian).
8. Interaktyvni modeliuvannya [Interactive simulations]. *phet.colorado.edu*. <https://phet.colorado.edu/uk/simulations/circuit-construction-kit-ac-virtual-lab>
9. Miastkowska, M. O., & Pshembaiev, I. M. (2016). Vykorystannia phet-symulatsii dlia vykonannia domashnykh zavdan z molekularnoi fizyky [Using phet-simulations for doing homework molecular physics]. *Zbirnyk naukovykh prats Kamianets-Podilskoho natsionalnogo universytetu imeni Ivana Ohienka. Seriiia pedahohichna – Collection of scientific works of Kamianets-Podilskiy National University named after Ivan Ohienko. Pedagogical series*, 22, 204–207 (in Ukrainian).
10. Podlasov, S. O., & Matviichuk, O. V. (2023). Osoblyvosti provedennia laboratornykh robot z fizyky v tekhnichnomu universyteti pid chas dystantsiinoho navchannia [Peculiarities of laboratory work in physics at a technical university during distance learning]. *ITLT*, 93 (1), 152–162 (in Ukrainian).
11. Slobodianyuk, O. V. (2019). Kompiuterni symulatsii pry vyvchenni atomnoi fizyky u zakladakh zahalnoi serednoi osvity [Computer simulations in the study of atomic physics in institutions of general secondary education]. *Naukovi zapysky, Seriiia: Pedahohichni nauky*, 179, 228 s. Kropyvnytskyi: RVV TsDPU im. V. Vynychan. (in Ukrainian).
12. Fedchyshyn, O., Mokhun, S., & Chopyk, P. (2022). Metodychni osnovy vykorystannia phet-symulatsii u protsesi vyvchennia fizyky [Methodological bases of using phet-simulations in the process of studying physics]. *Naukovi zapysky Ternopilskoho natsionalnogo pedahohichnogo universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka. Seriiia: pedahohika*, 1(1), 16–24. <https://doi.org/10.25128/2415-3605.22.1.2> (in Ukrainian).
13. Fedchyshyn, O., Mokhun, S., & Chopyk, P. (2023). Virtualnyi fizychnyi eksperyment yak zasib udoskonalennia fakhovykh kompetentnosti zdobuvachiv osvity v umovakh dystantsiinoho navchannia [A virtual physic experiment as a means of improving the professional competencies of students in the conditions of distance education]. *Fizyko-matematychna osvita – Physical and Mathematical Education*, 38(2), 50-55. <https://doi.org/10.31110/2413-1571-2023-038-2-008> (in Ukrainian).
14. Fizyka. Navchalni prohramy dlia zahalnoosvitnikh navchalnykh zakladiv. Fizyka. 10–11 klasy. [Physics. Educational programs for general educational institutions. Physics. 10-11 grades]. <https://mon.gov.ua/storage/app/media/zagalna%20serednya/programy-10-11-klas/2018-2019/fizika-10-11-avtorskij-kolektiv-pid-kerivnicztvom-lokteva-vm.pdf> (in Ukrainian).

