

РУДЕВИЧ НАТАЛІЯ ВАЛЕНТИНІВНА ✉ – доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2858-9836>; e-mail: natalia.rudevich@khpi.edu.ua.

ГАПОН ДМИТРО АНАТОЛІЙОВИЧ – доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8609-9707>; email: dmytro.hapon@khpi.edu.ua.

ЛАЗАРЄВ МИКОЛА ІВАНОВИЧ – доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри педагогіки, методики та менеджменту освіти, Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9742-4739>; e-mail: lazarev@uipa.edu.ua.

ШВЕЦЬ СЕРГІЙ ВІКТОРОВИЧ – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та кібербезпеки енергосистем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3716-141X>; email: serhii.shvets@khpi.edu.ua.

МЕТОД НАВЧАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ МІКРОПРОЦЕСОРНИХ СИСТЕМ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ТА АВТОМАТИКИ

З широким впровадженням цифрової техніки в енергетику актуальною постала проблема підготовки фахівців для експлуатації мікропроцесорних систем релейного захисту та автоматики, що можуть мати складні ієрархічні структури. Проаналізовано види експлуатаційних робіт інженерів з релейного захисту та автоматики. Виявлено, що основним видом роботи є перевірка технічного стану системи релейного захисту та автоматики, що передбачає встановлення причинно-наслідкових зв'язків між призначенням, побудовою, принципом дії та параметрами. Побудовано алгоритм технічної перевірки мікропроцесорної системи релейного захисту та автоматики, що відображає послідовність дій у разі низхідної перевірки, як найбільш розповсюдженій. Виявлено, що умовно процес технічної перевірки мікропроцесорних систем релейного захисту та автоматики можна розділити на 3 етапи, а саме розроблення завдання на технічну перевірку, перевірки технічного стану та встановлення показників функціонування системи релейного захисту та автоматики. Визначено причинно-наслідкові зв'язки, які складають основу розв'язання завдань на цих 3 етапах. У разі розроблення завдання на технічну перевірку на підставі причинно-наслідкових зв'язків формуються вимоги щодо перевірки системи релейного захисту та автоматики. Безпосередньо при перевірці технічного стану необхідно встановлення причинно-наслідкових зв'язків між вимогами щодо перевірки та принципом дії, побудовою програмного й апаратного забезпечення для складових різних рівнів ієрархії та всієї системи релейного захисту та автоматики. Етап, що пов'язаний з визначенням показників функціонування, передбачає встановлення причинно-наслідкових зв'язків між принципом дії й побудовою та параметрами складових всіх рівнів ієрархії та системи в цілому. Обґрунтовано узагальнену модель методу навчання експлуатації мікропроцесорних систем релейного захисту та автоматики на основі причинно-наслідкових зв'язків, що включає 4 етапи. На підставі узагальненої моделі розроблено методику навчання експлуатації конкретних мікропроцесорних систем релейного захисту та автоматики, що вивчаються в дисциплінах освітньої програми «Електроенергетика».

Ключові слова: причинно-наслідкові зв'язки; метод навчання; експлуатація; мікропроцесорні системи релейного захисту та автоматики.

Постановка проблеми. Безперервність процесу виробництва, передачі, розподілу та споживання електричної енергії, а також складність об'єктів управління, призвело до системної автоматизації енергосистем. Необхідність у пристроях релейного захисту та автоматики з'явилась з самого початку створення електричних систем. Спочатку це були прості пристрої побудовані на електромеханічних реле. Надалі використання електронної елементної бази для побудови пристроїв релейного захисту та автоматики дозволило значно розширити їх функціональні можливості. До недавнього часу вся система професійної підготовки майбутніх фахівців з релейного захисту та автоматики була побудована з урахуванням технічних можливостей аналогової та електромеханічної елементної бази в контексті знань моделі освіти. Широке використання мікропроцесорної техніки в енергетиці дозволило створювати цілі системи релейного захисту та

автоматики, які являють собою комбіновані багатофункціональні пристрої, що об'єднують різні функції захисту, автоматики, контролю, місцевого та дистанційного керування тощо. Сучасні системи релейного захисту та автоматики (СРЗА), які ще можуть називатися «мікропроцесорні релейні термінали», «мікропроцесорні термінали», «приладові модулі», «релейні термінали» або просто «цифрові захисти», являють собою складні програмно-апаратні комплекси зі складними ієрархічними структурами (рис. 1).

Принципи побудови та алгоритми, які використовуються в мікропроцесорних релейних терміналах, значно відрізняються від тих, що використовуються в електромеханічних та аналогових релейних захистах через суттєво різні технічні основи та способи обробки інформації.





Рисунок 1 – Ієрархічна структура мікропроцесорної СРЗА

У навчальній літературі на сьогодні достатньо повно розглянуті принципи апаратної реалізації мікропроцесорного релейного захисту, систематизовані основні його елементи та розглянуті типові структури [1, 2]. У свою чергу інформація щодо алгоритмічного забезпечення цифрових захистів у навчальній літературі носить досить епізодичний та фрагментарний характер і подається як варіант реалізації захисту певного виробника [3–5]. У переважній більшості навчальний матеріал має описовий характер, практично відсутня інформація щодо особливостей експлуатації цифрових СРЗА.

При проектуванні чи експлуатації реальних мікропроцесорних СРЗА інженер керується не лише наявними шаблонами, а й постійно вимушений встановлювати причинно-наслідкові зв'язки між призначенням, принципом функціонування, побудовою та параметрами пристрою [6]. З огляду на це задля забезпечення продуктивно-синтетичного рівня сформованості професійних знань та умінь у майбутніх інженерів з релейного захисту та автоматики енергосистем процес навчання повинен бути побудований на основі встановлення причинно-наслідкових зв'язків між різними підсистемами знань. В роботі [7] запропоновано зміст навчання проектуванню цифрових СРЗА на базі причинно-наслідкових ланцюгів знань, що дозволяє ефективно формувати проектну компетентність у майбутніх інженерів.

Мета статті – обґрунтування та розроблення методу навчання експлуатації мікропроцесорних систем релейного захисту та автоматики на основі причинно-наслідкових зв'язків.

Відповідно до мети роботи визначено наступні завдання:

1. Аналіз експлуатаційних видів робіт інженерів з релейного захисту та автоматики.
2. Побудова алгоритму технічної перевірки мікропроцесорної СРЗА.
3. Розробка методу навчання експлуатації мікропроцесорних СРЗА.

Основні матеріали дослідження. Експлуатаційна діяльність інженерів з релейного захисту та автоматики передбачає проведення наступних видів робіт [8, 9]:

- проведення робіт з технічної перевірки пристроїв;
- проведення робіт з виявлення та усунення причин некоректної роботи пристроїв;
- ведення технічної документації щодо пристроїв.

Роботи з технічної перевірки пристроїв захисту та автоматики проводять з метою:

- налаштування пристроїв, що складається з сукупності операцій щодо регулювання, підготовки, увімкнення та забезпечення нормальної роботи в заданих умовах;
- прийому в експлуатацію пристроїв, що в загальному випадку складається з перевірки відповідності проектам змонтованого обладнання, результатів випробувань і комплексного обстеження, підготовленості до нормальної експлуатації, якості монтажних робіт;
- технічного обслуговування пристроїв, що пов'язано з контролем виконання усіх вимог їх використання, спостереженням за справним станом, проведенням оглядів, контролем за дотриманням правил технічної експлуатації, інструкцій заводів-виробників та місцевих інструкцій, усуненням дрібних несправностей, що не вимагають вимкнення обладнання, регулюванням, чищенням, продувкою і змачуванням тощо;
- підвищення рівня експлуатації, оптимізації використання, вдосконалення, модернізації та розроблення нових програмних та технічних засобів пристроїв захисту та автоматики.

Проведення робіт з виявлення та усунення причин некоректної роботи пристроїв захисту та автоматики пов'язано з типовими професійними задачами щодо:

- зовнішнього та внутрішнього огляду,
- перевірки кіл зв'язку,
- заміни дефектних елементів,
- усунення несправностей в схемах підключення,
- налаштування.

Задачами при веденні технічної документації щодо пристроїв захисту та автоматики є запис до журналу проведених робіт та паспортів пристроїв.

Як можна бачити експлуатаційні задачі інженерів з релейного захисту та автоматики насамперед пов'язані з проведенням технічної перевірки, це

вимагає від працівника володіння понятійно-аналітичним та продуктивно-синтетичним мисленням, що передбачає встановлення причинно-наслідкових зв'язків щодо побудови та функціонування СРЗА.

Виконання експлуатаційних задач щодо мікропроцесорних СРЗА передбачає вибір певної послідовності дій. Роботи можуть починатися як з самого верхнього рівня і поступово доходити до нижнього рівня терміналу, так і з самого нижнього рівня і поступово доходити до верхнього рівня ієрархічної СРЗА. Це залежить від складності пристрою, досвіду працівника та конкретних умов. Наприклад, виявлення причин некоректної роботи здійснюється на підставі аналізу отриманих характеристик мікропроцесорного терміналу та його складових.

У разі низхідної перевірки спочатку перевіряються складові елементи першого рівня ієрархії мікропроцесорного терміналу, далі з урахуванням того в якому елементі виявленні відхилення перевіряються елементи його другого рівня і так далі. Перевірка здійснюється доки поки не буде виявлено несправний елемент. При висхідній перевірці спочатку перевіряються складові елементи нижніх рівнів ієрархії, після виявлення та усунення несправності перевіряється вся СРЗА.

У випадку низхідної технічної перевірки мікропроцесорної СРЗА, як найбільш розповсюдженій, алгоритм технічної перевірки можна записати у вигляді, що представлений на рис. 2.

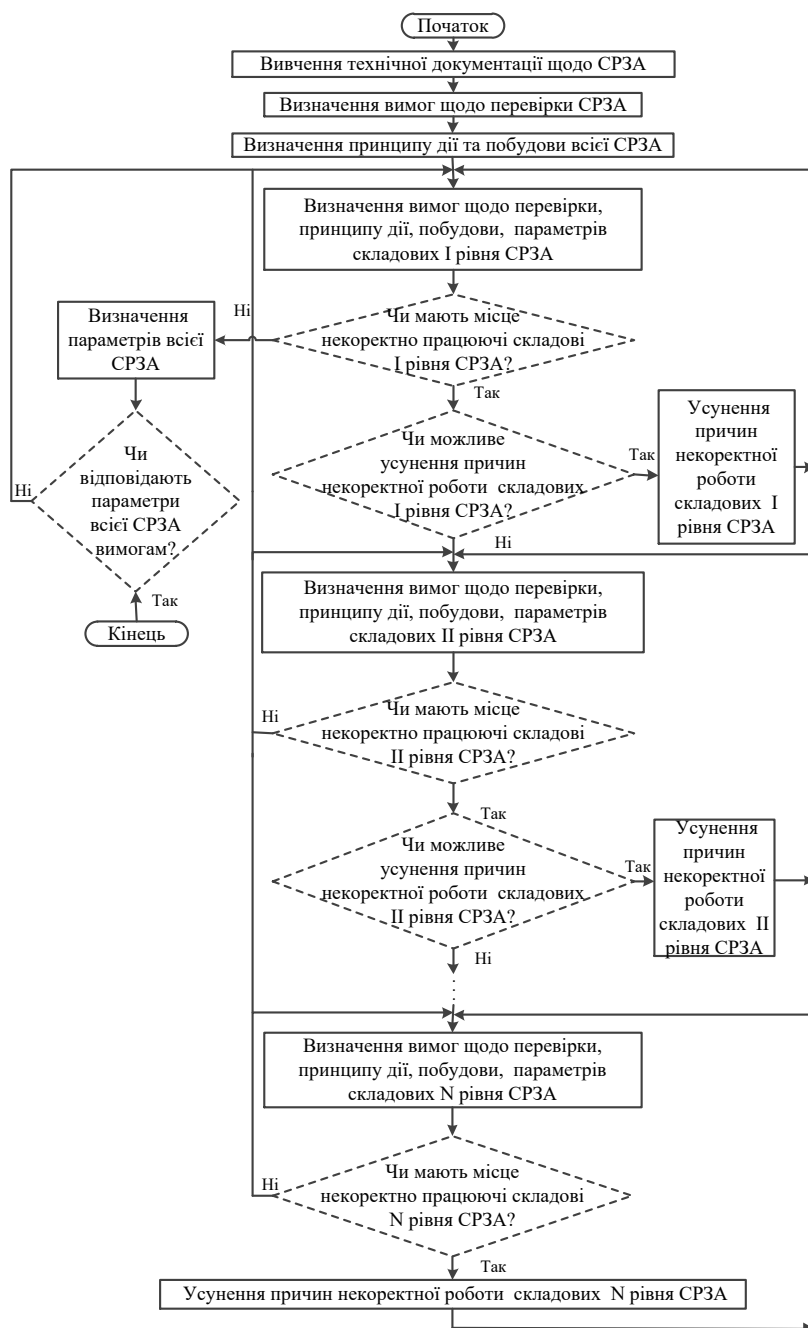


Рисунок 2 – Алгоритм технічної перевірки мікропроцесорної СРЗА

Згідно з наведеним алгоритмом технічної перевірки умовно можна виділити три основні етапи: розроблення завдання на технічну перевірку, перевірка технічного стану, встановлення показників функціонування складових та всієї мікропроцесорної СРЗА.

На заняттях викладачі повинні теоретично підготувати студентів з кожного етапу алгоритму. При вивченні технічної документації та визначенні вимог щодо перевірки СРЗА студент повинен мати навички роботи з технічною документацією щодо терміналів, уміти читати електричні принципи схем, уміти виділяти головне про обсяги й завдання технічного обслуговування пристрою, володіти інформацією щодо можливостей випробувальних установок та методів вимірювання (випробування).

Для успішного виконання робіт, що безпосередньо пов'язані з перевіркою технічного стану та визначенням показників функціонування СРЗА, студент повинен уміти оптимально розбивати систему на функціональні складові для виконання робіт, визначати структурні елементи, що реалізують певні функції та параметри виділених функціональних складових. На практичних або лабораторних заняттях викладачеві доцільно змодельовати спрощену професійну ситуацію, наприклад, перевірити технічний стан наявної на кафедрі цифрової СРЗА. Для чого студенти повинні отримати технічний опис на приладовий модуль, з якого визначити що треба перевіряти і яким чином. Далі, використовуючи наявні випробувальні установки, провести перевірку, визначити показники функціонування та зробити висновки й рекомендації щодо технічного стану мікропроцесорної СРЗА.

Отже, підставою для розроблення завдання на технічну перевірку, перевірки технічного стану та встановлення показників функціонування складових СРЗА електричної системи будуть слугувати наступні причинно-наслідкові зв'язки (рис. 3–5).

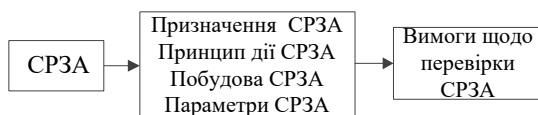


Рисунок 3 – Причинно-наслідкові зв'язки при розробленні завдання на технічну перевірку СРЗА

З урахуванням встановлених причинно-наслідкових зв'язків при виконанні різних завдань щодо технічної перевірки запишемо узагальнену модель методу навчання експлуатації мікропроцесорних СРЗА (рис. 6)

Як приклад здійснимо навчальну технічну перевірку приладового модуля релейного захисту та автоматики синхронного генератора (ПМРЗАСТ), що виготовляється науково-виробничим підприємством «ХАРТРОН-ІНКОР» (м. Харків) [10]. Як було зазначено раніше проведення технічної перевірки умовно складається з трьох видів задач, а саме: розроблення завдання на технічну перевірку, безпосередньо перевірки технічного стану та визначення показників функціонування СРЗА.

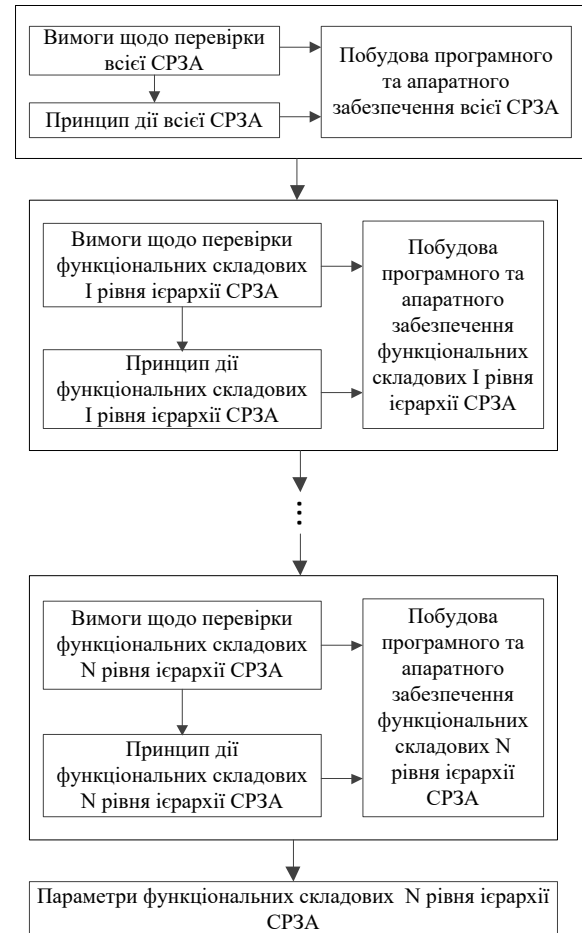


Рисунок 4 – Причинно-наслідкові зв'язки при перевірці технічного стану та встановленні показників функціонування складових N рівня ієрархії мікропроцесорної СРЗА

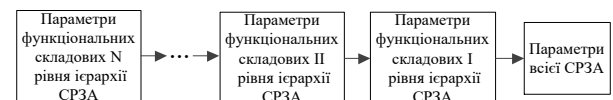


Рисунок 5 – Причинно-наслідкові зв'язки при встановленні показників функціонування усієї мікропроцесорної СРЗА

1. Розробка завдання на технічну перевірку приладового модуля релейного захисту та автоматики синхронного генератора.

Для здійснення технічної перевірки приладового модуля релейного захисту та автоматики синхронного генератора перш за все необхідно вивчення його структурної схеми, схеми зовнішніх підключень, габаритно-інсталяційного креслення та технічних характеристик [10, рис. 1.1.2, 1.5.1 і 1.5.2, табл. 1.2.1–1.2.6].

До принципу дії приладового модуля релейного захисту та автоматики закладені функції основних захистів синхронного генератора, функції протиаварійної автоматики та діагностики й управління вимикачем.

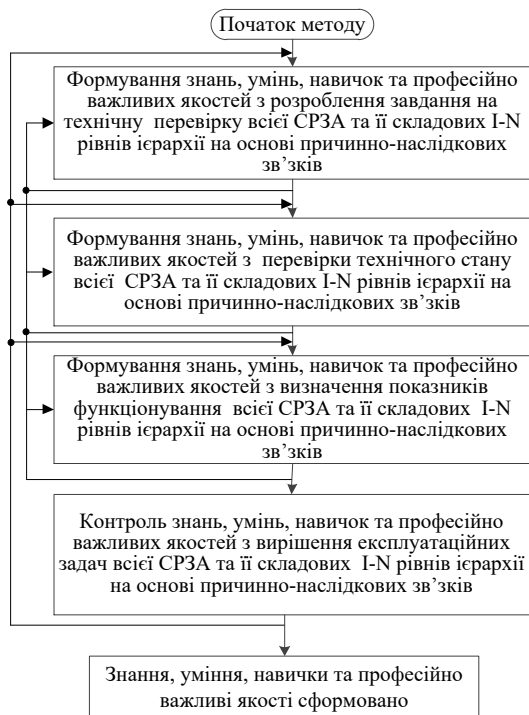


Рисунок 6 – Узагальнена модель методу навчання експлуатації мікропроцесорних СРЗА

Програмна та апаратна реалізація функціональних складових обумовлюють певні параметри та характеристики пристрою. Згідно із зазначеними функціями та побудовою приладового модуля, контрольованими параметрами є струм та напруга зі сьомо входами на кожний параметр ($I_{\text{ном}} = 5 \text{ А}$, $U_{\text{ном}} = 58 \text{ В}$), до експлуатаційних параметрів відносяться уставки та налаштування функцій захисту, автоматики та управління. Параметрами дискретних виходів виступають 26 виходів з постійною напругою 220 В та тривало комутованим струмом до 1 А, 8 виходів з постійною напругою 220 В та тривало комутованим струмом до 5 А. Параметрами дискретних входів є 32 входи з постійною напругою 220 В. Вище названі параметри є параметрами, що потребують перевірки, з урахуванням цього причинно-наслідковий зв'язок з визначення вимог щодо перевірки приладового модуля релейного захисту та автоматики синхронного генератора має вигляд (рис. 7).

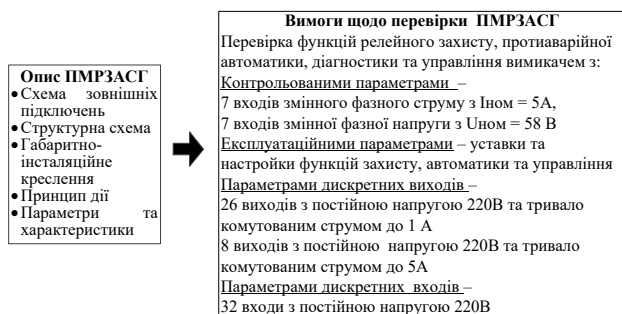


Рисунок 7 – Причинно-наслідковий зв'язок між описом та вимогами щодо перевірки приладового модуля релейного захисту та автоматики синхронного генератора

2. Перевірка технічного стану усього приладового модуля релейного захисту та автоматики синхронного генератора.

Здійсимо перевірку функцій релейного захисту приладового модуля релейного захисту та автоматики синхронного генератора. Згідно із загальних вимог щодо перевірки приладового модуля до функцій релейного захисту, які треба перевірити, відносяться [10]: повздовжній диференціальний захист, поперечний диференціальний захист, максимальний струмовий захист, захист від симетричних перенавантажень, струмовий захист від зворотної послідовності, захист від підвищення напруги, захист від втрати збудження та асинхронного режиму, захист від зворотної потужності, захист від коротких замикань в роторі, захист мінімальної частоти. Апаратна реалізація зазначених функцій релейного захисту згідно із загальної побудови приладового модуля релейного захисту та автоматики синхронного генератора забезпечується [10]: вимірювальним перетворювачем струму та напруги (ВПСН), аналогово-цифровим перетворювачем (АЦП), обчислювальною частиною (ОЧ), цифровим індикатором (ЦІ), клавіатурою (К), комплектом вихідних реле (КВР), контактними колодками – роз'ємами ($S_1, S_2, F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6, F_7, F_8, F_9, F_{10}$). Отже, на даному етапі причинно-наслідковий зв'язок з визначення принципу дії та побудови функцій релейного захисту приладового модуля релейного захисту та автоматики синхронного генератора має вигляд, що наведений на рис. 8.

Аналогічним чином можна визначити принцип дії та побудову функцій автоматики, діагностики і управління вимикачем приладового модуля релейного захисту та автоматики синхронного генератора.

3. Розробка завдання на технічну перевірку, перевірка технічного стану та встановлення показників функціонування приладового модуля релейного захисту та автоматики синхронного генератора.

В навчальних цілях здійсимо перевірку функції поперечного диференціального захисту приладового модуля релейного захисту та автоматики синхронного генератора, перелік вихідних сигналів та опис якого візьмемо з керівництва до експлуатації [6, рис. 1.3.7, табл. 1.3.2, Б3, Е2].

Згідно із загальних вимог щодо поперечного диференціального захисту контрольованим параметром є струм в перемичці між нейтраліями паралельних кіл синхронного генератора. А, отже, принципом дії зазначеної функції є формування команди на сигнал або на відключення при умові перевищення струму в перемичці (I_N) над струмом небалансу ($I_{\text{нб}}$).

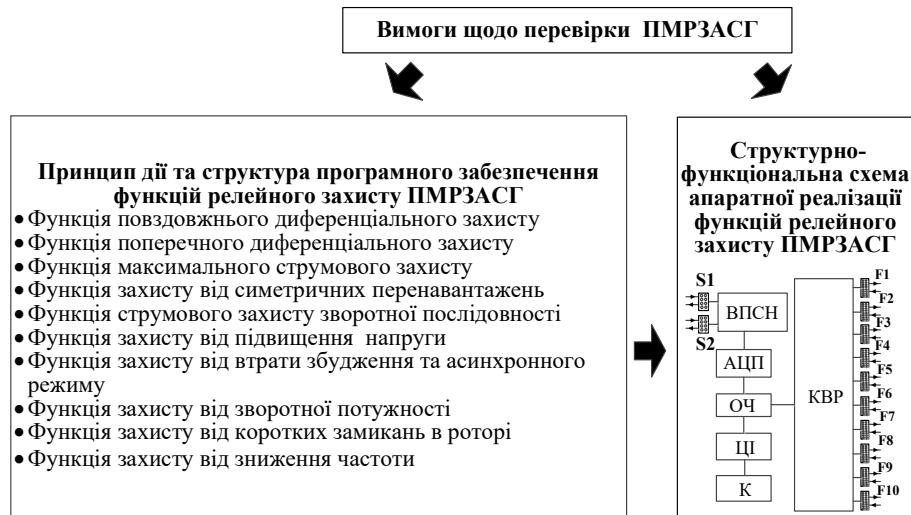


Рисунок 8 – Причинно-наслідковий зв'язок з визначення принципу дії та побудови функцій релейного захисту приладового модуля релейного захисту та автоматики синхронного генератора

Відповідно до схеми зовнішніх підключень приладового модуля релейного захисту та автоматики синхронного генератора до роз'ємів S1/7-S1/8 ВСПН повинна підключатися вторинна обмотка трансформатора струму, що встановлений в перемичці нейтралі синхронного генератора. Отже, для перевірки характеристик спрацьовування поперечного диференціального захисту необхідно до вказаних роз'ємів підключити джерело змінного струму, діюче значення якого не повинно перевищувати 5 А.

Вихідними колами приладового модуля є дискретні слабкострумові та силові сигнали, а, отже для їх виміру потрібно до відповідних роз'ємів під'єднати контрольно-перевірочну апаратуру. Визначимо роз'єми, на виводах яких повинен з'являтися сигнал при введенні в роботу поперечного диференціального захисту приладового модуля релейного захисту та автоматики синхронного генератора.

Відповідно до заводських налаштувань для реалізації роботи поперечного диференціального захисту приладового модуля задіяні наступні роз'єми [10, табл. В13]: F10/3-F10/11 – сигнал аварійної сигналізації; F10/4-F10/2 – сигнал попереджувальної сигналізації; F10/2-F10/10, F4/2-F4/10 – сигнал спрацьовування поперечного диференціального захисту; F6/1-F6/9, F6/3-F6/11, F6/4-F6/12, F6/5-F6/13, F6/6-F6/14, F6/8-F6/16 – сигнал спрацьовування поперечного диференціального захисту на відключення, F6/5-F6/13 – сигнал запуску поперечного диференціального захисту.

У свою чергу дискретний силовий сигнал на відключення генераторного вимикача згідно з даних призначення контактів роз'єму F8, з'явиться на контактах 2, 6, 10 [10, табл. В8].

З урахуванням сказаного причинно-наслідковий зв'язок з визначення вимог щодо перевірки, принципу дії, побудови та параметрів функції поперечного диференціального захисту приладового модуля релейного захисту та автоматики синхронного генератора має вигляд, що представлений на рис. 9.

У разі справності пристрою при певних значеннях контрольованого параметра та параметрів налаштування (експлуатаційні параметри) значення сигналу в кожному колі повинно дорівнювати 220 В постійного струму. Якщо поперечний диференціальний захист буде введено до роботи, то у разі запуску захисту повинен з'явитися сигнал на роз'ємах F6/5-F6/13, далі на роз'ємах F4/2-F4/10, F10/2-F10/10, що відповідає спрацьовуванню захисту. В залежності від того захист працює на сигнал або на відключення повинен з'явитися сигнал на роз'ємах F10/4-F10/2 або на роз'ємах F10/3-F10/11, F6/1-F6/9, F6/3-F6/11, F6/4-F6/12, F6/5-F6/13, F6/6-F6/14, F6/8-F6/16 відповідно.

Прийmemo, що при діючому значенні контрольованого струму 1 А захист повинен спрацьовувати, а, отже, повинен з'являтися вихідний дискретний сигнал на роз'ємах F10/2-F10/10. Припустимо, що сигнал буде відсутній або не буде відповідати нормі, що потребує визначення причин некоректної роботи. Так, відповідно до схеми програмної та апаратної реалізації функції поперечного диференціального захисту перевірки потребують роз'єми S1/7-S1/8, ВПСН, АЦП, обчислювальна частина, роз'єми F10/2-F10/10 комплектів вихідних реле.

Перш за все при визначенні несправностей перевіряють наявність живлення, що передбачає вимір рівня постійної напруги на вході елементу, наприклад, за допомогою вольтметра. Далі, якщо живлення забезпечене для всіх елементів схеми, перевіряють цілісність зв'язків між елементами, наприклад, за допомогою омметра. Наступним кроком є перевірка по черзі параметрів (характеристик) послідовно з'єднаних елементів, що реалізують відповідну функцію. Все це потребує наявності опису та технічних даних для кожного елементу. Здійснимо перевірку елементів кола ВПСН → АЦП → ОЧ → КВР, що забезпечують реалізацію функції поперечного диференціального захисту.

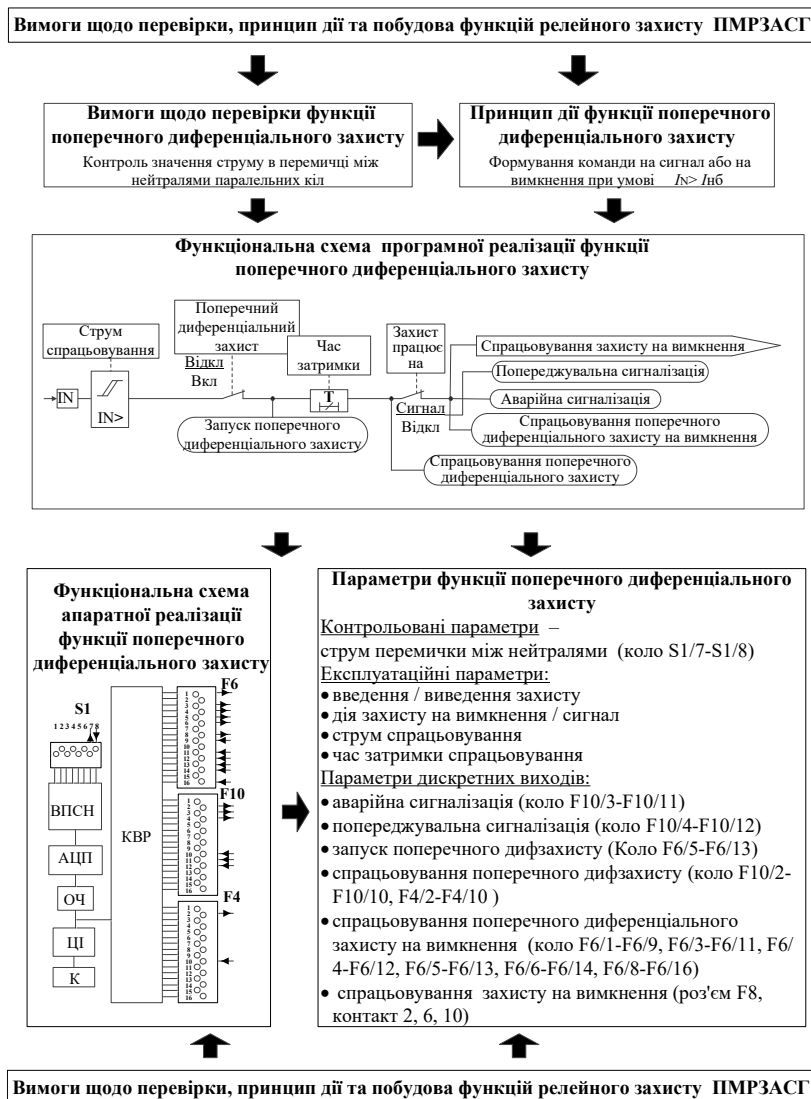


Рисунок 9 – Причинно-наслідкові зв'язки з визначення вимог щодо перевірки, принципу дії, побудови та параметрів функції поперечного диференціального захисту

Приймемо, що складові модуля ВПСН, а саме вимірювальний перетворювач струму та вимірювальний перетворювач напруги, можна перевірити окремо. Задля перевірки вимірювального каналу повинен бути поданий змінний струм певного значення, а вихідним сигналом повинен слугувати сигнал постійної напруги, що відповідає певному значенню вхідного струму. Для одноканального АЦП перевірка зводиться до подачі на вхід сигналу постійної напруги певного рівня та у разі справності отримання на виході цифрового коду, що відповідає рівню вхідної напруги. Для комплексу вихідних реле приймемо, що його складові можна перевірити окремо, а саме реле дискретних виходів (РДВ), реле дискретних входів (РДВх). Припустимо, що принцип функціонування реле дискретних виходів побудований таким чином, що поява напруги на певному виході буде визначатися певним цифровим кодом на його вході. Так, при подачі на вхід блоку РДВ цифрового коду 5 каналу, у разі справності елемента, на вихідних роз'ємах F10/2-F10/10 повинні отримати напругу

220 В. Аналогічним чином можна перевірити будь-який канал блоку РДВ та РДВх. У разі, якщо вихідна напруга будь-якого елемента не відповідає нормі, елемент повинен бути замінений на інший.

У зв'язку з тим, що обчислювальна частина являє собою інтелектуальний елемент, перевірка, що характерна для інших елементів пристрою, не є прийнятною для неї. Несправність в обчислювальній частині найпростіше може бути виявлена тільки шляхом виключення. У випадку, якщо перевірка показала апаратну справність усіх елементів (окрім обчислювальної частини), причинами некоректної роботи може бути апаратний або програмний збій центрального процесора або апаратний збій системної шини.

В якості прикладу побудуємо причинно-наслідковий зв'язок з визначення вимог щодо перевірки, принципу дії, побудови та параметрів АЦП, що реалізований на мікросхемі K572ПВ3 (рис. 10).

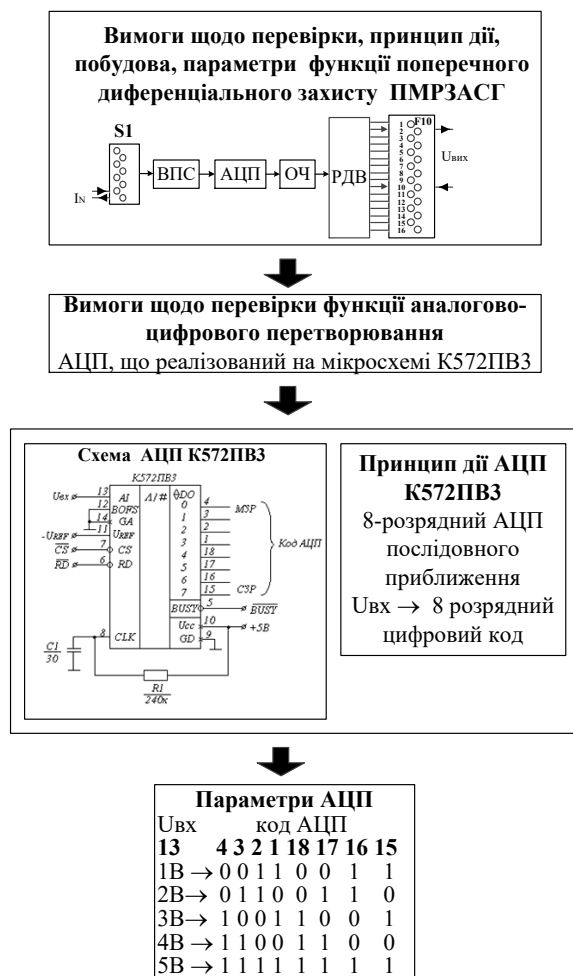


Рисунок 10 – Причинно-наслідкові зв'язки з визначення вимог щодо перевірки, принципу дії, побудови та параметрів аналого-цифрового перетворювача

Після виявлення причин некоректної роботи інженер повинен або замінити несправний модуль у разі наявності запасних частин або демонтувати та відправити фірмі-виробнику з указівкою несправних елементів (каналів). Після заміни несправного модуля необхідно знову провести перевірку необхідних функцій та приладового модуля в цілому.

Аналогічним чином можуть бути визначені вимоги щодо перевірки, принцип дії, побудова та параметри будь-якої функції захисту, а також функцій автоматики, діагностики та управління вимикачем, що загалом будуть визначати параметри всього приладового модуля релейного захисту та автоматики синхронного генератора.

Висновки. В роботі здійснено обґрунтування та розроблення методу навчання експлуатації мікропроцесорних СРЗА на основі причинно-наслідкових зв'язків.

Проаналізовано експлуатаційні види робіт інженерів з релейного захисту та автоматики. Визначено, що основним видом робіт є перевірка технічного стану, що передбачає встановлення причинно-наслідкових зв'язків між різними підсистемами знань щодо мікропроцесорної СРЗА.

Розроблено алгоритм технічної перевірки мікропроцесорної системи релейного захисту, визначено основні етапи щодо виконання, а саме: розроблення завдання на технічну перевірку, перевірка технічного стану, встановлення показників функціонування складових та всієї.

Побудовано узагальнену модель методу навчання експлуатації мікропроцесорних СРЗА з урахуванням встановлених причинно-наслідкових зв'язків при виконанні різних завдань в процесі технічної перевірки.

На основі узагальненої моделі розроблено методику навчання експлуатації конкретних СРЗА, що вивчаються в межах дисциплін професійної підготовки за освітньою програмою «Електроенергетика». Це дозволило збільшити значення показників сформованості знань, умінь, навичок та професійно-важливих якостей з експлуатації мікропроцесорних систем релейного захисту та автоматики на 20 %.

Список літератури

1. Яндульський О. С., Дмитренко О. О. Релейний захист. Цифрові пристрої релейного захисту, автоматики та управління енергетичних систем : навчальний посібник. Київ: НТУУ «КПІ», 2016. 102 с.
2. Дьяченко М. Д., Поднебенная С. К. Цифровая защита (аппаратное и алгоритмическое обеспечение) : навчальний посібник. Маріуполь: ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», 2014. 204 с.
3. Махлін П. В., Костенко С. Ю., Кузьменко О. П. Интеллектуальные пристрої релейного захисту та автоматики [Intelligent relay protection and automation devices] : навчальний посібник. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2020. 256 с. URL: <https://eir.zp.edu.ua/server/api/core/bitstreams/242f6a8a-2884-4d59-ab68-cc8d5d242bf6/content> (дата звернення: 29.01.2025).
4. Баженов В. М., Одегов М. М. Автоматика электроустановок электроэнергетических систем : навчальний посібник. Харків: Планета Принт, 2022. 186 с.
5. Баран П. М., Кідиба В. П. Цифровой захист ліній електропередавання : навчальний посібник. Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2023. 259 с.
6. Рудевіч Н. В. Професійна підготовка майбутніх інженерів з автоматизації енергосистем на основі каузального навчання : монографія. Харків: Видавництво «Диса-плюс», 2017. 404 с.
7. Рудевіч Н. В., Гапон Д. А., Лазарев М. І. Модель змісту навчання проектуванню цифрових систем релейного захисту та автоматики енергосистем. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність*. 2024. № 1 (8). С. 100–104. DOI: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2024.01.02>.
8. Міністерство палива та енергетики України. Виробництво та розподілення електроенергії. Частина 1. Розділи: "Експлуатація устаткування електростанцій і мереж, обслуговування споживачів енергії". "Ремонт устаткування електростанцій і мереж". *Довідник кваліфікаційних характеристик професій працівників*. 2001. № 62. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0019558-01#Text> (дата звернення: 22.01.2025).
9. СОУ-Н ЕЕ 35.514:2007. Технічне обслуговування мікропроцесорних пристроїв, релейного захисту, протинаварійної автоматики, електроавтоматики, дистанційного керування та сигналізації від 0,4 кВ до 750 кВ. Правила. Чинний від 2008-01-30. Вид. офіц. Київ, 2007.
10. НВП ХАРТРОН-ІНКОР. Приборный модуль релейной защиты и автоматики. Основные защиты и автоматика генераторов (G010). Руководство по эксплуатации. Харків, 2015. 137 с. URL: https://www.hartron-incor.com.ua/_files/ugd/452358_be34579f0f164a5e8212adbd1e85248b.pdf (дата звернення: 23.01.2025).

References

1. O. S. Yandulskyi and O. O. Dmytrenko, *Releinyi zakhyst. Tsyfrovi 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)
2. 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)
3. P. V. Makhlin, S. Yu. Kostenko, and O. P. Kuzmenko, *Intelektualni prystroi releinoho zakhystu ta avtomatyky [Intelligent relay protection and automation devices]*. Zaporizhzhia: NU «Zaporizka politekhnika», 2020. Accessed: Jan. 29, 2025. [Online]. Available: <https://eir.zp.edu.ua/server/api/core/bitstreams/242f6a8a-2884-4d59-a6c8-cc8d5d242bf6/content> (in Ukrainian)
4. V. M. Bazhenov and M. M. Odiehov, *Avtomatyka elektroustanovok elektroenerhetychnykh system [Automation of electrical installations of electric power systems]*. Kharkiv: Planeta Print, 2022. (in Ukrainian)
5. P. M. Baran and V. P. Kidyba, *Tsyfrovyi zakhyst linii elektroperesylannia [Digital protection of power transmission lines]*. Lviv: Vyd-vo Nats. un-tu "Lviv. politekhnika", 2023. (in Ukrainian)
6. N. V. Rudevich, *Profesiina pidhotovka maibutnikh inzheneriv z avtomatyzatsii enerhosystem na osnovi kauzalnogo navchannia [Professional training of future engineers in automation of power systems based on causal learning]*. Kharkiv: Vyd-vo «Dysa-plus», 2017. (in Ukrainian)
7. N. Rudevich, D. Gapon, and M. Lazarev, "Teaching content model for designing digital systems of power grid relay protection and automation", *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*, no. 1 (8), pp. 100–104, Jul. 2024, doi: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2024.01.02> (in Ukrainian)
8. Ministry of Fuel and Energy of Ukraine, "Vyrobnystvo ta rozpodilennia elektroenerhii. Chastyna 1. Rozdily: "Ekspluatatsiia ustatkuvannia elektrostantsii i merezh, obsluhovuvannia spozhyvachiv enerhii". "Remont ustatkuvannia elektrostantsii i merezh" [Electricity generation and distribution. Part 1: Chapters: 'Operation of power plant and grid equipment, servicing of energy consumers'. 'Repair of power plant and grid equipment']", *Dovidnyk kvalifikatsiinykh kharakterystyk profesii pratsivnykiv [Handbook of qualification characteristics of employee professions]*, no. 62, 2001. Accessed: Jan. 22, 2025. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0019558-01#Text> (in Ukrainian)
9. *Tekhnichne obsluhovuvannia mikroprotseornykh prystroiv, releinoho zakhystu, protyavariinoi avtomatyky, elektroavtomatyky, dystantsiinoho keruvannia ta syhnalizatsii vid 0,4 kV do 750 kV. Pravyly [maintenance of microprocessor devices, relay protection, emergency automation, electric automation, remote control and signalling from 0.4 kV to 750 kV. Rules]*, SOU-N EE 35.514:2007, VAT «LvivORHRES», Kyiv, 2007. (in Ukrainian)
10. SPE HARTRON-INCOR, "Pribornyj modul' relejnoj zashchity i avtomatiki. Osnovnye zashchity i avtomatika generatorov (G010). Rukovodstvo po jekspluatatsii [Instrument module of relay protection and automation. Main protection and automation of generators (G010). Operation Manual]", Kharkiv, AAVH.421453.005 – 119.04 RJe3, 2015. Accessed: Jan. 23, 2025. [Online]. Available: https://www.hartron-incor.com.ua/_files/ugd/452358_be34579f0f164a5e8212adbd1e85248b.pdf (in Russian)

Надійшла (received) 30.01.2025

UDC 621.315:378.14

RUDEVICH NATALIYA ✉ – Doctor of Pedagogical Sciences, Full Professor, Professor of the Department of Automation and Cybersecurity of Power Systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2858-9836>; e-mail: natalia.rudevich@khp.edu.ua.

GAPON DMITRIY – Doctor of Technical Sciences, Docent, Head of the Department of Automation and Cybersecurity of Power Systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8609-9707>; email: dmytro.hapon@khp.edu.ua.

LAZAREV MYKOLA – Doctor of Pedagogical Sciences, Full Professor, Professor of the Department of Pedagogy, Methodology and Management of Education, V. N. Karazin Kharkiv National University; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9742-4739>; e-mail: lazarev@uipa.edu.ua.

SHVETS SERHIY – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Associate Professor of the Department of Automation and Cybersecurity of Power Systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3716-141X>; email: serhii.shvets@khp.edu.ua.

LEARNING METHOD IN THE OPERATION OF MICROPROCESSOR SYSTEMS OF RELAY PROTECTION AND AUTOMATION

With the widespread introduction of digital technology in the power industry, the problem of training specialists for the operation of microprocessor relay protection and automation systems, which can have complex hierarchical structures, has become relevant. The types of operational work of relay protection and automation engineers have been analyzed. It has been found that the main type of work is checking the technical condition of the relay protection and automation system, which involves establishing cause-and-effect relationships between the purpose, construction, principle of operation and parameters. An algorithm for technical inspection of the microprocessor relay protection and automation system has been constructed, which reflects the sequence of actions in the case of a downward inspection, as the most common. It has been found that the process of technical inspection of microprocessor relay protection and automation systems can be conditionally divided into three stages, namely, developing a task for technical inspection, checking the technical condition and establishing indicators of the functioning of the relay protection and automation system. Cause-and-effect relationships have been determined, which form the basis for solving tasks at these three stages. In the case of developing a task for technical inspection based on cause-and-effect relationships, requirements for checking the relay protection and automation system are formulated. Directly during the technical condition check, it is necessary to establish cause-and-effect relationships between the inspection requirements and the principle of operation, the construction of software and hardware for components of different levels of the hierarchy and the entire relay protection and automation system. The stage associated with the determination of performance indicators involves the establishment of cause-and-effect relationships between the principle of action and the construction and parameters of components of all levels of the hierarchy and the system as a whole. A generalized model of the method of teaching the operation of microprocessor relay protection and automation systems based on cause-and-effect relationships, which includes four stages, has been substantiated. Based on the generalized model, a methodology for teaching the operation of specific microprocessor relay protection and automation systems studied in the disciplines of the educational program "Electrical Power Engineering" has been developed.

Keywords: causal relationships; learning method; operation; microprocessor system of relay protection and automation.