

УДК 378.147.001.76

Застосування комп'ютерних програм-симуляторів для моделювання електричних схем у навчальному процесі

Олександр Мозговий¹, Анатолій Відьмаченко², Валентина Суботіна³,
Олег Пальчик⁴

¹ Національний транспортний університет, кафедра інформаційно-аналітичної діяльності та інформаційної безпеки, м. Київ, Україна
mavimfto@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-0797-8779>

² Національний університет біоресурсів і природокористування України, кафедра фізики; Головна астрономічна обсерваторія НАН України, відділ фізики субзоряних і планетних систем, м. Київ, Україна
avidmachenko@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-0523-5234>

³ Національний транспортний університет, кафедра інформаційно-аналітичної діяльності та інформаційної безпеки, м. Київ, Україна
vsubotina20@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0006-9615-9746>

⁴ Національний транспортний університет, кафедра інформаційно-аналітичної діяльності та інформаційної безпеки, м. Київ, Україна
o_palchik@ukr.net

<https://orcid.org/0000-0003-4486-9819>

Анотація. У статті розглянуті сучасні підходи до моделювання електронних складних об'єктів і систем з використанням комп'ютерних програм-симуляторів. Особлива увага приділена інтеграції новітніх технологій, таких як хмарні симулятори, штучний інтелект, віртуальна та доповнена реальність, які здатні розширити можливості навчального процесу.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, комп'ютерні програми-симулятори, хмарні платформи.

1. Вступ

Випускники вищих навчальних закладів повинні володіти знаннями і навиками основної спеціальності, а також вміти користуватися сучасними інформаційними технологіями, мати здібність до саморозвитку, бути мобільними і конкурентоспроможними на ринку праці та ін.

Розвиток комп'ютерної техніки на початку двадцятого століття створив умови розвитку комп'ютерного моделювання, яке стало невід'ємною частиною навчання та досліджень у галузі електротехніки, електроніки та комп'ютерних наук.

Використання хмарних платформ, штучного інтелекту (AI) та віртуальної реальності (VR) розширює можливості учнів і студентів для навчання. Сучасні програми-симулятори такі як LTspice, KiCad, а також хмарні платформи CircuitLab і Tinkercad спрощують процес моделювання та роблять його більш доступним для учнів, студентів та інженерів. Активно використовуються у навчальному процесі інтерактивні симуляції на платформі PhET [1], моделювання та симуляції для вивчення комп'ютерних мереж [2] тощо.

Використання комп'ютерних програм дає можливість істотно зменшити витрати на облаштування досить дорогих навчальних лабораторій, які потребують дотримання певних технічних умов та обслуговування кваліфікованим персоналом. Створення віртуальної лабораторії не може замінити реальну лабораторію, де студенти вчать складати електричні схеми, працювати з вимірювальною технікою. За відсутності необхідного дорогого радіотехнічного обладнання та в умовах дистанційного навчання дослідження функціонування складних електронних схем доцільно здійснювати саме у віртуальній лабораторії [3 - 5]. Тому розширення використання інформаційних технологій у навчальному процесі є актуальною задачею.

2. Постановка проблеми

Історично комп'ютерне базувалося на аналогових обчислювальних пристроях і стало основним інструментом для дослідження складних об'єктів і систем. Воно ґрунтувалося на аналогії між математичними моделями та електричними колами, що дозволяло вивчати процеси, які описані рівняннями. Однак таке моделювання було: потрібно було вручну збирати та налаштовувати схеми.

З розвитком цифрових технологій традиційні аналогові методи були витіснені комп'ютерними програмами-симуляторами, які дозволяють моделювати електричні схеми швидше та точніше. Наприклад, програми Electronics Workbench та Multisim стали популярними інструментами для навчання та досліджень. Однак ці програми зазнали значних змін через появу хмарних платформ.

Основним та важливим викликом є перехід до новітніх інструментів, таких як LTspice, KiCad, а також хмарних симуляторів CircuitLab та Tinkercad. Вони дозволяють моделювати складні системи, такі як IoT-пристрої, автономні транспортні засоби та smart-мережі, що є актуальним для сучасного навчання та досліджень.

Метою статті є огляд сучасних підходів до моделювання з використанням комп'ютерних програм-симуляторів, які дозволяють учням, студентам та аспірантам швидко і точно досліджувати складні електричні системи.

Запропонований огляд комп'ютерних програм-симуляторів допоможе викладачам вищих навчальних закладів і вчителям шкіл створювати методичні рекомендації при вивченні складних електронних схем і їх аналізу.

3. Основні результати

Сучасне комп'ютерне моделювання базується на створенні віртуальних електричних кіл, які відображають математичні моделі реальних об'єктів. Ці моделі дозволяють досліджувати процеси, які описані рівняннями, спрощувати складані явища, робити висновки про стан реальних систем, передбачити результати і, навіть, є можливість управляти ними.

Математичні моделі поділяють на динамічні і статичні, лінійні чи нелінійні, детерміновані або стохастичні. Вид моделі, яку використовують, залежить від особливостей об'єкта та завдань, що потрібно вирішити [6].

Математичне моделювання має такі етапи: визначення завдання, побудова математичної моделі та її аналіз, перевірка моделі на адекватність та безпосереднє використання моделі до розв'язування поставлених задач.

Розглянемо кілька типів моделей залежно від виду рівнянь, які їх описують. Кожен тип моделі має свої особливості та застосування: алгебраїчні моделі, диференціюючого та моделі інтегруючого типів.

Алгебраїчні моделі описуються лінійними або нелінійними рівняннями. Вони використовуються для моделювання статичних систем, де час не є змінною.

- Лінійні алгебраїчні моделі описуються рівнянням виду: $Ax = F$, де: A – матриця коефіцієнтів, x – вектор невідомих величин, F – вектор заданих величин.

Приклад. Моделювання електричного кола з постійними параметрами (рис.1).

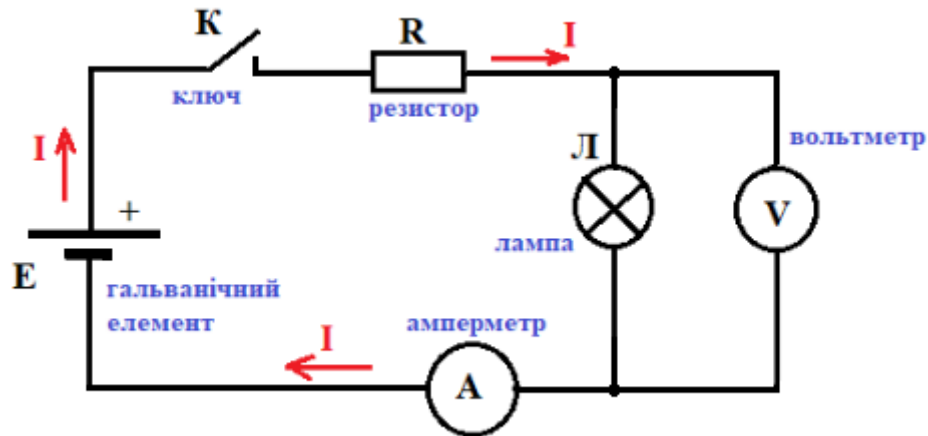


Рис. 1. Лінійна електрична модель з гальванічним елементом, резистором, лампочкою і приладами для вимірювання струму та напруги [7]

- Нелінійні алгебраїчні моделі описуються нелінійними рівняннями, наприклад: $f(x) = 0$, де $f(x)$ – нелінійна функція.

Приклад. Моделювання діодів або транзисторів, де залежність струму від напруги нелінійна і може бути представлена вольт-амперною характеристикою. Така характеристика, як правило, зображується у вигляді графіка, в якому напруга відкладається вздовж осі абсцис, а струм – вздовж осі ординат (рис.2).

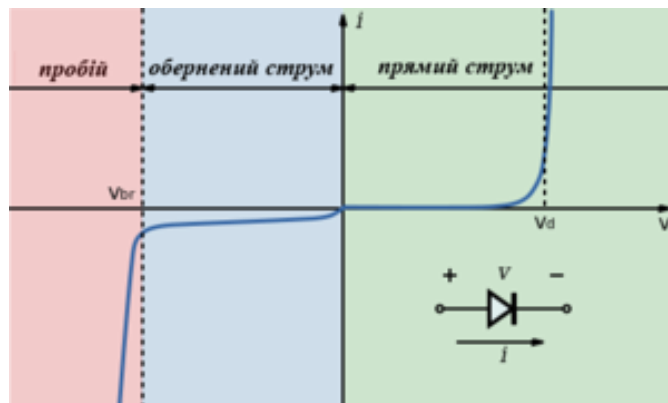


Рис. 2. Вольт-амперна характеристика діода (нелінійна модель) [8]

Диференціальні моделі описуються диференціальними рівняннями, які враховують зміну величин у часі [9]. Вони використовуються для моделювання динамічних систем.

- Лінійні диференціальні моделі описуються рівнянням виду: $\frac{dx}{dt} = Ax + F(t)$, де: x — вектор стану системи, A — матриця коефіцієнтів, F — вектор зовнішніх впливів.

Приклад. Моделювання RC-кола. Напруга на конденсаторі змінюється з часом. Коло називається диференціюючого типу якщо вхідний сигнал (V_{in}) подається на конденсатор, а вихідний (V_{out}) знімається з резистора (рис. 3). Напруга на виході (резисторі), а значить і пропорційний цій напрузі струм через резистор є функцією напруги, яка прикладена до конденсатора.

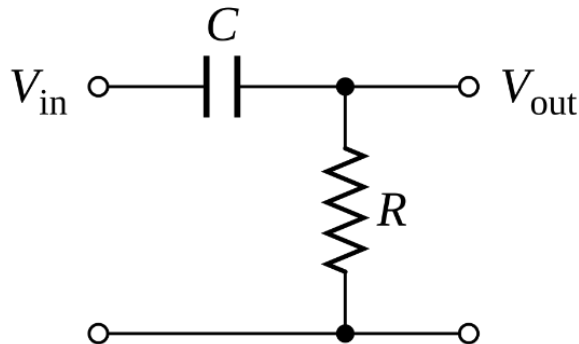


Рис. 3. RC-коло, приклад диференціюючого типу [10]

Якщо вхідний сигнал (V_{in}) подається на резистор, а вихідний (V_{out}) знімається з конденсатора (рис. 4), то таке коло називається колом інтегруючого типу. Напруга на виході (конденсаторі) є інтегральною функцією струму заряджання конденсатора. При цьому реакція кола на одиничний вхідний перепад з амплітудою V буде визначатись формулою $V_c(t) = V(1 - e^{-\frac{t}{RC}})$. Для такого аперіодичного процесу постійна часу визначається як $\tau = RC$.

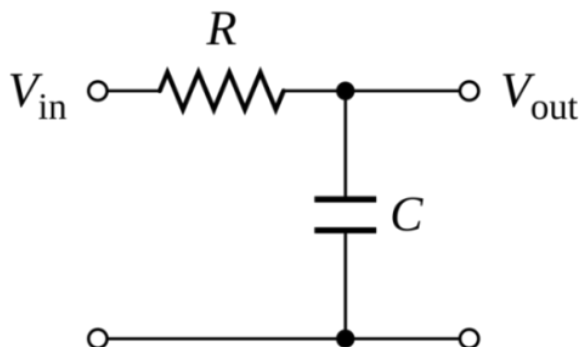


Рис. 4. RC-коло, приклад інтегруючого типу [10]

Нелінійні диференціальні моделі [9] описуються нелінійними диференціальними рівняннями, наприклад, моделювання коливань у нелінійних системах таких як маятник (рис. 5) або автогенератори. Динаміка маятника під впливом гравітації є класичною широко вивченою нелінійною задачею. У роботі [11] показано, що рух маятника можна описати за допомогою безрозмірнісного нелінійного рівняння $\frac{d^2\theta}{dt^2} + \sin(\theta) = 0$, де θ — кут між вертикальним напрямом гравітації і маятником.

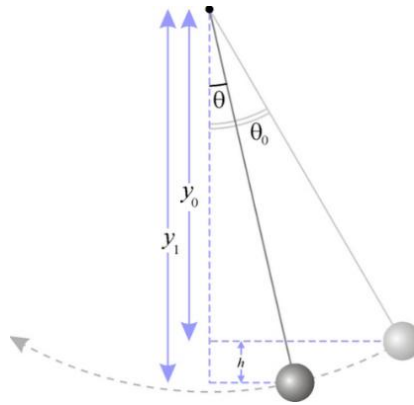


Рис. 5. Нелінійний маятник, приклад нелінійної диференціальної моделі

Сучасні інструменти для моделювання

Використання сучасних програм для комп'ютерного моделювання стає все частішим та ширшим. Ці програми дозволяють швидко та точно створювати віртуальні схеми, які легкі не тільки для сприйняття, а й піддаються для модифікації та покращення. Розглянемо нові інструменти, такі як LTspice [12], KiCad [13] та хмарні платформи CircuitLab і Tinkercad [14].

LTspice – це досить потужне, швидке та безкоштовне програмне забезпечення для симуляції SPICE, створення схем та перегляду осцилограм із покращеннями та моделями для покращення моделювання аналогових кіл. Його графічний інтерфейс створення схем дозволяє досліджувати схеми та отримувати результати моделювання, які можна додатково дослідити за допомогою вбудованого переглядача осцилограм.

Переваги такого програмного забезпечення є безкоштовне завантаження, підтримання моделювання аналогових та цифрових схем (рис. 6). Використовується для проектування та аналізу складних електричних систем.

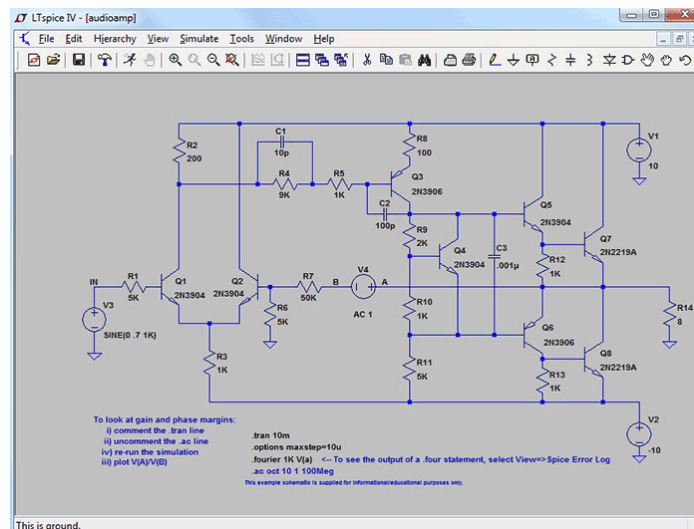


Рис. 6. Інтерфейс LTspice для моделювання електричних схем

Редактор схем KiCad – це відкрита платформа для проектування схем і друкованих плат. Використовується для створення складних електричних схем та їх підготовки до виробництва (рис. 7).

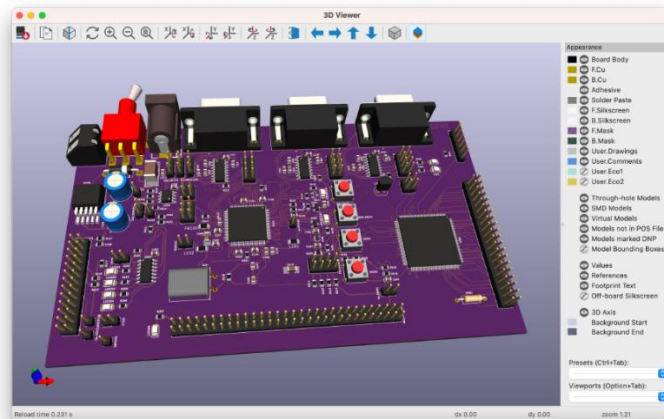


Рис. 7. Інтерфейс KiCad для проектування схем

Даний редактор підтримує все: від найпростіших схем до складних ієрархічних проектів із сотнями аркушів. KiCad дозволяє створювати власні символи або використовувати деякі з тисяч, які знаходяться в офіційній бібліотеці KiCad. Можна перевірити свій проект за допомогою інтегрованого симулятора SPICE та засобу перевірки електричних правил.

Tinkercad простий у використанні, працює у хмарі, підходить для початківців. Дозволяє швидко створювати та тестувати схеми (рис. 8). Використовується для навчання та швидкого прототипування схем.

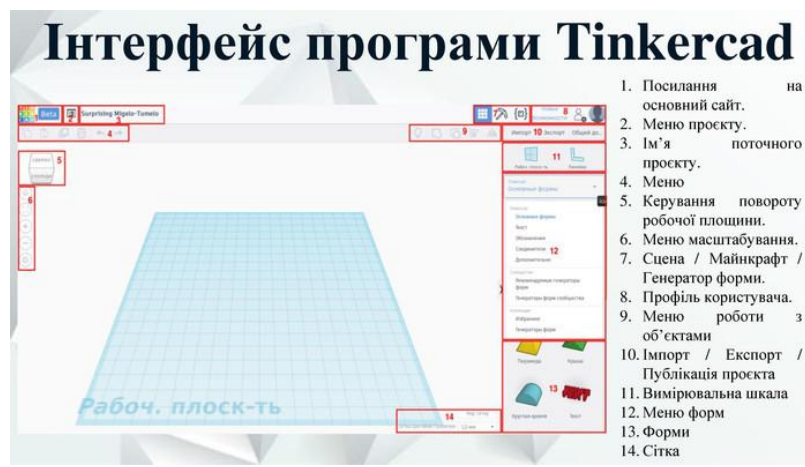


Рис. 8. Інтерфейс Tinkercad для онлайн-модельовання

Інтеграція AI та VR/AR технологій у програмах-симуляторах електричних схем для навчального процесу

У сучасному освітньому процесі програми-симулятори електричних схем активно розвиваються завдяки впровадженню технологій штучного інтелекту та віртуальної реальності. Ця інтеграція відкриває нові можливості для покращення якості навчання та розуміння електричних процесів студентами.

Штучний інтелект у програмах-симуляторах дозволяє реалізувати низку важливих функцій. Наприклад, AI-алгоритми здатні аналізувати схеми, які зібрали студенти, та надавати персоналізовані рекомендації щодо їх оптимізації. Системи машинного навчання також допомагають передбачати потенційні проблеми в схемах та пропонують варіанти їх вирішення, що особливо важливо на етапі навчання.

Віртуальна та доповнена реальність суттєво розширюють можливості традиційних симуляторів. У VR-середовищі студенти можуть "фізично" взаємодіяти з компонентами, спостерігати за роботою схеми в тривимірному просторі та візуалізувати електричні процеси, які неможливо побачити в реальному світі. AR-технології дозволяють накладати віртуальні елементи на реальні схеми, що допомагає краще розуміти принципи їх роботи. У роботі [15] показано п'ять запропонованих концептуальних моделей, що інтегрують адаптивні методики в освітні системи AR/VR. Це дає можливість визначити їх основні компоненти та можливості. Синергія цих технологій створює унікальне навчальне середовище. Наприклад, коли студент працює з віртуальною схемою, AI-система може в реальному часі аналізувати його дії та надавати підказки через VR-інтерфейс. Це створює інтерактивний процес навчання, де теорія одразу підкріплюється практикою.

Важливою перевагою такого підходу є можливість створення адаптивних навчальних сценаріїв. Штучний інтелект відслідковує прогрес кожного студента та автоматично коригує складність завдань, а VR-середовище забезпечує наочну демонстрацію матеріалу в найбільш зрозумілій формі.

Перехід від традиційного аналогового моделювання до комп'ютерних програм-симуляторів значно спростив процес дослідження складних електричних систем. Однак, ранні методи електричного моделювання базувалися на використанні аналогових обчислювальних пристроїв, що вимагали складної ручної настройки та обмежували швидкість розрахунків. Декілька років розвитку технологічної інфраструктури дало змогу знайти декілька напрямів еволюції сучасних технологій.

Ключовим напрямом розвитку сучасної електротехніки є автоматизація процесів комп'ютерного моделювання електричних схем. Використання алгоритмів машинного навчання, хмарних обчислень, квантових симуляцій та інших передових технологій дозволяє значно підвищити ефективність розробки та аналізу електричних систем.

Одним з найперспективніших інструментів є автоматизація на основі штучного інтелекту. Сучасні AI-алгоритми здатні ретельно аналізувати електричні схеми, прогнозувати їх поведінку з похибкою менше відсотка та оптимізувати параметри цих компонентів. До методів застосування AI можна віднести: Генетичні алгоритми – використовуються для автоматичного налаштування параметрів схем, підбору елементів та мінімізації енергоспоживання; Нейронні мережі – здатні аналізувати великі масиви даних, що дозволяє знаходити оптимальні рішення для складних електротехнічних задач; Машинне навчання – використовується для аналізу історичних даних, прогнозування несправностей та покращення точності симуляцій.

Використання віртуальних лабораторій дозволяє зробити навчання більш простим, допомагає студентам швидше та безпечніше освоювати електричне моделювання. А правильно сплановані симуляційні вправи розвивають критичне мислення, здатність приймати рішення, впевненість у своїх силах та розвивають навички взаємодії у роботі студентів та викладача. Програми-симулятори дозволяють моделювати складні системи, наприклад, IoT-пристрої, автономні транспортні засоби та інші складні системи.

Використання хмарних технологій завдяки віддаленому доступу до обчислювальних ресурсів дає можливість працювати зі складними симуляціями без якої-небудь необхідності у потужному апаратному забезпеченні. Перевагами хмарного моделювання є: підвищена швидкість – розподіл обчислювального навантаження між серверами дозволяє значно скоротити час симуляцій; доступність – користувачі можуть запускати моделі з будь-якого пристрою, що підтримує підключення до Інтернету; колаборація – можливість одночасної роботи над проектами кількома дослідниками в реальному часі.

Вершину нових горизонтів у сфері електротехнічного моделювання відкривають квантові комп'ютери (рис. 9), які дають змогу швидко розраховувати складні електромагнітні процеси, що важко піддаються класичним методам аналізу. Основними перевагами квантових симуляцій можна назвати: експоненційне прискорення розрахунків – обробка даних відбувається значно швидше, ніж на традиційних цифрових процесорах; висока точність – квантові алгоритми дозволяють зменшити похибку при симуляції складних систем; моделювання нових матеріалів – можливість прогнозувати електричні характеристики нових матеріалів та напівпровідників.

Як можемо побачити, автоматизація комп'ютерного моделювання електричних схем є важливим напрямом розвитку електротехніки. Використання AI, хмарних технологій, квантових обчислень та інших сучасних методів дозволяє значно підвищити ефективність аналізу та проектування складних електротехнічних систем. Подальший розвиток цієї сфери сприятиме покращенню якості інженерних рішень та скороченню часу розробки електронних пристроїв.

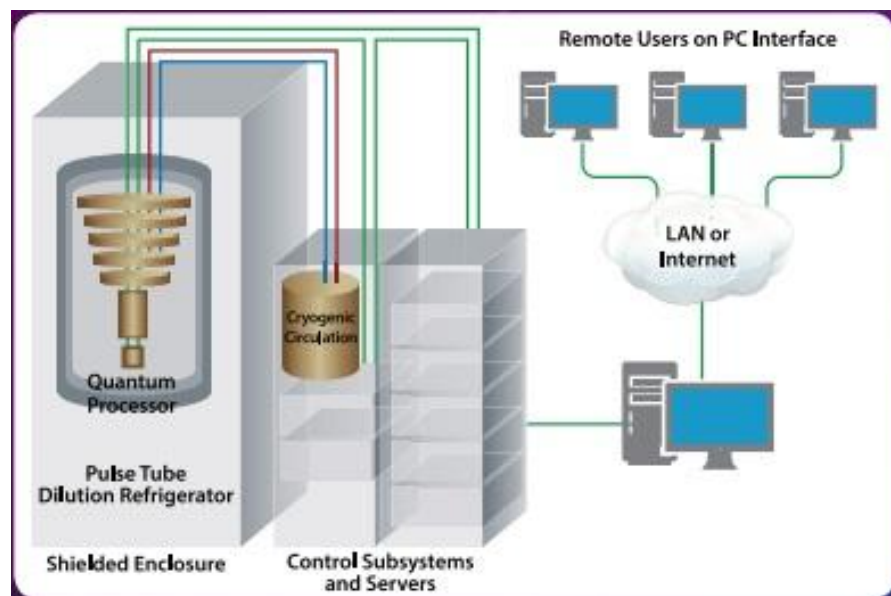


Рис. 9. Будова квантового комп'ютера [16]

Результатами наведеного дослідження підтверджується ефективність використання автоматизованих методів у комп'ютерному моделюванні електричних схем. Інтеграція сучасних технологій дозволяє не лише підвищити точність розрахунків, а й спростує процес навчання студентів як електротехнічних дисциплін, так інших дисциплін, забезпечуючи більш наочне та інтерактивне освоєння матеріалу.

Проте варто зазначити, що впровадження таких технологій у навчальний процес вимагає відповідної підготовки як технічної бази, так і викладацького складу. Необхідно розробляти нові методичні матеріали та підходи до оцінювання знань студентів, враховуючи особливості роботи з AI та VR/AR системами.

Перспективи розвитку цього напрямку включають створення повністю інтегрованих навчальних платформ, де симуляція електричних схем буде лише частиною комплексного підходу до вивчення електроніки. Такі системи зможуть забезпечити більш глибоке розуміння предмету та підготувати студентів до роботи з сучасними технологіями.

Таким чином, інтеграція AI та VR/AR технологій у програми-симулятори електричних схем значно розширює можливості навчального процесу, роблячи його

більш ефективним та захоплюючим для студентів. Це важливий крок у розвитку технічної освіти, який відповідає вимогам сучасного цифрового світу.

Висновки. У статті розглянуто сучасні підходи до комп'ютерного моделювання складних об'єктів і систем з використанням комп'ютерних програм-симуляторів: сучасні програми, такі як LTspice, KiCad, а також хмарні платформи CircuitLab, Tinkercad, значно спрощують процес електричного моделювання. Вони дозволяють швидко та точно досліджувати складні системи, такі як IoT-пристрої, автономні транспортні засоби та смарт-мережі; впровадження штучного інтелекту, віртуальної та доповненої реальності у навчальний процес значно підвищує ефективність навчання. Ці технології дозволяють студентам працювати з віртуальними лабораторіями, що робить процес навчання більш інтерактивним та безпечним. Використання AI, хмарних технологій та квантових обчислень дозволяє автоматизувати процеси проектування та оптимізації електричних схем. Це значно скорочує час розробки та підвищує точність результатів; інтеграція сучасних технологій у навчальний процес відкриває нові можливості для підготовки студентів до роботи з інноваційними системами, що включає використання AI для оптимізації схем, VR/AR для створення інтерактивних лабораторій та хмарних платформ і для дистанційного навчання; середовище програми-симулятора є простим і доступним інструмент для проведення експериментальних досліджень широкого класу електричних, електронних схем та схем комп'ютерної схемотехніки; всі прилади зображуються у вигляді, максимально наближеному до реального, тому працювати з ними просто і зручно. Результати моделювання можна вивести на принтер або імпортувати в текстовий або графічний редактор для їх подальшої обробки і створення презентаційних звітів з виконання лабораторних робіт; студент застрахований від випадкового ураження струмом, а прилади не вийдуть з ладу через неправильно зібрану схему. Отже, знімаються всі проблеми, пов'язані з можливістю некоректних дій.

Такий підхід передбачає індивідуалізацію процесу навчання і вихід його за межі звичних учбових лабораторій. За умови доступу до комп'ютера користувач може навчатися в будь-якому місці і у будь-який час, що дає можливість впровадити загальнодоступні програми-симулятори у навчальний процес і дистанційного навчання.

Конфлікт інтересів і етика. Автори заявляють, що не мають конфліктів інтересів. Автори також заявляють про повне дотримання всіх правил етики журнальних досліджень.

Подяки. Автори заявляють про відсутність спеціального фінансування цієї роботи.

Список використаних джерел

1. Використання інтерактивних симуляцій PhET на лекціях. URL: https://62491cfd-b2d0-40e6-b976-32131a41d75c.filesusr.com/ugd/cb7598_a6006bd8e84b4df5a91dafdd49d75636.pdf
2. Козак О.В., Михайлова Л.М., Семенишина І.В. Інструменти моделювання та симуляції для вивчення комп'ютерних мереж: огляд і практичний досвід. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. 2025. № 58. С. 70–79. DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-58-09>
3. Квятковська А.О., Сустретов А.С. Роль програм симуляторів в дистанційному навчанні студентів фахових закладів. *Інноваційна педагогіка*. 2022. Випуск 48. Т.1. С. 201–204. DOI: <https://doi.org/10.32843/2663-6085/2022/48.1.42>
4. Щербань А.А., Петренко І.А. Електротехніка. Лінійні кола : лаборат. практик. Київ: Вид-во НТУ України "КПІ", 2007. 140 с.
5. Гордієнко В.В. Застосування комп'ютерних симуляцій на уроках фізики під час дистанційного навчання. 2022. URL: <https://naurok.com.ua/zastosuvannya-komp-yuternih-simulyaciy-na-urokakh-fiziki-pid-chas-distancijnogo-navchannya>
6. Математична модель. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Математична_модель
7. Фізика – задачі. URL: https://driverivan.blogspot.com/2021/04/blog-post_21.html

8. Вольт-амперна характеристика. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Вольт-амперна_характеристика
9. Нелінійна система. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Нелінійна_система
10. RC-коло. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/RC-коло>
11. Сердюк О.О. Сучасні методи дослідження нелінійних динамічних систем: Посіб. для студ. Краматорськ: ДДМА, 2018. 120 с.
12. LTspice. URL: <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>
13. KiCad EDA. Open Source EDA Suite. URL: <https://www.kicad.org>
14. Tinkercad. Online 3D Design & Circuit Simulator. URL: <https://www.tinkercad.com>
15. Круглик В. Інтеграція технологій доповненої та віртуальної реальності з адаптивними системами навчання: аналіз концептуальних моделей. *Освітологічний дискурс*. 2023. Том 43, № 4. С. 69 – 82. DOI: <https://doi.org/10.28925/2312-5829.2023.44>
16. Квантові комп'ютери: мрія чи реальність? URL: <https://phm.cuspu.edu.ua/nauka/naukovo-populiarni-publikatsii/1026-kvantovi-kompyutery-mriya-chy-realnist.html>

UDC 378.147.001.76

Application of computer programs-simulation for modeling electrical circuits in the educational process

Oleksandr Mozghovyi, Anatoliy Vidmachenko, Valentyna Subotina, Oleg Palchik

Abstract. The article deals with modern approaches to modeling of electronic complex objects and systems using computer simulation programs. Particular attention is paid to the integration of the latest technologies, such as cloud simulators, artificial intelligence, virtual and augmented reality, which can expand the possibilities of the educational process.

Keywords: computer modeling, computer simulation programs, cloud platforms.

References

1. *The use of PhET interactive simulations in lectures.* [in Ukrainian]. https://62491cfd-b2d0-40e6-b976-32131a41d75c.filesusr.com/ugd/cb7598_a6006bd8e84b4df5a91dafdd49d75636.pdf
2. Kozak, O.V., Mykhaylova, L.M., Semenyshyna, I.V. (2025). *Modeling and simulation tools for studying computer networks: review and practical experiences*, Computer-integrated technologies: education, science, production, **58**, 70–79. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-58-09>
3. Kvyatkovskaya, A.O., Sustretov, A.S. (2022). *The role of simulation programs in distance learning of students of professional institutions*, Innovative pedagogy, **48** (1), 201–204. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32843/2663-6085/2022/48.1.42>
4. Shcherba, A.A., Petrenko, I.A. (2007). *Electrical engineering. Linear circuits: laboratory practice*, NTUU “KPI”, Kyiv. [in Ukrainian]
5. Gordienko, V.V. (2022). *Application of computer simulations in physics lessons during distance learning.* [in Ukrainian]. <https://naurok.com.ua/zastosuvannya-komp-yuternih-simulyaciy-na-urokakh-fiziki-pid-chas-distanciynogo-navchannya-292037.html>
6. *Mathematical model.* [in Ukrainian]. https://uk.wikipedia.org/wiki/Математична_модель
7. *Physics - problems.* [in Ukrainian]. https://driverivan.blogspot.com/2021/04/blog-post_21.html
8. *Volt-ampere characteristic.* [in Ukrainian]. https://uk.wikipedia.org/wiki/Вольт-амперна_характеристика
9. *Nonlinear system.* [in Ukrainian]. https://uk.wikipedia.org/wiki/Нелінійна_система
10. *RC-circuit.* [in Ukrainian]. <https://uk.wikipedia.org/wiki/RC-коло>
11. Serdyuk, O.O. (2018). *Modern methods of studying nonlinear dynamic systems: Study guide for students*, DGMA, Kramatorsk. [in Ukrainian]
12. *LTspice.* <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>
13. *KiCad EDA*, Open Source EDA Suite. <https://www.kicad.org>
14. *Tinkercad. Online 3D Design & Circuit Simulator.* <https://www.tinkercad.com>
15. Kruglyk, V. (2023). *Integration of augmented and virtual reality technologies with adaptive learning systems: analysis of conceptual models*, *Educological discourse*, **43** (4), 69–82. <https://doi.org/10.28925/2312-5829.2023.44>

16. *Quantum computers: a dream or a reality?* <https://phm.cuspu.edu.ua/nauka/naukovo-populiarni-publikatsii/1026-kvantovi-kompyutery-mriya-chy-realnist.html>

Про авторів / About the authors

Олександр Мозговий, кандидат технічних наук, доцент, кафедра інформаційно-аналітичної діяльності та інформаційної безпеки, Національний транспортний університет, вул. М. Бойчука, 42, м. Київ, 01103, Україна;

Oleksandr Mozghovyi, Candidate of Technical Science, Associate Professor, Department of Information and Analytical Activities and Information Security, National Transport University, 42, M. Boychuk str., Kyiv 01103, Ukraine;

Анатолій Відьмаченко, доктор фізико-математичних наук, професор, академік АН ВШ України, професор кафедри фізики Національного університету біоресурсів і природокористування України, головний науковий співробітник відділу фізики субзоряних і планетних систем Головної астрономічної обсерваторії НАН України; вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041, Україна;

Anatoliy Vidmachenko, Doctor of Science in Physics and Mathematics, Professor, Academician of the Academy of Sciences of the Higher School of Ukraine, Professor of the Department of Physics of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Chief Researcher of the Department of Physics of Substellar and Planetary Systems of the Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, 15 Heroiv Oborony Str., Kyiv, 03041, Ukraine;

Валентина Суботіна, старший викладач, кафедра інформаційно-аналітичної діяльності та інформаційної безпеки, Національний транспортний університет, вул. М. Бойчука, 42, м. Київ, 01103, Україна;

Valentyna Subotina, Senior Teacher, Department of Information and Analytical Activities and Information Security, National Transport University, 42, M. Boychuk str., Kyiv 01103, Ukraine;

Олег Пальчик, старший викладач, кафедра інформаційно-аналітичної діяльності та інформаційної безпеки, Національний транспортний університет, вул. М. Бойчука, 42, м. Київ, 01103, Україна;

Oleg Palchik, Senior Teacher, Department of Information and Analytical Activities and Information Security, National Transport University, 42, M. Boychuk str., Kyiv 01103, Ukraine.

Отримано / Received 13.08.2025

Прийнято до друку / Accepted 23.10.2025

Опубліковано / Published 26.11.2025