

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/0000-0003-2545-6314>; e-mail: natalia.rudevich@khi.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>; e-mail: dmytro.hapon@khi.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>; e-mail: serhii.shvets@khi.edu.ua.

МЕТОДИКА ФОРМУВАННЯ НАУКОВО-ДОСЛІДНОЇ КОМПЕТЕНТНОСТІ ЩОДО ЦИФРОВИХ СИСТЕМ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ТА АВТОМАТИКИ

Формування науково-дослідної компетентності у майбутніх інженерів-електроенергетиків є актуальною задачею в процесі їхньої професійної підготовки. Одним із профільних напрямків є підготовка фахівців для експлуатації, проектування та наукової діяльності щодо мікропроцесорних систем релейного захисту та автоматики. Проаналізовано науково-дослідні види робіт інженерів з релейного захисту та автоматики. Виявлено, що при проведенні будь-яких прикладних робіт щодо мікропроцесорних систем релейного захисту та автоматики невід'ємною складовою є здійснення пошукових досліджень, це передбачає встановлення каузальних зв'язків між різними підсистемами знань. Побудовано алгоритм проведення пошукових науково-дослідних робіт щодо цифрової системи релейного захисту та автоматики, який представлений п'ятьма етапами, а саме ознайомлення з системою релейного захисту та автоматики; визначення вимог та призначення науково-дослідних робіт щодо системи релейного захисту та автоматики; визначення можливих варіантів побудови або принципу функціонування системи релейного захисту та автоматики; дослідження параметрів складових елементів (функцій) та системи релейного захисту та автоматики в цілому; узагальнення та оцінка результатів досліджень. Відповідно до розробленого алгоритму проведено пошукові науково-дослідні роботи при здійсненні експлуатаційної, проектувальної та наукової діяльності щодо можливості модернізації, розроблення та удосконалення мікропроцесорного релейного захисту асинхронного двигуна відповідно. На підставі проведених досліджень розроблено методику навчання для формування науково-дослідної компетентності щодо цифрових систем релейного захисту та автоматики, яка включає п'ять етапів відповідно до етапів алгоритму проведення пошукових науково-дослідних робіт. При цьому кожен етап методики передбачає встановлення каузальних зв'язків між різними підсистемами знань щодо цифрової системи релейного захисту та автоматики.

Ключові слова: каузальні зв'язки; методика навчання; науково-дослідна робота; цифрова система релейного захисту та автоматики.

Постановка проблеми. Важливою складовою інтегральної професійної компетентності інженерів-електроенергетиків є науково-дослідна компетентність, яка насамперед передбачає можливість результативно проводити пошукові наукові дослідження, зокрема, і щодо цифрових систем релейного захисту та автоматики (СРЗА).

Необхідність в здійсненні пошукових науково-дослідних робіт (НДР) може виникнути в процесі: розробки проектного завдання на цифровий термінал з метою з'ясування існуючих технічних досягнень в цій галузі; розв'язання задач експлуатаційного характеру, що, наприклад, потребують покращення техніко-економічних параметрів пристрою; проведення наукової діяльності, яка направлена на розробку нових або удосконалення вже існуючих мікропроцесорних СРЗА. Безсумнівно, фундаментальні навички із здійснення пошукових НДР повинні сформуватись у майбутніх інженерів в процесі їхньої професійної підготовки.

В роботах [1, 2] обґрунтовано, що основу проектною та експлуатаційною професійною діяльністю фахівців з цифрових СРЗА складає встановлення каузальних зв'язків між призначенням, принципом

функціонування, побудовою та параметрами пристрою. З урахуванням цього запропоновано зміст та метод навчання для формування проектною та експлуатаційною компетентностей майбутніх фахівців з цифрових СРЗА.

У свою чергу проведення науково-дослідних робіт передбачає виявлення та аналіз причинно-наслідкових зв'язків між досліджуваними явищами. У процесі дослідження науковець встановлює, які фактори є причинами певних змін і до яких наслідків вони призводять, що дає змогу обґрунтувати отримані результати. Завдяки встановленню таких зв'язків стає можливим прогнозування результатів за зміни вихідних умов. Це, у свою чергу, забезпечує наукову обґрунтованість висновків і підвищує практичну цінність проведених досліджень [3, 4].

Мета статті: обґрунтування та розроблення методики навчання для формування науково-дослідної компетентності щодо цифрових СРЗА на основі каузальних зв'язків.

Відповідно до мети роботи визначено наступні завдання:

1. Аналіз науково-дослідних видів робіт інженерів з релейного захисту та автоматики.

© Н. В. Рудевич, Д. А. Гапон, М. І. Лазарєв, С. В. Швець, 2026



Ця робота ліцензується відповідно до *Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)*
Конфлікт інтересів: Автори заявили про відсутність конфлікту

2. Побудова алгоритму проведення пошукових НДР щодо цифрових СРЗА.

3. Розробка методики формування науково-дослідної компетентності щодо цифрових СРЗА.

Основні матеріали дослідження. Науково-дослідна діяльність інженерів з релейного захисту та автоматики пов'язана з наступними видами робіт [5]:

- проведення НДР щодо можливості розроблення, створення та впровадження конкурентоздатних СРЗА
- проведення НДР з метою отримання нових знань щодо СРЗА;
- оформлення та документування результатів НДР.

Проведення НДР щодо можливості розроблення, створення та впровадження конкурентоздатних СРЗА передбачає виконання типових професійних задач, а саме:

- розроблення завдання на проведення пошукових наукових досліджень щодо існуючих СРЗА;
- проведення пошукових наукових досліджень щодо існуючих СРЗА;
- визначення показників функціонування щодо існуючих СРЗА.

НДР, що пов'язані з отриманням нових знань щодо СРЗА, включають типові професійні задачі з:

- розроблення завдання на проведення наукових досліджень щодо удосконалення існуючих або створення нових СРЗА;
- проведення наукових досліджень щодо удосконалення існуючих або створення нових СРЗА;
- визначення показників функціонування щодо удосконалених або створених СРЗА.

Оформлення та документування результатів науково-дослідної діяльності щодо СРЗА вимагає виконання наступних типових професійних задач:

- підготовка наукових публікацій та інформаційних оглядів щодо СРЗА, виступ на наукових нарадах, семінарах, конференціях;
- складання науково-технічних звітів, заявок на винаходи та промислові зразки щодо СРЗА.

З проведеного аналізу науково-дослідних видів робіт щодо СРЗА можна бачити, що підґрунтям для прикладних розробок є проведення пошукових НДР. При цьому алгоритм проведення пошукових НДР щодо цифрових СРЗА буде мати вигляд, що представлений на рис. 1.

Як можна бачити, алгоритм у загальному випадку включає п'ять етапів:

1. Ознайомлення з СРЗА;
2. Визначення вимог та призначення НДР щодо СРЗА;
3. Визначення можливих варіантів побудови або принципу функціонування СРЗА;
4. Дослідження параметрів складових елементів (функцій) та СРЗА в цілому;
5. Узагальнення та оцінка результатів досліджень щодо СРЗА.

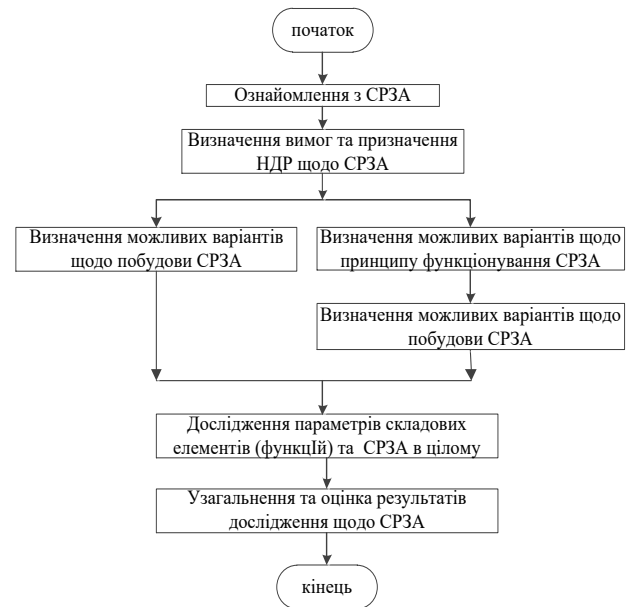


Рисунок 1 – Алгоритм проведення пошукових НДР щодо цифрових СРЗА

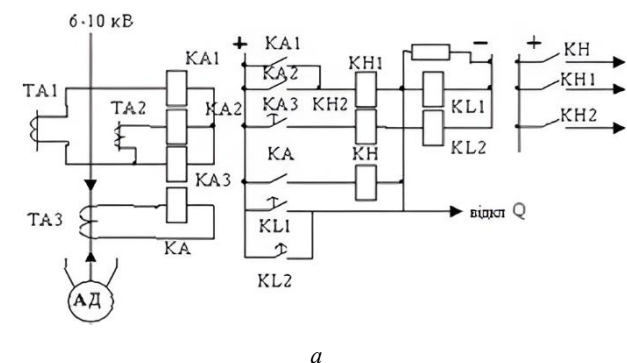
Застосуємо наведений алгоритм задля здійснення пошукових НДР в процесі експлуатаційної, проектної та наукової діяльності фахівцями з цифрових СРЗА. Наведемо приклад проведення пошукових НДР під час експлуатаційної діяльності інженерів-електроенергетиків, де на сьогодні актуальним є питання модернізації СРЗА. В якості СРЗА прийнемо релейний захист асинхронного двигуна (АД).

1. Ознайомлення з СРЗА. Релейний захист АД, що планується модернізувати, реалізований на електромеханічних реле і має наступну принципову схему (рис. 2) [6].

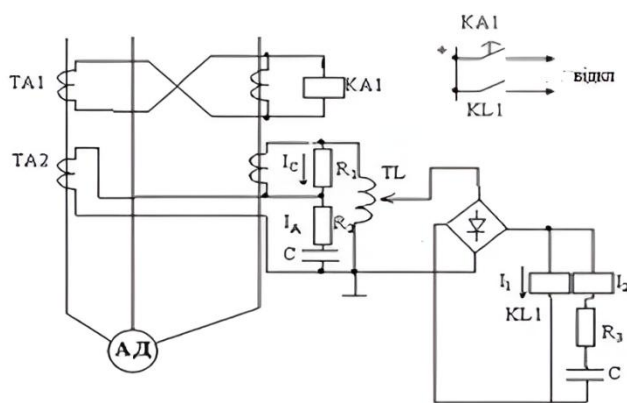
Вимірювальний орган – струмові реле КА1, КА2 (РТ-40), КА3 (РТ-80) увімкнені через трансформатор струму ТА за схемою неповної зірки з реле в зворотньому проводі. При двофазних коротких замиканнях (КЗ) спрацьовує КА1 (або КА2) і захист вимикає як максимальний струмовий захист з незалежною витримкою часу, створеної реле КЛ1. При трифазних КЗ спрацьовує КА3 – як максимальний струмовий захист з залежною витримкою. Додаткове уповільнення створюється реле КЛ2. Захист від однофазних КЗ виконаний на трансформаторі струму нульової послідовності ТА3 і працює на сигнал за допомогою вказівного реле КН (рис. 2 а).

Захист від перенавантажень використовує трансформатори струму ТА1, увімкнені на різницю струмів фаз і реле КА1 (РТ-80), своїм контактом дає сигнал на вимикання. Захист від обриву фаз використовує трансформатори струму ТА2, увімкнені у різні фази. Навантаженнями служать резистори R1, R2 та ємність С, що дають зсув фаз струмів I_c і I_a трансформаторів для нормального режиму і обриву фази відповідно $\varphi = \pi$, $\varphi \neq \pi$ за однакової кількості вихідних напруг. В результаті цього в першому випадку струми поляризованого реле $I_1 = I_2 = 0$, а в другому $I_1 = I_2 \neq 0$ і реле КЛ1 спрацьовує, вимикаючи

двигун без витримки часу. Автотрансформатор TL служить для зміни чутливості (рис. 2 б).



а



б

Рисунок 2 – Принципова схема захисту АД:

а – від коротких замикань;

б – від перенавантаження та обриву фаз

Як можна бачити, існуючий захист АД лише забезпечує функції захисту від коротких замикань, теплового перенавантаження та обриву фаз. Багаторічний досвід експлуатації АД показав, що захист не забезпечує безаварійну роботу двигуна. Через те що, захист виконаний на електромеханічних реле має місце значна похибка вимірювання струму, вплив несинусоїдальності напруги на роботу захисту, помилкове спрацьовування при пуску двигуна, бездіяльність захисту при несиметричних струмах тощо.

Основними видами аварій АД є механічні та електричні аварії. Електричні аварії, у свою чергу, діляться на три типи: мережеві аварії (аварії за напругою); струмові аварії, пов'язані з обривом провідників в обмотках статора, ротора або кабелю, порушенням контактів і руйнуванням сполук, виконаних пайкою або зварюванням, міжвиткове і міжфазне замикання обмоток, аварії, що призводять до пробоя ізоляції в результаті нагрівання, викликаного протіканням струмів перенавантаження або короткого замикання; аварії, що пов'язані зі зниженням опору ізоляції внаслідок її старіння, руйнування або зволоження [7].

Отже, задля підвищення ефективності захисного пристрою АД він повинен включати захист від:

мережевих аварій, внутрішніх аварій, захист від механічних перенавантажень, захист від холостого ходу, захист від теплового перенавантаження та захист від пробоя ізоляції.

2. Визначення вимог та призначення НДР щодо СРЗА. Актуальність проведення НДР щодо підвищення ефективності захисного пристрою АД обумовлюється цілою низкою факторів. По-перше, струм необхідно вимірювати якомога точніше, адже відомо, що тривала робота АД лише при 5% перенавантаженні скорочує термін його служби в 10 разів. По-друге, у зв'язку з сильною несинусоїдальністю кривої струму, необхідно визначати діюче значення струмів, включаючи гармонійний аналіз, щоб врахувати значення вищих гармонік, що роблять найбільш шкідливий вплив на пускові та робочі характеристики двигуна. Робота за пікових значень або за якимись усередненими сумами призводить до помилкових спрацьовувань. По-третє, необхідно забезпечити відбудову від 7–8 кратних пускових струмів, одночасно забезпечивши вимикання двигуна навіть при невеликих тривалих перенавантаженнях. По-четверте, захист повинен бути «розумним», тобто час спрацьовування повинен залежати від струму. По-п'яте, необхідно відключати недонавантажений двигун при виникненні неприпустимої асиметрії струмів, що призводить до биття ротора. У шосте, необхідно враховувати тепло, що виділяється при пусках двигуна, так як при частих пусках двигун може перегрітися пусковими струмами, маючи на валу навантаження значно нижче номінального.

Крім того повинна бути можливість передавати виміряні величини, параметри аварійних режимів, значення уставок, інформацію про стан устаткування на місцеві або віддалені диспетчерські пункти, а також проводити дистанційне керування об'єктом, автоматичне повторне вмикання, блокування від багаторазових вмикань електродвигуна і формування сигналу при відмові вимикача тощо.

Отже, основним призначення НДР є дослідження функціональних можливостей мікропроцесорних захистів АД, що виготовляються різними виробниками. Дослідження проведемо за наступними критеріями, якими, на наш погляд, повинен відповідати універсальний захист АД: захист від аварій в електромережі, робота за діючим значенням струмів, захист від внутрішніх аварій, захист від механічного перенавантаження, захист від холостого ходу, захист від пробоя ізоляції на корпус, захист від теплового перенавантаження, ідентифікація стану двигуна, функції автоматики та дистанційного керування.

3. Визначення можливих варіантів щодо побудови або принципу функціонування СРЗА. Спроби створити ефективний захист робляться різними виробниками постійно. Найбільшого поширення набули дві ідеології: кутково-фазовий метод, реалізований у більшості імпортованих дорогих пристроїв і контроль параметрів роботи двигуна за величиною діючого значення струму в кожній із

живильних фаз, покладений в основу вітчизняних пристроїв.

Світові лідери у виробництві СРЗА є європейські компанії ABB, SIEMENS, ALSTOM, SCHNEIDER ELECTRIC, до вітчизняних виробників відносяться наступні організації – науково-виробниче підприємство (НВП) «ХАРТРОН-ІНКОР», компанія «РЕЛСіС», Виробниче об'єднання (ВО) «КІЇВПРИЛАД».

Більшість з представлених на ринку імпортних пристроїв захисту АД, мало чим відрізняються один від одного за своїми функціональними можливостями і мають загальні недоліки: низька точність виставлення струмів, спрацьовування за максимально допустимим струмом, відсутність вимірювання напруги та інше.

Що стосується вітчизняних пристроїв, то в них функції захисту реалізовані не гірше, а у деяких, за сукупністю параметрів, навіть краще, ніж у більшості імпортних аналогів. Такі пристрої об'єднує наявність у вимірювальному колі трансформаторів струму, які контролюють робочі струми, що протікають в обмотках статора, цифрової обробки сигналу, безліч параметрів, що контролюються, простота конструкції і найголовніше – ціна. При великих потужностях їх вартість становить кілька тисяч доларів. До того ж, імпортні захисні пристрої часом не здатні витримати жорсткі режими експлуатації: підвищена температура, вологість, низька якість напруги живлення, потужні електромагнітні і комутаційні збурення присутні у мережі. Ціна більшості вітчизняних пристроїв не перевищує кілька сотень доларів, причому практично не залежить від потужності АД, що захищається. Вони створювалися з урахуванням наших умов. Здатні підлаштовуватися під реальні умови експлуатації, при яких, за специфікою виробництва, необхідно іноді загрубляти або, навпаки, послабити режими роботи. Прості в обігу і не вимагають додаткових налаштувань.

В якості прикладу порівняємо функціональні можливості мікропроцесорних релейних захистів АД трьох вітчизняних виробників, що працюють за діючим значенням струму.

Пристрій МРЗС-05Д (ВО «КІЇВПРИЛАД») виконує наступні функції захисту, автоматики і управління [8]: диференціальний захист; максимальний струмовий захист (МСЗ); захист від несиметричних режимів; захист від замикань на землю; пристрій резервування відключення вимикача; захист від пуску на загальмований механізм; захист від розчеплення з механізмом або при пошкодженні механізму; індивідуальний захист мінімальної напруги; автоматичне увімкнення резерву (для увімкнення резервного механізму); управління вимикачем; контроль справності кіл управління вимикачем.

Захист двигуна РДЦ-01-057 НВП «РЕЛСіС» призначений для захисту трифазних АД, а саме [9]: захист за максимальної напруги; захист за мінімальної напруги; захист за холостим / сухим ходом; захист за асиметрією струмів; захист за блокуванням ротора;

струмова відсічка; захист від замикання на землю; захист від неправильного чергування фаз.

Показниками функціонального призначення приладового модуля релейного захисту та автоматики (ПМ РЗА) АД «Діамант» НПП «ХАРТРОН-ІНКОР» виступають [10]: МСЗ, захист від однофазних замикань на землю, захист від перенавантаження, дуговий захист, захист мінімального струму, захист від несиметричних режимів, ідентифікація пуску двигуна, захист від зтяжного пуску, захист від частих пусків, контроль активної потужності, захист мінімальної напруги, захист від обриву фаз живлячого фідера, резервування відмови вимикача, управління високовольним вимикачем, розрахунок ресурсу високовольного вимикача, диференціальний захист.

4. Дослідження параметрів складових елементів (функцій) та СРЗА в цілому. Проаналізуємо наявність функцій захисту від мережних аварій, внутрішніх аварій, механічних перенавантажень холостого ходу, теплового перенавантаження та пробою ізоляції в пристроях МРЗС-05Д, РДЦ-01-057, «Діамант» (табл. 1).

5. Узагальнення і оцінка результатів досліджень щодо СРЗА. На підставі проведених досліджень щодо функціональних можливостей мікропроцесорних захистів АД, які виготовляються НВП «ХАРТРОН-ІНКОР», компанією «РЕЛСіС», ВО «КІЇВПРИЛАД», можна зробити висновок, що найбільш універсальним захисним пристроєм АД виступає ПМ РЗА «Діамант». Через це він може бути рекомендований для захисту асинхронних електродвигунів замість електромеханічних пристроїв.

Проведемо пошукові НДР, що характерні для проектувальної діяльності інженерів з СРЗА, наприклад, щодо розробки захисту АД.

1. Ознайомлення з СРЗА. У теперішній час все більш широке поширення набувають мікропроцесорні захисти електричного обладнання, які приходять на зміну електромеханічним і мікроелектронним реле. Мікропроцесорні захисти не змінюють принципів релейного захисту, але вони розширюють функціональні можливості, скорочують кількість реле, спрощують обслуговування і зрештою знижують її вартість. При розробці сучасних мікропроцесорних захисних пристроїв АД з'являється можливість передбачити функції захисту від усіх можливих аварійних та ненормальних режимів АД, а саме: аварій за напругою, струмових аварій, аварій, що пов'язані зі зниженням опору ізоляції, механічних аварій. Отже, в одному захисному пристрої повинні бути передбачені наступні функції захисту: від аварій в електромережі, внутрішніх аварій, механічного перенавантаження, холостого ходу, пробою ізоляції на корпус, теплового перенавантаження.

2. Визначення вимог та призначення НДР щодо СРЗА. Головною задачею НДР є дослідження існуючих методів і засобів захисту АД, що реалізують вище названі функції і побудовані на мікропроцесорах.

Таблиця 1 – Функції захисту АД, що реалізовані в МРЗС-05Д, РДЦ-01-057, «Діамант»

Параметри захисту АД	МРЗС-05Д «КІВПРИЛАД»	РДЦ-01-057 «РЕЛСіС»	ПМ РЗА «Діамант» «ХАРТРОН-ІНКОР»
Захист від аварій в електромережі	Захист мінімальної напруги	Захист за максимальної напруги, захист за мінімальної напруги	Захист мінімальної напруги, захист від обриву фаз живлячого фідера
Захист від внутрішніх аварій	Диференціальний двоступеневий захист у трифазному виконанні, триступеневий максимальний струмовий захист у трифазному виконанні, двоступеневий захист від несиметричних режимів, захист від замикань на землю за струмом $3I_0$ ненаправлений	Струмова відсічка, захист за асиметрією струмів, захист від замикання на землю, захист від неправильного чергування фаз	Триступеневий максимальний струмовий захист у трифазному виконанні, захист від однофазних замикань на землю, дуговий захист, захист від несиметричних режимів, двоступеневий диференціальний захист
Захист від механічного перенавантаження	Захист від пуску на загальмований механізм, захист від пошкодження механізму	—	Захист від зтяжного пуску
Захист від холостого ходу	Захист при розчепленні з механізмом	Захист за холостим / сухим ходом	Захист мінімального струму
Захист від теплового перенавантаження	—	Триступеневий захист при перенавантаженні за струмом	Захист від перенавантаження, захист від частих пусків, контроль активної потужності
Захист від пробую ізоляції на корпус	—	—	—
Ідентифікація стану двигуна	—	—	Ідентифікація пуску двигуна
Функції автоматики та дистанційного керування	Функція резервування відключення вимикача, автоматичне включення резерву, управління вимикачем, контроль справності ланцюгів управління вимикачем	—	Резервування відмови вимикача, управління високовольтним вимикачем, розрахунок ресурсу високовольтного вимикача

3. *Визначення можливих варіантів побудови або принципу функціонування СРЗА.* Визначимо можливі варіанти побудови, наприклад, для захисту від внутрішніх аварій, що пропонуються вітчизняними виробниками: МРЗС-05Д – диференціальний захист, МСЗ, захист від несиметричних режимів, захист від замикань на землю; РДЦ-01-057 – струмова відсічка, захист за асиметрією струмів, захист від замикання на землю, захист від неправильного чергування фаз; ПМ РЗА «Діамант» – МСЗ, захист від однофазних замикань на землю, дуговий захист, захист від несиметричних режимів, диференціальний захист.

Аналогічним чином можуть бути визначені можливі варіанти побудови інших функцій захисту.

4. *Дослідження параметрів складових елементів (функцій) та СРЗА в цілому.* Дослідимо параметри вище наведених захистів від внутрішніх аварій. МРЗС-05Д: диференціальний захист – двоступеневий у трифазному виконанні, МСЗ – триступеневий у трифазному виконанні (1 ступінь з незалежною витримкою часу – струмова відсічка, 2 ступінь як з незалежною, так і залежною витримкою часу, 3 ступінь з незалежною витримкою часу – захист від

перенавантаження), захист від несиметричних режимів – двоступеневий, з незалежною та з зворотньо залежною витримкою часу, захист від замикань на землю – за струмом $3I_0$ ненаправлений. ПМ РЗА «Діамант»: МСЗ – триступеневий (1 ступінь – струмова відсічка з незалежною часо-струмовою характеристикою, 2 і 3 ступені – з пуском за напругою (задається уставкою) і можливістю вибору типу часо-струмової характеристики), диференціальний захист – двоступеневий (1 ступінь – диференціальна відсічка, 2 ступінь – диференціальний захист з гальмуванням), захист від однофазних замикань.

Аналогічним чином можуть бути досліджені параметри інших функцій захисту.

5. *Узагальнення і оцінка результатів досліджень щодо СРЗА.* На підставі проведених досліджень щодо функціональних можливостей існуючих мікропроцесорних захистів АД, в захисті, що планується розробити, доцільно передбачити наступні функції захисту від внутрішніх аварій: триступеневий МСЗ у трифазному виконанні, двоступеневий диференціальний захист у трифазному виконанні, двоступеневий захист від несиметричних режимів,

захист від замикань на землю за струмом $3I_0$, захист від неправильного чергування фаз, дуговий захист.

Проведення прикладних НДР під час наукової діяльності майбутніх інженерів з автоматизації енергосистем пов'язано зі створенням нових або удосконаленням існуючих принципів функціонування (побудови) СРЗА. В якості прикладу проведемо навчальні пошукові НДР щодо удосконалення теплового захисту АД.

Ознайомлення з СРЗА. Досвід експлуатації показав, що в АД, схильних до перенавантаження з технологічних причин, має місце передчасне старіння ізоляції через перегрів обмотки ротора. В такому випадку доцільно передбачити тепловий захист, що реагує на струм та температуру нагрівання обмотки ротора.

Визначення вимог та призначення НДР щодо СРЗА. Для ефективного захисту АД від перегріву необхідно забезпечити захист, що контролює не лише струм в обмотці, а й температуру нагрівання обмотки. Отже, метою НДР є дослідження існуючих методів реалізації теплових захистів з контролем струму та температури нагрівання обмотки ротора.

Визначення можливих варіантів побудови або принципу функціонування СРЗА. Відомі захисти від теплового перенавантаження АД, засновані на використанні інтегральної залежності струму статора в функції часу [6, 7]. Даний принцип реалізований у більшості сучасних мікропроцесорних терміналах, таких як REM-545 (концерн ABB, Швеція), Seram 1000+ M20 (Schneider Electric, Франція); РДЦ-01-057 (ВО РЕЛСіС), Україна). До інших підходів реалізації теплового захисту ротора слід віднести захист, що базується на основі непрямого визначення температури нагрівання короткозамкнутого ротора [11].

4. *Дослідження параметрів складових елементів(функцій) та СРЗА в цілому.* Спосіб, що заснований на використанні інтегральної залежності струму статора у функції часу має недоліки через відсутність контролю температури нагріву обмоток статора і ротора.

Захист на основі непрямого визначення температури нагрівання короткозамкнутого ротора заснований на безперервному вимірі миттєвих значень фазних струмів і напруг, подальших обчислень поточкозчеплень і їх похідних, швидкості обертання ротора і температури нагріву обмотки ротора, при перевищенні допустимих значень проводиться відключення двигуна від мережі живлення [11]. До недоліків такого підходу можна віднести те, що температура нагрівання ротора визначається з великою похибкою через непряме визначення ковзання на основі каталожного значення активного опору ротора. У цьому випадку захист забезпечується тільки для АД невеликої потужності (потужність до 200 кВт), в яких відсутній ефект витіснення струму в роторі (скін-ефект), а також при допущенні, що у формулі для обчислення швидкості обертання використовується каталожне значення активного опору ротора. Застосування даного захисного алгоритму некоректно для асинхронного двигуна з глибокопазним ротором

або ротором з подвійною білячою кліткою (потужність понад 200 кВт), в яких опір ротора залежать окрім температури нагрівання і від явища ефекту витіснення струму.

5. *Узагальнення і оцінка результатів досліджень щодо СРЗА.* На підставі проведених досліджень з урахуванням недоліків існуючих теплових захистів АД для підвищення ефективності захисного пристрою доцільно принцип дії побудувати на основі непрямого визначення температури нагрівання обмотки ротора, а саме обчислення температури нагріву робити у темпі реального часу шляхом розрахунку активного опору ротора і його порівняння з відомим значенням у холодному стані.

З урахуванням проведених пошукових НДР щодо СРЗА, що характерні для експлуатаційної, проєктувальної та наукової діяльності інженерів-електроенергетиків, розробимо загальну методику формування науково-дослідної компетентності щодо цифрових СРЗА.

1. Етап «*Ознайомлення з СРЗА*». На цьому етапі майбутній інженер з СРЗА повинен навчитися визначати вимоги щодо поліпшення характеристик СРЗА згідно з поставлених задач. Для експлуатаційної діяльності на цьому етапі характерним є виявлення властивостей СРЗА, що використовується, з метою її модернізації. Проєктувальна діяльність передбачає визначення вимог щодо покращення параметрів СРЗА з метою розробки нового пристрою. Наукова діяльність пов'язана з визначенням вимог щодо підвищення ефективності СРЗА з метою створення нового або удосконалення існуючого принципу функціонування (побудови) цифрового термінала. Загалом, для визначення вимог щодо покращення параметрів СРЗА необхідно володіти знаннями з нормальних, ненормальних та аварійних режимів об'єкта управління, для якого застосовується чи планується застосовуватися даний пристрій захисту. Отже, каузальний зв'язок знань першого етапу методу навчання буде мати вигляд (рис. 3)

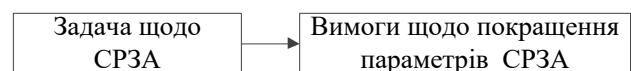


Рисунок 3 – Каузальний зв'язок знань першого етапу методики навчання

2. Етап «*Формування знань, умінь, навичок з визначення вимог та призначення НДР щодо СРЗА*». На цьому етапі студенти повинні навчитися давати коротку характеристику та оцінку стану проблеми, визначати актуальність та обґрунтувати необхідність виконання НДР, визначати номенклатуру параметрів, які необхідно отримати, формулювати головну мету і задачі роботи. Підставою для формування знань на цьому етапі повинен слугувати наступний каузальний зв'язок знань (рис. 4)

3. Етап «*Формування знань, умінь, навичок з визначення можливих варіантів побудови або принципу функціонування СРЗА*» передбачає оволодіння здатністю визначати можливі способи вирішення поставлених задач у НДР щодо СРЗА, які

обумовлюються призначенням та висунутими вимогами. Отже, каузальний зв'язок знань третього етапу методики навчання має вигляд (рис. 5)

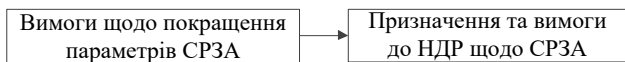


Рисунок 4 – Каузальний зв'язок знань другого етапу методики навчання

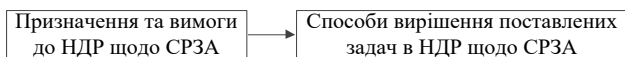


Рисунок 5 – Каузальний зв'язок знань третього етапу методики навчання

4. Етап «Формування знань, умінь, навичок з дослідження параметрів складових елементів (функцій) та СРЗА в цілому» головним чином передбачає навчити майбутніх фахівців визначати вплив різних принципів функціонування та побудови СРЗА на її параметри. В якості каузального зв'язку знань четвертого етапу слід застосовувати наступний (рис. 6)



Рисунок 6 – Каузальний зв'язок знань четвертого етапу методики навчання

5. Етап «Формування знань, умінь, навичок з узагальнення і оцінки результатів досліджень» передбачає набуття у студентів здатності складати характеристики технічного рівня досліджуваних СРЗА, розробляти рекомендації щодо оптимального вирішення технічної задачі з урахуванням отриманих у процесі дослідження параметрів пристрою. В якості рекомендацій можуть виступати параметри вимог щодо СРЗА, яку планується модернізувати, спроектувати, удосконалити або створити. Отже, каузальний зв'язок знань цього етапу повинен мати вигляд (рис. 7).



Рисунок 7 – Каузальний зв'язок знань п'ятого етапу методики навчання

Висновки. Проаналізовано науково-дослідні види робіт інженерів з релейного захисту та автоматики. Визначено, що невід'ємною складовою будь-яких прикладних робіт є проведення пошукових досліджень, що передбачає встановлення каузальних зв'язків між різними підсистемами знань щодо мікропроцесорної СРЗА.

Розроблено алгоритм процесу виконання пошукових НДР щодо цифрової СРЗА, що складається з п'яти основних етапів, а саме: ознайомлення з СРЗА, визначення вимог та призначення НДР щодо СРЗА, визначення можливих варіантів побудови або принципу функціонування СРЗА, дослідження параметрів складових елементів (функцій) та СРЗА в цілому, узагальнення та оцінка результатів досліджень щодо СРЗА.

На підставі проведеного аналізу видів робіт та побудованого алгоритму проведення пошукових НДР обґрунтовано та розроблено методику формування науково-дослідної компетентності щодо цифрових СРЗА.

Застосування запропонованої методики навчання на базі каузальної моделі змісту проведення пошукових НДР щодо цифрових СРЗА у відповідних дисциплінах професійної підготовки майбутніх інженерів дозволить успішно сформувати науково-дослідну компетентність. Свідченням цього є покращення значення середнього показника сформованості знань, умінь, навичок та професійно-важливих якостей з проведення пошукових НДР щодо мікропроцесорних СРЗА в межах дисципліни «Автоматика енергосистем» на 25 %.

Список літератури

1. Рудевич 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>.
2. Метод навчання експлуатації мікропроцесорних систем релейного захисту та автоматики / Н. В. Рудевич та ін. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність*. 2025. № 1(10). С. 112–120. DOI: [https://doi.org/10.20998/erec.2025.1\(10\).322948](https://doi.org/10.20998/erec.2025.1(10).322948).
3. Huntington-Klein N. The Effect: An Introduction to Research Design and Causality. 2nd ed. Boca Raton, FL : CRC Press, 2025. 686 p.
4. Ruiz de Villa A. Causal inference for data science. Shelter Island, NY : Manning Publications Co., 2025. 393 p.
5. 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: 22.01.2026).
6. Релейний захист і автоматика / С. В. Панченко та ін. Харків : УкрДУЗТ, 2021. Ч. 2. 276 с.
7. Релейний захист високовольтних електродвигунів / В. В. Тепля та ін. Вінниця : ВНТУ, 2022. Ч. 1. 137 с.
8. МРЗС-05Д АИАР.466452.002 – Захист, Автоматика та Контроль Електродвигунів. *Промавтоматика*. URL: <https://rza-promav.com/product/pristroi-zahistu-elektrodviguniv/mrzs-05d-ayar-466452-002/> (дата звернення: 07.02.2026).
9. РДЦ-01-057-4, РДЦ-01-057-5 - Мікропроцесорне реле захисту для електродвигунів 6/10 кВ. *РЕЛСiС*. URL: <https://rels.ua/ua/products/motor-protection/rdc-01-057-4-5> (дата звернення: 11.02.2026).
10. M021 - Захист та автоматика асинхронних ЕД Р > 2500 кВт. *Харктрон-Інкор*. URL: <https://www.hartron-incor.com.ua/m021> (дата звернення: 09.02.2026).
11. Пристрій захисту асинхронного двигуна: пат. 69523 : H02P29/04. № 2003042859 ; заявл. 02.04.2003 ; опубл. 15.09.2004, Бюл. № 9/2004.

References

1. 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)
2. N. Rudevich, D. Gapon, M. Lazarev, and S. Shvets, "Learning method in the operation of microprocessor systems of relay protection and automation," *Bulletin of the National Technical University*

- "KhPI". Series: *Energy: Reliability and Energy Efficiency*, no. 1(10), pp. 112–120, Jul. 2025, doi: [https://doi.org/10.20998/eree.2025.1\(10\).322948](https://doi.org/10.20998/eree.2025.1(10).322948) (in Ukrainian)
3. N. Huntington-Klein, *The Effect: An Introduction to Research Design and Causality*, 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2025.
 4. A. Ruiz de Villa, *Causal Inference for Data Science*. Shelter Island, NY: Manning Publ. Co., 2025.
 5. 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)
 6. S. V. Panchenko, V. S. Blyndiuk, V. M. Bazhenov, M. M. Odiehov, and Yu. O. Semenenko, *Releinyi zakhyst i avtomatyka [Relay protection and automation]*, vol. 2. Kharkiv: UkrSURT, 2021. (in Ukrainian)
 7. V. V. Teptia, V. O. Komar, V. O. Lesko, and O. B. Burykin, *Releinyi zakhyst vysokovolnykh elektrodyhunyiv [Relay protection for high-voltage electric motors]*, vol. 1. Vinnytsia: VNTU, 2022. (in Ukrainian)
 8. "MRZS-05D AYAR.466452.002 – Zakhyst, Avtomatyka ta Kontrol Elektrodyhunyiv [MRZS-05D AIAR.466452.002 – Protection, Automation, and Control of Electric Motors]." Promavtomatyka. [Online]. Available: <https://en.rza-promav.com/product/electric-motor-protection-devices/en-mrzs-05d-ayar-466452-002-2/>
 9. "RDC-01-057-4, RDC-01-057-5 - microprocessor relay of protection for electric motor 6/10 kv." RELSIS. Accessed: Feb. 11, 2026. [Online]. Available: <https://reلسis.ua/en/products/motor-protection/rdc-01-057-4-5>
 10. Research and Production Enterprise "KHARTRON-INCOR." "M021 - Zakhyst ta avtomatyka asynkhronnykh ED P > 2500 kVt [M021 - Protection and Automation for Induction Motors P > 2500 kW]." Khartron-Incor. Accessed: Feb. 9, 2026. [Online]. Available: <https://www.hartron-incor.com.ua/m021> (in Ukrainian)
 11. D. Y. Rodkin, O. P. Chorny, V. F. Zhyvora, Yu. V. Lashko, and V. M. Sydorenko, "Device for protecting an asynchronous motor," Patent 69523, Sep. 15, 2004. (in Ukrainian)

Надійшла (Received) 05.03.2026

Прийнята (Accepted) 17.03.2026

Опублікована (Published) 29.05.2026

UDC 621.315:378.14

RUDEVICH NATALIYA ✉ – Doctor of Philosophy (PhD), 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: nataliia.rudevich@khp.edu.ua.

GAPON DMYTRO – 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>; e-mail: 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>; e-mail: serhii.shvets@khp.edu.ua.

METHODOLOGY FOR DEVELOPING RESEARCH COMPETENCE IN DIGITAL RELAY PROTECTION AND AUTOMATION SYSTEMS

Developing research skills in future electrical power engineers is an important task in their professional training. One of the key areas is training specialists in the operation, design, and research of microprocessor-based relay protection and automation systems. The research activities of relay protection and automation engineers have been analyzed. It has been found that when conducting any applied work on microprocessor-based relay protection and automation systems, an integral component is the conduct of exploratory research, which involves establishing causal relationships between different knowledge subsystems. An algorithm for conducting exploratory research on digital relay protection and automation systems has been developed, which consists of five stages, namely familiarization with the relay protection and automation system; determination of the requirements and purpose of research on the relay protection and automation system; determining possible options for the construction or principle of operation of the relay protection and automation system; researching the parameters of the constituent elements (functions) and the relay protection and automation system as a whole; summarizing and evaluating the research results. In accordance with the developed algorithm, research and development work was carried out in the course of operational, design, and scientific activities on the possibility of modernizing, developing, and improving microprocessor relay protection for asynchronous motors. Based on the research, a training methodology was developed to build research competence in digital relay protection and automation systems, which includes five stages in line with the stages of the algorithm for conducting research. Each stage of the methodology involves establishing causal links between different subsystems of knowledge regarding digital relay protection and automation systems.

Keywords: causal relationships; teaching methods; research work; digital relay protection and automation system.