

Н. В. РУДЕВИЧ, Д. А. ГАПОН, М. І. ЛАЗАРЄВ

МОДЕЛЬ ЗМІСТУ НАВЧАННЯ ПРОЄКТУВАННЮ ЦИФРОВИХ СИСТЕМ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ТА АВТОМАТИКИ ЕНЕРГОСИСТЕМ

Виявлено, що ефективне формування понятійно-аналітичного та продуктивно-синтетичного рівнів сформованості професійних знань та умінь щодо проєктування цифрових систем релейного захисту та автоматики енергосистем можливе за системного розроблення та використання узагальненої моделі змісту навчання. На підставі вивчення інформаційних моделей технічних систем в якості базового інваріанта прийнято ознакову модель, що включає множини ознак призначення, побудови, принципу дії та параметрів технічної системи. Виявлено, що умовно процес проєктування цифрових систем релейного захисту та автоматики енергосистем можна розбити на три етапи, а саме розроблення завдання на проєктування, безпосередньо здійснення проєктування та визначення параметрів функціонування. Визначено причинно-наслідкові ланцюги знань, які складають основу вирішення задач на цих трьох етапах. Виявлено, що методи поетапної декомпозиції та агрегації є ключовими при побудові змісту навчання проєктуванню цифрових систем релейного захисту та автоматики енергосистем на основі причинно-наслідкових ланцюгів знань. Обґрунтовано узагальнену модель змісту навчання проєктуванню цифрових систем релейного захисту та автоматики енергосистем на основі причинно-наслідкових ланцюгів знань. Згідно узагальненої моделі розроблено зміст навчання проєктуванню конкретних мікропроцесорних систем релейного захисту та автоматики енергосистем. За допомогою експериментальної перевірки доведена ефективність змісту навчання проєктуванню цифрових систем релейного захисту та автоматики на основі причинно-наслідкових ланцюгів знань. Результати дослідження можуть бути використані у навчальному процесі професійної підготовки майбутніх інженерів за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Ключові слова: причинно-наслідковий ланцюг знань, зміст навчання, проєктування, цифрові системи релейного захисту та автоматики.

N. V. RUDEVICH, D. A. GAPON, M. I. LAZARIEV

TEACHING CONTENT MODEL FOR DESIGNING DIGITAL SYSTEMS OF POWER GRID RELAY PROTECTION AND AUTOMATION

It was found that the effective formation of conceptual-analytical and productive-synthetic levels of formation of professional knowledge and skills regarding the design of digital systems of power grid relay protection and automation is possible with the systematic development and use of a generalized model of the teaching content. Based on the study of information models of technical systems, a feature model was adopted as a basic invariant, which includes a set of features of the purpose, construction, principle of operation and parameters of the technical system. It was found that the design process of digital systems of power grid relay protection and automation can be conventionally divided into three stages, namely, the development of the design task, the direct implementation of the design, and the determination of the parameters of operation. Causal chains of knowledge that form the basis of problem solving at these three stages are determined. It was found that the methods of step-by-step decomposition and aggregation are key in building the content of teaching the design of digital systems of power grid relay protection and automation based on causal chains of knowledge. A generalized model of the teaching content design of digital systems of power grid relay protection and automation based on causal chains of knowledge is substantiated. According to the generalized model, the teaching content design of specific microprocessor systems of power grid relay protection and automation has been developed. With the help of experimental verification, the effectiveness of the teaching content design of digital systems of relay protection and automation based on causal chains of knowledge has been proven. The results of the research can be used in the educational process of professional training of future engineers in the specialty 141 Electric power, electrical engineering and electromechanics.

Keywords: causal chain of knowledge, content of training, design, digital systems of relay protection and automation.

Постановка проблеми. Сучасною стратегією електроенергетики є безпека, енергоефективність та конкурентоспроможність, що передбачає постійний пошук та впровадження інноваційних розробок у цій галузі. Створення необхідних умов для розвитку і підвищення технічного рівня електроенергетики та забезпечення енергетичної безпеки країни можливе за умови наявності компетентних інженерів, здатних в тому числі вирішувати професійні задачі з проєктування цифрових систем релейного захисту та автоматики енергосистем. В загальному випадку процес вирішення проєктувальних задач передбачає взаємодію, що призводить до зміни стану та властивостей в існуючих системах або до появи нових систем з іншою будовою та принципом функціонування, яких не було до початку дії причини. Наслідком взаємодії є результат – технічна система з заданими параметрами. Отже, характер цих задач вимагає від фахівця прояву продуктивного мислення, основу якого складає філософський принцип причинності [1].

Світові освітні системи характеризуються системною реалізацією принципу причинності, що передбачає побудову процесу навчання та його елементів на основі виявлення причинно-наслідкових відношень між різними елементами знань [2, 3].

У зв'язку з цим підготовка майбутніх фахівців з проєктування цифрових систем релейного захисту та автоматики енергосистем потребує забезпечення продуктивної навчальної діяльності з вирішення професійних задач, основу якої складає встановлення причинно-наслідкових зв'язків між різними підсистемами знань.

Все електроенергетичне обладнання електричних станцій, підстанцій та мереж оснащується системами управління, що здійснюють керування технологічними процесами виробництва, передачі, розподілу й споживання електричної енергії в нормальних і аварійних умовах. Безумовно, різноманіття таких систем управління дуже велике, від найпростіших засобів захисту та автоматики до інформаційно-керуючих систем енергооб'єднаннями. В численній

© Н. В. Рудевич, Д. А. Гапон, М. І. Лазарєв, 2024

вітчизняній навчальній літературі можна зустріти різні приклади реалізації конкретних мікропроцесорних пристроїв релейного захисту та автоматики, що у сукупності складає значний обсяг матеріалу, який підлягає засвоєнню [4–7]. Крім того у змісті навчання, що представлений в підручниках та навчальних посібниках, причинно-наслідкові зв'язки між різними підсистемами знань носять несистемний, невпорядкований, фрагментарний характер, а іноді й зовсім відсутні. Як наслідок, не забезпечується в повному обсязі понятійно-аналітичний та продуктивно-синтетичний рівні сформованості професійних знань та умінь.

Отже, виникає потреба системного розроблення узагальної моделі змісту навчання проєктуванню цифрових систем релейного захисту та автоматики енергосистем на базі причинно-наслідкових ланцюгів знань. Це суттєво спростить та дасть можливість вирішення достатньо великої кількості конкретних професійних задач.

На підставі вивчення інформаційних моделей технічних систем в якості базового інваріанта доцільно прийняти наступну ознакову модель, яка в повній мірі забезпечує системний опис будь-якої цифрової системи релейного захисту та автоматики енергосистем [8]:

$$P = \{R, S, D, H\},$$

де R, S, D, H – множина ознак призначення, побудови, принципу дії та параметрів цифрової системи релейного захисту та автоматики енергосистем.

Ефективність застосування цієї моделі підтверджується результатами експериментальної перевірки розробленої на її основі системи комплексних моделей елементів професійно-орієнтованого змісту навчання електротехніки [9].

Мета статті. обґрунтування, розроблення та експериментальна перевірка змісту навчання проєктуванню цифрових систем релейного захисту та автоматики енергосистем на основі причинно-наслідкових ланцюгів знань.

Відповідно до мети роботи визначено наступні завдання:

1. Побудова узагальної моделі змісту навчання проєктуванню цифрових систем релейного захисту та автоматики енергосистем на основі причинно-наслідкових ланцюгів знань.

2. Розроблення на основі узагальної моделі змісту навчання проєктуванню конкретних цифрових систем релейного захисту та автоматики енергосистем.

3. Експериментальна перевірка розробленого змісту навчання проєктуванню цифрових систем релейного захисту та автоматики енергосистем на основі причинно-наслідкових ланцюгів знань в процесі професійної підготовки майбутніх фахівців за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Основні матеріали дослідження. Для побудови узагальної моделі визначимо причинно-наслідкові

ланцюги знань, які складають основу вирішення задач з розроблення завдання на проєктування, безпосередньо здійснення проєктування та визначення параметрів функціонування цифрових систем релейного захисту та автоматики (ЦСРЗА) енергосистем. Задля наочності приймемо, що ЦСРЗА являє собою пристрій, який має два ієрархічні рівні: вищий рівень всієї системи (c) та нижчий рівень елементів системи (ec).

При розробленні завдання на проєктування ЦСРЗА важливими завданнями є визначення вимог до системи в цілому, до функцій, які вона повинна виконувати, до видів її забезпечення тощо. Все це в загальному випадку можна відобразити через підсистему знань параметри вимог ($H_{\text{вим}}^c$), з урахуванням цього причинно-наслідковий ланцюг знань при розробленні завдання буде мати вигляд (рис. 1).

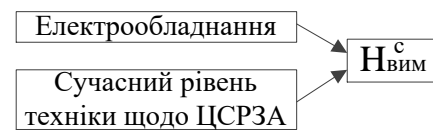


Рисунок 1 – Причинно-наслідковий ланцюг знань при розробленні завдання на проєктування ЦСРЗА

В процесі проєктування в залежності від поставлених вимог в першу чергу визначається загальний алгоритм функціонування та складається структурно-функціональна схема усієї ЦСРЗА. При цьому причинно-наслідковий ланцюг знань має вигляд, що представлений на рис. 2 ($D, S_{c-ф}$ – підсистеми знань щодо принципу дії та побудови структурно-функціональної схеми системи відповідно).

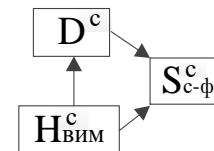


Рисунок 2 – Причинно-наслідковий ланцюг знань при розробленні алгоритму та структурно-функціональної схеми ЦСРЗА

Вимоги, що висуваються до системи в цілому, його загальний принцип дії й структура впливають на вимоги щодо проєктування елементів системи більш нижнього ієрархічного рівня. Окреслені вимоги складових елементів визначають їх принцип дії та структуру. Далі обирається яким чином будуть реалізовані ці складові елементи, а, отже, і система в цілому. Таким чином, в загальному випадку причинно-наслідковий ланцюг знань при виконанні проєктування ЦСРЗА буде мати вигляд, що зображений на рис. 3 ($S_{п}$ – підсистема знань щодо побудови принципової схеми системи (елементу системи)).

В теперішній час більшість пристроїв розробляється на базі готових модулів з подальшим їх комплексуванням та програмуванням. В такому випадку задачі проєктувальника зводяться до визначення структури комплексу, розподілу функцій

між модулями, встановлення послідовності їх виконання, визначення схем підключення пристрою тощо.

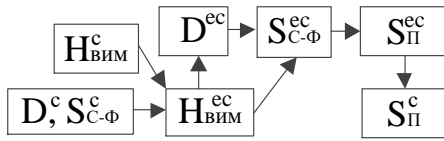


Рисунок 3 – Причинно-наслідковий ланцюг знань при проєктуванні ЦСРЗА

Безумовно, певна реалізація елементів пристрою визначає їх дійсні параметри ($H_{дійс}$) і, як наслідок, параметри пристрою в цілому (рис. 4).

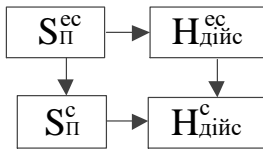


Рисунок 4 – Причинно-наслідковий ланцюг знань при визначенні дійсних параметрів ЦСРЗА

В загальному випадку, коли ЦСРЗА має ієрархічно розвинену структуру, спочатку будується структура всієї системи, а потім встановлюються причинно-наслідкові зв'язки з її першим рівнем. Після цього складаються структурно-функціональні схеми першого рівня, які будуть мати причинно-наслідкові зв'язки з другим рівнем і т. п. Послідовна деталізація здійснюється доти поки не отримують рівень з функціонально неподільними елементами, а, отже, структурні схеми самого нижнього рівня являють собою прості елементи. Наступним кроком є вибір реалізації (побудова принципів схем) функціонально неподільних елементів з подальшим їх об'єднанням в підсистему більш високого рівня. Об'єднання здійснюється доти поки не отримують реалізацію всієї ЦСРЗА. Тобто на етапі реалізації відбувається агрегація елементів в одну систему. При цьому на кожному рівні системи, починаючи з нижнього, порівнюються кінцеві параметри з початковими вимогами, у разі невідповідності останніх вимоги більш нижнього рівня можуть бути переглянуті (скоректовані) та проєктування необхідних рівнів проведено знову.

Таким чином, на підставі методів поетапної декомпозиції та агрегації розроблено узагальнену модель змісту навчання проєктуванню цифрових ЦСРЗА на основі причинно-наслідкових ланцюгів знань (рис. 5) [10].

В якості прикладу побудуємо фрагмент змісту навчання проєктуванню автоматичного пристрою синхронізації синхронного генератора з енергосистемою (рис. 6). Аналогічним чином може бути побудований зміст навчання проєктуванню будь-якої ЦСРЗА, що вивчається в межах дисциплін професійної підготовки за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

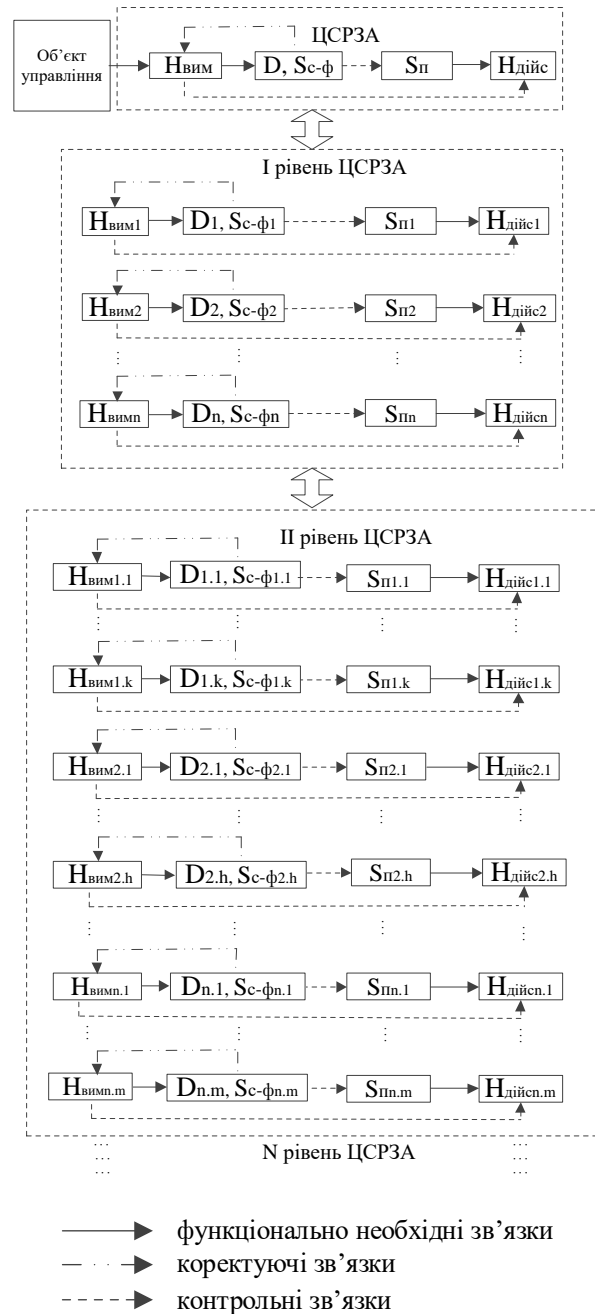


Рисунок 5 – Узагальнена модель змісту навчання проєктуванню ЦСРЗА на основі причинно-наслідкових ланцюгів знань

Експериментальна перевірка. Для науково-об'єктивної та доказової перевірки ефективності розробленого змісту навчання проєктуванню ЦСРЗА на основі причинно-наслідкових ланцюгів знань було проведено педагогічний однофакторний експеримент.

Для проведення педагогічного експерименту було задіяно міжгрупову схему порівнянь. Така схема проведення педагогічного експерименту передбачає вибір паралельних груп студентів: контрольної та експериментальної. Це дозволяє інтерпретувати зміни вихідного (залежного) параметру за результатами впливу експериментальних умов.

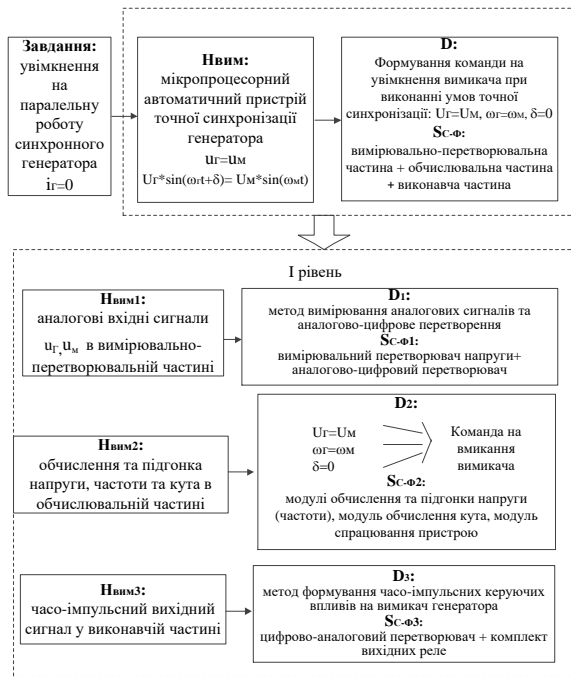


Рисунок 6 – Фрагмент змісту навчання проєктуванню цифрового автоматичного пристрою синхронізації синхронного генератора

Для проведення експерименту було виділено контрольні (13 осіб) та експериментальні (12 осіб) групи зі студентів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», які навчалися за освітньою програмою «Електроенергетика». Студенти контрольної групи навчались за традиційним змістом навчання, а експериментальної – за змістом навчання на основі причинно-наслідкових ланцюгів знань в межах дисципліни «Сучасні технології та способи побудови систем релейного захисту та автоматики».

В якості критеріальної бази оцінки ефективності було обрано показники сформованості знань, умінь та мотиваційно-цілевих, когнітивних й емоційно-вольових професійно важливих якостей з проєктування цифрових ЦСРЗА. Для вимірювання визначених показників використовувалися стандартизовані методики, а саме: для визначення рівнів сформованості знань та умінь – професійно-орієнтовані задачі; професійно-важливих якостей – анкети та опитувальники. Оцінювання здійснювалося за тривірневою шкалою (1 – низький, 2 – середній, 3 – високий рівні).

Результати порівняльного експерименту наведені у табл. 1. Аналіз даних таблиці свідчить про перевагу використання змісту навчання проєктуванню ЦСРЗА на основі причинно-наслідкових ланцюгів знань. Приріст середніх значень відповідних показників в експериментальних групах по відношенню до контрольних груп знаходиться в інтервалі 17,2–21,4 %. Результати дисперсійного аналізу за критерієм F -розподілу Фішера середніх значень показників сформованості знань, умінь та професійно важливих якостей у студентів контрольних та

експериментальних груп підтвердили їх статистичну неоднорідність.

Таблиця 1 – Результати порівняльного експерименту

Показники педагогічного експерименту	Середні значення показників		Приріст, %
	Контр. групи	Експ. групи	
Показник сформованості знань з проєктування ЦСРЗА	1,82	2,2	20,9
Показник сформованості умінь з проєктування ЦСРЗА	1,73	2,1	21,4
Показники сформованості мотиваційно-цілевих якостей	1,85	2,2	18,7
Показники сформованості когнітивних якостей	1,79	2,1	17,2
Показники сформованості емоційно-вольових якостей	1,91	2,28	19,3

Висновки. В роботі здійснено обґрунтування, розроблення та експериментальну перевірку змісту навчання проєктуванню цифрових систем релейного захисту та автоматики на основі причинно-наслідкових ланцюгів знань.

Обґрунтовано узагальнену модель змісту навчання проєктуванню цифрових систем релейного захисту та автоматики на базі причинно-наслідкових ланцюгів знань. Розроблена модель відповідає вимозі системності знань, має структурований і цілісний характер, розкриває ієрархічну структуру і системно-інваріантні зв'язки між елементами знань.

На основі узагальненої моделі розроблено зміст навчання проєктуванню конкретних систем релейного захисту та автоматики, що вивчаються в межах дисциплін професійної підготовки за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Експериментальна перевірка розробленого змісту навчання довела її значні переваги у порівнянні з традиційним змістом навчання проєктуванню цифрових систем релейного захисту та автоматики як у формуванні системи знань й умінь з проєктування, так і формуванні мотиваційно-цілевих, когнітивних та емоційно-вольових професійно-важливих якостей майбутніх інженерів.

Список літератури

- Семенюк Е., Мельник В. Філософія сучасної науки і техніки: підручник. Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2017. 364 с.
- Frisch M. Causal reasoning in physics. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1017/cbo9781139381772>.
- Causal Learning: Psychology, Philosophy, and Computation (Oxford Series in Cognitive Development) / ред.: A. Gopnik, L. Schulz. Oxford University Press, USA, 2007. 358 с. DOI: <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195176803.001.0001>.
- Дьяченко М. Д., Поднебенная С. К. Цифровая защита (аппаратное и алгоритмическое обеспечение): навчальный

- посібник. Маріуполь: ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», 2014. 204 с.
5. Яндулський О. С., Дмитренко О. О. Релейний захист. Цифрові пристрої релейного захисту, автоматики та управління енергетичних систем: навчальний посібник. Київ: НТУУ «КПІ», 2016. 102 с.
 6. Баран П. М., Кідиба В. П., Пришляк Я. Д. Цифрові пристрої релейного захисту трансформаторів (автотрансформаторів): навчальний посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2020. 208 с.
 7. Гребченко М. В., Нікіфоров А. П., Бунько В. Я. Релейний захист і автоматика розподільних електричних мереж. Частина 1: навчальний посібник. Київ: ЦП «КОМПРИНТ», 2019. 314 с.
 8. Лазарев М. І. Полісистемне моделювання змісту технологій навчання загальноінженерних дисциплін: монографія. Харків: Видавництво НФаУ, 2003. 356 с.
 9. Development of complex models of elements of the system of professionally-oriented content of electrical engineering training / M. Lazarev et al. 2020 *IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, Kremenchuk, Ukraine, 21–25 September 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/paep49887.2020.9240802>.
 10. Рудевич Н. В. Професійна підготовка майбутніх інженерів з автоматизації енергосистем на основі каузального навчання: монографія. Харків: Видавництво «Диса-плюс», 2017. 404 с.

References

1. E. Semeniuk and V. Melnyk, *Filosofia suchasnoi nauky i tekhniky [Philosophy of modern science and technology]*. Lviv: LNU im. Iv. Franka, 2017. (in Ukrainian)
2. M. Frisch, *Causal Reasoning in Physics*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2014, doi: <https://doi.org/10.1017/cbo9781139381772>.
3. A. Gopnik and L. Schulz, Eds., *Causal Learning: Psychology, Philosophy, and Computation (Oxford Series in Cognitive Development)*. Oxford Univ. Press, USA, 2007, doi: <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195176803.001.0001>.
4. M. D. Diachenko and S. K. Podnebennaia, *Tsifrovaia Zashchita (Apparatnoe I Algoritmicheskoe Obespechenie) [Digital Security (Hardware and Algorithms)]*. Mariupol: DVNZ «Pryaz. derzh. tekhn. un-t», 2014. (in Russian)
5. O. S. Yandulskiy and O. O. Dmytrenko, *Releinyi zakhyst. Tsyfrovii prystroi releinoho zakhystu, avtomatyky ta upravlinnia enerhetychnykh system [Relay protection. Digital devices for relay protection, automation and control of power systems]*. Kyiv: NTUU «KPI», 2016. (in Ukrainian)
6. P. D. Baran, V. P. Kidyba, and Ya. D. Pryshliak, *Tsyfrovii prystroi releinoho zakhystu transformatoriv (avtotransformatoriv) [Digital relay protection devices for transformers (autotransformers)]*. Lviv: Vyd-vo Lviv. politekhniki, 2020. (in Ukrainian)
7. M. V. Hrebchenko, A. P. Nikiforov, and V. Ya. Bunko, *Releinyi zakhyst i avtomatyka rozpodilnykh elektrychnykh merezh. Chastyina 1 [Relay protection and automation of electrical distribution networks. Part 1]*. Kyiv: TsP «KOMPRYNТ», 2019. (in Ukrainian)
8. M. I. Lazarev, *Polisystemne modeliuвання змісту tekhnolohii navchannia zahalnoinzhenernykh dystsyplin [Poly-system modelling of the content of teaching technologies for general engineering disciplines]*. Kharkiv: Vyd-vo NFaU, 2003. (in Ukrainian)
9. M. Lazarev, H. Mosiienko, A. Tarasenko, and I. Soloshych, “Development of complex models of elements of the system of professionally-oriented content of electrical engineering training”, in 2020 *IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, Kremenchuk, Ukraine, Sep. 21–25, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/paep49887.2020.9240802>.
10. N. V. Rudevich, *Profesiina pidhotovka maibutnykh inzheneriv z avtomatyzatsii enerhosystem na osnovi kauzalnoho navchannia [Professional training of future power system automation engineers based on causal learning]*. Kharkiv: Vyd-vo «Dysa-plus», 2017. (in Ukrainian)

Надійшла (received) 04.02.2024

Відомості про автора (-ів) / About the Author (-s)

Рудевич Наталія Валентинівна (Nataliia Rudevich) – доктор педагогічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2858-9836>; e-mail: n.rudevich@ukr.net.

Гарон Дмитро Анатолійович (Dmitriy Garon) – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8609-9707>; e-mail: dima12345go@gmail.com.

Лазарев Микола Іванович (Mykola Lazarev) – доктор педагогічних наук, професор, Українська інженерно-педагогічна академія, професор кафедри педагогіки, методики та менеджменту освіти; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9742-4739>; e-mail: lazarev@uipa.edu.ua.