



УДК 378.147:004.42:681.5

EDUCATIONAL SIGNIFICANCE OF HARDWARE-AND-SOFTWARE SIMULATORS IN INDUSTRIAL AUTOMATION TRAINING

ОСВІТНЄ ЗНАЧЕННЯ АПАРАТНО-ПРОГРАМНИХ ТРЕНАЖЕРІВ ПРИ ПІДГОТОВЦІ СПЕЦІАЛІСТІВ У ГАЛУЗІ ПРОМИСЛОВОЇ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Tarasevich I.G. / Тарасевич І.Г.

с.т.с., as.prof. / к.т.н., доц.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3249-619X>

Foris S.M. / Форис С.М.

с.т.с., as.prof. / к.т.н., доц.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7104-640X>

Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, Science avenue, 4, 49600

Український державний університет науки і технологій, Дніпро, пр. Науки, 4, 49600

Harmash D.M. / Гармаш Д.М.

master / магістр

Анотація. В роботі розглядається освітнє значення апаратно-програмних тренажерів при підготовці фахівців у галузі промислової автоматизації в умовах розвитку багаторівневих автоматизованих систем керування виробничими процесами. Показано, що ключову роль у створенні та експлуатації таких тренажерів відіграє програмне забезпечення, яке включає операційні системи, системи програмування та прикладні програмні засоби.

Підкреслюється залежність якості програмного забезпечення від рівня професійної підготовки фахівців у галузі автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій і робототехніки. Розглянуто вимоги до освітніх програм підготовки бакалаврів і магістрів, які передбачають опанування широкого спектра засобів програмування – від машинних команд і асемблера до мов високого рівня та спеціалізованих комп'ютерно-інтегрованих середовищ. Зазначено, що недостатня структурованість навчальних планів ускладнює формування пріоритетів професійної підготовки студентів.

Окрему увагу приділено впливу людського фактора як однієї з визначальних причин порушення безпечної експлуатації технологічних установок та виникнення аварійних ситуацій, що зумовлено недостатнім рівнем відпрацювання позаштатних режимів роботи автоматизованих систем на моделях і тренажерах. Обґрунтовано доцільність застосування апаратно-програмних тренажерів як ефективного засобу підвищення рівня підготовки операторів АСУ ТП і формування у них стійких практичних навичок контролю та оперативного керування технологічним процесом у режимі реального часу.

Представлено розробку програмного тренажера автоматизованого електропривода постійного струму на базі Matlab/Simulink, OPC-технологій та Simple-SCADA системи, показана організація обміну даними між цими компонентами. Сформульовано вимоги до функціональних можливостей тренажерних комплексів, їх структури та режимів роботи з метою навчання фахівців роботі з промисловими SCADA-системами. Зроблено висновок, що використання подібних засобів програмного моделювання сприяє формуванню професійних компетентностей і розвитку професійної самостійності майбутніх спеціалістів у галузі промислової автоматизації.

Ключові слова: промислова автоматизація, програмне забезпечення, програмні тренажери, SCADA-системи, підготовка фахівців, комп'ютерно-інтегровані технології, моделювання, Matlab/Simulink, Simple-SCADA, OPC-технології



Вступ.

Сучасні системи промислової автоматизації характеризуються високим рівнем складності, інтеграцією програмних, апаратних і мережевих компонентів, а також підвищеними вимогами до безпеки та надійності. У зв'язку з цим традиційні підходи до підготовки інженерів з автоматизації та операторів автоматичних систем керування (АСК), що базуються виключно на теоретичному навчанні або роботі з реальним обладнанням, виявляються недостатніми. У наукових та прикладних дослідженнях все більшого поширення набувають програмні та апаратно-програмні тренажери, які дозволяють моделювати поведінку об'єктів та систем керування в реальному або квазіреальному часі [1–3].

У літературі зазначається, що використання тренажерів у навчальному процесі забезпечує безпечне середовище для експериментування, скорочує витрати на експлуатацію обладнання та сприяє формуванню практичних навичок роботи з програмованими логічними контролерами (ПЛК), розподіленими системами керування (Distributed Control System), SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) та HMI-системами (HMI – Human-Machine Interface) ще до початку роботи на реальних об'єктах [3–5].

Аналіз джерел дозволяє виділити декілька основних класів тренажерів, що використовуються при підготовці спеціалістів з автоматизації:

1. *Програмні симулятори* технологічних процесів, які реалізують математичні моделі об'єктів керування та застосовуються для вивчення динаміки процесів, налаштування регуляторів і перевірки алгоритмів керування [6].

2. *Тренажери для підготовки операторів (Operator Training Simulators – OTS)*, що поєднують модель процесу, логіку системи керування та операторський інтерфейс (SCADA/HMI), широко застосовуються для підготовки та підвищення кваліфікації операторів АСУ ТП [7].

3. *Апаратно-програмні тренажери типу Hardware-in-the-Loop (HIL)*, у яких реальні контролери або їх окремі модулі взаємодіють із віртуальною моделлю об'єкта керування, що дозволяє досягти високого рівня реалізму [8];



4. Програмні тренажери віртуального пусконаладження (*Virtual Commissioning*) та цифрові двійники, які використовуються як у промисловості, так і в освітніх програмах для перевірки логіки керування та навчання персоналу до фізичного пуску установки [1].

У роботах [1, 6] підкреслюється, що інтеграція таких тренажерів у навчальні дисципліни з автоматизації дозволяє сформувати у студентів системне бачення об'єкта керування та взаємодії його складових.

Особливу увагу в сучасних дослідженнях приділено застосуванню тренажерів для відпрацювання позаштатних та аварійних режимів роботи. Більшість аварійних ситуацій (відмова датчиків, залипання виконавчих механізмів, порушення зв'язку, помилки оператора) або не можуть бути відтворені на реальному обладнанні з міркувань безпеки, або призводять до значних матеріальних втрат [4, 7–8].

OTS та HIL-тренажери дозволяють цілеспрямовано моделювати такі сценарії, аналізувати дії оператора та оцінювати правильність прийняття рішень у стресових умовах. У публікаціях ABB та Siemens зазначається, що систематичне використання OTS у навчанні операторів значно знижує ймовірність помилок, пов'язаних з людським фактором, під час реальної експлуатації технологічних установок [7, 9].

Університетські та індустріальні кейси підтверджують ефективність впровадження тренажерів у освітні програми з автоматизації. Зокрема, програма Siemens Cooperates with Education (SCE) передбачає використання симуляторів і віртуальних лабораторій для навчання студентів роботі з ПЛК, SCADA та цифровими двійниками [9]. Аналогічні рішення пропонуються компанією ABB у рамках навчальних версій системи 800xA Simulator [7].

Дослідження [1, 10] демонструють, що застосування Virtual Commissioning у навчальних курсах дозволяє не лише підвищити рівень практичної підготовки студентів, але й скоротити час адаптації випускників до реальних виробничих умов.

Аналіз наукових публікацій та індустріальних джерел свідчить, що



програмні та апаратно-програмні тренажери є ефективним інструментом підготовки фахівців у галузі промислової автоматизації та операторів АСУ ТП. Їх застосування є особливо актуальним для відпрацювання позаштатних ситуацій, що неможливо або небезпечно реалізувати на реальних об'єктах. Інтеграція таких тренажерів у навчальний процес є актуальною та сприяє підвищенню якості освіти, формуванню практичних компетентностей і зниженню ризиків під час подальшої професійної діяльності.

Розроблення програмних тренажерних комплексів для автоматизованих систем керування технологічними процесами тісно пов'язане з необхідністю оволодіння програмним забезпеченням як ключовим компонентом АСУ ТП [11–12]. Реалізація моделей технологічних об'єктів, алгоритмів керування та взаємодії між складовими системи потребує знань у галузі SCADA-систем, стандартів програмування IEC 61131-3 і технологій обміну даними OPC.

Компонент програмного забезпечення в будь-якій автоматизованій системі є базисом, що визначає ефективність і трудомісткість усієї розробки. Статистика вітчизняних і зарубіжних розробок показує, що вартість розроблення програм становить 40...60% загальної вартості розробки, включаючи вартість технічних засобів. При цьому ефективність функціонування інформаційно-керуючої системи на 70...80% залежить від якості програмного забезпечення. Такі високі показники постійно привертають увагу дослідників до проблем програмування [13–14].

Аналіз літературних джерел підтверджує, що сучасні системи промислової автоматизації характеризуються складною ієрархічною структурою програмного забезпечення, яка включає операційні системи, системи програмування та прикладні програмні засоби (рисунк 1).

Як зазначається в низці фундаментальних праць, базовим компонентом автоматизованих систем керування є операційні системи реального часу (ОСРЧ) (рисунк 1, *Рівень 1*), забезпечуючи детерміноване виконання задач, надійність і передбачуваність роботи обчислювальних засобів в умовах жорстких часових обмежень [15]. Застосування ОСРЧ, таких як QNX, VxWorks та аналогічних, є



необхідною умовою функціонування мікропроцесорних систем керування технологічними процесами.

Системи програмування формують наступний рівень програмного забезпечення та охоплюють мови й середовища розробки керуючих програм (рисунок 1, *Рівень 2*). У промисловій автоматизації ключову роль відіграють мови, стандартизовані міжнародним стандартом ІЕС 61131-3, такі як LD, FBD і ST, призначені для програмування програмованих логічних контролерів [16]. Поряд із ними все ширше застосовуються високорівневі мови загального призначення (C/C++, Python, Java), що використовуються для реалізації складних алгоритмів керування, обробки даних та інтеграції автоматизованих систем із зовнішніми інформаційними ресурсами [17, 18].

Прикладні програмні засоби, включаючи SCADA-системи, HMI-інтерфейси, системи архівування та аналізу даних, забезпечують моніторинг, диспетчеризацію та взаємодію людини з об'єктом управління (рисунок 1, *Рівень 3*). Дослідження показують, що ефективність роботи операторів та надійність управління технологічними процесами значною мірою залежать від якості реалізації програмного забезпечення прикладного рівня [19-21]. Крім того, в умовах концепції Industry 4.0 прикладні програмні засоби стають ключовим елементом інтеграції автоматизованих систем управління з MES- та CPS-платформами, що розширює функціональні можливості промислових підприємств і підвищує їх адаптивність [22].

З урахуванням високої складності ієрархічної структури ПЗ, значна частка вартості розробки та залежність роботи системи від якості програмного забезпечення підкреслюють критичну роль підготовки фахівців у цій галузі. Кваліфіковані спеціалісти повинні володіти компетентностями з розробки та програмування керуючих систем, проєктування алгоритмів управління, інтеграції автоматизованих систем із зовнішніми інформаційними ресурсами, налаштування та супроводу прикладного ПЗ, а також аналізу та оптимізації роботи технологічних процесів.

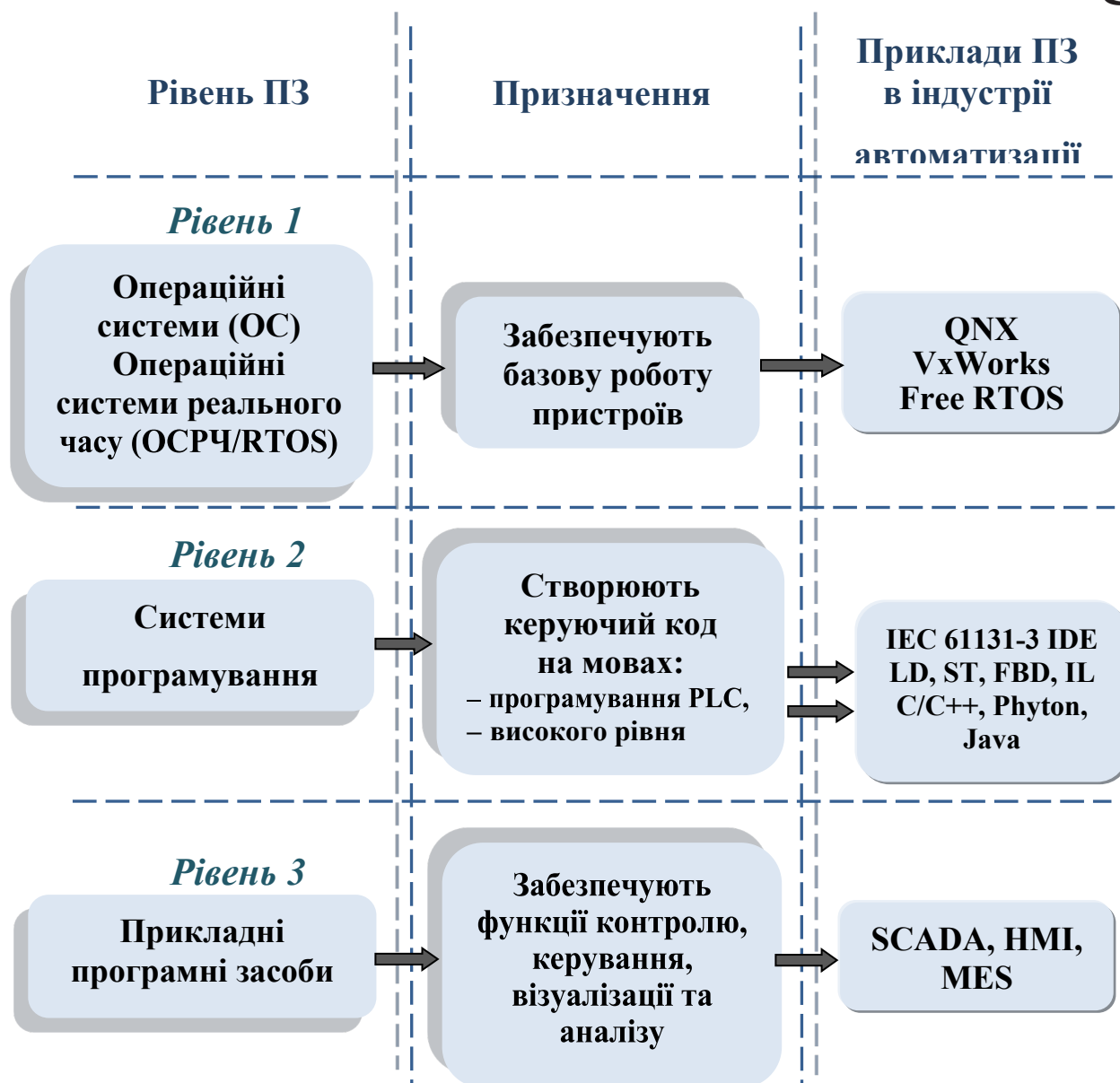


Рисунок 1 - Програмне забезпечення (ПЗ) у промислових автоматизованих системах керування технологічними процесами

Авторська розробка

Такі фахівці здатні забезпечувати ефективне керування виробництвом, підвищувати надійність і адаптивність промислових підприємств та реалізовувати сучасні концепції, зокрема Industry 4.0.

Для формування та закріплення цих компетентностей особливе значення мають саме моделі-тренажери, які дозволяють студентам та операторам набувати професійних вмінь у роботі з SCADA-системами та прикладним програмним забезпеченням у безпечному і контрольованому середовищі, імітуючи реальні технологічні процеси та нестандартні ситуації.



Метою роботи є розробка програмного тренажера автоматизованого електропривода постійного струму на базі Matlab/Simulink, Simple-SCADA системи і OPC DA для формування у студентів і фахівців у галузі промислової автоматизації практичних навичок використання прикладних програмних засобів АСУ ТП і технологій обміну даними між динамічними моделями систем керування та операторським інтерфейсом.

Основні завдання, що вирішуються в роботі:

- аналіз сучасних вимог до підготовки фахівців у галузі промислової автоматизації та ідентифікація ключових компетенцій,
- розробка програмного тренажера, який реалізує: математичну модель автоматизованого електропривода постійного струму з попереднім розрахунком параметрів алгоритму керування, людино-машинний інтерфейс оператора на базі Simple-SCADA системи і уніфіковані програмні протоколи обміну даними між цими компонентами на базі OPC-технології (OPC DA),
- визначення структури та функціональних компонентів тренажера, включаючи симуляцію фізичних процесів та відпрацювання штатних і позаштатних режимів без підключення реального обладнання,
- реалізація обміну даними між динамічною моделлю в Matlab/Simulink і Simple-SCADA системою через OPC-сервер та клієнт,
- оцінка ефективності використання програмного тренажера автоматизованої системи керування на спеціалізованих кафедрах ВНЗ, для первинної підготовки операторів, а також на етапі придбання студентами і фахівцями навичок програмування та моделювання автоматичних систем керування; можливості подальшого вдосконалення представленої розробки.

Виклад основного матеріалу.

Стандартом вищої освіти підготовки фахівців першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» (наказ МОНУ №1071 від 04.10.2018р.) визначено перелік наступних спеціальних (фахових) компетентностей, досягнення яких неможливо без теоретичних знань і практичних навичок з програмування, а саме:



- здатність вільно користуватись сучасними комп'ютерними та інформаційними технологіями для вирішення професійних завдань, програмувати та використовувати прикладні та спеціалізовані комп'ютерно-інтегровані середовища для вирішення задач автоматизації;

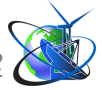
- здатність обґрунтовувати вибір технічної структури та вміти розробляти прикладне програмне забезпечення для мікропроцесорних систем керування на базі локальних засобів автоматизації, промислових логічних контролерів та програмованих логічних матриць і сигнальних процесорів;

- здатність використовувати для вирішення професійних завдань новітні технології у галузі автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, зокрема, проєктування багаторівневих систем керування, збору даних та їх архівування для формування бази даних параметрів процесу та їх візуалізації за допомогою засобів людино-машинного інтерфейсу.

Також стандартом вищої освіти підготовки фахівців другого (магістерського) рівня за спеціальністю «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» (наказ МОНУ №1022 від 10.08.2020р.) визначено фахові компетентності, однією з яких є:

- здатність застосовувати спеціальне програмне забезпечення та цифрові технології для розв'язання складних задач і проблем автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Актуальність підготовки фахівців у галузі промислової автоматизації зумовлена зростанням вимог до рівня сформованості професійних компетентностей, необхідних для проєктування, програмування та експлуатації сучасних автоматизованих систем керування. З урахуванням цих вимог випускові кафедри технічних закладів вищої освіти розробляють освітньо-професійні програми та навчальні плани за спеціальністю «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка», передбачаючи включення вибіркових дисциплін, орієнтованих на поглиблене формування фахових компетентностей. Важливу роль у цьому процесі відіграє використання сучасних програмних засобів і тренажерних комплексів, що забезпечують



набуття практичних навичок роботи з автоматизованими робочими місцями операторів, SCADA-системами та моделями технологічних процесів, а також відпрацювання позаштатних режимів функціонування автоматизованих систем. Застосування таких засобів сприяє підвищенню якості професійної підготовки та зниженню впливу людського фактора в реальних умовах експлуатації технологічних об'єктів.

У зв'язку з цим здобувач вищої освіти (студент) випускової кафедри закладу вищої освіти повинен мати можливість усвідомленого вибору з переліку дисциплін вибіркової частини навчального плану логічно взаємопов'язаних дисциплін, які забезпечують повноцінне оволодіння компетентностями, зокрема у сфері розроблення спеціалізованого програмного забезпечення для розв'язання завдань автоматизації. Для цього випусковій кафедрі необхідно забезпечити такі умови усвідомленого вибору дисциплін:

1) інформувати здобувачів вищої освіти молодших курсів про структурно-логічну схему освітньо-професійної програми підготовки за спеціальністю та запропоновані вибіркові напрями в межах навчального плану;

2) доводити до відома здобувачів вищої освіти основні особливості та відмінності кожного напрямку підготовки з розкриттям очікуваних результатів навчання;

3) організовувати семінари за участю практикуючих фахівців у галузі промислової автоматизації, які сприятимуть ознайомленню з особливостями застосування різних операційних систем, мов програмування та прикладних програмних засобів для розроблення й функціонування автоматизованих систем;

4) забезпечувати можливість реального вибору здобувачами вищої освіти напрямку професійної підготовки шляхом залучення практикуючих фахівців (викладачів) з відповідною кваліфікацією;

5) передбачати у випускній кваліфікаційній роботі розділ, що відображає результати навчання за обраним напрямом освітньої програми (зокрема, розроблення програмного забезпечення для контролю та моніторингу параметрів технологічного обладнання).



У статті розглянуто один із можливих напрямів вибіркової складової навчального плану підготовки спеціалістів у галузі автоматизації виробничих процесів, який спрямований на формування практичних навичок застосування спеціалізованого програмного забезпечення та цифрових технологій для розробки програмного тренажера автоматизованого електропривода постійного струму. Зокрема, такий напрям передбачає набуття компетентностей зі створення динамічних моделей автоматизованих систем керування, розроблення інтерфейсу автоматизованого робочого місця оператора та забезпечення інформаційної взаємодії між зазначеними компонентами. Реалізація цього напрямку підготовки здійснюється через опанування комплексу відповідних навчальних дисциплін.

1) Для оволодіння *навичками побудови динамічних моделей АСК:*

- Аналіз і синтез АСК,
- Моделювання технологічних об'єктів керування;

2) Для оволодіння *навичками проектування і розробки інтерфейса АРМ оператора:*

- Алгоритмічне програмування,
- Системи реального часу,
- Проектування SCADA-систем,
- Системи диспетчерського управління;

3) Для *забезпечення уніфікованого, надійного та реалістичного обміну даними* між математичною моделлю об'єкта керування, реальними або віртуальними контролерами та інтерфейсами оператора:

- Промислові мережі та протоколи (OPC, Modbus, Ethernet),
- Програмні інтерфейси АСУ ТП.

У межах роботи виконано розроблення програмного тренажера, що реалізує математичну модель автоматизованого електропривода постійного струму з попереднім розрахунком параметрів алгоритмів керування, людино-машинний інтерфейс оператора на базі Simple-SCADA системи, а також уніфіковані програмні протоколи обміну даними між зазначеними компонентами з



використанням технології OPC (OPC DA).

До складу тренажера входять такі основні компоненти:

- тренажерний комп'ютер з HMI-інтерфейсом оператора, який реалізовано на основі Simple-SCADA системи [24];
- імітаційна модель електропривода постійного струму, побудована в середовищі Matlab/Simulink [25];
- програмний пакет Matrikon OPC [26], що забезпечує двосторонній обмін даними між HMI-інтерфейсом оператора та моделлю електропривода.

Функціональні можливості тренажера забезпечують:

- ✓ вивчення принципів побудови та функціонування проєктів на базі Simple-SCADA системи;
- ✓ набування досвіду роботи оператора з людино-машинним інтерфейсом. За допомогою інтерфейсу оператор може здійснювати моніторинг параметрів процесу керування, аналізувати отримані дані, виконувати керувальні дії та відпрацьовувати реагування на позаштатні режими роботи автоматизованої системи.

Розроблений програмний тренажер виконує наступні функції:

- 1) моделювання динаміки електропривода постійного струму як об'єкта керування,
- 2) візуалізацію процесів керування за допомогою людино-машинного інтерфейсу;
- 3) моніторинг і відображення ключових параметрів функціонування електропривода, зокрема струму та швидкості обертання двигуна у режимах пуску, холостого ходу та роботи під навантаженням.

Електропривід постійного струму як об'єкт керування являє собою сукупність електромеханічних і силових елементів, взаємодія яких забезпечує перетворення електричної енергії в керований механічний рух. До складу об'єкта керування входить електродвигун постійного струму, вал якого через механічну передачу (редуктор) з'єднаний з робочим органом технологічної машини, а також силовий перетворювач – тиристорний перетворювач, призначений для



формування керованої напруги живлення двигуна [23].

У процесі експлуатації електропривода необхідно забезпечувати регулювання електромагнітних і механічних координат, насамперед струму якоря та швидкості обертання двигуна, у різних режимах роботи: під час пуску, у режимі холостого ходу та при роботі під навантаженням. У пусковому режимі основною задачею є обмеження пускового струму та формування заданого прискорення, що запобігає перевантаженню силових елементів і механічних вузлів. У режимі холостого ходу та при змінному навантаженні пріоритетним є стабілізація швидкості обертання та забезпечення необхідного моменту на валу двигуна.

Для реалізації таких вимог у системах автоматичного керування електроприводами постійного струму широко застосовується принцип підлеглого регулювання [23–24]. Згідно з цим принципом система керування будується у вигляді ієрархічно підпорядкованих контурів, де внутрішній контур регулювання струму забезпечує швидку та точну стабілізацію електромагнітного моменту, а зовнішній контур регулювання швидкості формує завдання для регулятора струму відповідно до заданих динамічних і статичних характеристик.

Такий підхід дозволяє підвищити швидкодію та стійкість системи керування, зменшити вплив збурень з боку навантаження та забезпечити якісне регулювання електропривода в усіх експлуатаційних режимах, що робить його доцільним об'єктом для моделювання та використання у навчальних програмних тренажерах.

Система підлеглого (каскадного) регулювання містить (рисунк 2):

- об'єкт керування,
- внутрішній контур регулювання струму,
- зовнішній контур регулювання швидкості.

Контур струму є швидкодіючим і призначений для стабілізації струму якоря, а отже – електромагнітного моменту двигуна. Контур швидкості формує завдання струму відповідно до відхилення швидкості.

Принцип підлеглості полягає в тому, що контур струму має значно більшу



швидкодію, ніж контур швидкості, що дозволяє розглядати його як майже ідеальний при синтезі зовнішнього регулятора.

Результати моделювання – графіки зміни струму (I) та швидкості обертання двигуна (ω) в режимах пуску, холостого ходу та під навантаженням – представлені на рисунку 3.



Рисунок 2 – Схема моделі системи підлеглого регулювання в Matlab/Simulink з двома контурами регулювання: струму (I) та швидкості обертання двигуна (ω)

Авторська розробка

Аналіз графіків перехідного процесу свідчить про те, що система відповідає заданим показникам якості: пусковий струм перебуває в межах допустимого ($I_{\max} = 2,0 \cdot I_n = 2,0 \cdot 280 \text{ А}$) і становить 555 А. Швидкість обертання двигуна змінюється за лінійним законом до величини $\omega_n = 104 \text{ об/хв}$ за 1,3 с. При прикладанні навантаження (на $t = 4 \text{ с}$) статична похибка за швидкістю дорівнює менше ніж 1%.

Інтерфейсну частину програмного тренажера, призначену для візуалізації та диспетчеризації роботи об'єкта керування, реалізовано з використанням Simple-SCADA системи та вбудованого середовища розробки Simple-Editor. Simple-SCADA є легкою SCADA-платформою, що забезпечує збір, обробку, архівування та відображення технологічних параметрів і підтримує обмін даними з об'єктами автоматизації за допомогою технології OPC (OPC DA 3.0 і нижче) [24].

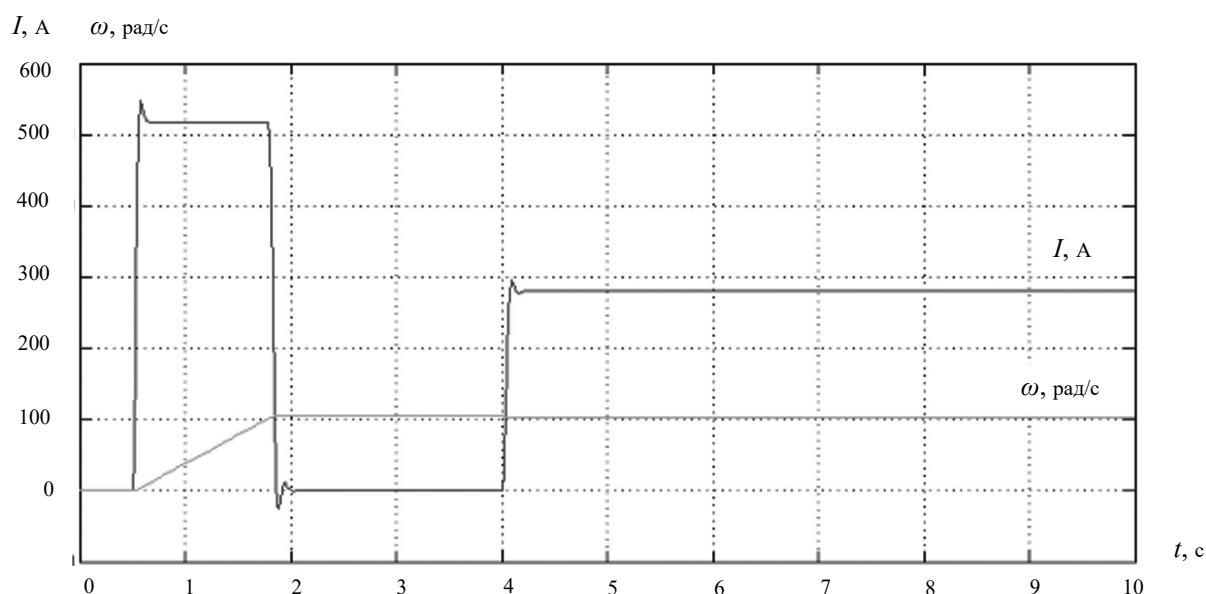


Рисунок 3 – Графіки зміни струму (I) та швидкості обертання двигуна (ω) в режимах пуску, холостого ходу та під навантаженням

Авторська розробка

Розробка операторського інтерфейсу та мнемосхеми програмного тренажера автоматизованої системи регулювання швидкості двигуна постійного струму (рисунок 4) здійснювалася у декілька етапів. На початковому етапі виконувалося встановлення SCADA-системи та створення нового проєкту в середовищі редактора. Після цього формувалася структура проєкту, яка включає клієнтську частину для візуалізації, сервер для обробки даних і виконання скриптів, а також засоби підключення до OPC-серверів.

На наступному етапі розроблялася мнемосхема та робоча область оператора, що забезпечує можливість керування режимами роботи електропривода та спостереження за основними технологічними параметрами. Для цього використовувалися стандартні графічні компоненти Simple-SCADA, зокрема елементи керування (кнопки), індикатори, шкали та тренди, які розміщувалися у робочій зоні проєкту та формували операторський пульт керування.

Подальшим кроком було налаштування обміну даними через OPC, що є ключовим для функціонування тренажера. У редакторі змінних виконувалося додавання необхідних тегів OPC-сервера, які відповідають сигналам керування та вимірюваним параметрам динамічної моделі. В якості OPC-сервера



використовувався стандартний симуляційний сервер, що дозволило відпрацювати механізми обміну даними між математичною моделлю, SCADA-системою та операторським інтерфейсом.

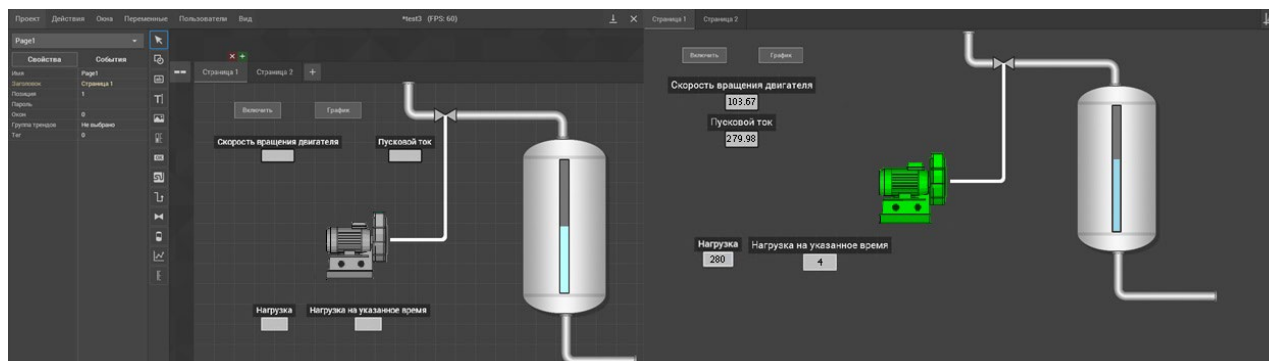


Рисунок 4 – Операторський інтерфейс та мнемосхема програмного тренажера автоматизованого електропривода постійного струму

Авторська розробка

На завершальному етапі здійснювалося прив'язування OPC-змінних до елементів інтерфейсу, що забезпечило відображення поточних значень параметрів, формування графіків (рисунок 5) та передачу керуючих впливів від оператора до моделі. Після перевірки коректності взаємодії між компонентами проєкт зберігався та використовувався як операторський інтерфейс програмного тренажера.

Обмін даними між динамічною моделлю в середовищі Matlab/Simulink та операторським інтерфейсом Simple-SCADA системи здійснюється з використанням стандарту OPC DA. Такий підхід забезпечує уніфіковану взаємодію між програмними компонентами тренажера та дозволяє відокремити модель об'єкта керування від засобів візуалізації і диспетчеризації.

Для реалізації OPC-зв'язку в моделі використовуються можливості OPC Toolbox середовища Simulink, який забезпечує підключення до OPC-серверів, розташованих на локальному комп'ютері або в мережі. В якості OPC-сервера застосовується Matrikon OPC Server for Simulation, що дозволяє створювати групи змінних (alias groups) і теги, які відповідають вхідним і вихідним сигналам моделі системи автоматизованого керування [26].

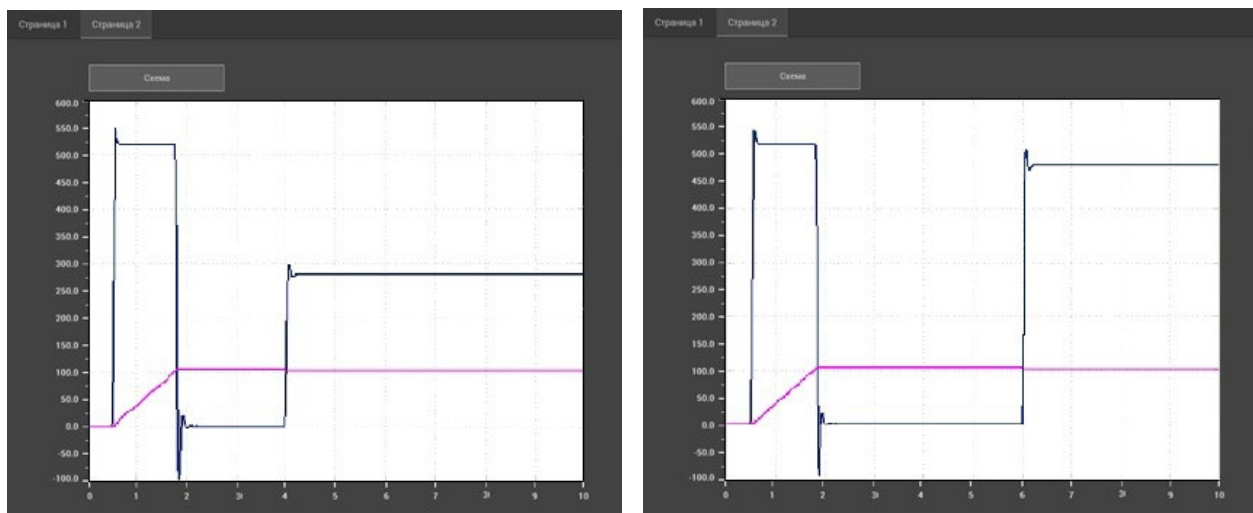


Рисунок 5 – Графіки зміни струму якоря та частоти обертання двигуна в режимах розгону, холостого ходу та під навантаженням

($I_{\text{нав}} = 280 \text{ A}$, $I_{\text{нав}} = 480 \text{ A}$) у системі Simple-SCADA

Авторська розробка

Налаштування обміну даними включає формування структури тегів на OPC-сервері, задання їх типів і збереження конфігурації. Контроль коректності створених тегів та їх значень здійснюється за допомогою утиліти Matrikon OPC Explorer. На стороні Matlab/Simulink у модель додається блок OPC Configuration, який визначає параметри підключення до OPC-сервера та відповідність між тегам сервера і змінними моделі.

Зчитування даних з OPC-сервера реалізується за допомогою блоку OPC Read, що дозволяє передавати вимірювані параметри технологічного процесу (наприклад, швидкість обертання або струм якоря) у математичну модель. Передача керуючих впливів з моделі до SCADA-системи здійснюється за допомогою блоку OPC Write, який забезпечує запис обчислених значень у відповідні OPC-теги. Для роботи з кількома сигналами використовуються стандартні блоки мультиплексування та демультиплексування.

Таким чином, реалізований механізм OPC-обміну забезпечує двосторонній зв'язок між Matlab/Simulink та Simple-SCADA в реальному масштабі часу, що є ключовою умовою функціонування програмного тренажера.

Дослідження роботи системи автоматизованого електропривода постійного



струму на створеному тренажері проводилося шляхом запуску проекту з наступним завданням навантаження та увімкненням двигуна через інтерфейс (рисунок 4). Натисканням кнопки формувалися графіки зміни струму якоря та частоти обертання двигуна в режимах розгону, холостого ходу та під навантаженням (рисунок 5, $I_{\text{нав}} = 280 \text{ A}$, $I_{\text{нав}} = 480 \text{ A}$). Аналіз перехідних процесів показав, що система відповідає заданим показникам якості.

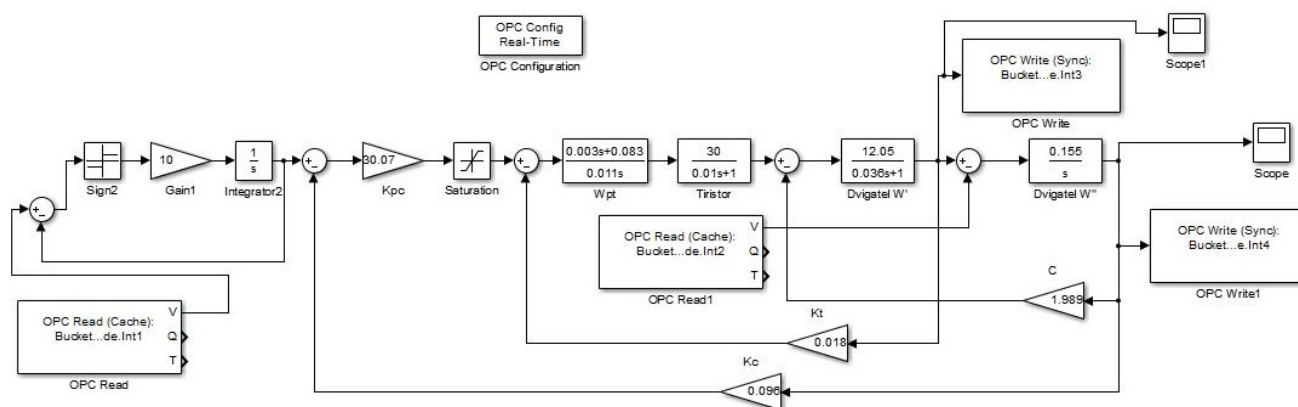


Рисунок 6 – Схема моделі електропривода з використанням інструментів OPC Toolbox середовища Matlab/Simulink

Авторська розробка

Висновки.

На основі викладеного в статті матеріалу можна сформулювати такі висновки. В роботі обґрунтовано актуальність застосування програмних та апаратно-програмних тренажерів для підготовки фахівців з автоматизації та операторів АСУ ТП, зокрема для набуття ними практичних навичок роботи з SCADA-системами, OPC-технологіями обміну даними та цифровими моделями технологічних процесів. Проведено огляд класифікації тренажерів, що включає програмні симулятори, OTS, HIL-системи та Virtual Commissioning, та підкреслено їх ефективність для відпрацювання позаштатних режимів без ризику для реального обладнання.

Розроблений тренажер автоматизованого електропривода постійного струму на базі Matlab/Simulink, Simple-SCADA та OPC DA забезпечує моделювання динаміки об'єкта, інтерфейс оператора та уніфікований обмін даними між компонентами. Система дозволяє вивчати принципи побудови



SCADA-проектів, відпрацьовувати керування електроприводом у різних режимах та реагування на позаштатні ситуації.

Моделювання підтвердило відповідність системи заданим показникам якості: пусковий струм у допустимих межах, швидкість обертання стабілізується за лінійним законом, а статична похибка під навантаженням менше 1%. Використання каскадного принципу підлеглого регулювання забезпечує стабільність і швидкодію системи.

Таким чином, інтеграція тренажерів у навчальний процес підвищує якість підготовки, формує компетентності з програмного забезпечення АСУ ТП і цифрового моделювання процесів та знижує ризики експлуатації реального обладнання.

Література:

1. Lechler T., Fischer E., Metzner M., Mayr A., Franke J. Virtual Commissioning – Scientific review and exploratory use cases in advanced production systems. *Procedia CIRP*. 2019. Vol. 81. P. 1125-1130. DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.278
2. Deubert D., Klingel L., Selig A. Online simulation at machine level: a systematic review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024. Vol. 131, P. 977–998. DOI:10.1007/s00170-024-13065-1
3. Євсеєнко О. М., Зуєв А. О., Євсіна Н. О. Розробка програмно-апаратного комплексу імітатора поведінки об'єкта керування. *Системи управління навігації та зв'язку: зб. наук. праць*. 2022. №2. С. 9–14. DOI: 10.26906/SUNZ.2022.2.009
4. Когутяк М. І., Логінов А. Л., Торгунаков М. В. Тренажер-імітатор для налагодження систем керування та навчання фахівців з автоматизації. *Нафтогазова енергетика*. 2018. № 8. С. 61–67. DOI: 10.31471/1993-9868-2018-1(29)-61-67
5. Жеребко В. А. Віртуалізація моделей технічних об'єктів управління в навчально-наукових задачах проектування систем управління. *Прикладні засоби програмування та програмне забезпечення*. 2015. № 1. С. 65–70.



6. Kluever C. A. *Dynamic Systems: Modeling, Simulation, and Control*. 2nd ed. Wiley-Blackwell, 2015. ISBN 9781119723479
7. ABB. ABB Ability™ System 800xA Simulator / Operator Training. URL: <https://new.abb.com/control-systems/system-800xa/simulator> (дата звернення: 18.12.2025).
8. Plummer A. R. Model-in-the-Loop Testing. *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part I: Journal of Systems and Control Engineering*. 2006. Vol. 220(3), P. 183-199. DOI: 10.1243/09596518JSCE207
9. Siemens. Siemens Cooperates with Education (SCE) : офіційний освітній портал. URL: <https://www.siemens.com/sce> (дата звернення: 18.12.2025).
10. Vogel-Heuser B., Hess H. Guest Editorial – Industry 4.0 prerequisites and visions. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2016. Vol. 13(2). P. 411–413.
11. ДСТУ 2226-93. Автоматизовані системи. Терміни та визначення. [Чинний від 1994-07-01]. Вид. офіц. Київ : Держстандарт України, 1994. 93 с. (Національні стандарти України).
12. Ельперін І. В., Пупена О. М., Сідлецький В. М., Швед С. М. Автоматизація виробничих процесів: підручник. 2-ге вид., виправлене. Київ: Ліра-К, 2017. 378 с.
13. Cuasito Ruvel J., Lopez Michael L. Effectiveness of a PLC Programming Learning Module in Industrial Automation Education: A Guided Simulation Approach. *Journal of Harbin Engineering University*. 2025. Vol. 46(5). P. 195–209. ISSN: 1006-7043
14. Koziolk H., Burger A., Platenius-Mohr M., Jetley R. A classification framework for automated control code generation in industrial automation. *Journal of Systems and Software*. 2020. Vol. 166. 110575. DOI: 10.1016 / j.jss.2020.110575
15. Burns A., Wellings A. Real-Time Systems and Programming Languages: Ada, Real-Time Java and C/Real-Time POSIX. 4th ed. Pearson Canada, 2009. 624 p.
16. International Electrotechnical Commission. IEC 61131-3. Programmable Controllers – Part 3: Programming Languages. Geneva: International Electrotechnical



Commission, 2003. 226 p.

17. Маркін М., Добролюбова М., Маркіна О., Батрак Є. Оптимізація розробки програмного забезпечення для інформаційно-вимірювальних систем з використанням Python. *Адаптивні системи автоматичного управління*. 2025. Вип. 1, №46. С. 70–82. DOI: 10.20535/1560-8956.46.2025.323687

18. Кравчук А. Р. Аналіз мовної складової в програмних продуктах колаборативної робототехніки для вирішення технологічних завдань. *Технічна інженерія*. 2023. № 1(91). С. 50–56. DOI: 10.26642/ten-2023-1(91)-50-56

19. Пупена О. М. Розроблення людино-машинних інтерфейсів та систем збирання даних з використанням програмних засобів SCADA/HMI: навч. посіб. Київ: Видавництво Ліра-К, 2020. 594 с. ISBN 978-617-7910-07-6

20. Куваєв В. М., Мещеряков Л. О., Харь А. П., Політов А. С. Інтерфейс технічного супроводження складних інформаційно-керуючих систем автоматизації. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*. 2023. № 2. С. 26–33. DOI: 10.32782/IT/2023-2-3

21. Тарасевич І. Г. Програмування систем реального часу. Проектування автоматизованих систем управління в середовищі SCADA/SoftLogic S3: навч. посіб. Дніпро: УДУНТ, 2022. 108 с.

22. Lee J., Bagheri B., Kao H.-A. A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*. 2015. Vol. 3. P. 18–23. DOI: 10.1016/j.mfglet.2014.12.001

23. Голодний І. М., Лавріненко Ю. М., Козирський В. В. та ін. Регульований електропривод: підручник / за ред. І. М. Голодного. Київ: ТОВ ЦП Компрінт, 2015. 509 с. ISSN: 978-966-929-068-7

24. Simple-Scada: современная SCADA-система для разработки и обеспечения работы систем автоматизированного управления и мониторинга. URL: <https://simple-scada.com/> (дата звернення: 18.12.2025).

25. Гераїмчук М. Д., Лазарєв Ю. Ф., Толочко Т. О. Моделювання систем у середовищі MATLAB-Simulink: комп'ютерний практикум. Київ: НТУУ «КПІ», 2006. 175 с.



26. OPC Demo Tutorial: ознайомчий PDF-матеріал з використання технології OPC (OPC Demo). URL: <https://www.matrikonopc.com/training/opc-demo-tutorial.pdf> (дата звернення: 18.12.2025).

Abstract. *The paper examines the educational significance of hardware-software simulators in the training of specialists in the field of industrial automation, particularly in the context of multi-level automated control systems for production processes. It is demonstrated that software plays a key role in the creation and operation of such simulators, encompassing operating systems, programming environments, and application software tools.*

The study emphasizes the dependence of software quality on the professional training level of specialists in automation, computer-integrated technologies, and robotics. The requirements for bachelor's and master's educational programs are analyzed, highlighting the need to master a wide range of programming tools—from machine code and assembly to high-level languages and specialized computer-integrated environments. It is noted that insufficiently structured curricula complicate the prioritization of students' professional development.

Special attention is given to the impact of the human factor as a primary cause of unsafe operation of technological installations and the emergence of emergency situations, which is attributed to inadequate practice in handling abnormal modes of automated systems using models and simulators. The paper substantiates the appropriateness of using hardware-software simulators as an effective means to enhance operator training in industrial control systems (ICS) and to develop stable practical skills in process monitoring and real-time operational control.

The development of a software simulator for a DC motor drive based on Matlab/Simulink, OPC technologies, and the Simple-SCADA system is presented, illustrating the organization of data exchange between these components. The functional requirements, structural organization, and operational modes of simulator complexes are formulated to facilitate training specialists in industrial SCADA systems. It is concluded that the use of such software modeling tools contributes to the formation of professional competencies and fosters the professional independence of future specialists in the field of industrial automation.

Key words: *industrial automation, software, software simulators, SCADA systems, specialist training, computer-integrated technologies, modeling, Matlab/Simulink, Simple-SCADA, OPC technologies.*

Статтю надіслано: 19.12.2025 р.

© Тарасевич І.Г.