

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2026-64-09>

УДК 004.31:378.147

Головін Микола Борисович, к. ф.-м.н., доцент

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

Головіна Ніна Анатоліївна, к. ф.-м.н., доцент

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

Волинський національний університет імені Лесі Українки, м. Луцьк, Україна

ПРОЕКТНА НАВЧАЛЬНА ДІЯЛЬНІСТЬ НА ПРИКЛАДІ СТВОРЕННЯ СХЕМИ СУМАТОРА МІКРОПРОЦЕСОРА В СЕРЕДОВИЩІ LOGISIM

Головін М. Б., Головіна Н. А. Проектна навчальна діяльність на прикладі створення схеми суматора мікропроцесора в середовищі Logisim. У статті представлена навчальна проектна діяльність, як інтегративний інструмент для ефективного формування фахових компетентностей майбутніх бакалаврів інженерів. У середовищі графічного моделювання Logisim запропоновано стереотипну дорожню карту навчального проєкту, представленого у вигляді цілісного ланцюга взаємопов'язаних мініпроєктів, на прикладі поетапної розробки схеми суматора мікропроцесора. У процесі дослідження наочно проілюстровано фундаментальні інженерні принципи: модульність, структурну ієрархічність та масштабованість цифрових схем за допомогою методу послідовного каскадування від базового напівсуматора до багаторозрядного суматора. Демонструються засоби інженерної абстракції, що дозволяють приховувати складність апаратних рішень за рахунок переходу від деталізованого вентильного рівня до компактної блокової репрезентації компонентів. Особливу увагу приділено психолого-педагогічному аспекту. Показано, що специфіка проєктних дій тісно пов'язана з особливостями людського мислення. Розкрито механізми подолання обмежень робочої пам'яті (числа Міллера) через порційність і формування когнітивних абстракцій у довготривалій пам'яті. Описано дві взаємодоповнюючі ментальні стратегії — покрокову низхідну деталізацію та висхідний модульний синтез штучного об'єкта. Автори підкреслюють, що обов'язкова вимога доведення кожного проміжного вузла до повністю працездатного стану є потужним каталізатором когнітивного розвитку студентів. Процес пошуку помилок та інтерактивного налагодження схем забезпечує жорсткий зворотний зв'язок, який безпосередньо тренує причинно-наслідкове, абстрактно-логічне та критичне інженерне мислення, інтегруючи технічні навички у цілісну професійну компетентність.

Ключові слова: проєктна навчальна діяльність; середовище Logisim; суматор мікропроцесора; інженерна абстракція; модульний синтез; робоча пам'ять; критичне мислення.

Holovin M., Holovina N. Project educational activity on the example of creating a microprocessor adder scheme in the Logisim environment. The article presents educational project activities as an integrative tool for the effective formation of professional competencies of future bachelors of engineering. In the Logisim graphical modeling environment, a stereotypical roadmap of an educational project is proposed, presented in the form of a coherent chain of interconnected mini-projects, using the example of the phased development of a microprocessor adder circuit. In the process of research, fundamental engineering principles are clearly illustrated: modularity, structural hierarchy and scalability of digital circuits using the method of sequential cascading from a basic half-adder to a multi-bit adder. Engineering abstraction tools are demonstrated, which allow hiding the complexity of hardware solutions by moving from a detailed gate level to a compact block representation of components. Special attention is paid to the psychological and pedagogical aspect. It is shown that the specificity of project activities is closely related to the characteristics of human thinking. Mechanisms for overcoming the limitations of working memory (Miller's number) through portioning and the formation of cognitive abstractions in long-term memory are revealed. Two complementary mental strategies are described - step-by-step top-down detailing and bottom-up modular synthesis of an artificial object. The authors emphasize that the mandatory requirement of bringing each intermediate node to a fully functional state is a powerful catalyst for students' cognitive development. The process of error detection and interactive debugging of schemes provides a hard feedback loop that directly trains causal, abstract-logical and critical engineering thinking, integrating technical skills into a holistic professional competence.

Keywords: project-based learning; Logisim environment; microprocessor adder; engineering abstraction; modular synthesis; working memory; critical thinking.

Вступ. Постановка наукової проблеми у загальному вигляді.

Сучасний етап розвитку світової та вітчизняної енергетики характеризується стрімким впровадженням концепцій «Розумних мереж» (Smart Grid), відновлюваних джерел енергії (ВЕД), цифрових систем керування (SCADA). Робота всіх цих систем базується на мікропроцесорах, що реалізують відповідне керування системами. Роста потреба в спеціалістах здатних працювати з такими складними комп'ютеризованими системами. Особливої гостроти ця ситуація набуває в Україні, де завдання повоєнного відновлення, модернізації та децентралізації енергетичної інфраструктури вимагають принципово нової генерації інженерних кадрів. Зазначені трансформації висувають нові вимоги до якості підготовки фахівців з відповідних спеціальностей.

Традиційна парадигма вищої інженерної освіти, яка тривалий час базувалася на репродуктивному засвоєнні фундаментальних знань через виконання лабораторних робіт за чітко визначеними інструкціями, наразі демонструє обмеженість. Вона не забезпечує належного рівня гнучкості мислення, здатності до самостійного прийняття рішень у нестандартних виробничих

ситуаціях та швидкої адаптації до динамічного технологічного середовища. Виникає нагальна потреба в розробці та впровадженні інноваційних освітніх технологій, здатних забезпечити перехід від пасивного накопичення інформації до активного формування інтегральних, загальних та фахових компетентностей.

Проектні технології в навчанні у сфері схемотехніки є одним з найбільш ефективних способів подолання розриву між теоретичними знаннями та практичними навичками. Навчальна цінність проектів кратно підсилюється, якщо в ході їх виконання передбачається створення комп'ютерної моделі електронного об'єкту з подальшою можливістю запуску його в роботу. Модельний підхід дозволяє краще розібратись у специфіці роботи об'єктів моделювання. Це особливо цікаво для процесів, які неможливо спостерігати безпосередньо, зокрема, для об'єктів мікроелектроніки. Хорошої ілюстрації проектних технологій та модельного підходу в навчанні можна досягнути виконуючи ці проекти в середовищі Logisim. Цікавим об'єктом моделювання в середовищі Logisim є суматор, адже, цей функціональний вузол схемотехніки є компонентом кожного мікропроцесора.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Представлені вище потреби технологій і процеси адаптації освіти під ці потреби знайшли відбиток в наукових публікаціях. Так у статті [1] розглядається досвід впровадження методу проектного навчання (Project-Based Learning — PBL) під час викладання курсів «Електричні установки» та «Освітлювальні установки» для студентів архітектурних спеціальностей Політехнічного університету Валенсії (UPV). Автори детально описують трансформацію структури курсу, де замість стандартних лабораторних робіт студентам пропонуються наскрізні семестрові проекти. Організаційна модель навчання базується на таких етапах: формування команд та видача ТЗ; самостійному пошуку та аналізу базової інформації; поетапному проектуванні; консультативному супроводі викладача; публічному захисті проекту.

У роботі [2] теж пропонується активна проектна методологія навчання. У статті автори аналізують перехід від лекційної системи до активних методик де студентів стають головними героями свого навчального процесу, сприяючи розвитку як технічних, так і міжособистісних навичок. Описано, як студентські команди розробляли практичні рішення реальних проблем, інтегруючи зміст курсу електротехніки зі знаннями з інших галузей. Результати впровадження нової методології навчання у двох базових курсах електротехнічного профілю показали зростання успішності студентів та підвищення рівня сформованості ринкових інженерних компетентностей.

У роботі [3] подано ментальну карту, що ілюструє поняття проекту, освітнього проекту, проектних технологій, характеристик та класифікації освітнього проекту. Розглянуто етапи реалізації проекту. Деталізовано етап планування, що є фундаментом успішної реалізації будь-якого проекту. Наголошено, що виконання навчального проекту базується на раніше здобутих первинних знаннях, пошуково-дослідницькій роботі. Кінцевий результат проектної діяльності – доповідь з представленням створеного ІТ продукту, що реалізується засобами освоєних інформаційних технологій (текстовий файл, презентація, програмний код, відеоролик, сайт тощо).

Дослідження [4] фокусується на перевагах середовища Logisim, підкреслюючи його гнучкість у створенні ієрархічних блоків, що відповідає сучасним методологіям проектування інтегральних схем (VLSI).

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Існує очевидне протиріччя між об'єктивною потребою ринку праці у спеціалістах з електричної інженерії, які володіють високим рівнем проектно-конструкторської, дослідницької та синергетичної компетентностей, і реальним станом методичного забезпечення інженерних дисциплін в університетах, де досі домінують ізольовані, монопредметні підходи.

Мета дослідження.

Метою статті є науково-методичне обґрунтування застосування проектної діяльності як інтегративного інструменту формування фахових компетентностей майбутніх бакалаврів інженерів.

Завдання.

1. Розробка стереотипної дорожньої карти для навчальних проектів зі створення цифрових схем на прикладі суматора у середовищі Logisim.
2. Ілюстрація проекту, як ланцюга мініпроектів, кожен з яких має свою сенсову вагу.
3. Виокремлення та наочна ілюстрація фундаментальних інженерних принципів: модульності, структурної ієрархічності, масштабованості цифрових схем та ментальних стратегій

роботи зі складними схемами для ілюстрації при впровадженні проєктних технологій у підготовку спеціалістів.

Виклад основного матеріалу дослідження й обґрунтування отриманих результатів дослідження. Позитивним моментом подібних навчальних проєктів зі схемотехніки є можливість надати конкретний сенс тим фрагментам схем, що вибудовуються в процесі еволюції макропроєкту. Розглянемо еволюцію моделі суматора в середовищі Logisim на шляху від напівсуматора до чотирьох розрядного суматора.

Мініпроєкт №1. Модель напівсуматора. Це – модель, що складається з двох логічних елементів XOR (Виключне АБО), що обчислює суму без переносу, та логічного елементу AND (І), що обчислює біт переносу (рис.1а). Цей пристрій може працювати лише як наймолодший розряд у суматорі, оскільки він «не знає», чи був перенос від попередньої операції. Видно, якщо на вхід схеми подати дві одиниці, то на виході відбудеться перенос одиниці на наступний розряд.

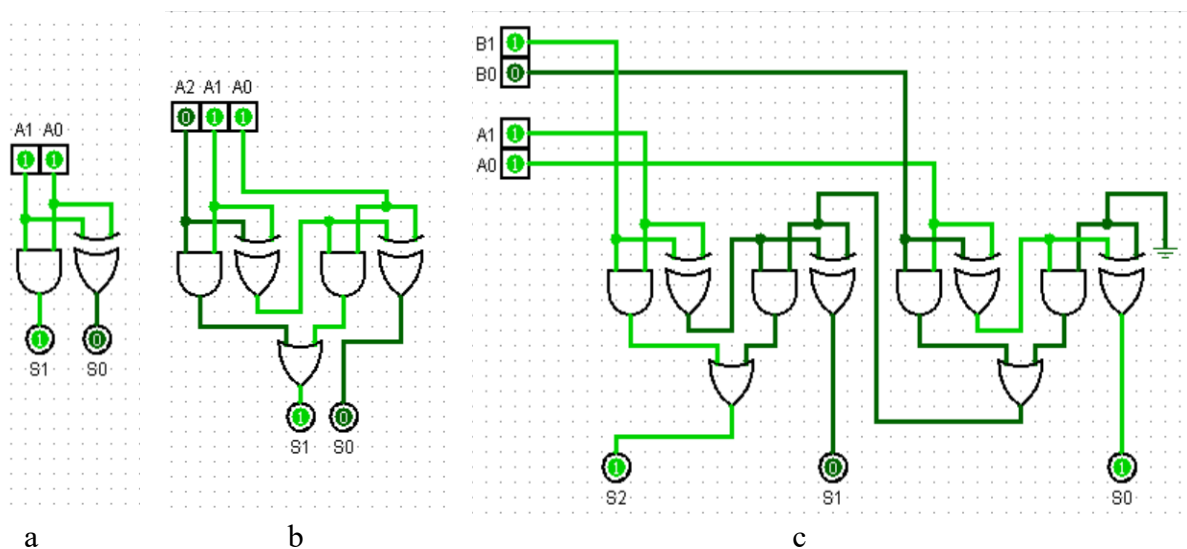


Рис.1 Схеми: а) напівсуматора, б) одно розрядного суматора, с) двох розрядного суматора

Мініпроєкт №2. Однорозрядний суматор. Представлений на рис.1б. Однорозрядний суматор має повну функціональність. Еволюція схеми полягає у додаванні можливості обробки вхідного переносу. Це дозволяє каскадно з'єднувати суматори для створення багаторозрядних пристроїв, наприклад, 4-бітових або 8-бітових суматорів. Еволюція конструкції, за своєю суттю полягає у під'єднанні ще одного півсуматора. Схема однорозрядного суматора це комбінація двох напівсуматорів та одного елемента OR (АБО). В цьому новому пристрої перший напівсуматор додає вхідні числа, а другий додає результат попередньої суми до вхідного переносу. Елемент OR об'єднує сигнали переносу з обох напівсуматорів. Якщо хоча б один із них видає «1», загальний перенос також стає «1».

Мініпроєкт №3. Двохрозрядний суматор. У схемі, зображений на рис.1с, продовжує реалізовуватись принцип модульності в цифровій техніці. Якщо попередня еволюція (від напівсуматора до повного суматора) була спрямована на здатність враховувати перенос, то поточний етап — це перехід від окремого модуля до каскадної системи. Еволюція конструкції від однорозрядного до двоохрозрядного суматора виглядає наступним чином. Однорозрядний суматор це елементарна «цеглинка» схеми. Ця схема є самодостатнім модулем для додавання трьох бітів, тобто двох доданків плюс вхідний перенос. У двоохрозрядному суматорі використаний принцип конвеєризації. Еволюція схеми полягає у каскадному з'єднанні двох таких «цеглинок» - однорозрядних суматорів. Це рішення перетворює розрізнені операції на алгоритм додавання багаторозрядних чисел. У схемі двоохрозрядного суматора два повних однорозрядних суматори, з'єднані послідовно (ланцюжком). Тут реалізується механізм переносу (Carry Ripple). Це ключовий момент еволюції проєкту. Вихід переносу першого суматора (молодшого розряду) фізично підключається до входу переносу другого суматора - старшого розряду. У результаті, тепер схема може обробляти два 2-бітних числа і додавати їх, враховуючи при цьому перенос між розрядами.

Цей підхід є масштабуванням попередньої двохранрядної схеми, адже, щоб отримати 4-розрядний суматор, достатньо просто "пристикувати" два однакові блоки.

Головні особливості еволюції конструкції полягають у наступному. Реалізувалась повторюваність. Більше не потрібно проектувати складну логіку для 2, 4 чи 8 бітів. Проектується один ідеальний модуль (повний суматор), а далі він просто дублюється. Однак, є негативний момент у цьому підході. З'явилася часова затримка — перенос має «пробігти» через весь ланцюжок від наймолодшого розряду до найстаршого. Тому такі схеми називають Ripple Carry Adder — суматор з послідовним переносом. На схемі двохранрядного суматора видно, що вхід переносу першого суматора (наймолодшого розряду) заземлений (підключений до "0"), оскільки там немає попереднього переносу. Це показує, як гнучко можна адаптувати універсальний блок під конкретну позицію в схемі.

Мініпроект №4. Чотирьох розрядний суматор. На схемі рис.2 продовжується еволюція цифрових схем. Перехід від двохранрядного до чотирьохрозрядного суматора — це вже не просто додавання елементів, а перехід до потокового принципу обробки даних. Еволюція конструкції на цьому етапі полягає в переході до модульної архітектури. Якщо на попередніх етапах розбиралась "начинка" суматора, то в мікропроекті чотирьохрозрядного суматора стає очевидним принцип блочно-модульної побудови. Тут проявляється конструктивна ідентичність. Кожен з чотирьох блоків суматора ідентичний за внутрішньою логікою. Еволюція схеми полягає у тиражуванні одного й того ж шаблону для збільшення розрядності обчислень. Також тут проявляється уніфікація. Дизайнеру схеми не потрібно винаходити нову логіку для 4-х бітів; достатньо з'єднати в лінію чотири стандартні повні суматори. Відбувається також і еволюція "ланцюжка переносу" (Ripple Carry). Це критичний аспект конструкції, що стає помітним при масштабуванні. Адже, ще більше проявляється накопичувальна затримка. У 4-розрядному суматорі сигнал переносу має пройти через чотири каскади логічних елементів, перш ніж сформується остаточне значення старшого біта суми). Фізичне з'єднання каскадів полягає в тому, що вихід переносу кожного попереднього суматора стає входом для наступного. Це створення послідовного інформаційного шляху, який фізично простягається через усю схему зліва направо.

Це важливо для комп'ютерної архітектури тому, що тепер можна створити 8, 16, 32 або 64-розрядний суматор, просто додаючи необхідну кількість блоків. Це основа побудови АЛПІ (арифметико-логічного пристрою) будь-якого процесора. Однак, тут проявляється компроміс з швидкодією. Зі зростанням кількості розрядів суматор стає "повільнішим", оскільки сигналу переносу потрібно більше часу, щоб пройти весь ланцюг. Це стимулює інженерів шукати складніші, але швидші методи, наприклад, суматори з прискореним перенесенням (Carry Lookahead Adder).

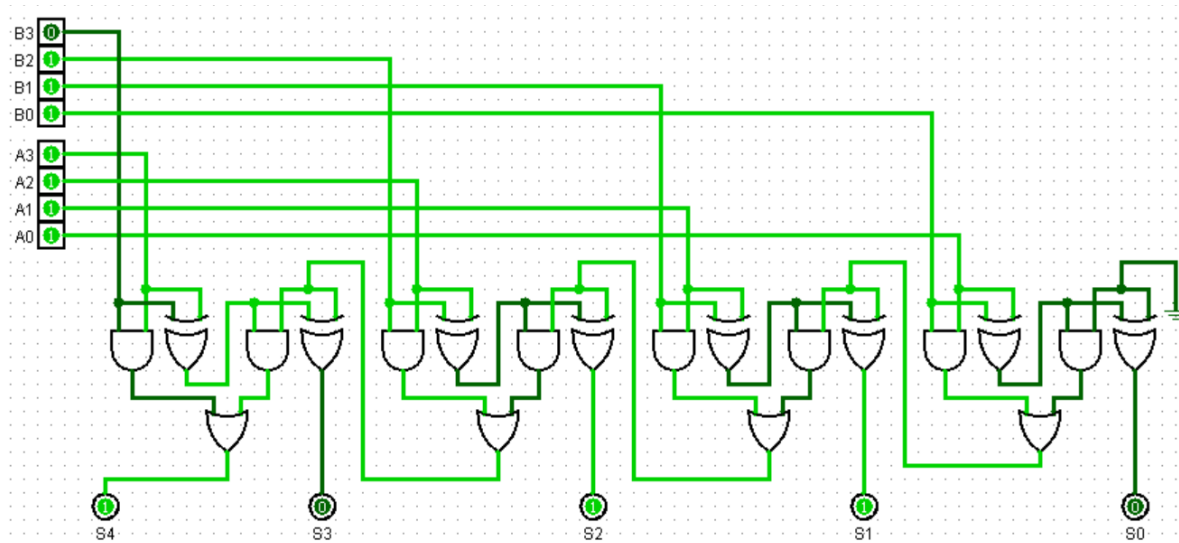


Рис.2 Схема чотирьох розрядного суматора

Деталізована схема на рис.2 - це схема, на якій видимий рівень логічних елементів. Тут демонструється реалізація 4-розрядного суматора «як є», тобто через усі логічні вентиля (AND, OR, XOR).

Таке представлення є технічною документацією «низького рівня». Вона показує, як саме електричний сигнал проходить через кожен окремий логічний вентиль. Позитивна особливість такої схеми в тому, що тут повністю прозорий алгоритм роботи. Ми бачимо, як формується перенос для кожного з чотирьох розрядів. Недоліком такого представлення є те, що така схема дуже громіздка. При проектуванні 32- або 64-розрядних процесорів відобразити всі вентиля на одному аркуші фізично неможливо і нечитабельно для інженера.

Мініпроект №5. Блокова схема чотирьох розрядного суматора. Блокова схема, зображена на рис.3, представляє ту ж схему, що і на рис.2 але з більшим рівнем абстракції. Тут використовуються «чорні ящики» (Black Boxes) для позначення стандартних вузлів. Кожен квадратний блок — це той самий повний однорозрядний суматор, який розглядався раніше, але тепер він представлений у вигляді логічного модуля. Перевагами такої абстракції є краща читабельність схеми. Схема стала компактною. Однак, в такій схемі ми бачимо структуру системи і перестаємо бачити її "фізику". Повторне використання (Reuse) схеми одно розрядного суматора тут проявляється краще. Тут схема одно розрядного суматора не малюється всередині блоку щоразу. На рис.3 просто вказується «тут має бути суматор». При такому представленні покращується масштабованість. Якщо нам знадобиться 8-розрядний суматор, ми просто додамо ще 4 таких блоки в ряд, не перевантажуючи проект деталями. Завершальним висновком представленої еволюції проектів є наступне. Остання зміна позначень, на межі рис.2 та рис.3 відображає основний підхід у сучасній електроніці. Інженер перестає думати про окремі «транзистори» і починає думати блоками. Це дозволяє створювати надскладні сучасні мікропроцесори, де мільйони вентилів приховані за рівнем ієрархічних блоків, подібних до тих, що представлені на рис.3.

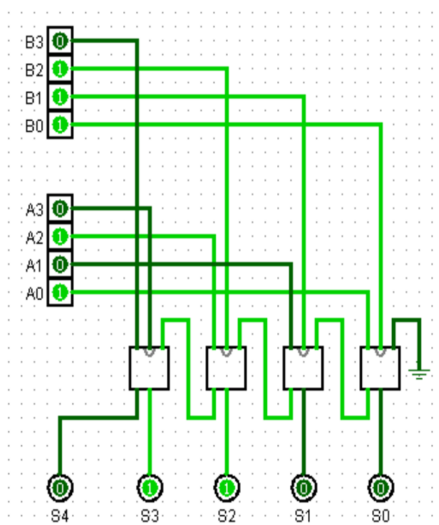


Рис.3 Блокова схема чотирьох розрядного суматора

Якщо навчання реалізоване як послідовність проектів. То наступним проектом може стати проект, в якому відбувається подолання часової затримки, що зв'язана з послідовним переносом сигналу.

Окремої уваги заслуговує інтерактивність середовища Logisim, яка змінює підхід до діагностики помилок. На відміну від статичних креслень, динамічна симуляція дозволяє студентам у режимі реального часу відстежувати проходження логічних сигналів через кожен вентиль за допомогою підсвічування ліній зв'язку. Така візуалізація стану «0» (низький рівень) та «1» (високий рівень) перетворює процес налагодження схеми на інтуїтивно зрозуміле дослідження. Студенти можуть миттєво локалізувати розриви з'єднань, конфлікти сигналів або логічні помилки в таблицях істинності. Цей зворотний зв'язок є критично важливим для формування навичок debugging (налагодження), оскільки дозволяє самостійно виявляти причини невідповідності теоретичних розрахунків реальній поведінці схеми, стимулюючи критичне мислення та глибше розуміння принципу дії кожного елемента.

Процес конструювання багаторозрядного суматора в середовищі Logisim, що реалізується в межах проектної діяльності, зокрема, перехід від базових логічних вентилів до ієрархічного блокового представлення, має глибоке когнітивне підґрунтя. З психолого-педагогічної точки зору, така еволюція візуального та структурного подання схеми є відображенням процесу формування складної когнітивної схеми (паттерна) об'єкта проектних дій у свідомості здобувача освіти.

Необхідно відмітити важливий момент проектної діяльності. Специфіка проектної діяльності зумовлена особливостями людського мислення, зокрема, в першу чергу, обмеженим об'ємом робочої (короткочасної) пам'яті людини. Поле уваги та свідомість людини напряму залежить від параметрів цієї робочої пам'яті. Порція, компонентів мислення, що одномоментно усвідомлюється і відповідно знаходиться в полі уваги не може перевищувати 7 ± 2 компонента мислення (число Міллера). Саме ця обмеженість робить ментальну і матеріалізовану діяльність стосовно об'єкту порційною. У свою чергу, порції формують еволюційну етапність в реалізації проекту. Здатність мови позначати одним абстрактним поняттям групу логічно зв'язаних компонентів, що утворюють логічно завершену цілісність, дозволяє звільняти поле уваги людини і відповідно включити в неї додаткові компоненти об'єкта проектних дій. Нова синтетична цілісність в полі уваги тепер може бути доповнена додатковими компонентами. Синтетичні ментальні дії в полі уваги (в свідомості), що генерують абстрактне поняття, виводять ментальні дії з площини конкретики. Ментальні дії, що направлені абстракціями «вверх», формують ієрархічне дерево абстрактних понять - ієрархічну структуру уявлень про об'єкт проектних дій у декларативній довготривалій пам'яті. Понятійне ментальне дерево, що має абстрактно логічний вимір, може в зв'язаному вигляді зберігати десятки тисяч понять в голові людини. Саме це дерево абстрактно логічних уявлень про об'єкт підтримує матеріалізовані дії зі створення проекту, коли виконавець проекту починає маніпулювати синтетичними компонентами об'єкту проектних дій. Специфіка таких ментальних і матеріалістичних дій, на прикладі програмування детально розглянуті в роботі [5]. В цілому реалізація моделі в ході виконання проекту підкоряється двом ментальним стратегіям. При плануванні матеріалізованих дій застосовується метод «покрокової низхідної деталізації». Після досягнення рівня найбільшої деталізації і конкретизації вступає в дію друга стратегія модульного покрокового синтезу штучного об'єкту [6].

Важливим моментом проектної роботи стосовно складних об'єктів електроніки є необхідність доведення до працездатного стану того пристрою який фіналізує логічно завершений етап проекту. Тому проектна робота стосовно складних об'єктів електроніки потужно розвиває не тільки абстрактно логічне мислення, а причинно-наслідкове та вимагає високої критичності мислення. Особливості такого способу мислення в царині програмування розглянуті в роботі [7].

Висновки та перспективи подальших досліджень

У середовищі Logisim на прикладі суматора запропоновано стереотипну дорожню карту для навчальних проектів зі створення цифрових схем. Здійснено ілюстрацію проекту, як ланцюга мініпроектів, кожен з яких має свою сенсову вагу. Аналізуючи приклад проекту щодо еволюції суматорів, можна виділити ключові етапи розвитку цифрових схем, які демонструють фундаментальні принципи інженерного проектування.

- В еволюції проекту проявився принцип ієрархічності та модульності розвитку цифрових схем. Показано еволюційний шлях, що пройшов проект від базового напівсуматора, що обробляє два біти без переносу, до однорозрядного суматора, здатного враховувати вхідний перенос, і далі до повного багаторозрядного суматора, який може додавати багато розрядні числа. Це дозволило створити з однорозрядного суматора універсальну «цеглинку» для побудови складних систем будь-якої розрядності.

- У процесі виконання проекту проявився принцип масштабованості (каскадування) схем - перехід від однорозрядного суматора, універсальної «цеглинки» проекту, до двохранового, а згодом і до чотирьоххранового суматора. Це проілюструвало метод послідовного каскадування та дозволило легко збільшувати розрядність обчислень, просто дублюючи ідентичні функціональні блоки. Зазначено шляхи оптимізації продуктивності каскадних схем.

- Продемонстровано засоби інженерної абстракції, які є ключовим інструментом, що робить складні системи читабельними та придатними для розробки. Еволюція позначень від деталізованої вентильної схеми до блокової репрезентації показує перехід від фізичного розуміння механізму взаємодії окремих логічних елементів до архітектурного проектування.

- Показано, що проектна діяльність у сфері конструювання цифрових електронних систем є не лише технічним, а й глибоко когнітивним процесом, який природним чином еволюціонує разом

із розвитком структури мислення здобувача освіти. Подолання фундаментальних обмежень короткочасної пам'яті відбувається через механізм порційності та утворення абстракцій: студенти вчаться групувати розрізнені базові елементи у логічно завершені функціональні макро-блоки. Це розвантажує поле уваги та дозволяє вибудувати в довготривалій пам'яті стійке ієрархічне дерево знань.

- Успішна реалізація апаратних проектів вимагає циклічної взаємодії двох ключових ментальних стратегій: низхідної деталізації на етапі планування (розуміння того, як велика система розбивається на елементарні логічні вентиля); висхідного модульного синтезу на етапі реалізації (поступова збірка складної архітектури з перевірених базових вузлів).

- Обов'язкова умова апаратного проектування — доведення кожного проміжного модуля до повністю працездатного стану — виступає найпотужнішим каталізатором когнітивного розвитку. Процес пошуку помилок та налагодження схем трансформує теоретичні моделі у площину матеріалізованих дій, забезпечуючи жорсткий зворотний зв'язок, який безпосередньо тренує причинно-наслідкове, абстрактно-логічне та критичне інженерне мислення. У підсумку, такий інтегрований підхід формує не просто набір технічних навичок, а цілісну, здатну до масштабування професійну компетентність.

Список бібліографічного опису

1. Cabanes A. N., Villa R., Giménez V. Project-based learning used for teaching electrical installations and lighting installations in architecture. J. Ind. Eng. Manage. 2011. No. 4(1),. P. 123–145. URL: <https://www.jiem.org/index.php/jiem/article/view/291/112>.
2. Project-Based learning and design thinking applied to the improvement of teaching and learning in electrical engineering. / J. F. Araujo et al. Project-Based learn. des. thinking appl. improvement teaching learn. elect. eng. 2026. Vol. 21. P. 108–118. URL: <https://doi.org/10.1109/RITA.2026.3669297>.
3. До питання організації та проведення навчальної практики «Освітні проектні технології» / Н. Головіна та ін. Фізика та освітні технології. 2025. № 1. С. 10–19. URL: <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-2>.
4. Burch C. Logisim: a graphical system for logic circuit design and simulation. Journal on educational resources in computing (JERIC). 2002. Vol. 2, no. 1. P. 5–16. URL: <https://doi.org/10.1145/545161.545162>.
5. Holovina N., Holovin M. Modeling of physical phenomena as a methodological means of forming a knowledge structure in physics and programming. ScienceRise: pedagogical education. 2021. No. 4 (43). P. 18–25. URL: https://journals.uran.ua/sr_edu/article/view/237974/236789.
6. Kaeslin H. Top-Down digital VLSI design: from architectures to gate-level circuits and fpgas. Morgan Kaufmann, 2014. 598 p.
7. Головін М., Головіна Н. Механізми критичного мислення та навчання фізики і програмування. Фізика та освітні технології. 2022. № 1. С. 15–26. URL: <https://evnuir.vnu.edu.ua/bitstream/123456789/21710/1/Critical%20thinking.pdf>.

References

1. Cabanes A. N., Villa R., Giménez V. Project-based learning used for teaching electrical installations and lighting installations in architecture. J. Ind. Eng. Manage. 2011. No. 4(1),. P. 123–145. URL: <https://www.jiem.org/index.php/jiem/article/view/291/112>.
2. Project-Based learning and design thinking applied to the improvement of teaching and learning in electrical engineering. / J. F. Araujo et al. Project-Based learn. des. thinking appl. improvement teaching learn. elect. eng. 2026. Vol. 21. P. 108–118. URL: <https://doi.org/10.1109/RITA.2026.3669297>.
3. To the question of organizing and conducting educational practice "Educational project technologies" / N. Holovina et al. Physics and educational technologies. 2025. No. 1. P. 10–19. URL: <https://doi.org/10.32782/pet-2025-1-2>.
4. Burch C. Logisim: a graphical system for logic circuit design and simulation. Journal on educational resources in computing (JERIC). 2002. Vol. 2, no. 1. P. 5–16. URL: <https://doi.org/10.1145/545161.545162>.
5. Holovina N., Holovin M. Modeling of physical phenomena as a methodological means of forming a knowledge structure in physics and programming. ScienceRise: pedagogical education. 2021. No. 4 (43). P. 18–25. URL: https://journals.uran.ua/sr_edu/article/view/237974/236789.
6. Kaeslin H. Top-Down digital VLSI design: from architectures to gate-level circuits and fpgas. Morgan Kaufmann, 2014. 598 p.
7. Holovin M., Holovina N. Mechanisms of critical thinking and teaching physics and programming. Physics and educational technologies. 2022. No. 1. P. 15–26. URL: <https://evnuir.vnu.edu.ua/bitstream/123456789/21710/1/Critical%20thinking.pdf>.

Історія статті:

Отримано: 29.05.2026 Доопрацьовано: 27.08.2026 Прийнято до друку: 23.09.2026 Опубліковано: 29.09.2026