



# Raport końcowy z wyników prac B+R

Projektu nr. RPMA.01.02.00-14-B499/18

## „Nowe obszary badawcze w firmie Elektrometal Energetyka S.A.”

Współfinansowanego z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego

Osi Priorytetowej I „Wykorzystanie działalności badawczo-rozwojowej w gospodarce”

Działania 1.2 „Działalność badawczo-rozwojowa przedsiębiorstw”

Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Mazowieckiego na lata 2014–2020

dla: **Mazowiecka Jednostka Wdrażania Programów Unijnych**

ul. Jagiellońska 74, 03-301 Warszawa  
tel. (22) 542 20 00, fax (22) 698 31 44  
e-mail: [mjwpu@mazowia.eu](mailto:mjwpu@mazowia.eu), [www.mazowia.eu](http://www.mazowia.eu)  
[www.funduszedlamazowska.eu](http://www.funduszedlamazowska.eu)

konkurs: **RPMA.01.02.00-IP.01-14-080/18**

umowa: **RPMA.01.02.00-14-b499/18-00**

**Autor:**

dr inż. Dariusz Sajewicz



**Warszawa, wrzesień 2022 r.**

# Spis treści

<b>1. Wprowadzenie.....</b>	<b>3</b>
<b>2. Realizowane prace badawcze.....</b>	<b>4</b>
<b>3. Badania nad automatyką zabezpieczeniową stacji WN/SN z funkcjami predykcji i automatycznego dostrajania członów zabezpieczeniowych .....</b>	<b>11</b>
3.1 Zadanie 1 .....	11
3.2 Zadanie 2 .....	15
3.3 Podsumowanie .....	16
3.4 Osiągnięte rezultaty.....	16
<b>4. Badania nad rozdzielnicami SN do rozdziału pierwotnego wyposażonych w sensory do dostarczania szerokiego spektrum pomiarów .....</b>	<b>17</b>
4.1 Zadanie 3 .....	17
4.2 Zadanie 4 .....	20
4.3 Podsumowanie .....	23
4.4 Osiągnięte rezultaty.....	24
<b>5. Badania i analizy danych big data do przygotowania algorytmów predykcji i auto strojenia zabezpieczeń .....</b>	<b>25</b>
5.1 Zadanie 5 .....	25
5.2 Zadanie 6 .....	28
5.3 Zadanie 7 .....	29
5.4 Podsumowanie .....	31
5.5 Osiągnięte rezultaty.....	32
<b>6. Budowa prototypów urządzeń do badań .....</b>	<b>33</b>
6.1 Zadanie 8 .....	33
6.2 Wątek 1 — zabezpieczenia średnich i wysokich napięć .....	33
6.3 Wątek 2 — rozdzielnice średniego napięcia .....	36
6.4 Osiągnięte rezultaty.....	39
<b>7. Rozpowszechnianie wyników prac B+R.....</b>	<b>40</b>

## 1. Wprowadzenie

Projekt badawczo-rozwojowy o nazwie „Nowe Obszary badawcze w firmie Elektrometal Energetyka S.A.” realizowany był w konsorcjum, w skład którego wchodziły następujące podmioty: Elektrometal Energetyka S.A. — Lider konsorcjum, Instytut Elektrotechniki Sieci Badawczej Łukasiewicz w Warszawie (Partner IEL) oraz Akademia im. Leona Koźmńskiego (Partner ALK). W celu realizacji przedsięwzięcia została podpisana umowa partnerska pomiędzy ww. podmiotami. Projekt polegał na realizacji prac badawczych i rozwojowych mających na celu przygotowanie gotowych rozwiązań wspomagających działanie i eksploatację systemu zabezpieczeń stacji wysokiego (WN) i średniego (SN) napięcia w obszarze bezpieczeństwa, prewencji oraz akwizycji danych, niezbędnych do predykcji stanów awaryjnych w pracy stacji elektroenergetycznych. Jednocześnie, w ramach działań w projekcie prowadzono badania rozdzielnic SN rozdziału pierwotnego, umożliwiające optymalizację konstrukcji pod kątem pracy przy wyższych parametrach zwarciovych oraz umożliwiające zastosowanie rozbudowanych systemów akwizycji i przetwarzania danych o pracy stacji, tworząc system przewidywania stanów awaryjnych. W ramach badań prowadzono prace nad wprowadzeniem algorytmów pozwalających na autonomiczne dostosowywanie nastaw zabezpieczeń w celu eliminacji nadmiarowych wyłączeń oraz dla zwiększenia dyspozycyjności. Wykonano analizy stanów awaryjnych na stacjach WN/SN, na podstawie dostępnych danych oraz pozyskanych w warunkach laboratoryjnych jak i z rzeczywistych obiektów przemysłowych. Analizy realizowane były z użyciem algorytmów big data. Przeprowadzono też pozytywną weryfikację działania niektórych algorytmów predykcyjnych na obiektach przemysłowych. Prowadzone były badania pozwalające na wybranie najbardziej miarodajnych parametrów jakie należy mierzyć i rejestrować, aby zwiększyć pewność przewidywania stanów awaryjnych dla zapewnienia niezawodności i bezpieczeństwa obsługi oraz wyeliminowania narażenia życia operatorów i poważnych strat finansowych w przypadku nagłej awarii. Dodatkowo, parametry te pozwolą na pełną identyfikację zdarzeń i procesów zachodzących w trakcie pracy stacji oraz uproszczą nadzór, obsługę i konserwację urządzeń.

## 2. Realizowane prace badawcze

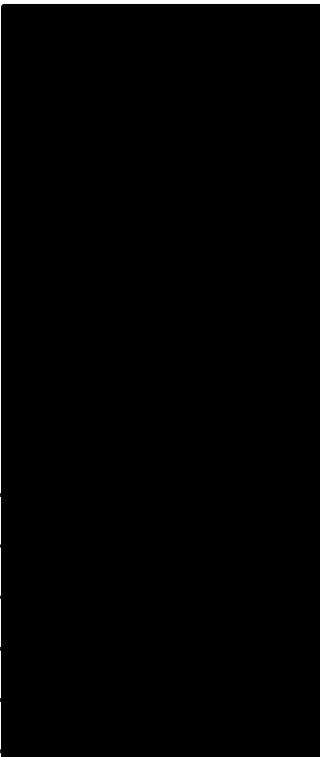
Projekt był realizowany w trzech głównych obszarach tematycznych i podzielony na siedem zadań w zakresie badań przemysłowych, oraz jedno zadanie dotyczące badań rozwojowych. Zgodnie z założeniami projektu wyniki poszczególnych prac badawczych były wykorzystywane w innych zadaniach w celu finalnego przygotowania prototypów urządzeń w ramach zadania 8.

### **Zadania 1 i 2.   Badania nad automatyką zabezpieczeniową stacji WN/SN z funkcjami predykcji i automatycznego dostrajania członów zabezpieczeniowych**

Zadanie 1 zrealizował Lider konsorcjum, a zadanie 2 Partner — Instytut Elektrotechniki. Zakresy badań w tych zadaniach dotyczą tego samego obszaru. Prace przebiegały równolegle, przy współdziałaniu obu stron. Zadania 1 i 2 dotyczą prac nad rodziną zabezpieczeń dla stacji wysokich napięć z nowymi funkcjami obejmującymi zbieranie i analizy nowych danych, oraz funkcjami auto dostosowania nastaw zabezpieczeń. W pierwszym etapie prac prowadzono badania nad częścią sprzętową urządzeń i podstawowych funkcji zabezpieczeniowych. W wyniku tego etapu powstała podstawowa baza sprzętowa do całej rodziny zabezpieczeń. W ramach kolejnych etapów badań, na bazie częściowych wyników badań prowadzonych w ramach zadań 5, 6, 7 przeprowadzono prace badawcze w zakresie algorytmów samouczenia i samo-regulacji nastaw zabezpieczeń oraz części sprzętowej do zbierania i analizy dodatkowych danych z obiektów. Na bazie tych prac zostały wykonane prototypy poszczególnych zespołów zabezpieczeń, jak np. karta procesora, karty pomiarowe dedykowane do zastosowań w stacjach wysokich napięć oraz baza sprzętowa do realizacji funkcji akwizycji i archiwizacji danych.

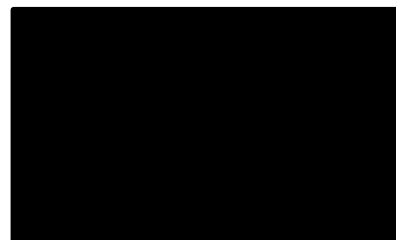
Zespół badawczy Lidera do zadania 1:

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.
- 5.
- 6.
- 7.
- 8.
- 9.
- 10.
- 11.
- 12.
- 13.
- 14.
- 15.

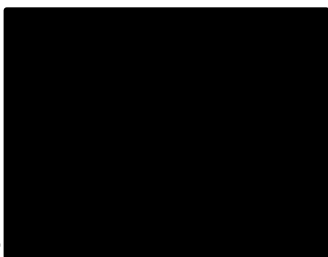


Zespół Badawczy Partnera, Instytutu Elektrotechniki do zadania 2:

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.
- 5.



- 6.
- 7.
- 8.
- 9.
- 10.



Główne etapy badań — kamienie milowe:

1. Badania i próbki podstawowej bazy sprzętowej zabezpieczeń, wspólnej dla całej rodziny zabezpieczeń z możliwością dołożenia dodatkowych kart pomiarowych,
2. Badania nad algorytmami zabezpieczeń wyłączających dla funkcji zabezpieczeniowych,
3. Badania nad rozszerzoną bazą sprzętową do zbierania dodatkowych danych, oraz przygotowanie próbek sprzętu,
4. Badania nad algorytmami samokorekcji i samonastaw zabezpieczeń,
5. Badania nad algorytmami i metodami zbierania i analizy danych do celów analizy danych *big data*,
6. Badania nad podstawowymi algorytmami zabezpieczeń prewencyjnych do wykrywania stanów awaryjnych na bazie rozszerzonego spektrum pomiarów.

Wykaz raportów cząstkowych do zadań 1 i 2

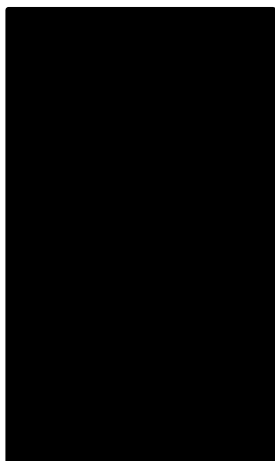
1. Zabezpieczenie różnicowe linii (Załącznik nr 1.1)
2. Zabezpieczenie różnicowe transformatora (Załącznik nr 1.2)
3. Sterownik automatycznej regulacji napięcia ARN ( Załącznik nr 1.3)
4. Zabezpieczenie odległościowe (Załącznik nr 1.4)
5. Automatyka Samoczynnego Załączania Rezerwy (Załącznik nr 1.5)
6. Karty pomiarowe do akwizycji danych (Załącznik nr 1.6)
7. Zasilacz impulsowy o szerokim zakresie napięcia wejściowego (Załącznik nr 1.7)
8. Światłowodowe czujniki temperatury szyn (Załącznik nr 1.8)
9. Czujnik optyczny stanu rozłącznika (Załącznik nr 1.9)
10. Algorytmy i metody zbierania danych do celów analizy danych BIG DATA (Załącznik nr 1.10)

**Zadanie 3 i 4. Badania nad rozdzielnicami SN do rozdziału pierwotnego wyposażonych w sensory do dostarczania szerokiego spektrum pomiarów**

Zadanie 3 zrealizował Lider konsorcjum, a zadanie 4 Partner — Instytut Elektrotechniki. Zakresy badań w tych zadaniach dotyczą tego samego obszaru, a podział wynika z dostępnego potencjału naukowego i laboratoryjnego. Badania dotyczą rozdzielnic SN instalowanych w stacjach WN/SN dla wyższych parametrów prądowych i zwarciovych. W pierwszym etapie prowadzono prace badawcze nad konstrukcją rozdzielnic w oparciu o programy komputerowe do projektowania i symulowania warunków pracy rozdzielnic. Wykorzystano wyniki badań poprzednio realizowanego projektu badawczego w celu ograniczenia ilości badań laboratoryjnych i niszczących. W celu potwierdzenia wyników symulacji budowano próbki elementów rozdzielnic do badań rzeczywistych. Badania prowadzono u Lidera konsorcjum w oparciu o dostępną infrastrukturę laboratoryjną oraz u Partnera — Instytut Elektrotechniki z wykorzystaniem potencjału badawczego. W drugim etapie prowadzono badania dotyczące sposobów i miejsc zbierania dodatkowych pomiarów z rozdzielnic w celu określenia rodzajów sensorów, sposobów instalacji, wpływu na parametry rozdzielnic, odporności na zakłócenia.

Zespół badawczy Lidera do zadania 3:

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.
- 5.
- 6.
- 7.
- 8.
- 9.



Zespół Badawczy Partnera, Instytutu Elektrotechniki do zadania 4:

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.
- 5.
- 6.
- 7.
- 8.
- 9.
- 10.
- 11.
- 12.
- 13.
- 14.
- 15.
- 16.
- 17.
- 18.
- 19.
- 20.
- 21.
- 22.
- 23.



Główne etapy badań — kamienie milowe:

1. Badania konstrukcyjne nad nowymi konstrukcjami rozdzielnic SN na wyższe parametry zwarciowe i odporności łukowej,
2. Symulacje opracowanych konstrukcji w środowisku wirtualnym z wykorzystaniem doświadczeń z poprzedniego projektu badawczego,
3. Przygotowanie próbek, cząstkowe badania w laboratoriach i analiza wyników wraz z porównaniem z wynikami symulacji,
4. Modelowanie i badanie miejsc i sposobów montażu sensorów w rozdzielnicach,
5. Badania próbek wyposażonych w dodatkowe sensory w celu określenia wpływu zakłóceń jakie mogą występować w warunkach rzeczywistych.

Wykaz raportów cząstkowych do zadań 3 i 4

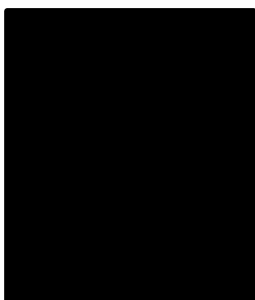
1. „Opracowanie danych wejściowych rozdzielnic o podwyższonych parametrach zwarciowych”
2. „Badania sił docisku”
3. „Analiza rozkładu temperatur w rozdzielnic e<sup>2</sup>ALPHA”
4. „Obliczenia narażeń łukowych rozdzielnic SN”
5. „Badania przemysłowe rozwiązań konstrukcyjnych rozdzielnic e<sup>2</sup>ALPHA”
6. „Analiza rozmieszczenia czujników w rozdzielnic e<sup>2</sup>ALPHA”
7. „Czujniki”
8. „Czujniki temperatury szyn”
9. „Wyniki laboratoryjnych badań przemysłowych – część II”
10. „Wyniki laboratoryjnych badań przemysłowych – część I”
11. „Wyniki laboratoryjnych badań przemysłowych – część III”

**Zadanie 5, 6, 7. Badania i analizy danych big data do przygotowania algorytmów predykcji i auto strojenia zabezpieczeń.**

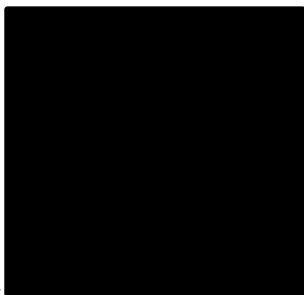
Zadanie 5 zrealizował Lider konsorcjum, zadanie 6 Partner — Instytut Elektrotechniki, a zadanie 7 Partner — Akademia Leona Koźmińskiego. Zakresy badań w tych zadaniach dotyczą tego samego obszaru, a podział wynika z dostępnego potencjału naukowego i laboratoryjnego. Badania obejmują obszar analizy danych. W pierwszym etapie analizowano historyczne dane z zakłóceń w stacjach WN/SN w celu określenia możliwych sposobów analizy i oceny tych danych do wczesnego wykrywania potencjalnych stanów awaryjnych. W drugim etapie wytypowano dodatkowe parametry jakie należy mierzyć w celu usprawnienia analizy danych. Te informacje wykorzystano w ramach prac badawczych w zadaniach 1 — 4 w celu przygotowania zarówno zabezpieczeń WN wraz z odpowiednimi kartami pomiarowymi, jak również rozdzielnic SN w których mają być instalowane dodatkowe sensory.

Zespół badawczy Lidera do zadania 5:

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.
- 5.
- 6.



- 7.
- 8.
- 9.
- 10.
- 11.
- 12.



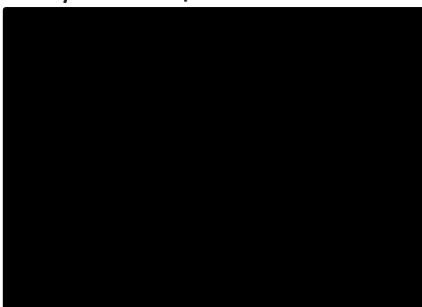
Zespół Badawczy Partnera, Instytutu Elektrotechniki do zadania 6:

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.
- 5.
- 6.
- 7.



Zespół Badawczy Partnera, Akademii Leona Koźmińskiego do zadania 7:

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.
- 5.
- 6.



Główne etapy badań — kamienie milowe:

1. Badania i zbieranie danych z dotychczasowych zdarzeń awaryjnych w sieciach,
2. Analiza i badania nad możliwością rozszerzenia zbieranych danych w celu zwiększenia prawdopodobieństwa funkcji prewencyjnych,
3. Analiza i badania funkcji prewencyjnych z rozszerzonym zakresem danych,
4. Badania optymalizacyjne i typowanie dodatkowych pomiarów do implementacji w zabezpieczeniach i rozdzielnicach,
5. Badania i analiza poprawności działania algorytmów opracowanych funkcji prewencyjnych i zabezpieczeniowych.

Wykaz raportów cząstkowych do zadań 5, 6 i 7

1. Stanowiska i badania laboratoryjne
2. Analiza danych big data do przygotowania algorytmów predykcji i auto strojenia zabezpieczeń
3. Akwizycja danych pomiarowych pracy silników SN w trudnych warunkach zakłóceń
4. Algorytmy zabezpieczeniowe do predykcji uszkodzeń w liniach średniego napięcia
5. Algorytmy zabezpieczeniowe do predykcji uszkodzeń silników średniego napięcia
6. Algorytm zabezpieczeniowy do wykrywania zjawiska ferorezonansu

## Zadanie 8. Budowa prototypów urządzeń do badań

Prowadzono prace rozwojowe mające na celu zbudowanie finalnych prototypów urządzeń i przeprowadzenia badań rozwojowych w celu przygotowania urządzeń do finalnych badań certyfikacyjnych. Bazując na przeprowadzonych badaniach przemysłowych zostały przygotowane prototypy automatyki zabezpieczeniowej do stosowania na średnim i wysokim napięciu, oraz prototypy rozdzielnic średniego napięcia do rozdziału pierwotnego do stosowania w stacjach WN/SN oraz wyposażonych w sensory do pomiarów wielkości fizycznych oraz obrazowania do prewencji i wykrywania potencjalnych stanów awaryjnych. Zbudowano prototypy z wykorzystaniem materiałów z próbek jakie zostały przygotowane w ramach badań przemysłowych. Prototypy zostały poddane testom w laboratoriach badawczych i w warunkach rzeczywistych, w celu potwierdzenia osiągnięcia zakładanych parametrów i funkcjonalności.

Zespół badawczy Lidera do zadania 8:

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.
- 5.
- 6.
- 7.
- 8.



Główne etapy badań — kamienie milowe:

1. Zebranie istniejących wyników i próbek z poprzednich zadań,
2. Budowa prototypów zabezpieczeń,
3. Budowa prototypów rozdzielnic z sensorami,
4. Badania kompletnych urządzeń i systemu zabezpieczeń w laboratoriach Wnioskodawcy,
5. Badania urządzeń w warunkach zbliżonych do rzeczywistych.

Wykaz raportów cząstkowych do zadania 8

1. Opracowanie prototypów zabezpieczeń średniego i wysokiego napięcia,
2. Opracowanie i badania prototypów rozdzielnic SN,
3. Sprawozdanie z badań sterownika polowego e<sup>2</sup>TANGO-450,
4. Sprawozdanie z badań sterownika polowego typu e<sup>2</sup>TANGO-2000
5. EAZ/1735/2021 Sprawozdanie z badań zabezpieczenia różnicowego transformatora sterownika e<sup>2</sup>TANGO-2000
6. EAZ/1737/2021 Sprawozdanie z badań zabezpieczenia różnicowego transformatora sterownika e<sup>2</sup>TANGO-2000-TRR
7. EAZ/1738/2021 Sprawozdanie z badań zabezpieczenia różnicowego transformatora sterownika e<sup>2</sup>TANGO-2000-TRR
8. FWP/R110/P1/A311/21 Protokół z badań i pomiarów e<sup>2</sup>TANGO-2000 (A311 – zabezpieczenie różnicowe). SE 20/110kV FW Pelplin
9. FWP/R110/P1/A321/21 Protokół z badań i pomiarów e<sup>2</sup>TANGO-2000 (A321 – zabezpieczenie nadprądowe & sterownik pola). SE 20/110kV FW Pelplin

10. FWP/R110/P1/A331/21 Protokół z badań i pomiarów e<sup>2</sup>TANGO-2000 (A331 – regulator napięcia transformatora). SE 20/110kV FW Pelplin
11. FWP/R110/P1/A341/21 Protokół z badań i pomiarów e<sup>2</sup>TANGO-2000 (A341 – zabezpieczenie nadprądowe dławika uziem.). SE 20/110kV FW Pelplin
12. FWZ/R110/TR2/A311/21 Protokół z badań i pomiarów e<sup>2</sup>TANGO-2000 (A311 – zabezpieczenie różnicowe). SE 20/110kV FW Żuromin
13. FWZ/R110/TR2/A321/21 Protokół z badań i pomiarów e<sup>2</sup>TANGO-2000 (A321 – zabezpieczenie nadprądowe & sterownik pola) SE 20/110kV FW Żuromin
14. FWZ/R110/P2/A331/21 Protokół z badań i pomiarów e<sup>2</sup>TANGO-2000 (A331 – regulator napięcia transformatora). SE 20/110kV FW Żuromin
15. FWZ/R110/TR2/A341/21 Protokół z badań i pomiarów e<sup>2</sup>TANGO-2000 (A341 – zabezpieczenie nadprądowe dławika uziem.). SE 20/110kV FW Żuromin
16. FWZ/R110/TR1/A321/21 Protokół z badań i pomiarów e<sup>2</sup>TANGO-2000 (A321 – zabezpieczenie nadprądowe & sterownik pola). SE 20/110kV FW Żuromin
17. FWZ/R110/TR1/A311/21 Protokół z badań i pomiarów e<sup>2</sup>TANGO-2000 (A311 – zabezpieczenie różnicowe). SE 20/110kV FW Żuromin
18. FWZ/R110/P1/A331/21 Protokół z badań i pomiarów e<sup>2</sup>TANGO-2000 (A331 – regulator napięcia transformatora). SE 20/110kV FW Żuromin
19. FWZ/R110/TR1/A341/21 Protokół z badań i pomiarów e<sup>2</sup>TANGO-2000 (A341 – zabezpieczenie nadprądowe dławika uziemiającego). SE 20/110kV FW Żuromin
20. Raport z badań nr. NL/01/22. Sterownik Polowy e<sup>2</sup>TANGO-450. Badania mechaniczne. Radmor,
21. Sprawozdanie z badań nr 04/2022/01. Zespół zabezpieczeń e<sup>2</sup>TANGO-250. WAT
22. Sprawozdanie z badań nr 03/2022/02. Zespół zabezpieczeń e<sup>2</sup>TANGO-250. WAT
23. Sprawozdanie z badań nr 03/2022/01. Zespół zabezpieczeń e<sup>2</sup>TANGO-450. WAT
24. Sprawozdanie z badań nr 05/2022/01. Zespół zabezpieczeń e<sup>2</sup>TANGO-450. WAT
25. Karta kontroli e2ALPHA 17 kV przyścienna
26. Karta kontroli e2ALPHA 24 kV

### 3. Badania nad automatyką zabezpieczeniową stacji WN/SN z funkcjami predykcji i automatycznego dostrajania członów zabezpieczeniowych

#### 3.1 Zadanie 1

Lider w ramach zadania 1 przeprowadził prace badawcze w zakresie nowych autorskich rozwiązań podzespołów automatyki zabezpieczeniowej dla stacji wysokiego i średniego napięcia, które polegały na przygotowaniu bazy sprzętowej do realizacji funkcji zabezpieczeniowych, sterowniczych, rejestracji, przetwarzania i akwizycji danych. Ponadto prowadził prace badawcze w zakresie algorytmów pomiarowo-zabezpieczeniowych oraz predykcyjnych, a także nowych kart pomiarowych do realizacji dodatkowych pomiarów i funkcjonalności. W ramach tego zadania zostały opracowane:

**Badania przemysłowe związane z opracowaniem nowoczesnych, autorskich algorytmów zabezpieczeniowych oraz w zakresie komunikacji cyfrowej.**

Pierwszym analizowanym zagadnieniem w tym zadaniu były zabezpieczenia linii wysokiego i średniego napięcia. Analiza rynku i dostępnych na rynku rozwiązań oraz potrzeb klientów odnośnie zabezpieczeń linii wysokiego i średniego napięcia wykazała, że istnieje potrzeba poprawy niezawodności istniejących rozwiązań i zwiększenia poprawności działania zabezpieczeń. Badania przemysłowe w obszarze komunikacji urządzeń skupiły się na dwóch wątkach:

1. Badanie łączności komunikacji i odpowiednich algorytmów w zależności od długości łącza komunikacyjnego,
2. Wprowadzenie kanału redundantnego, który w przypadku awarii kanału podstawowego przejmuje jego funkcje.

Zabezpieczenia linii średniego napięcia są stosowane na krótkich i ważnych z punktu widzenia systemu elektroenergetycznego odcinkach, a tym samym odległości między półkompletami zabezpieczenia, są znacznie mniejsze (rzędu kilkunastu kilometrów) niż w przypadku stosowania na napięciu wysokim (do 100 km). W ramach badań przemysłowych przygotowano zostały założenia i przygotowano próbki dla światłowodowych modułów komunikacyjnych, które w zależności od zastosowania (wysokiego napięcia czy średniego napięcia) mogą komunikować się na różnych dystansach. W ramach prac badawczych prowadzono badania dotyczące zwiększenia niezawodności działania zabezpieczeń pracujących na dwóch końcach linii. Badania doprowadziły do wniosków że najlepszym rozwiązaniem jest redundantny kanał komunikacyjny ze względu na ilość przesyłanych danych oraz szybkość i niezawodność komunikacji. Inne rodzaje komunikacji wprowadzają zbyt duże opóźnienia do prawidłowego działania zabezpieczeń. Wykonano badania próbek w laboratorium na modelu linii wysokiego napięcia, w wyniku czego udoskonalono działanie oraz wyeliminowano sporadyczne występowanie nieprawidłowych pobudzeń zabezpieczeń. Dodatkowo przeprowadzono testy laboratoryjne na modelu linii średniego napięcia czasów zadziałania zabezpieczenia różnicowego linii SN i zweryfikowano możliwość zastosowania opracowanych algorytmów dla linii WN. W wyniku badań określono wymagania oraz zakres komunikacji między dwoma urządzeniami kompletu zabezpieczenia różnicowego oraz odległościowego współbieżnego dla linii WN i SN.

Kolejnym wyzwaniem w ramach tego zadania było opracowanie nowego algorytmu zabezpieczenia różnicowego transformatora. Analiza dostępnych na rynku rozwiązań wykazała, że są one niedoskonałe w zakresie blokowania działania zabezpieczenia drugą i piątą harmoniczną. W związku z tym podjęto działania mające na celu opracowanie autorskiego algorytmu zabezpieczeniowego. Wymagało to zmiany koncepcji algorytmu w obszarze wyliczania sumy hamowania jako sumy prądu hamowania oraz prądów drugiej i piątej harmonicznej (zgodnie z zależnością 1).

$$\sum h = I_h + k1 * I_{2h} + k2 * I_{5h} \quad (1)$$

W takim wypadku blokowanie działania odbywało się nie przy stałej wartości zawartości danej harmonicznej, ale przy wartości zależnej od obu składników na raz. Uznano, że blokowanie każdą z harmonicznymi powinno być niezależne. Po wielu iteracjach zostały opracowane algorytmy, które w tym zakresie wykazały poprawne

działanie i skuteczność w przypadku pojawiania się różnych zakłóceń w czasie pracy zabezpieczenia różnicowego transformatora.

W dalszej kolejności, przeprowadzono eksperymenty dotyczące automatyki samoczynnego częstotliwościowego odciążania (SCO). Przyczyną do tego działania był fakt, że dostępne na rynku zabezpieczenia SCO mają problemy z wyliczaniem w stanach zakłóceńowych częstotliwości z przebiegów napięć. W ramach projektu pracowano nad skutecznym algorytmem wyliczania częstotliwości. W ramach kolejnych iteracji badań zostały wyciągnięte wnioski że najlepszym rozwiązaniem będzie wyliczanie częstotliwości z napięć i z prądów co umożliwi jego skuteczne działanie w przypadku występowania różnych rodzajów zakłóceń. Opracowano autorski algorytm, który umożliwi wyliczanie częstotliwości zarówno z napięć jak i z prądów, co nie zakłóca działania automatyki SCO. W ramach badań przemysłowych pozyskano próbki różnego rodzaju zakłóceń występujących w sieci elektroenergetycznej. Następnie odtworzono je w warunkach laboratoryjnych za pomocą testerów zabezpieczeń i na tej podstawie dokonano weryfikacji poprawności działania algorytmu.

Kolejny obszar badań obejmował algorytmy automatyki samoczynnego załączania rezerwy (SZR). Automatyka SZR działa przeważnie z krótką przerwą beznapięciową, co może przyczynić się do przerwania pracy urządzeń odbiorcy, a nawet do ich awarii. W ramach badań zostały określone parametry pracy automatyki SZR, która jest w stanie sterować większą ilością łączników niż standardowe 3 łączniki w cyklach bezprzerwowych wraz z algorytmami sterującymi blokadami zapewniającymi bezpieczeństwo, umożliwiające wykonanie wspomnianej automatyki z założeniem przełączania quasisynchronicznego oraz synchronicznego w postaci rezerwy utajonej oraz rezerwy jawnej, która pozwala na wykonanie bezprzerwowych przełączeń napięcia zasilania dla skomplikowanych układów zasilania. Badania wymagały również opracowania nowych kart sterujących i pomiarowych do poprawnej realizacji funkcji automatyki przełączania. Kolejne badania przemysłowe dotyczyły zabezpieczeń linii wysokiego napięcia, w zakresie algorytmów decyzyjnych z wykorzystaniem sztucznej inteligencji oraz problemów związanych z zabezpieczeniami wyposażonymi w łącze telekomunikacyjne. Wykonano opracowanie algorytmów decyzyjnych cyfrowego zabezpieczenia odległościowego wysokiego napięcia. Przeprowadzono prace badawcze związane z rozwojem algorytmów pomiarowych mające na celu: eliminację wpływu wyższych harmonicznych na przekłamania w pomiarze oraz eliminację składowej nieokresowej. Drugim etapem prac był rozwój algorytmów decyzyjnych opartych na standardowych impedancyjnych algorytmach decyzyjnych oraz wykorzystujących osiągnięcia sztucznej inteligencji (logiki rozmytej oraz sztucznych sieci neuronowych). Wykonano projekt koncepcyjny sterownika polowego wraz z algorytmami pomiarowymi i decyzyjnymi. Prace badawcze dotyczyły również funkcji zapewnienia bezpieczeństwa obsługi komunikacji w zabezpieczeniach łączowych, która w przypadku zabezpieczeń różnicowych jest kluczowa do ich poprawnego działania. Opracowano algorytm pełniący funkcję nadzoru nad kanałem komunikacyjnym oraz redundantny kanał komunikacyjny (w przypadku uszkodzenia łącza podstawowego) w zabezpieczeniu różnicowym linii wysokiego napięcia.

Opracowane algorytmy pomiarowo-zabezpieczeniowe poddano dalszym testom wewnętrznym. Wykazano niepoprawność działania automatyki zabezpieczeniowej w ramach zabezpieczenia ziemnozwarciowego kierunkowego oraz zabezpieczenia nadprądowego kierunkowego. W przypadku pierwszego ze wspomnianych algorytmów konieczna była zmiana górnej granicy zakresu pomiarowego z przyjętej wartości 10 A dla automatyki średniego napięcia do 100 A, aby było możliwe jego zastosowanie w automatyce zabezpieczeniowej wysokiego napięcia. Z kolei algorytmy zabezpieczenia nadprądowego kierunkowego nie działały poprawnie w przypadku symulacji zwarć dwufazowych oraz w przypadku zmiany kierunku przepływu prądu zwarcia na przeciwny, niż płynący przed zwarcie. Wywnioskowano, że na skutek czasu własnego algorytmów filtrujących należy wprowadzić opóźnienie w obliczaniu kierunku zwarcia. W przypadku zwarć międzyfazowych należało zastosować korektę obliczanego kąta fazowego.

Przeprowadzono analizę dostępnych na rynku rozwiązań systemów predykcyjnych uszkodzeń silników. Podstawowe systemy predykcyjne oparte są o modele cieplne jednowęzłowe i wielowęzłowe, które są niedoskonałe, gdyż albo zbyt wcześnie wyłączają silnik, lub zbyt późno gdy jest już przegrzany. Modele wielowęzłowe wymagają dużej ilości danych od producenta silników, co często jest nieosiągalne i stanowi duże utrudnienie. Zaawansowane systemy predykcyjne bazują na bardzo złożonych układach do pomiaru wibracji lub wyładowań niezupełnych, wymagających kosztownej i wrażliwej aparatury pomiarowej oraz instalacji wielu czujników. W zakresie realizacji zadania związanego z zabezpieczeniami predykcyjnymi opracowano i przetestowano prosty algorytm detekcji uszkodzenia klatek silnika, wykrywający obecność odpowiednich składowych

harmonicznych w mierzonym sygnale prądowym, podczas rozruchu silnika. Założeniem dla tego algorytmu było pozyskiwanie danych wejściowych z rejestratora wbudowanego w zabezpieczenie połowe. Przeprowadzono testy na danych pomiarowych pochodzących ze sterowników połowych zainstalowanych w obiektach przemysłowych oraz w Instytucie Elektrotechniki. Testy istniejących algorytmów wykazały ich niską skuteczność, co potwierdziło potrzebę poszukiwania nowych, lepszych rozwiązań, które zostały zrealizowane w ramach badań przemysłowych w projekcie.

Kolejny obszar badań wynikał z analizy rynku, która wykazała, że ze względu na duże rozproszenie stacji oraz problemy z wykwalifikowaną kadrą do bieżącej obsługi istnieje potrzeba opracowania oprogramowania z możliwością zarządzania infrastrukturą elektroenergetyczną przy pomocy urządzeń mobilnych dla przedsiębiorców, służb utrzymania ruchu i innych odbiorców końcowych. W ramach przeprowadzonych badań przemysłowych opracowano prototyp aplikacji na urządzenia mobilne (miniScada), która umożliwiła właścicielowi obiektu i/lub służbom utrzymania ruchu pełny dostęp do swoich obiektów 24 h na dobę, w tym podgląd stanu łączników wraz z możliwością sterowania (zamknij/otwórz), podgląd zdarzeń i alarmów, informacje o bieżącej i historycznej produkcji energii, itp. Rozwiązanie to jest przydatne i wygodne w szczególności, kiedy właściciel obiektu i/lub służby utrzymania ruchu mają wiele obiektów, bądź obiekt(y) zlokalizowane są w różnych miejscach, z reguły w znacznej odległości od centrum zarządzania nimi.

### **Badania przemysłowe związane z opracowaniem autorskich rozwiązań w zakresie hardware oraz akwizycji danych pomiarowych.**

Poprawna realizacja nowych funkcji pomiarowych oraz działania algorytmów wymagały przeprowadzenia badań przemysłowych w zakresie hardware. W ramach badań prowadzono prace nad sprzętem do przetwarzania danych (procesory, DSP), do pomiarów wielkości analogowych z różnych sensorów (przekładniki, sensory, kamery, czujniki temperatury) i służące do akwizycji danych niezbędnych do opracowywania i realizacji algorytmów sztucznej inteligencji (AI). W ramach badań przygotowano wiele koncepcji układowych i próbek sprzętowych, które były badane w wewnętrznym laboratorium Lidera, i Partnera IEL oraz przekazano do podmiotów zewnętrznych w celu przeprowadzenia badań dotyczących wrażliwości na zakłócenia zewnętrzne. W tej części zadania opracowano karty pomiarowe współpracujące z sensorami napięciowymi, cewkami Rogowskiego oraz przekładnikami prądowymi i napięciowymi. Badania wstępnego rozwiązania układu do rejestracji danych przy pomocy cewek Rogowskiego wykazały duże wahania wartości mierzonych w zakresie małych wartości prądów. Pomiar wykazały wolno-okresowe zmiany wartości pomiarowych na skutek zastosowania wzmacniaczy operacyjnych w układzie nieodwracającym. Wspomniany efekt fluktuacji udało się ograniczyć w znacznym stopniu (ale nie wyeliminować całkowicie) po zmianie układu podłączenia wzmacniaczy operacyjnych zastosowanych w wejściowych układach pomiarowych na układ odwracający ze sprzężeniem ujemnym. Badania wykazały również konieczność stosowania filtrów drugiego rzędu, w celu odfiltrowania jak największej ilości wyższych harmonicznych. Cewki Rogowskiego charakteryzują się wzmocnieniem sygnału proporcjonalnym do częstotliwości, co ma negatywny wpływ na pomiar składowej podstawowej. Testy układów do akwizycji danych przy pomocy sensorów napięciowych oraz konwencjonalnych przekładników napięciowych oraz prądowych przebiegły pozytywnie. Porównując konwencjonalne przekładniki prądowe do cewek Rogowskiego oraz konwencjonalne przekładniki napięciowe do sensorów napięciowych można stwierdzić, że każdy ze wspomnianych układów będzie spełniał swoje funkcje przy realizacji algorytmów zabezpieczeniowych, jednak cewki Rogowskiego nie powinny być stosowane w układach wymagających wysokiej dokładności pomiarowej przy dużej dynamice i szerokim zakresie pomiarowym prądu. W celu rozszerzenia możliwości pomiarowych, układ do pomiaru za pośrednictwem cewek Rogowskiego zmieniono dodając przełącznik sterowany cyfrowo. Dzięki takiemu rozwiązaniu można dynamicznie zmieniać zakres pomiarowy, co zwiększa możliwości zastosowania tego rozwiązania w przypadku opracowanych układów.

W ramach badań przemysłowych opracowano nową kartę pomiarową prądów. Wynikało to z odnotowanych przypadków błędnego działania zabezpieczeń w warunkach zakłóceń. Opracowano prototyp nowej karty pomiarowej, w której zastosowano nowe rozwiązanie miniaturowych przekładników prądowych. Testy przed prototypem wykazały zbyt dużą wrażliwość obwodów wejściowych na występowanie składowej stałej w prądzie. Występowanie składowej stałej na poziomie 30% prądu znamionowego pierwszej harmonicznej powodowało w pierwszej chwili pobudzenie, a następnie odwzbudzenie zabezpieczenia — co równa się jego nie zadziałaniu; kolejny objaw to bardzo późne pobudzenie zabezpieczenia po kilku minutach od wystąpienia zakłócenia — co równa się jego błędnemu zadziałaniu; dalszy wpływ zjawiska to wydłużenie czasu działania

zabezpieczenia powyżej 40 ms, w wyniku utrudnionej analizy sygnału po stronie wtórnej przekładników prądowych zabudowanych na karcie pomiarowej. Dalsze prace badawcze nad obwodami wejściowymi zabezpieczeń polegały na wymianie zastosowanych przekładników prądowych w karcie pomiarowej na egzemplarze o wyższym granicznym współczynniku dokładności (GWD) i przeprowadzeniu dalszych badań wrażliwości na składową stałą w sygnale wejściowym, co przyczyniło się do wzrostu ich niezawodności. Zjawisko wystąpienia składowej stałej w prądzie mogłoby uniemożliwić zastosowanie opracowanych algorytmów do zabezpieczenia różnicowego transformatora oraz zabezpieczenia różnicowego linii, ze względu na niepowtarzalną odpowiedź algorytmów dla różnych egzemplarzy przekładników. Z tego względu konieczne było wyeliminowanie wspomnianego wpływu.

Następnym działaniem w ramach prac nad hardware było opracowanie uniwersalnego zasilacza sterowników polowych. Przeprowadzono analizę parametrów zasilania w stosowanych dotychczas rozwiązaniach. Wykazała ona, że przyjęty zakres napięcia zasilania 110 — 230 V AC/DC oraz oddzielny na 24 — 48 V DC jest nieoptymalny. W celu uzyskania uniwersalnej wersji zasilania na zakres 24 — 230 V AC/DC wykonano próby adaptacji wersji zasilacza stosowanej w jednym z istniejących urządzeń. Opracowano układ, którego badania wykazały, że cel można osiągnąć jedynie przy niewielkim poborze mocy (poniżej 6 W). W przypadku zwiększonego zapotrzebowania nie ma takiej możliwości. Zmodyfikowano układ zasilania i przeprowadzono próby ograniczenia zakresu napięcia zasilania do 24 — 110 V DC, które zakończyły się sukcesem. Przeprowadzone badania dla wspomnianego zakresu napięcia wejściowego oraz nominalnego obciążenia wykazały konieczność przeprojektowania transformatora zasilającego (we współpracy z dostawcą tego elementu). Dopiero po trzeciej próbie zmiany parametrów elektrycznych transformatora udało się uzyskać efekt poprawnego działania układu zasilania dla zakresu napięcia 24 — 110 V DC.

Koncepcja opracowania algorytmów predykcyjnych, opartych o analizę big data wymagała budowy systemu zbierania danych pomiarowych z obiektów rzeczywistych i przygotowanych modeli laboratoryjnych. Lider posiada w kraju ponad 600 realizacji układów zasilania obiektów przemysłowych, oraz wiele więcej w ramach energetyki zawodowej i OZE. W ramach tych możliwości prowadzono badania dotyczące sposobów akwizycji danych pomiarowych i zakłóceń niezbędnych do przygotowania i uczenia algorytmów predykcyjnych i zabezpieczeniowych. Pozyskano zgody od części klientów na pobieranie danych z ich obiektów i pochodzących z rejestratorów zakłóceń. Opracowano koncepcję serwera/ serwerów instalowanych u klientów, lub u Lidera w zależności od polityki bezpieczeństwa danego podmiotu. Opracowano algorytmy zbierania danych zapewniających cyberbezpieczeństwo i anonimizację danych.

Opracowano koncepcję stanowisk laboratoryjnych, do połączenia z systemem akwizycji danych pomiarowych. Pierwsze stanowisko wyposażono w model linii średniego napięcia napowietrzno–kablowej, wraz z odczepami do symulacji w warunkach laboratoryjnych różnego rodzaju zakłóceń występujących w rzeczywistych obiektach elektroenergetycznych. Drugie stanowisko posłużyło do badania uszkodzeń silników. Opracowano konfigurację sprzętową stanowiska, wraz z niezbędną aparaturą pomiarową. Pozyskiwane dane dotyczyły uszkodzeń klatek i łożysk w silniku oraz sprzęgu z maszyną napędzaną.

Celem pracy była również analiza dostępnych metod gromadzenia danych na rzecz algorytmów BIG DATA oraz możliwość ich optymalnego wykorzystania. W ramach pracy opracowano specjalną aplikację służącą do pobierania zarejestrowanych danych na obiektach elektroenergetycznych. Ponieważ na potrzeby analizy BIG DATA niezbędne są duże ilości danych, to istniała potrzeba automatyzacji tego procesu. Dotychczasowe metody nagrywania danych na pamięć przenośną typu pendrive lub pobierania ich z każdego urządzenia oddzielnie były niewystarczające. W wyniku współpracy z Instytutem Elektrotechniki udało się uruchomić i przetestować w warunkach zbliżonych do rzeczywistych aplikację serwerową, umożliwiającą wykorzystanie lokalnej sieci typu Ethernet do szybkiego pobierania i gromadzenia danych na serwerze. Na innym etapie projektu dokonano jej integracji z algorytmami analizy BIG DATA.

W przyszłości, jako alternatywne rozwiązanie, można rozpatrywać zastosowanie łącza modemu LTE do przesyłania rejestracji. Badania jakości komunikacji i połączenia między urządzeniami na obiekcie, telefonem komórkowym oraz aplikacją serwerową zakończyły się wynikiem pozytywnym. Istnieje jednak ryzyko utraty połączenia na skutek przyczyn zależnych od dostawcy usługi. Z tego powodu nie należy tego rozwiązania rozpatrywać, jako podstawowego.

Analiza rynku wykazała, że ze względu na duże rozproszenie stacji oraz problemy z wykwalifikowaną kadrą do bieżącej obsługi, istnieje potrzeba wykorzystania opracowanego oprogramowania na urządzenia mobilne w zakresie zarządzania infrastrukturą elektroenergetyczną dla przedsiębiorców, służb utrzymania ruchu i innych odbiorców końcowych. Prototyp aplikacji na urządzenia mobilne (miniScada) opracowany w ramach badań przemysłowych umożliwi właścicielowi obiektu i/lub służbom utrzymania ruchu pełny dostęp do swoich obiektów 24 h na dobę, w tym podgląd stanu łączników wraz z możliwością sterowania (zamknij/otwórz), podgląd zdarzeń i alarmów, informacje o bieżącej i historycznej produkcji energii, itp. Rozwiązanie to jest przydatne i wygodne w szczególności, kiedy właściciel obiektu i/lub służby utrzymania ruchu mają wiele obiektów, bądź obiekt(y) zlokalizowane są w różnych miejscach, z reguły w znacznej odległości od centrum zarządzania nimi.

### **Integracja opracowanych nowoczesnych, autorskich algorytmów zabezpieczeniowych oraz w zakresie komunikacji cyfrowej z przygotowanym hardware.**

W kolejnym etapie, na bazie eksperymentalnych układów hardware, opracowano próbki kart rozszerzeń oraz próbki całych urządzeń i dokonano integracji ze stworzonymi algorytmami automatyki zabezpieczeniowej. W celu zweryfikowania poprawności działania, przeprowadzono badania odporności na zakłócenia w ramach kompatybilności elektromagnetycznej, a także testy funkcjonalne.

Projektowanie i badania odporności próbek na zaburzenia elektromagnetyczne (kompatybilność elektromagnetyczna) były realizowane we współpracy z Partnerem IEL. Wstępny etap prac obejmował badania przemysłowe, które wykazały brak odporności obwodów zasilania na testy narażeniowe udarami oraz szybkimi elektrycznymi stanami przejściowymi. Obwody te wymagały przekonstruowania w celu uzyskania odpowiedniego poziomu odporności.

## **3.2 Zadanie 2**

Partner IEL w ramach zadania 2 przeprowadził prace badawcze w zakresie weryfikacji działania przedprototypów automatyki zabezpieczeniowej dla stacji wysokiego napięcia, nowych kart pomiarowych do zabezpieczeń średniego napięcia oraz zaimplementowanych algorytmów pomiarowo-zabezpieczeniowych i predykcyjnych. IEL posiada rozbudowaną bazę laboratoryjną, wyposażoną w specjalistyczny sprzęt pomiarowy oraz posiada odpowiednie i kompetentne zasoby ludzkie odpowiednie do przeprowadzenia tego typu prac badawczych, co pozwoliło na sprawną i skuteczną pracę zespołów Lidera i Partnera IEL.

### **Badania przemysłowe związane z opracowaniem nowoczesnych, autorskich algorytmów zabezpieczeniowych oraz w zakresie komunikacji cyfrowej.**

W ramach badań przemysłowych Partner IEL wykonał testy funkcjonalności opracowanych przez Lidera światłowodowych modułów komunikacyjnych, wraz z algorytmem obsługującym redundantny kanał komunikacyjny. Wykonano badania próbek w laboratorium Partnera IEL na modelu linii wysokiego napięcia, w wyniku czego Lider udoskonalił działanie oraz wyeliminował sporadyczne występowanie nieprawidłowych pobudzeń zabezpieczenia. Dodatkowo Partner IEL przeprowadził testy laboratoryjne na modelu linii średniego napięcia czasów zadziałania zabezpieczenia różnicowego linii SN i zweryfikował możliwość zastosowania opracowanych algorytmów dla linii WN. W wyniku badań Lider określił wymagania oraz zakres komunikacji między dwoma urządzeniami kompletu zabezpieczenia różnicowego dla linii WN i SN.

Kolejnym obszarem realizowanym w ramach ścisłej współpracy pomiędzy Liderem i Partnerem IEL było opracowanie i badanie funkcjonalności nowego algorytmu zabezpieczenia różnicowego transformatora. Wielokrotne zmiany algorytmów i ponowne badania prowadzone przez Partnera IEL doprowadziły do osiągnięcia zakładanych parametrów i poprawnego działania opracowanych algorytmów i hardware do realizacji funkcjonalności zabezpieczenia różnicowego transformatora.

W dalszej kolejności, przeprowadzono badania autorskiego algorytmu automatyki samoczynnego częstotliwościowego odciążania (SCO). Badania wykonano odwzorowując w warunkach laboratoryjnych, za pomocą testera zabezpieczeń, rzeczywiste przebiegi napięć i prądów w różnych stanach zakłóceń. Na tej podstawie dokonano weryfikacji poprawności działania algorytmu.

Wykonano również badania karty sterującej wraz z algorytmami sterującymi i blokadami zapewniającymi bezpieczeństwo, realizującej automatykę samoczynnego załączania rezerwy (SZR) z założeniem przełączania quasisynchronicznego oraz synchronicznego w postaci rezerwy utajonej oraz rezerwy jawnej, która pozwala na wykonanie bezprzerwowych przełączeń napięcia zasilania. W ramach przeprowadzonych przez Partnera IEL prac badawczych wykonano stanowisko testowe z modelem automatyki SZR, opartej o 5 wyłączników mocy. Przeprowadzone testy funkcjonalne wykazały poprawność działania opracowanego przez Lidera rozwiązania.

### **Badania przemysłowe związane z opracowaniem nowoczesnych, autorskich w zakresie hardware oraz akwizycji danych pomiarowych.**

W ramach badań przemysłowych Partner IEL wykonał testy działania przedprototypów elementów hardware, należały do nich: płytki procesorowe, pomiarowe i służące do akwizycji danych. Partner IEL wykonał badania pod kątem wrażliwości na zakłócenia zewnętrzne. W tej części zadania zbadano również karty pomiarowe współpracujące z sensorami napięciowymi, cewkami Rogowskiego oraz przekładnikami prądowymi i napięciowymi. Badania współpracy sensorów napięciowych były niezbędne przy badaniach nad interfejsem do współpracy z zabezpieczeniami. Badania nad sensorami były prowadzone w ramach zadania 4, ale jednocześnie weryfikowano poprawność współpracy z interfejsami pomiarowymi automatyki zabezpieczeniowej. Partner IEL przeprowadzał na bieżąco testy nowej bazy sprzętowej, co umożliwiało podejmowanie działań korekcyjnych w badanych rozwiązaniach.

W ramach koncepcji opracowania algorytmów predykcyjnych, Partner IEL udostępnił swoje stanowiska laboratoryjne do badania systemu zbierania danych pomiarowych z obiektów rzeczywistych. Lider wyposażył stanowiska w niezbędne urządzenia i infrastrukturę do rejestracji i przesyłania danych na serwery, w celu pozyskania danych pomiarowych do budowy i weryfikacji algorytmów predykcyjnych i zabezpieczeniowych. Pozyskane dane z rejestratorów zakłóceń, ze względu na moc zainstalowanych urządzeń i występujące ogromne zakłócenia elektromagnetyczne odwzorowują w pełni warunki rzeczywiste występujące w środowisku przemysłowym. Pozyskiwane dane dotyczyły uszkodzeń klatek i łożysk w silniku oraz sprzęgu z maszyną napędzaną, w tym przypadku z generatorami i wzbudnicami.

### **3.3 Podsumowanie**

Efektom końcowym badań przemysłowych dla zadań 1 i 2 było utworzenie bazy sprzętowej składającej się z opracowanych kart do akwizycji danych, układów zasilania oraz procesorowych, które stanowiły podstawę do implementacji algorytmów automatyki zabezpieczeniowej. We współpracy z Partnerem IEL udało się przebadać zarówno elementy składowe, jak i próbki urządzeń. Nowe algorytmy zabezpieczeniowe i powstałe próbki, zostały przebadane w warunkach laboratoryjnych, usprawnione i sprawdzone w środowisku zbliżonym do warunków rzeczywistych. Stanowiły one podstawę do dalszych działań w projekcie. Opracowana baza sprzętowa oraz podstawowe algorytmy eliminacyjne były bazą dla prowadzonych dalszych badań rozwojowych obejmujących opracowanie prototypów urządzeń. Zespoły realizujące zadania 1, 2 na bieżąco komunikowały się z wykonawcami zadań 3, 4 oraz 5, 6, 7 w celu ciągłym wymiany informacji i potrzeb w zakresie niezbędnych interfejsów do zbierania i akwizycji danych pomiarowych z nowych sensorów oraz wymaganej mocy obliczeniowej do realizacji algorytmów sztucznej inteligencji i akwizycji danych.

### **3.4 Osiągnięte rezultaty**

Prace badawcze przeprowadzone w zakresie zadania wykazały potrzebę wprowadzenia modyfikacji sprzętowych w badanych próbkach, obejmujących zmianę obwodów zasilacza oraz wejść pomiarowych, a także w zaimplementowanym algorytmie zabezpieczenia różnicowego transformatora. Udowodniły jednak poprawność działania ostatecznie zaimplementowanych algorytmów oraz finalnych wersji próbek w warunkach laboratoryjnych, zbliżonych do warunków rzeczywistych. Osiągnięto założony cel zadania tworząc bazę sprzętową wyposażoną w niezbędne elementy służące do akwizycji danych niezbędnych w kolejnych częściach projektu.

## 4. Badania nad rozdzielnicami SN do rozdziału pierwotnego wyposażonych w sensory do dostarczania szerokiego spektrum pomiarów

### 4.1 Zadanie 3

Lider w ramach tego zadania przeprowadził badania przemysłowe, mające na celu opracowanie rozwiązań, pozwalających na podniesienie parametrów elektrycznych rozdzielnic średniego napięcia w izolacji powietrznej dla rozdziału pierwotnego. Dodatkowo wykonano prace badawcze polegające na określeniu optymalnego rozmieszczenia czujników w przedziałach rozdzielnic (czujników zarówno już istniejących oraz tych projektowanych).

W ramach prac koncepcyjnych nad opracowaniem rozdzielnic o podwyższonych parametrach zwarciovych oraz napięciowych, bazowano w dużej mierze na doświadczeniach na powstałych już produktach ALPHA, które miały już wykonane próby typu, czyli posiadały wszystkie niezbędne badania laboratoryjne. Dodatkowym wsparciem były analizy numeryczne rozkładów temperatury na szynach oraz w poszczególnych przedziałach pola rozdzielnic. Analizy te dały potwierdzenie w rzeczywistych badaniach, czyli poprawność metody została potwierdzona badaniami laboratoryjnymi oraz stanowiły wiarygodne narzędzie pozwalające weryfikować pewne rozwiązania już na etapie projektowania. Ograniczyło to znacząco ilość koniecznych badań laboratoryjnych.

Prace koncepcyjne nad podniesieniem parametrów zwarciovych rozdzielnic, Lider rozpoczął od analizy poprzednich rozwiązań, które miały potwierdzenie parametry znamionowe w badaniach laboratoryjnych. Do dyspozycji w tym zakresie były rozdzielnice jedno i dwusystemowe o parametrach zwarciovych 25 kA i 31,5 kA. Przeprowadzona analiza doprowadziła do wybrania najmniejszej gabarytowo rozdzielnic e<sup>2</sup>ALPHA-G, posiadającej parametry zwarciove na poziomie 25 kA w czasie 1 s oraz odporność na działanie łuku wewnętrznego na poziomie 25 kA w czasie 0,5 s. Cechą charakterystyczną rozdzielnic górniczej, jest to, że nie posiada ona kanałów dekompresyjnych i w połączeniu z małymi gabarytami jest najbardziej wymagająca pod względem oddziaływania łuku elektrycznego w razie wystąpienia zwarcia. Aby zweryfikować jakie zmiany konstrukcyjne, dotyczące wytrzymałości pola, należy wprowadzić przeprowadzono serię prób łukowych, wydłużając czas trwania zwarcia do maksymalnie 1 s. Badania były prowadzone w laboratoriach Partnera IEL w trzech przedziałach funkcyjnych pola rozdzielczego. Badanie przedziału przyłączeniowego dało wynik pozytywny, dwa pozostałe — aparatowy i szyn zbiorczych dały wynik negatywny. Negatywny wynik wytyczył kierunek prac konstrukcyjnych, w ramach badań wprowadzano zmiany i przeprowadzano powtórne badania. Okazało się że w tego typu konstrukcji ze względu na gabaryty oraz wewnętrzną dekompresję nie jest możliwe uzyskanie wyższych parametrów niż 25 kA/1 s dla działania łuku elektrycznego. Prowadząc te badania osiągnięto wiedzę jaka konstrukcja umożliwi osiągnięcie zakładanego poziomu 40 kA/1 s dla minimalnych gabarytów i przy założeniu izolacji powietrznej neutralnej dla środowiska .

W dalszym etapie prowadzono badania nad konstrukcją rozdzielnic posiadającą większe gabaryty i zewnętrzny wydmuch gazów. Jednocześnie eksperymenty w tym etapie miały doprowadzić do opracowania najbardziej optymalnego ułożenia szyn prądowych w strukturze pola rozdzielczego. Przeprowadzono szereg badań dla potwierdzenia poprawności połączeń śrubowych i oddziaływania elektrodynamicznego na poziomie prądów zwarciovych rzędu 31,5 kA, dla tzw. klasycznego układu szyn i rozmieszczenia aparatów. Równocześnie w ramach badań opracowano innowację w tym zakresie układu szyn i aparatów w polu co w dalszych etapach badań było podstawą do opracowania rozwiązania eliminującego problem dostępu do przekładników prądowych i podłączania kabli SN dla rozwiązań przyściennych, gdzie nie ma dostępu do wnętrza od tyłu pola rozdzielnic. Rozwiązanie takie umożliwia stosowanie pól w aplikacjach wymagających mniejszej przestrzeni, tam gdzie do tej pory stosowano izolację SF<sub>6</sub>. Opracowano koncepcję takiego pola, przeprowadzono analizę wytrzymałościową, dającą wskazania na pozytywny wynik badań. Przeprowadzono szereg badań i zmian konstrukcji poszczególnych przedziałów w celu wyznaczenia maksymalnych parametrów dla tego typu konstrukcji. Maksymalne parametry jakie udało się osiągnąć to 31,5 kA/3 s dla prądów zwarciovych w tym toru uziemiającego i uziemnika, oraz 1s dla zwarc łukowych. Kolejne prace badawcze dotyczyły osiągnięcia parametrów napięciowych dla poziomów znamionowych 12 kV i 17,5 kV . W ramach prac skorzystano z

wyników poprzednio realizowanego projektu w zakresie analiz komputerowych rozkładu napięć w polach rozdzielniczy dzięki czemu ograniczono ilość badań laboratoryjnych.

Dalsze badania przemysłowe dotyczyły konstrukcji na docelowe parametry 40 kA prądu zwarciovego i łukowego, oraz prądy znamionowe do 4 000 A. Poprzednie wyniki badań wskazały obszary działania w celu osiągnięcia zakładanych parametrów. W ramach badań prowadzone były analizy dostępnej aparatury pierwotnej jaką można instalować dla takich paramentów w optymalnych gabarytach i układach odprowadzania ciepła. W celu usprawnienia prac skorzystano z dotychczasowych wyników i konstrukcji przedziałów pól rozdzielczych, w tym konstrukcji na napięcia 24 kV, które są większe gabrytowo. Analiza możliwości wykorzystania tej konstrukcji pozwalała na zastosowanie w niej aparatów o znamionowym prądzie zwarciovym wynoszącym 40 kA (wyłączniki, uziemniki i inne) oraz prądy znamionowe ciągłe rzędu 4 000 A. Na podstawie dostępnych badań, wykonanych przez Partnera (IEL), pokazujących rozkład temperatury w różnych przedziałach rozdzielniczy ALPHA-2S, wykonano analizę rozpatrywanego rozwiązania. W ramach prac opracowano przedziały funkcyjne o zbliżonych gabarytach i układzie połączeń szynowych. Analiza wyników dotychczasowych wykazała że w celu podniesienia parametrów znamionowych wymagana jest szersza konstrukcja, co zapewniło warunki dla osiągnięcia podwyższonych parametrów elektrycznych. Lider wspólnie z Partnerem IEL wykonał serię prób i finalnie osiągnięto wynik pozytywny. Konstrukcja ta umożliwiła podniesienie parametrów zwarciovych do 40 kA.

Oprócz badań prądowych i zwarciovych prowadzono również badania dotyczące opracowania rozwiązań umożliwiających osiągnięcie wymaganych paramentów napięciowych, w tym poziomu izolacji, odporności na udary napięciowe, zachowania odpowiedniej klasy przegród. W ramach badań niezbędne okazało się wprowadzanie zmian w celu osiągnięcia zakładanych parametrów napięciowych dla 12, 17,5 i 24 kV. Zmieniono lokalizację przyłącza kablowego, umieszczając je z przodu. W przypadku autorskiego układu pola do zastosowań przyściennych zmieniono lokalizację przyłącza kablowego, umieszczając je z przodu, zmieniono również lokalizację przekładników prądowych, dając możliwość dostępu do nich od przodu bez konieczności demontażu kabli SN. Opracowano również nowy układ uziemnika (zmiana położenia, nowy rodzaj napędu, nowy układ krańcówek). Wykonano próbę napięciową dla szeregu 12 i 17,5 kV, Dla parametrów 24 kV, 2 500 A, badania wykazały konieczność zmiany układu szyn pola, przegród węzła wyłącznikowego oraz układu przegród ruchomych styków stałych. Dodatkowo opracowano funkcyjne osłony zewnętrzne pola (z uwagi na możliwość stosowania różnych modeli wyłączników). Założenia wynikające z prowadzonych badań były wstępnie weryfikowane i wspierane pracami symulacyjnymi na modelu komputerowym przez Partnera IEL realizującego zadanie 4.

Odrębnym wątkiem realizowanym przez Lidera w ramach prac badawczych było poszukiwanie potencjalnych miejsc, w przedziałach funkcyjnych, umożliwiających zamontowanie różnego rodzaju czujników. Wykonano próbę zawieszenia czujników temperatury, bezpośrednio na szynach prądowych, opracowano na podstawie analizy rozkładu temperatur ich rozmieszczenie w polu (wybrano obszary potencjalnie najbardziej narażone na przegrzanie). Skuteczność rozmieszczenia czujników weryfikowano w czasie nagrzewania pól w celu potwierdzenia przyjętych założeń. Ze względu na bezwładność temperaturową wykazano, że rozmieszczenie czujników ma dużą tolerancję, dzięki temu finalnie zostały określone optymalne miejsca montażu: okolice przyłączy kablowych — dla skutecznego monitorowania punktów podłączenia kabli, oraz pionowe odcinki szyn powyżej aparatu łączeniowego dla monitorowania temperatury styków aparatu łączeniowego oraz połączeń szyn zbiorczych. Na podstawie prowadzonych badań zostały przekazane założenia dla zespołu realizującego badania w ramach zadania 1 i 2 w celu opracowania hardware do monitorowania temperatury w sześciu punktach pola rozdzielniczy.

W zakresie czujników błysku badano rozmieszczenie pod kątem odporności napięciowej, ze względu na konieczność stosowania metalowych uchwytów do montażu czujników. Badania potwierdziły, że dla przedziałów szyn zbiorczych i wyłącznikowego wystarczające jest użycie pojedynczego czujnika błysku, natomiast dla przedziału przyłączeniowego w zależności od wyposażenia pola (przekładniki napięciowe, ograniczniki przepięć, przekładniki Ferrantiego, ilość kabli) jeden czujnik powoduje zwiększenie czasu działania zabezpieczenia i zalecane jest stosowanie dwóch czujników pracujących równolegle.

W ramach badań nad wizualizacją pozycji aparatów ruchomych takich jak uziemnik, wózek wyłącznika prowadzono badania nad lokalizacją kamer do monitorowania i wizualizacji tych przestrzeni. Układ i

rozmieszczenie badano pod kątem widoczności aparatów, zarówno przy obecności światła widzialnego jak również podczerwieni, oraz skuteczności i pewności działania podczas pracy na napięciu znamionowym, oraz przy przepływie prądów znamionowych. Po wielu badaniach zostały wybrane lokalizacje kamer dla stabilnej pracy i odporności na działanie zakłóceń elektromagnetycznych oraz odporności temperaturowej dla prądów znamionowych.

W ramach prowadzonych badań przemysłowych prowadzono również prace nad koncepcją pomiaru napięć i prądów rezygnując ze stosowania klasycznych przekładników prądowych i napięciowych. Badania przemysłowe dotyczyły realizacji nowych funkcjonalności pomiaru napięcia przy pomocy sensorów napięciowych oraz prądów przy pomocy cewek Rogowskiego z możliwością przełączania zakresu pomiarowego. Umożliwiło to eliminację pomiarów prądów i napięć z przekładników konwencjonalnych, dzięki czemu informacja przekazywana do zabezpieczenia o prądach i napięciach, szczególnie w czasie trwania zwarcia, poprawia niezawodność i pewność działania zabezpieczeń. W ramach realizacji zadania 4 Partner IEL opracował sensory napięciowe do pomiaru napięcia, natomiast Lider karty pomiarowe do sterowników polowych w wersji z cewkami Rogowskiego i sensorami napięcia, które umożliwią lepsze oczyunikowanie rozdzielnic pod względem pomiaru napięć i prądów ze względu na małe gabaryty oraz koszty wykonania opracowanych rozwiązań sprzętowych.

Nowe rozwiązania czujników do wykrywania łuku oraz do pomiaru temperatury szyn zbiorczych w rozdzielnicach wykonał Lider w ramach realizacji zadania 3, we współpracy z Politechniką Białostocką, na podstawie dwustronnej umowy o współpracy.

Pierwszym zadaniem było wykonanie soczewek aktywnych przy użyciu materiałów wykazujących absorpcję promieniowania nadfioletowego, które jest następnie konwertowane na światło widzialne. W ramach prac wykonano soczewki aktywne z materiałów polimerowych (PMMA) domieszkowanych barwnikami oraz ze specjalnych szkielek fosforanowych domieszkowanych jonami lantanowców. Wyżej wspomniane materiały posiadają pasma absorpcji promieniowania w zakresie UV i konwersję na VIS. Soczewki te posłużyły do wykonania czujników optycznych, które w swojej budowie wykazują podobieństwo do czujników dostępnych na rynku, lecz mają wprowadzoną innowację w postaci możliwości wykrywania widma emisji wyładowania niepełnego przed zapaleniem się łuku. Badania laboratoryjne i analiza charakterystyk zbudowanych czujników potwierdziły tezę, że wybrane materiały można wykorzystać do konwersji promieniowania UV na promieniowanie VIS. Oznacza to, że takie sensory można wykorzystać jako innowacyjne zamienniki dla obecnych czujników występujących na rynku zabezpieczeń. Jednak wprowadzenie ich na rynek wymaga przeprowadzenia pomiarów w układach rzeczywistych, co będzie stanowić dalszy kierunek prac badawczych finansowanych przez Lidera po zakończeniu projektu.

Drugim zadaniem było zaprojektowanie i wykonanie czujnika do pomiaru temperatury szyn zbiorczych w rozdzielnicach. W ramach prac przemysłowych opracowano dwa kompletne rozwiązania czujników do pomiaru temperatury szyn zbiorczych. W pierwszym głowicę pomiarową zbudowano na podstawie układu scalonego z zasilaniem bateryjnym, w drugim rozwiązaniu głowica zbudowana była ze szkła luminescencyjnego.

Celem badań przemysłowych pierwszej głowicy pomiarowej była weryfikacja możliwości dostarczenia niskokosztowych rozwiązań opartych o cyfrowe układy pomiarowe. Zbudowano próbkę czujnika, która bazując na pomiarze cyfrowym wykonywanym przez mikrokontroler, wysyłała informację o stanie temperatury do decyzyjnej jednostki nadrzędnej.

Dodatkowo w ramach zadania Lider opracował i wykonał karty pomiarowe współpracujące z obydwojoma rozwiązaniami czujników. Jako medium do izolacji galwanicznej oraz do transmisji sygnału z czujników wykorzystano światłowód plastikowy. Wykonane badania w laboratorium wielkoprądowym, u Partnera IEL, potwierdziły odporność rozwiązań na pole elektryczne i elektromagnetyczne, zakładaną dokładność pomiaru oraz zakres pomiarowy opracowanych czujników. Ostatecznie ze względu na koszt pompy laserowej o wymaganej długości fali (ok. 1 000 zł) w rozwiązaniu docelowym rozdzielnic zastosowano czujniki oparte o układ scalony. Rozwiązanie głowicy pomiarowej ze szkłem luminescencyjnym musi być poddane dalszym pracom badawczym w celu obniżenia kosztu wytworzenia układu pomiarowego, prace nad tym rozwiązaniem będą kontynuowane poza projektem i finansowane ze środków Lidera.

## 4.2 Zadanie 4

Partner IEL w ramach zadania nr 4 prowadził wraz z liderem badania przemysłowe dotyczące przygotowania złożeń oraz opracowania elementów rozdzielnic zdolnych wytrzymać zwarcia łukowe do 40 kA/1 s oraz poziomy napięciowe dla typoszeregu 24 kV napięcia znamionowego. Do badań nad konstrukcjami rozdzielnic zostało wykorzystane zaplecze laboratoryjne Partnera IEL. Równolegle Partner IEL w ramach badań przemysłowych wykonał analizy numeryczne pola elektromagnetycznego oraz pól cieplnych (rozkładów temperatury) dla różnych układów wentylacyjnych w rozdzielnic z powietrzną izolacją główną. Cyfrowy model rozdzielnic zbudowano w oparciu o jej rysunki konstrukcyjne i został on dopasowany do wymagań zastosowanego oprogramowania obliczeniowego. Do realizacji niniejszej pracy zastosowano pakiet oprogramowania Maxwell 3D (Ansys) oraz Flux 3D, wykorzystujące metodę elementów skończonych (MES). Przeprowadzono wstępną analizę numeryczną rozkładów temperatury w wybranym przedziale rozdzielnic, w której izolację główną stanowi powietrze atmosferyczne. Na podstawie dostarczonych przez Lidera rysunków konstrukcyjnych rozdzielnic dostosowano wybrane fragmenty jej modelu do wymagań zastosowanego oprogramowania obliczeniowego. W celu weryfikacji przygotowanego modelu numerycznego przeprowadzono obliczenia rozkładu temperatury w przedziale szyn zbiorczych dla prądu znamionowego do 2 500 A. Obliczenia wykonano w pierwszym etapie dla obudowy pozbawionej otworów wentylacyjnych. W kolejnym etapie wykonano obliczenia w otworami wentylacyjnymi w celu sprawdzenia ich wpływu na rozkład temperatury wewnątrz rozdzielnic. Dla modelu z otworami wentylacyjnymi różnice pomiędzy wynikami pomiarów temperatury uzyskanych z obiektu rzeczywistego podczas prób laboratoryjnych przy obciążeniu prądem 1 250 A i obliczeń nie przekraczają 3 °C. Świadczy to o poprawności przyjętych założeń obliczeniowych. Dalsze prace badawcze dotyczyły przygotowania przez Lidera w oparciu o pozyskane dane, ulepszonej wersji rozdzielnic i aparatury pomiarowej na wyższe parametry znamionowe.

Partner IEL w ramach zadania 4 przeprowadził badania przemysłowe dotyczące opracowania i wykonania przed prototypu konstrukcji sensora do pomiaru napięcia umieszczonego w konstrukcji izolatora wsporcze. Na wstępie przeanalizowano uproszczone konstrukcje sensora z uwzględnieniem niewielkiej dokładności pomiaru oraz kosztów produkcji i niezawodności działania. Przygotowano formę ułatwiającą lutowanie elementów sensora pomiarowego. Przeprowadzono wstępne badania przekładni przygotowanych układów pomiarowych. Do pomiaru wykorzystano multimetr laboratoryjny FLUKE 8846A. Wszystkie układy zostały przebadane laboratoryjnie przy napięciu probierczym 1 000 V DC oraz AC częstotliwości od 50 Hz do 5 kHz. Uzyskane wyniki pomiarów były powtarzalne i zgodne z założeniami konstrukcyjnymi. W dalszym etapie układy pomiarowe zostały zalane żywicą w formie izolatora wsporcze celem wykonania badań napięciowych, które potwierdziły zakładane parametry elektryczne wykonanych sensorów pomiarowych. Zalanie układów pomiarowych żywicą zmieniło charakterystykę pracy części napięciowej, przez co niezbędne było dalsze prowadzenie badań nad rozwiązaniem kompensującym zmiany charakterystyki odpowiedzi napięciowej i częstotliwościowej dla układu po zalaniu żywicą. Po wielokrotnych próbach udało się uzyskać zakładane parametry. Jednocześnie prowadzono badania dotyczące wytrzymałości mechanicznej sensorów, tak aby mogły spełniać wymagania dla izolatorów wsporcze. Przeprowadzone badania wykazały problemy związane z lokalizacją przyłącza do obwodów pomiarowych oraz wielkości wtopki do przykręcania izolatora. Badania różnych kombinacji tych elementów pozwoliły na finalne osiągnięcie zakładanych parametrów mechanicznych.

### **Analiza numeryczna pól cieplnych rozdzielnic.**

Ze względu na dostępność danych pomiarowych z badań rzeczywistych w pierwszym etapie przedmiotem analizy numerycznej była rozdzelnica SN e<sup>2</sup>ALPHA-2S  $U_n = 24$  kV i  $I_n = 1\ 600$  A dedykowana do pierwotnego i wtórnego rozdziału energii. Składa się z kilku wydzielonych, niezależnych przedziałów oddzielonych metalowymi przegrodami. Umieszczony w środkowej części przedział dekompresji umożliwia odprowadzenie ciśnienia i gazów połukowych w jedno miejsce, powstałych w momencie wystąpienia zwarcia w którymś z przedziałów rozdzielnic. Lider przekazał trójwymiarowy model rozdzielnic dwu-systemowej. Ze względu na dużą złożoność i detale konstrukcyjne niewpływające na rozkład temperatury przygotowano uproszczony model obliczeniowy. Obudowa rozdzielnic miała te same gabaryty i składała się z prostych płyt który tworzyły bryłę konstrukcyjną. Układ szyn zbiorczych został uproszczony tak aby zachować jego układ i geometrię a zostały w nim pominięte zaokrąglenia, otwory czy inne nieistotne szczegóły w analizie termicznej. W pierwszym etapie prac wyodrębniono pojedyncze przedziały do analiz termicznych. Do wstępnej analizy wybrano przedział

odłącznika. Analiza termiczna polegała na przestawieniu zależności wielkości i miejsca umieszczenia otworów wentylacyjnych na obudowie tego pola.

Analiza numeryczna została wykonana przy zastosowaniu pakietu oprogramowania Maxwell 3D (Ansys), wykorzystujące metodę elementów skończonych (MES). Do obliczeń został wykorzystany uproszczony model numeryczny opracowany na podstawie rysunków konstrukcyjnych przekazanych przez Lidera. Do analizy wybrano wybrane przedziały mający wzajemny wpływ na siebie. Odpowiednio zoptymalizowano model pola rozdzielnic pod kątem wymagań aplikacji Ansys Icepack. W obudowie zostały zasymulowano otwory wentylacyjne o zadanej przepuszczalności powietrza, zastępując kratki wentylacyjne. Do wyliczenia współczynnika posłużył opracowany algorytm pozwalający na dokładne wyliczenia współczynnika. Dla każdej kratki a także grupy otworów wentylacyjnych został zadany procentowy współczynnik, określający procentowy udział przepływu powietrza. Dzięki temu możliwa jest modyfikacja parametry modelu nie zmieniając jego geometrii.

Dla różnych materiałów zostały określone i przypisane współczynniki definiujące materiał (miedź, stal, powietrze), zostały określone współczynniki rezystywności i przewodności cieplnej. Zapewniono ciągłość obwodu prądowego dla którego zadano wartość prądu, zostały określone także temperaturowe warunki brzegowe. W modelu zostały uwzględnione wszystkie elementy mające wpływ na generację i propagację ciepła. Model numeryczny odzwierciedla w skali 1:1 rozpatrywany fragment rozdzielnic. W celu uproszczenia modelu torów prądowych rozdzielnic w miejsce aparatów (wyłącznik, odłącznik) zastosowano odpowiednie zwory, którym przypisano właściwości materiałowe oraz podwyższoną rezystywność jako parametr generujący ciepło w torze prądowym. Dla każdej kratki i otworu wentylacyjnej został określony odpowiedni współczynnik przenikalności. Poprzez zmianę wartości tego współczynnika, istniała możliwość modelowania różnego typu krutek i otworów wentylacyjnych. Współczynnik przenikalności zawiera się w zakresie od 0 do 1. Przy czym wartość zero oznacza powierzchnię zamkniętą bez cyrkulacji natomiast wartość 1 odpowiada otworowi o pełnej przepuszczalności.

Ze względu na dużą złożoność procesu obliczeń także jego długi czas trwania, w celu uproszczenia analizy na końcach szyn głównych zadawano wartość temperatury. Tą temperaturę zmierzono podczas badań eksperymentalnych na rzeczywistym modelu rozdzielnic podczas badań grzejnych. Następnie przygotowano zoptymalizowany do obliczeń za pomocą oprogramowania Icepak, model rozdzielnic e<sup>2</sup>APLHA. Wstępną analizę rozkładu temperatury wykonano dla obudowy zamkniętą bez wentylacji i prądu roboczego do 1 600 A. Zadano przesunięty fazowo prąd dla każdego zestawu szyn, na podstawie obliczeń uzyskano straty czynne w torze prądowym analizowanej rozdzielnic. Największe straty mocy (nawet około 3 W/m<sup>3</sup>) występują w pobliżu połączeń aparatów łączeniowych i szyn rozdzielnic. Następnie wyznaczono rozkład temperatury i stwierdzono, że znaczące wartości około 95 °C występują w górnej części toru prądowego, a także w miejscu zainstalowania aparatów. Na podstawie wyników obliczeń można stwierdzić, że na rozkład temperatury, istotny wpływ ma ruch powietrza wewnątrz obudowy, a także sąsiedztwo źródeł ciepła (odległość od układu szyn). Ruch powietrza wewnątrz i na zewnątrz obudowy wymuszony jest różnicą temperatur w poszczególnych obszarach generacji ciepła. Uzyskane w analizie wyniki temperatur są porównywalne do tych uzyskanych podczas próby nagrzewania. Straty mocy kształtują się w zakresie od 30 kW/m<sup>3</sup> do niemal 455 kW/m<sup>3</sup> w bliskim sąsiedztwie aparatów łączeniowych.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że zmiana współczynnika przepuszczalności otworów wentylacyjnych znacząco wpływa na rozkład temperatury w analizowanej konstrukcji rozdzielnic. Powiększając wielkość otworów zwiększamy ruch i prędkość ruchu powietrza wewnątrz obudowy, dzięki czemu elementy wewnątrz osiągną niższe wartości temperatury ustalonej podczas pracy rozdzielnic przy prądzie znamionowym 1 600 A. Dla współczynnika przepuszczalności otworów wentylacyjnych 0,6 maksymalna temperatura na szynach wynosiła nawet 87 °C, na powierzchni obudowy 44 °C, w sufitowej części temperatura powietrza osiągała nawet 58 °C natomiast prędkość powietrza 0,71 m/s. W przypadku współczynnika przepuszczalności otworów wentylacyjnych 0,8 zanotowano maksymalną temperaturę na szynach 55 °C, na powierzchni obudowy 40 °C, w sufitowej części temperatura powietrza osiągała nawet 46 °C natomiast prędkość powietrza 0,66 m/s. Na podstawie tych wyników analizy numerycznej rozkładu temperatury można uznać że tego typu konstrukcja otworów wentylacyjnych i ich przepustowość istotnie wpływa na temperaturę pracy rozdzielnic. Podobną analizę przeprowadzono dla mniejszych wartości prądów znamionowych rozdzielnic.

Przeprowadzone analizy pozwoliły stwierdzić ich poprawność a także wychwycić zachodzące w modelu zależności (np. rozmieszczenie czy wielkości otworów wentylacyjnych). Wyniki uzyskane w analizie numerycznej są zbliżone do tych uzyskanych w próbie nagrzewania w laboratorium zwarciowym. Temperatura na obudowie rozdzielnic kształtowała się od 23 °C w dolnej części obudowy do 51 °C w górnej części obudowy w pobliżu otworów wentylacyjnych. Temperatura torów prądowych rozdzielnic zawierała się w zakresie od 60 °C (w dolnej części torów prądowych) do 80 °C (w górnej części torów prądowych), a lokalnie nawet do 120 °C na stykach aparatów łączeniowych. W pomiarach laboratoryjnych przyrostów temperatury pod wpływem prądu 1 600 A uzyskano zbliżone wyniki. Kilkustopniowe różnice wynikają z zadanych w obliczeniach wartości parametrów materiałowych oraz uproszczeń konstrukcji modelu numerycznego rozdzielnic. Należy zauważyć że podczas badań laboratoryjnych temperatura badana jest punktowo na powierzchni szyn za pomocą termopar, co wpływa na różnice pomiędzy wynikami obliczeń i pomiarów. Tego typu analiza termiczna pozwoliła na określenie wpływu, wielkości i lokalizacji otworów wentylacyjnych na obudowie tego pola pozwalając na optymalizację rozkładu temperatury w torach prądowych i na obudowie rozdzielnic. W dalszym etapie prac przeprowadzono obliczenia prędkości ruchu powietrza w rozdzielnicach. Umożliwia to rozpoznanie rozmieszczenia strug powietrza (kanału wentylacyjnego) wewnątrz jak i na zewnątrz rozdzielnic zapewniających chłodzenie nagrzanego jej elementów. Wyznaczona prędkość strug powietrza zawierała się w zakresie od około 0,23 m/s w kanałach wentylacyjnych do około 0,55 m/s w pobliżu szyn. Są to wartości zbliżone do wyników pomiarów eksperymentalnych wykonanych przez projektanta rozdzielnic.

W celu weryfikacji poprawności obliczeń wykonano również analizy numeryczne za pomocą oprogramowania Flux 3D. Obiektem analizy numerycznej były: dwusystemowa rozdzielnica SN-e<sup>2</sup>ALPHA-2S, oraz jednosystemowa rozdzielnica przyścienna SN-e<sup>2</sup>ALPHA. Dla rozdzielnic dwusystemowej przeprowadzono analizę dla pola 1 600 A i 2 500 A, natomiast dla rozdzielnic przyściennych dla pola 1 250 A. Modele numeryczne zostały stworzone na podstawie dokumentacji technicznej rozdzielnic. Wyniki analizy numerycznej rozkładu temperatur, w szynach i obudowie rozpatrywanego fragmentu rozdzielnic, zależą od parametrów elektrycznych i cieplnych (współczynników rezystywności i przewodności cieplnej w funkcji temperatury), przypisanych materiałom konstrukcyjnym rozdzielnic (miedź, stal, powietrze), a także od ustalonych temperaturowych warunków brzegowych. W celu pokazania wpływu liczby i rozmieszczenia otworów wentylacyjnych na warunki chłodzenia obudowy rozdzielnic wykonano, analizę porównawczą dwóch przypadków różniących się liczbą otworów na zewnętrznej ścianie obudowy. Analizując pomiary laboratoryjne i wyniki obliczeń można stwierdzić zbieżność lokalizacji punktów o wysokiej temperaturze, które występują w torach prądowych odłącznika i na wyjściu rozdzielnic. Różnice w wartościach temperatur są spowodowane brakiem dokładnych informacji o parametrach materiałowych poszczególnych elementów rozdzielnic oraz o parametrach wejścia i wyjścia toru prądowego.

Przeprowadzono analizy dla różnych układów otworów wentylacyjnych modelowanych pół rozdzielnic, dążąc do wyznaczenia optymalnych przepływów, zapewniających skuteczne chłodzenie wnętrza pola oraz równomierny rozkład temperatur.

W obszarach obudowy i półki z umieszczonymi otworami wentylacyjnymi zaobserwowano zmianę rozkładu temperatury obudowy wynikającą ze zmiany warunków chłodzenia poszczególnych jej boków. O ile wartości temperatury nie ulegały znaczącym zmianom, to jednak zmieniał się zasięg oddziaływania poszczególnych temperatur. Temperatura niektórych obszarów malała, a innych wzrastała w stosunku do temperatury tych samych obszarów, wyznaczonych dla obudowy bez otworów wentylacyjnych. Widać to było wyraźnie w obszarach obudowy z otworami wentylacyjnymi, ale również w obszarach bez otworów. Wynika to z różnicy w cyrkulacji nagrzanego powietrza wewnątrz obudowy, z otworami i bez, wpływającej bezpośrednio na nagrzewanie się wewnętrznych boków rozdzielnic, a poprzez przewodnictwo cieplne także zewnętrznych. Jeszcze bardziej różnice te widać było w przypadku otworów zastępczych. Duże powierzchni otworów w obszarze półki, sprzyjały swobodnemu przepływowi nagrzanego powietrza, powodując większe nagrzewanie się niektórych powierzchni bocznych obudowy, zwłaszcza w obszarach bez własnych otworów wentylacyjnych. Efektem tych analiz było wskazanie optymalnego układu naturalnej wentylacji pola rozdzielnic.

### **Analiza numeryczna pola elektromagnetycznego rozdzielnic.**

Analiza rozkładu pola elektromagnetycznego była opracowana przy użyciu programu Maxwell. W pierwszym etapie analizy numerycznej podczas analizy zagadnień elektromagnetycznych wyznaczany był rozkład gęstości prądu w szynach prądowych, a także straty Joule'a w szynach prądowych i straty od prądów wirowych w obudowie rozdzielnic. Na podstawie otrzymanych wartości strat w szynach i obudowie, a także przypisanych parametrów cieplnych materiałów konstrukcyjnych oraz temperaturowych warunków brzegowych, w drugim etapie analizy numerycznej rozszerzono wpływ zjawisk elektromagnetycznych na wyniki analizy zagadnień cieplnych w programie Icepak. Wyznaczany był rozkład temperatury w szynach prądowych oraz w obudowie. W rozpatrywanym przypadku ciepło powodujące nagrzewanie się obudowy, generowane było w szynach prądowych na skutek przepływu przez nie prądu. Analizę rozkładu gęstości prądu w szynach prądowych oraz start w szynach oraz obudowie wykonano dla prądu w szynach 1 250 A przesuniętych względem siebie o 120° (120° — 0° — 240°)

### **Opracowanie i wykonanie przed prototypu konstrukcji sensora do pomiaru napięcia umieszczonego w konstrukcji izolatora wsporcze.**

Kolejne badania przemysłowe dotyczyły opracowania konstrukcji sensora pomiaru napięcia z funkcją izolatora wsporcze. Na wstępie przeanalizowano uproszczone konstrukcje sensora z uwzględnieniem dokładności pomiaru oraz kosztów produkcji i niezawodności działania. Przygotowano formę ułatwiającą lutowanie elementów sensora pomiarowego. Przygotowano 3 sztuki układów pomiaru napięcia z rezystorem 250 MΩ oraz 6 sztuk układów wyposażonych w rezystor 100 MΩ. Przeprowadzono wstępne badania przekładni przygotowanych układów pomiarowych. Do pomiaru wykorzystano multimetr laboratoryjny FLUKE 8846A o impedancji ~2 MΩ. Wszystkie obiekty zostały przebadane przy napięciu 1 000 V oraz częstotliwościach: 0 Hz, 50 Hz, 350 Hz, 1 kHz, 5 kHz. Uzyskano wyniki badań są powtarzalne i zgodne z założeniami. W dalszym etapie układy pomiarowe zostały zalane żywicą w formie izolatora wsporcze. Następnie wykonano badania napięciowe wykonanych sensorów pomiarowych przed ich zalaniem. Przekładnia znamionowa międzyfazowa wynosiła 24 kV/3,25 V, czemu odpowiada napięcie fazowe odpowiednio 13,856 kV i 1,876 V na wejściu i wyjściu sensora. Napięcie wzorcowe określono jako wartość zadanego napięcia pomnożoną przez idealną przekładnię (24 000 V/3,25 V=7 384,615 V/V). Do zalania przeznaczono 6 dzielników z rezystorem wysokonapięciowym 250 MΩ oraz 6 dzielników z rezystorem wysokonapięciowym 100 MΩ. Dzielniki o mniejszej rezystancji pozwalają na uzyskanie lepszej klasy sensora napięciowego. Dzielniki o większej rezystancji mają większą szansę na przetrwanie prób napięciowych AC i udarowych. Przed zalaniem dzielników sprawdzono ich przekładnie dla napięcia 1 000 V, z wykorzystaniem multimetru FLUKE 8846A, przy częstotliwości 0, 50, 350, 1 000, 5 000 Hz. Spośród 12 zalanych dzielników, trzy posiadały już uszkodzony w czasie prób napięciowych rezystor wysokonapięciowy. W założeniu miały one posłużyć jako obiekty testowe, które mogą ulec zniszczeniu w procesie produkcji. Jeden z nich został po zalaniu przeznaczony do prób mechanicznych niszczących.

### **4.3 Podsumowanie**

Efektom badań przemysłowych zrealizowanych w ramach zadania 3 i 4 są nowe konstrukcje rozdzielnic SN na wyższe parametry elektryczne w postaci: napięcia, prądów i wytrzymałości zwarciowej.

Opracowano alternatywne rozwiązanie czujników temperatury szyn oraz karty pomiarowej w celu polepszenia jakości i niezawodności układu pomiarowego oraz zwiększenia bezpieczeństwa pracy rozdzielnic. Wykonano badania laboratoryjne przedprototypów w zakresie poprawności działania. Zaimplementowano nową wersję kamer służących do wizualizacji położenia styków łączników w rozdzielnic, dzięki czemu uzyskano lepszą jakość oraz niezawodność. Rozwiązanie przetestowano w warunkach laboratoryjnych. W ramach prac badawczych opracowano czujnik do pomiaru temperatury wykorzystujący zjawisko luminescencji. Stosując do budowy głowicy jony lantanowców, praca czujnika pozostaje obojętna na zewnętrzne pola magnetyczne. Zastosowanie niewielkich wymiarów elementu aktywnego — optrody, umożliwi zastosowanie go do pomiarów w trudno dostępnych miejscach. Zaletą tego czujnika jest również pomiar temperatury w dużych zakresach, ograniczeniem w tym przypadku są właściwości termiczne użytych materiałów do budowy elementu aktywnego. Wadą rozwiązania jest koszt pompy laserowej o wymaganej długości fali (ok. 1 000 zł)

#### 4.4 Osiągnięte rezultaty

Badania nad rozdzielnicami SN do rozdziału pierwotnego wyposażonych w sensory do dostarczania szerokiego spektrum pomiarów.

Prace badawcze w zakresie opracowania nowoczesnej konstrukcji pól rozdzielnic z uwzględnieniem redukcji strat mocy w poszczególnych elementach oraz poprawy ich chłodzenia, celem uzyskania wyższych parametrów prądowych i zwarciovych. Projekt i wykonanie prototypów sensorów napięciowych dedykowanych do opracowanych pól rozdzielnic.

W ramach prac badawczych opracowano czujnik do pomiaru temperatury wykorzystujący zjawisko luminescencji. Stosując do budowy głowicy jony lantanowców, praca czujnika pozostaje obojętna na zewnętrzne pola magnetyczne.

W ramach prac badawczych opracowano czujniki optyczne w postaci soczewek aktywnych z materiałów polimerowych (PMMA) domieszkowanych barwnikami oraz ze specjalnych szkieł fosforanowych domieszkowanych jonami lantanowców. Innowacją opracowanego rozwiązania stanowi możliwość wykrywania widma emisji wyładowania niepełnego przed zapaleniem się łuku.

## 5. Badania i analizy danych big data do przygotowania algorytmów predykcji i auto strojenia zabezpieczeń

### 5.1 Zadanie 5

Prace badawcze zrealizowane przez Lidera w ramach zadania 5 dotyczyły problemu identyfikacji zjawiska uszkodzenia kłatek w silniku opartej na analizie danych z rejestratorów zakłóceń. Celem pracy było wykrywanie uszkodzonych prętów silnika elektrycznego na podstawie rejestracji prądów rozruchu silnika. W badaniu zostały wykorzystane metody uczenia maszynowego. W szczególności regresja logistyczna w połączeniu z próbkowaniem z rozkładu prawdopodobieństwa z wykorzystaniem wnioskowania bayesowskiego. W trakcie prac badawczych wyekstrahowano najbardziej istotne cechy sygnałów prądów w dziedzinie częstotliwości. Pozyskane cechy stanowiły podstawę budowy probabilistycznego klasyfikatora zdarzeń awaryjnych. Detekcja uszkodzeń dotyczy wykrywania: pękniętych prętów wirnika i stopnia jego degradacji. Lider wraz z Partnerem IEL zaprojektował i wykonał system akwizycji danych pomiarowych z modeli laboratoryjnych i obiektów rzeczywistych. Dane pozyskane z rejestratorów zakłóceń zawierają liczne rejestracje przebiegów napięć i prądów, co umożliwiło analizę zachowania się tych wielkości elektrycznych w przypadku wystąpienia określonych uszkodzeń/awarii.

Wykrywanie uszkodzeń prętów wirnika silnikowego wymagało zbudowania modelu w oparciu o opisane rejestracje rozruchów. W badaniu zostały wykorzystane dane zebrane w warunkach laboratoryjnych na Wydziale Elektrycznym Politechniki Białostockiej oraz dane z obiektów rzeczywistych będących w zasobach Lidera.

Dla stwierdzenia jak uszkodzenia kłatki wpływają na podstawowe parametry silnika (sprawność, przyrost temperatury uzwojenia stojana, moment rozruchowy i maksymalny) przeprowadzono badania laboratoryjne na standardowym silniku niewielkiej mocy (4 kW) z kłatką zalewaną aluminium, o ilości żłobków wirnika  $N = 28$ . Złamania prętów kłatki realizowano przecinając pręt na wyjściu z pakietu blach, na połączeniu z pierścieniem zwierającym. Przecięte pręty leżały w sąsiadujących żłobkach. W skład stanowiska laboratoryjnego do badania uszkodzeń silników asynchronicznych wchodzi: trójfazowy regulowany zasilacz, zespół przekładników prądowych 20/5 A/A, łącznik trójfazowy, autonomiczny rejestrator RZS-9. Rejestrator RZS-9 jest urządzeniem mikroprocesorowym dokonującym zapisu doprowadzonych z poszczególnych faz badanych silników sygnałów pomiarowych analogowych. Rejestruje dane występujące przez określone czasy: przed, w czasie trwania i po ustaniu zakłócenia. Wraz z rejestratorem RZS-9 wykorzystano oprogramowanie umożliwiające jego konfigurowanie i eksploatację ZPrAE-EDIT. W badaniach posługiwano się wbudowanym w urządzenie rejestratorem wartości chwilowych (szybkochwilowych) — częstotliwość próbkowania ustawiono na 5 kHz. Badania laboratoryjne podzielono na dwie grupy silników. Pierwsza o niższej sprawności (wycofywana z rynku), natomiast druga o sprawności co najmniej IE3, zgodnie z postanowieniami dyrektywy 2005/32/WE dla silników elektrycznych. Każda z próbek obejmowała pięć maszyn o identycznych parametrach. W pierwszym etapie przebadano wszystkie silniki zdrowe w celu określenia rozrzutu parametrów produkcyjnych, w kolejnym etapie pozostawiono dwa silniki zdrowe, kolejne trzy uszkodzono rozwiercając odpowiednią liczbę prętów w wirniku (3 z 28, 6 z 28 i 9 z 28). Następnie symulując odpowiednie warunki rzeczywiste generowano przebiegi z rejestratora zakłóceń podczas rozruchów i pracy ustalonej silników. Do budowy modelu klasyfikacji uszkodzonych prętów wirnika silnika elektrycznego i jego walidacji zostało wykorzystanych 601 zarejestrowanych rozruchów. Zbiór testowy klasyfikatora stanowił ~10% zebranych danych. Rejestracje z silników z uszkodzonymi prętami wirnika pochodzą z silników elektrycznych o identycznej charakterystyce. Dane z silników nieuszkodzonych pochodzą zarówno z silników o identycznej charakterystyce (silniki uszkodzone w laboratorium), jak też z silników o innych charakterystykach z obiektów rzeczywistych. 46.5% ogółu rejestracji to rejestracje wykonane w laboratorium, 53.5% to dane z obiektów rzeczywistych.

Dane z rejestratorów użyte do budowy modelu nie były jednorodne. Rejestracje cechowały długości od 3 do 16 sekund oraz różna częstotliwość próbkowania od 1 000 do 5 000 Hz. Do części badawczej zostały wybrane zapisy prądów w trzech fazach. Analizie poddawane są pierwsze dwie sekundy rozruchu z pominięciem początkowych 200 ms rozruchu, w celu wyeliminowania wpływu składowych przejściowych sieci elektroenergetycznej. Każda z zarejestrowanych faz została przeniesiona z dziedziny czasu do dziedziny częstotliwości z

wykorzystaniem algorytmu Szybkiej Transformaty Fouriera (FFT). Wynikiem działania algorytmu jest szereg liczb zespolonych. W kolejnym etapie zostały one przekształcone do liczb rzeczywistych. Do budowy modelu klasyfikacji został wybrany sygnał reprezentujący częstotliwości od 10 Hz do 45 Hz. W związku z tym, że rejestracje nie były jednorodne, utrudnione było opracowanie algorytmu, którego zadaniem jest przypisywanie rejestracji do klasy wynikowej. Wyzwaniem przy tworzeniu narzędzia do rozpoznawania uszkodzonych prętów wirnika była też stosunkowo niewielka ilość rejestracji. W badaniu zdecydowano się na opracowanie metody określenia prawdopodobieństwa uszkodzenia w oparciu o metody probabilistyczne metody uczenia maszynowego. Etapem poprzedzającym budowę klasyfikatora był proces ekstrakcji i selekcji cech. Ekstrakcja została wykonana z użyciem pakietu tsfresh. Najbardziej istotne cechy powstały w wyniku obliczenia liniowej regresji najmniejszych kwadratów dla wartości szeregów czasowych, które zostały zagregowane w jednostkach w stosunku do sekwencji od 0 do liczby jednostek minus jeden. Dodatkowo została wyliczona mediana sygnału oraz wartości dla 3, 4, i 6 kwantyla. Do budowy modelu zostało ostatecznie wybranych dziesięć cech zależnych oraz cecha niezależna będąca zmienną dychotomiczną informującą o stanie silnika: uszkodzony, nie uszkodzony.

Model klasyfikacji został zbudowany z wykorzystaniem klasyfikacji opartej o probabilistyczną regresję liniową. W podejściu wykorzystano również paradygmat programowania probabilistycznego. W związku z tym, że zmienna niezależna jest dychotomiczna, do budowy modelu użyto rozkładu Bernoulliego, a do określenia prawdopodobieństwa przynależności do klasy wykorzystano funkcję logistyczną:

$$\prod_{i=1}^n p_i^{y_i} (1 - p_i)^{1-y_i} \quad (2)$$

Gdzie  $p_i = \frac{1}{1+e^{-z_i}}$  a  $z_i = \alpha + \sum(\beta(x))$ , klasa decyzyjna  $y_i = 1$  dla uszkodzonego silnika a  $y_i = 0$  dla silnika nieuszkodzonego. Ostatecznie prawdopodobieństwo przynależności do klasy zależało od wartości dwóch parametrów  $\alpha$  i  $\beta$ . Budowa modelu probabilistycznego zakłada, że istnieją wartości parametrów  $\alpha$  i  $\beta$ , które opisują regresję logistyczną w sposób odzwierciedlający najlepsze dopasowanie do danych. W modelu parametry są rozkładami, nie wartościami punktowymi. Wynikiem klasyfikacji jest rozkład prawdopodobieństwa przynależności do klasy wynikowej. Dzięki temu można interpretować prawdopodobieństwo klasyfikacji. Przeprowadzone badania wykazały, że średnia rozkładu prawdopodobieństwa może stanowić podstawę binarnej klasyfikacji. Wartością przypisania do klasy z uszkodzonymi prętami jest wskazanie prawdopodobieństwa uszkodzenia na poziomie 0,5 lub większym.

Zbiór testowy uszkodzonych prętów wirnika zawiera 62 rejestracje. Dokładność klasyfikatora osiągnęła 100% na zbiorze. Zbudowany klasyfikator probabilistyczny pozwala na interpretację wyników. Średnie prawdopodobieństwo przynależności do klasy reprezentującej uszkodzone pręty dla rejestracji gdzie uszkodzenia prętów nie było wynosi  $\sim 12\%$ . Jest to wartość znacznie niższa niż założony próg przypisania do klasy opisującej uszkodzone silniki. Średnie prawdopodobieństwo przynależności do klasy gdzie uszkodzenia prętów występowało wynosi  $\sim 69\%$ . Odległość średniej prawdopodobieństwa od założonej granicy podziału jest wyższa dla silników nieuszkodzonych. Oznacza to, że klasyfikator jest bardziej jednoznaczny przy wskazaniu rejestracji z nie uszkodzonymi prętami wirnika.

Model stopnia uszkodzenia prętów został zbudowany na bazie 155 rejestracji z rozruchów silników z uszkodzonymi prętami wirnika. Wykonano podział zbioru na testowy i treningowy. Odpowiednio 99 i 56 rejestracji. Zbiór testowy i treningowy charakteryzuje równomierny rozkład klas.

Probabilistyczny model oparty o regresję logistyczną daje możliwość założenia prognozy niepewności klasyfikacji. Ustalono, że dla każdego stopnia uszkodzenia klasyfikator wskaże stopień uszkodzenia gdy jego prawdopodobieństwo przekracza 0.5. Klasyfikator wskazał stopień uszkodzenia dla 37 (66%) rejestracji. W 19 przypadkach klasyfikator nie był w stanie przypisać rejestracji do klasy. Dla 37 rejestracji dokładność klasyfikacji wyniosła 73%

Utworzony klasyfikator nie był w stanie dokonać poprawnego przypisania do klasy decyzyjnej rejestracji rozruchów dla 3 uszkodzonych prętów. Dla wyższych poziomów uszkodzenia klasyfikator był w stanie wskazać uszkodzenie z F1-Score na poziomie 0.9 dla 6 uszkodzonych prętów i 0.7 dla 9 uszkodzonych prętów.

Badania nad uszkodzeniem łożysk zostały wykonane na trzech silnikach o identycznej charakterystyce. W pierwszym etapie zarejestrowano rozruchy przed uszkodzeniem silników. Następnie dokonano rejestracji na silnikach uszkodzonych zachowując identyczne obciążenie silników. Różnicą był zakres analizowanego sygnału w dziedzinie częstotliwości. Analizie został poddany sygnał z zakresu od 105 do 140 Hz. Szybka transformata Fouriera została wykonana ma sumie sygnałów. W badaniu wykorzystano 60 rejestracji rozruchów. 30 pochodziło z uszkodzonych silników i 30 z nieuszkodzonych. Zbiór uczący klasyfikatora składał się z 42 a treningowy z 18 rejestracji. Proces selekcji cech był zbliżony do opisanego wyżej. Na podstawie wyników możemy wyznaczyć dokładność klasyfikacji, która wynosi 94%.

Wykonane pomiary laboratoryjne potwierdziły, iż wystąpienie nawet dość znacznej ilości przełamań prętów klatki ma stosunkowo niewielki wpływ (a przynajmniej tak jest dla silnika z klatką zalewaną) na wartość początkową momentu rozruchowego silnika. Zmienia się jednak przebieg krzywej momentu  $T = f(n)$  i wyraźnie obniża wartość momentu maksymalnego. W miarę wzrostu ilości złamanych prętów klatki wzrasta przyrost temperatury uzwojenia stojana i obniża się współczynnik sprawności silnika. Wzrasta również poślizg i zmniejsza się prędkość obrotowa przy obciążeniu.

W trakcie badań omawianego silnika stwierdzono też, iż tzw. „falowanie” prądów przy obciążeniu, (objawiające się kołysaniem w takt poślizgu amperomierzy wskazówkowych), charakterystyczne dla silnika z uszkodzoną klatką, występuje tu wyraźnie poczynając od ilości trzech przerwanych prętów. Dla ustalenia faktycznego stanu degradacji klatki, tj. ustalenia liczby przerwanych lub naderwanych prętów, konfiguracji uszkodzonych prętów oraz stanu pierścieni zwierających konieczne jest przeprowadzenie dokładniejszych badań diagnostycznych.

Prace badawcze zrealizowane przez Lidera odnośnie zabezpieczeń wysokiego napięcia w ramach zadania 5 dotyczyły założeń konstrukcyjnych i działania algorytmów adaptacyjnych w zabezpieczeniu impedancyjnym. Celem przeprowadzonych badań nad zabezpieczeniem odległościowym, który wytyczony jest przez relację logiczną klasycznego zabezpieczenia „działa bezzwłocznie, gdy zwarcie wystąpiło w strefie chronionej; blokuje działanie lub działa z opóźnieniem, gdy zwarcie jest poza strefą chronioną”, było skonstruowanie takiego układu, który będzie poprawnie spełniał swą funkcję przy możliwie najmniejszej liczbie sygnałów wejściowych i wielkości traktowanych jako dane (stałe wartości wykorzystywane przez algorytm). Idea jest zatem taka, aby maksymalnie odstroić się od wielkości, które obciążone są jakąkolwiek niepewnością.

Przeprowadzone badania i analizy wykazały, iż błąd pomiaru odległości do miejsca zwarcia (to jest zmierzonej reaktancji, odniesionej do całkowitej reaktancji linii) rośnie wraz z przesuwaniem się punktu zwarcia w stronę końca linii, osiągając maksymalną wartość bliską 25%. Stąd można również wywnioskować, że zabezpieczenie odległościowe może nie podjąć poprawnej decyzji w chwili wystąpienia zwarcia, ponieważ pomiar reaktancji obciążony jest dużym błędem dodatnim. Klasyczne charakterystyki rozruchowe zabezpieczenia odległościowego (charakterystyka MHO oraz czworoboczna z zasięgiem pierwszej strefy równym 85% długości zabezpieczanego toru) na tle trajektorii impedancji widzianej przez człon pomiarowy zabezpieczenia obrazują skalę problemu. Można stwierdzić, że w przypadku standardowych, pozbawionych elementów adaptacyjnych, algorytmów decyzyjnych, zasięg pierwszej, bezzwłocznej strefy skraca się znacząco, co skutkuje brakiem zadziałania zabezpieczenia w przypadku zwarcia w tym obszarze.

Realizowana w projekcie tematyka badawcza dotyczy przeciwdziałaniu występowania efektu reaktancyjnego, poprzez takie ukształtowanie charakterystyki rozruchowej zabezpieczenia, aby oddzielić obszar pracy normalnej (to znaczy określony zakres impedancji ruchowej, wyznaczonej na podstawie wartości napięć i prądów mierzonych w normalnych warunkach pracy) od obszaru wskazującego na zwarcie. Aby to osiągnąć, charakterystyki na płaszczyźnie impedancji mają rozszerzony zasięg w kierunku osi R. Zasięg ten musi być jednak ograniczony, a jego granice wyznaczone są poprzez największe wartości impedancji ruchowej. W przypadku zabezpieczeń cyfrowych istnieje możliwość optymalizacji kształtu charakterystyki i uformowania charakterystyki o kształcie ściśle dopasowanym do warunków pracy zabezpieczenia w konkretnym punkcie zabezpieczeniowym. W osi X charakterystyka taka musi zapewniać skuteczną eliminację zwarcia dalekich. Nie jest jednak możliwe zapewnienie ochrony całej długości linii.

Prace badawcze zrealizowane przez Lidera odnośnie nowych algorytmów zabezpieczeń średniego napięcia, w ramach zadania 5 dotyczyły odwzorowania wpływu odgałęzienia na modelu linii średniego napięcia na możliwość eliminacji zakłóceń. Dodatkowo wykonano badania symulujące zwarcia łukowe na linii

napowietrznej SN odwzorowujące dotyk gałęzi do przewodów. Wygenerowano ok. 600 przebiegów z rejestratora zakłóceń w celu opracowania algorytmu identyfikacji zjawisk. Wykonano model laboratoryjny sieci izolowanej średniego napięcia celem odwzorowania zjawiska ferorezonansu oraz opracowania metod jego eliminacji w zależności od energii drgań. Wygenerowano ok. 500 przebiegów z rejestratora zakłóceń w celu opracowania algorytmu identyfikacji zjawiska. Wykonano stanowisko laboratoryjne do badań silników, wyposażone w autonomiczny rejestrator zakłóceń, sztucznie uszkodzono silniki tak, aby odwzorować uszkodzenie klatek w wirniku i łożysk. Wygenerowano ok. 1 000 przebiegów z rejestratora zakłóceń w celu opracowania algorytmu identyfikacji zjawisk.

Dalsze prace badawcze na stanowisku laboratoryjnym sieci średniego napięcia dotyczyły wykonania badań symulujących zwarcia międzyfazowe (łukowe) na linii napowietrznej SN oraz dalszej rozbudowy modelu linii SN o odgańczenie (odcinek kablowy) w celu odwzorowania jego wpływu na możliwość eliminacji zakłóceń. Lider we współpracy z Partnerem ALK przygotowując dane z systemu akwizycji do realizacji zadania 7 opracował skrypty umożliwiające import danych z kanałów analogowych i cyfrowych w formacie COMTRADE do późniejszej obróbki przy pomocy R oraz Python. Uzgodniono szczegółowe definicje danych zbieranych przez rejestratory oraz ich powiązanie z działaniem zabezpieczeń. Zapoznano się również z katalogiem rozmaitych rejestracji przebiegów prądu i napięcia w sieci średniego napięcia — zarówno z rzeczywistych linii, jak i z linii laboratoryjnych. Pierwsza faza przeprowadzonych prac badawczych dotyczyła problemu identyfikacji typów uszkodzeń zachodzących w sieci średniego napięcia na podstawie zarejestrowanych przebiegów prądu i napięcia. Do tych badań wykorzystano dane pochodzące z symulacji laboratoryjnych dla sieci izolowanej, kompensowanej i uziemionej przez rezystor. Symulacje dotyczyły następujących rodzajów uszkodzeń: mało rezystancyjne na końcu linii, upływ na końcu linii, zwarcia doziemne i międzyfazowe.

Prace badawcze dotyczyły też problemu identyfikacji zjawiska ferorezonansu zachodzącego w sieci średniego napięcia na podstawie zarejestrowanych przebiegów prądu i napięcia. Do tych badań wykorzystano dane pochodzące z symulacji laboratoryjnych dla sieci izolowanej i kompensowanej. Symulacje dotyczyły warunków sprzyjających powstawaniu zjawiska i metodom jego eliminacji.

## 5.2 Zadanie 6

W ramach zadania 6 Partner IEL przeprowadził testy funkcjonalne próbek algorytmów predykcyjnych dotyczących silników, linii średniego napięcia oraz ferorezonansu. Próbkę algorytmów były rozwijane przez Lidera na platformie Azure o dużej mocy obliczeniowej. Algorytmy zostały opracowane przez Partnera ALK na podstawie zgromadzonych rejestracji przebiegów prądów i napięć w systemie akwizycji danych.

Partner IEL w ramach zadania 6 pozyskał przebiegi z posiadanych stanowisk laboratoryjnych do badania systemu zbierania danych pomiarowych z obiektów rzeczywistych w warunkach silnych zakłóceń elektromagnetycznych. Uzyskane dane pomiarowych zostały przekazane Partnerowi ALK do budowy algorytmów predykcyjnych i zabezpieczeniowych dotyczących silników średniego napięcia. Pozyskane dane z rejestratorów zakłóceń pochodzą z układów zasilania silników napędzających generatory zwarciove 25 MVA i 100 MVA. W trakcie realizacji badań zaobserwowano pracę zespołu generatora z poluzowanym oraz z naprawionym sprzęgiem. Obserwowane silniki charakteryzują się bardzo ciężkim rozruchem. Ze względu na moc zainstalowanych urządzeń i występujące ogromne zakłócenia elektromagnetyczne pozyskane rejestracje odwzorowują w pełni warunki rzeczywiste występujące w środowisku przemysłowym.

W dalszej kolejności Partner IEL realizował prace naukowo-badawcze dotyczące pomiarów impedancji pętli zwarcia w dostarczonych przez Lidera przedprototypie zabezpieczenia odległościowego oraz procedur adaptacyjnych zabezpieczeń odległościowych opartych na wspólnej idei, polegającej na tym, iż można przesunąć charakterystykę zabezpieczenia odległościowego odpowiednio do warunków zwarciowych, to należy uwzględnić efekt reaktancyjny i skompensować jego wpływ na podejmowanie decyzji.

Partner IEL przeprowadził badania przemysłowe na modelach numerycznych istniejących rozdzielnic produkowanych przez Lidera w celu wskazania miejsc szczególnie podatnych na stany awaryjne. Analizy te miały na celu wskazanie miejsc, które warto monitorować w celach diagnostycznych dla kreślenia stanu technicznego rozdzielnic. Dzięki temu Lider zidentyfikował optymalne rozmieszczenie sensorów i czujników w przedziałach rozdzielnic: sensory napięciowe, cewki Rogowskiego oraz czujniki temperatury.

### 5.3 Zadanie 7

W ramach zadania 7 w pierwszej kolejności doprecyzowano zakres prac do realizacji oraz dostarczono Partnerowi ALK odpowiednią literaturę, celem zapoznania się z badanymi urządzeniami i zjawiskami fizycznymi które w nich zachodzą. Ustalono format dostępnych danych oraz specyfikację rejestracji przebiegów z badanych urządzeń, tj. częstotliwości próbkowania, ilości kanałów analogowych i cyfrowych. Uzgodniono szczegółowe definicje danych zbieranych przez rejestratory oraz ich powiązanie z działaniem zabezpieczeń. Punktem wyjścia do prowadzenia obliczeń było opracowanie skryptów umożliwiających import danych z kanałów analogowych i cyfrowych w formacie COMTRADE do późniejszej obróbki przy pomocy skryptów w językach R oraz Python. W celu przygotowania i generacji danych z obiektów laboratoryjnych ustalono budowę trzech stanowisk laboratoryjnych, w których zbudowano modele: linii napowietrznej SN, sieci izolowanej SN oraz silnikowe, do badania zakłóceń w ich pracy.

W ramach badań przemysłowych opracowano system przetwarzania sygnałów diagnostycznych mający za zadanie transformację danych wejściowych i wygenerowanie jak najszerszej palety cech i miar dla badanych sygnałów. Opracowano m.in. metody filtracji sygnału oparte o średnie ruchome dla mocy pozornej i admittancji. Przeanalizowano również widma amplitudowe i fazowe sygnałów prądu i napięcia. Dane były analizowane w oknach czasowych przed pobudzeniem zabezpieczenia oraz po pobudzeniu zabezpieczenia, ale przed jego zadziałaniem. Wynikiem transformacji zarejestrowanych sygnałów diagnostycznych były duże zbiory danych odznaczające się potencjalnie nadmiarowością informacji. Analiza statystyczna tych dużych zbiorów danych z uwzględnieniem fizycznej charakterystyki badanych zjawisk stanowiła punkt wyjścia do poszukiwania odpowiedzi na poszczególne zagadnienia badawcze.

Pierwsza faza prac badawczych koncentrowała się na problemie identyfikacji typów uszkodzeń zachodzących w sieci na podstawie przebiegów prądu i napięcia. Zapoznano się z katalogiem rozmaitych rejestracji przebiegów prądu i napięcia w sieci średniego napięcia — zarówno z rzeczywistych linii, jak i z linii laboratoryjnych. Do tych badań najpierw wykorzystano dane pochodzące z symulacji laboratoryjnych dla sieci izolowanej oraz kompensowanej dla różnych rodzajów linii uszkodzeń:

- zwarcia doziemne oraz wysoko rezystancyjne uszkodzenia niepowodujące zadziałania zabezpieczenia,
- uszkodzenie w  $\frac{1}{4}$  linii, na środku linii, w  $\frac{3}{4}$  linii oraz na końcu linii,
- sieć kompensowana przez cewkę, uziemiona przez rezystor lub izolowana,
- uszkodzenie w dwóch trzecich linii,
- sieć nieodgałęziona i odgałęziona (w tym uszkodzenia na odczepie),
- uszkodzenia z występowaniem łuku.

Opracowane miary wykazały bardzo dobre zdolności klasyfikacyjne przy wykorzystaniu relatywnie prostego narzędzia w postaci liniowej analizy dyskryminacyjnej. Miary oparta o admittancję identyfikowały rodzaj sieci oraz typ uszkodzenia. Miary oparte o przesunięcie fazowe prądu i napięcia dla fazy 0 wykryły uprzednie uszkodzenia o charakterze rezystancyjnym niepowodujące pobudzenia zabezpieczenia. Wartości bazujące na przesunięciu fazowym prądu i napięcia dla faz 1 — 3 określały lokalizację uszkodzenia. Odczep w połowie linii powoduje pewne trudności z klasyfikowaniem uszkodzeń na głównej linii za odczepem oraz w pobliżu lokalizacji odczepu.

Występowanie łuku zaburza wykorzystane miary tylko w niektórych przypadkach, ale w przeważającej większości sytuacji możliwe jest oczyszczenie ich z wpływu łuku poprzez wykorzystanie w kalkulacji wartości medianowych zamiast średnich. Natomiast sam fakt wystąpienia łuku możliwy jest do wykrycia go poprzez wzrost wariancji parametrów sygnału (szczególnie natężenia prądu).

Opracowane miary i metody są skuteczne, a jednocześnie stosunkowo proste do wyliczenia poprzez rejestrator i mogą służyć do korekt nastaw zabezpieczeń.

W ramach badań ferorezonansu opracowano metodę wykrywania ferorezonansu z wykorzystaniem dowolnego napięcia fazowego ( $L1, L2, L3$ ), jak również z wykorzystaniem napięcia składowej zerowej  $U0$ . Metoda składa się z trzech kroków:

1. obliczanie widma Fouriera sygnałów,
2. selekcja składowych widma amplitudowego,
3. podejmowanie decyzji w oparciu o prostą regułę decyzyjną.

W pierwszym kroku wyznaczane jest widmo Fouriera badanego sygnału ( $U0, U1, U2$  lub  $U3$ ). Korzystnym jest, jeśli liczba punktów transformaty Fouriera jest wielokrotnością ilorazu częstotliwości próbkowania sygnału i składowej 25 Hz. W drugim kroku należy wyselekcjonować składową widma o częstotliwości 25 Hz i wyznaczyć jej widmo amplitudowe ( $I_{25}$ ).

W ostatnim kroku wartości widma amplitudowego składowej 25 Hz ( $I_{25}$ ) są porównywane z progami  $downTH$  i  $upTH$ . Wszystkie chwile czasu po wystąpieniu wartości  $I_{25}$  większej niż próg  $upTH$  oznacza się jako wystąpienie ferorezonansu. Wszystkie chwile czasowe po wystąpieniu wartości  $I_{25}$  mniejszej od progu  $downTH$  oznacza się jako brak ferorezonansu. W przeprowadzonych eksperymentach wartości progów wyniosły:  $downTH = 25$  V,  $upTH = 50$  V. Progi należy dobrać eksperymentalnie na podstawie wartości napięć mierzonych w badanym układzie zasilania.

Napięcie sieci zasilającej  $U1, U2, U3$  lub  $U0$  podawane jest na wejście układu zasilanego (odbiornika) Napięcie to jest mierzone w bloku pomiarowym. W efekcie pomiaru uzyskuje się sygnał  $u(t)$ , który podaje się na wejście układu próbkującego. Amplituda sygnału  $u(t)$  jest dopasowana do zakresu dynamiki wejścia układu próbkującego. Układ ten dokonuje konwersji analogowego sygnału napięcia na próbki  $u(n)$ . Próbki  $u(n)$  są przetwarzane na widmo Fouriera  $U(\omega)$ . W kroku 4 wybiera się prążek widma  $I_{25}$  odpowiadający częstotliwości 25 Hz oraz liczy jego moduł (amplitudę). W kroku 5 próbki amplitudy  $I_{25}$  są porównywane z progami  $upTH$  oraz  $downTH$ . Jeśli  $I_{25}$  przekracza wartość  $upTH$ , w buforze zatraskiwany jest stan wysoki oznaczający występowanie ferorezonansu. Jeżeli  $I_{25}$  jest mniejsza od progu  $downTH$ , w buforze zatraskiwany jest stan niski oznaczający brak ferorezonansu. Na wyjściu bufora prezentowany jest wynik detekcji ferorezonansu stanowiący efekt działania układu.

Faza trzecia zadania 7 objęła badanie uszkodzeń silników. Rozpoczęto ją od analizy uszkodzeń klatek silników. Trzy główne, jednakowe silniki stanowiły podstawowy przedmiot badań, a czwarty (o innych parametrach) był traktowany jako silnik kontrolny. Po zarejestrowaniu zestawu rozruchów dla silników w dobrym stanie, uszkodzono w głównych silnikach odpowiednio 3, 6 i 9 klatek, a w kontrolnym — 6 klatek. Następnie przeprowadzono nowe rejestracje dla silników uszkodzonych. Wszystkie rejestracje prowadzone były z innym napięciem zasilania (40 V, 50 V, 60 V, 80 V lub 100 V), aby wykorzystując niższe napięcie zasilania zasymulować dłuższy rozruch silnika.

W pierwszym etapie analizy zarejestrowanych przebiegów, przeprowadzono filtrację dolnoprzepustową o częstotliwości odcięcia 45 Hz. Filtracja ujawniła fakt występowania oscylacji w trakcie rozruchu w przebiegach prądu. Oscylacja ta wykazywała monotonicznie zmieniającą się częstotliwość. Oznacza to, że każda kolejna oscylacja ma okres  $T$  krótszy od poprzedniej. Efekt ten był najwyraźniejszy przy dłuższych rozruchach (napięcie zasilania 40 V, 50 V lub 60 V). Tego typu oscylacje dla wszystkich uszkodzonych silników trwały przynajmniej 5 okresów średnio dla każdej fazy sygnału. Z kolei dla wszystkich sprawnych silników oscylacje te trwały krócej niż 5 okresów. W ten sposób możliwe było odróżnienie silników uszkodzonych od sprawnych.

W kolejnym etapie analizy wykryto zauważalny spadek efektywności uszkodzonych silników. W stosunku do silników sprawnych, te uszkodzone cechowało obniżenie maksymalnego obserwowanego poziomu natężenia prądu w okresie rozruchu dla wszystkich faz. Dla 3 i 6 uszkodzonych klatek wynosiło ono ok. 10%-20%, natomiast dla 9 klatek dochodziło do 35%. Skala obniżenia się maksymalnego napięcia dla silnika kontrolnego z 6 uszkodzonymi klatkami była zbliżona do tej obserwowanej dla silników głównych. Wykres poniżej pokazuje zaznaczony maksymalny chwilowy poziom napięcia w okresie obserwowanej oscylacji.

Po opracowaniu wiarygodnego sposobu rozpoznania uszkodzonych klatek silnikowych, przeanalizowano kwestie uszkodzeń łożyska i sprzęgu silnika. Zaobserwowano, że maksymalna wartość RMS prądu pośród wszystkich faz w okresie rozruchu odchyła się w górę w przypadku uszkodzonego łożyska i jednoznacznie

identyfikuje uszkodzony silnik. Dla uszkodzenia sprzęgu silnika zauważono, że możliwa jest jego identyfikacja już w stanie ustalonym, po zakończonym rozruchu. W tym celu są wykorzystywane maksymalne wartości RMS prądu dla każdej z faz, obserwowane w oknie minimum 100 ms (500 próbek przy częstotliwości próbkowania wynoszącej 5 kHz). Jeśli te wartości dla dwóch faz są zbliżone, a wartość dla ostatniej fazy jest mniejsza, sugeruje to wystąpienie uszkodzenia sprzęgu.

Dodatkowo, przeanalizowano możliwość wykrycia uszkodzenia sprzęgu przy pomocy miary *Oscillation Current Factor* (OCF) definiowanej jako:

$$OCF = \frac{I_{RMS\_MIN}^2}{I_{RMS\_MAX}^2} \quad (3)$$

gdzie:

$I_{RMS\_MIN}$  najmniejsza wartość skuteczna modułu wektora prądu stojana w czasie TT,

$I_{RMS\_MAX}$  największa wartość skuteczna modułu wektora prądu stojana w czasie TT.

Przyjmując za czas TT przynajmniej 50 wielokrotności okresu podstawowej harmonicznej napięcia w stanie ustalonym, zbadano, że w przypadku uszkodzenia sprzęgu, przedział uzyskiwanych wartości OCF dla badanych silników mała z ok. 0,96-0,98 do 0,90-0,96.

## 5.4 Podsumowanie

W ramach prac przemysłowych zrealizowanych w ramach zadań 5, 6 i 7 zostały opracowane wyniki, założenia i algorytmy dla realizacji funkcji zabezpieczeniowych urządzeń dla linii wysokiego i średniego napięcia, transformatora WN/SN, silnika elektrycznego SN oraz zjawiska ferorezonansu, w którego skład wchodzi:

1. Klasyfikatory awarii silnika elektrycznego. Klasyfikatory obejmują detekcję: uszkodzonych kłatek wirnika, uszkodzenia łożysk oraz uszkodzenia sprzęgu silnika z maszyną napędzaną. Klasyfikatory zostały opracowane na bazie ok. 1 500 rejestracji laboratoryjnych oraz ok. 600 rejestracji z obiektów rzeczywistych. Dokładność klasyfikacji wynosi 95%.
2. Klasyfikatory uszkodzeń linii. Klasyfikatory obejmują detekcję: rodzaju sieci, lokalizację uszkodzeń admitancyjnych (upływ prądu — uszkodzony izolator), lokalizację miejsca doziemienia na linii SN (metoda do zastosowania na WN jeśli nie wyjdzie na SN, oparty o miary odległości a nie model skupiony), lokalizację dotyku gałęzi do linii (opracowany algorytm do detekcji na danych laboratoryjnych, dane rzeczywiste po opracowaniu karty FASTPROT). Klasyfikator został opracowany na bazie ok. 2 000 rejestracji laboratoryjnych oraz ok. 400 rejestracji z obiektów rzeczywistych. Dokładność klasyfikacji wynosi 97%.
3. Klasyfikatory uszkodzeń wewnętrznych transformatora. Opracowany model ma na celu wykrywanie zakłóceń wewnętrznych mogących uszkodzić transformator. Klasyfikator obejmuje detekcję: zwarć międzyfazowych, zwarć do kadzi i zwarć międzyzwojowych. Klasyfikatory zostały opracowane na bazie ok. 1 000 rejestracji laboratoryjnych oraz ok. 350 rejestracji z obiektów rzeczywistych. Dokładność klasyfikacji wynosi 95%.
4. Algorytm do detekcji i eliminacji dwustopniowej zjawiska ferorezonansu w sieciach izolowanych i kompensowanych średniego napięcia. Opracowany model ma na celu wykrywanie groźnego dla przekładników napięciowych i kabli zjawiska ferorezonansu. Opracowanie algorytmu obejmowało symulację zjawisk: wyłączenia silnika w sieci izolowanej, wyłączenia linii SN, dla różnych typów sieci SN (izolowana, kompensowana przez cewkę) oraz wykorzystaniu automatyki AWSCz (automatyka dołączająca rezystor na stacji) do eliminacji zjawiska ferorezonansu. Algorytm został opracowany na bazie ok. 1 200 rejestracji laboratoryjnych oraz ok. 450 rejestracji z obiektów rzeczywistych. Dokładność klasyfikacji wynosi 99%.
5. Algorytm pół-adaptacyjny zabezpieczenia od niesymetrii silnika SN. Możliwe scenariusze działania: asymetria napięciowa, w zależności od stanu cieplnego silnika możliwa blokada zabezpieczenia lub

wydłużenie czasu opóźnienia; asymetria prądowa, porównanie danych z danymi archiwalnymi, w przypadku pogłębiającego się uszkodzenia informacja do systemu nadrzędnego „SCADA” oraz skrócenie czasu opóźnienia zadziałania zabezpieczenia; w przypadku wykrycia znacznej asymetrii prądowej, eliminacja zakłócenia poprzez wyłączenie silnika (zabezpieczenie bezzwłoczne). Algorytm został opracowany na bazie ok. 400 rejestracji laboratoryjnych oraz ok. 300 rejestracji z obiektów rzeczywistych. Poprawiono pewność działania zabezpieczenia od asymetrii silnika o 40%.

<b>l.p.</b>	<b>opis</b>	<b>liczba</b>
1	Rejestracje z obiektów rzeczywistych	10 591
2	Dane z dotychczasowych zdarzeń awaryjnych w sieciach	597
3	Dane pozyskane w pierwszym roku (2019)	263
4	Dane pozyskane w drugim roku (2020)	4 108
5	Dane pozyskane w trzecim roku (do 07.2021)	3 295
6	Dane pozyskane w trzecim roku (od 07.2021)	1 195
7	Dane pozyskane w 2022 roku do 06.2022	1 133

## 5.5 Osiągnięte rezultaty

W ramach badań przemysłowych opracowano system przetwarzania cech sygnałów pochodzących z różnych urządzeń, który umożliwi obróbkę dużych zbiorów cech odznaczających się nadmiarowością informacji i zawierających zwykle takie cechy sygnałów, które w określonych przypadkach są nieistotne z punktu widzenia formułowania diagnozy.

Interdyscyplinarność opracowanych w ramach badań przemysłowych klasyfikatorów i algorytmów zabezpieczeniowych poprzez obróbkę danych pochodzących z rejestratorów zakłóceń z zastosowaniem metod statystycznych i technik informatycznych.

W ramach prac badawczych opracowano klasyfikatory uszkodzeń linii SN, transformatora WN/SN, silnika SN umożliwiające predykcję uszkodzeń oraz algorytmy zabezpieczeniowe dotyczące detekcji ferorezonansu z napięć fazowych i pół-adaptacyjnego zabezpieczenia od niesymetrii silnika SN.

## 6. Budowa prototypów urządzeń do badań

### 6.1 Zadanie 8

Prowadzone przez Lidera, w ramach projektu, prace rozwojowe przebiegały w dwóch wątkach: budowy prototypów zabezpieczeń oraz rozdzielnic średniego napięcia na wyższe parametry wyposażone dodatkowo w układ sensorów. W kolejnym kroku zbudowane prototypy poddano testom laboratoryjnym oraz częściowo w warunkach rzeczywistych, w celu potwierdzenia osiągnięcia zakładanych parametrów i funkcjonalności.

### 6.2 Wątek 1 — zabezpieczenia średnich i wysokich napięć

Prace rozwojowe w tym wątku obejmowały budowę urządzeń automatyki zabezpieczeniowej linii średniego i wysokiego napięcia. Bazując na wynikach z etapu badań przemysłowych oraz z wykorzystaniem w dużej mierze próbek poszczególnych elementów hardware opracowanych w poprzednich etapach zostały zbudowane prototypy zabezpieczeń realizujące algorytmy zabezpieczeń eliminacyjnych oraz predykcyjnych. Rodzina zabezpieczeń średniego i wysokiego napięcia została przygotowana w oparciu o uniwersalną platformę sprzętową składającą się z jednostki centralnej bazującej na dotychczasowej konstrukcji i ewentualnie oddzielnej jednostki HMI (panelu operatorskiego). W ramach badań rozwojowych prowadzono prace nad pełną integracją poszczególnych elementów składowych, opracowanych na etapie badań przemysłowych oraz rozbudową zabezpieczeń o nowe konstrukcje obudów z wykorzystaniem dotychczasowej koncepcji budowy modułowej. Jednostka centralna zabezpieczenia jako podstawowe wyposażenie musi być wyposażona w kartę zasilacza oraz procesora, w zależności od konkretnego zastosowania zostały opracowane różne wersje kart do pomiarów analogowych które mogą realizować pomiary z przekładników prądowych, napięciowych, cewek Rogowskiego, sensorów napięcia oraz różnych ich kombinacji, w tym dodatkowe karty do pomiarów prądów dla zabezpieczeń różnicowych. W ramach projektu powstała również karta pomiaru temperatur z sześciu czujników temperatury wyposażonych w wyjścia światłowodowe. Karta procesora posiada pamięć do rejestracji zakłóceń niezbędnych do działania algorytmów zabezpieczeniowych oraz predykcyjnych. Ze względu na wymaganą moc obliczeniową i szybkość działania algorytmy zabezpieczeniowe zostały podzielone pomiędzy jednostką centralną i panelem operatorskim, a w samej jednostce w niektórych przypadkach między dwa procesory: sygnałowy oraz decyzyjny. Zabezpieczenia eliminacyjne i część algorytmów bazujących na AI została finalnie zaimplementowana w jednostce centralnej, natomiast część algorytmów predykcyjnych w panelu operatorskim, ponieważ nie są dla nich wymagane sztywne reżimy czasowe, a wymagają dużej mocy obliczeniowej. Dodatkowo moduły komunikacyjne do realizacji komunikacji dla zabezpieczeń linii na duże odległości również zostały opracowane jako moduły podłączane bezpośrednio do jednostki procesora ze względu na wymaganą szybkość działania i niezawodność połączenia. Rozdzielenie obliczeń w jednostce centralnej na dwa procesory umożliwiło implementację nowych algorytmów i połączenie ich z funkcjami sterownika polowego wyposażonego w standardowy zestaw zabezpieczeń do wszelkiego rodzaju pól rozdzielczych.

W ramach prac rozwojowych opracowane zostały elementy mechaniczne oraz elektroniczne do budowy urządzeń prototypowych zabezpieczeń e<sup>2</sup>TANGO-250 oraz e<sup>2</sup>TANGO-450, a także elementy niezbędne do przeprowadzenia serii badań inżynierskich na wspomnianych urządzeniach. Przeprowadzono badania kompatybilności elektromagnetycznej oraz środowiskowe, które wykazały konieczność dokonania zmian w projektach i wyprodukowania drugiej wersji prototypu, na skutek niewystarczającej odporności urządzeń na zakłócenia wynikające z szybkich stanów przejściowych oraz uderzeń napięciowych. W ramach projektu wykonano projekt nowej karty rozszerzeń, dedykowanej do urządzeń typu e<sup>2</sup>TANGO-250 oraz e<sup>2</sup>TANGO-450, łączącą w sobie funkcje wejść oraz wyjść dwustanowych.

Badania prowadzone nad urządzeniami e<sup>2</sup>TANGO współpracującymi z cewkami Rogowskiego oraz sensorami napięcia wykazały konieczność udoskonalenia kart pomiarowych. Wykonano prototypy nowych kart umożliwiających zmianę zakresu pomiarowego i współpracujących z różnymi typami cewek Rogowskiego. Wykonano prototypu dwóch wersji kart: współpracującej z konwencjonalnymi przekładnikami napięciowymi i cewkami Rogowskiego oraz sensorami napięcia i cewkami Rogowskiego. Rozszerzono również zakres pomiarowy napięcia fazowego z sensorów napięciowych, w celu możliwości zastosowania szerszej gamy typów sensorów

napięciowych (produkowanych przez różnych producentów) opracowano i przetestowano możliwość zastosowania przekładników niskoenergetycznych w miejsce cewek Rogowskiego. W ramach projektu powstały karty prototypowe w celu weryfikacji wprowadzonych udoskonaleń.

We współpracy z firmą Radmor przeprowadzono badania wpływu narażeń mechanicznych na działanie opracowanych prototypów. Weryfikacja i kalibracja poprawności działania algorytmów zabezpieczeniowych oraz samych badanach urządzeń realizowana była przez konstruktorów zespołu badawczego Lidera. Zespół pracowników Radmor zapewnił zaplecze laboratoryjne oraz jego obsługę. Na podstawie obserwacji prowadzonych podczas badań, zespół badawczy Lidera stwierdził poprawność działania badanych próbek i brak jakiegokolwiek negatywnego wpływu na ich działanie co potwierdza możliwość ich stosowania na różnych rodzajach obiektów energetycznych.

Opracowana koncepcja budowy modułowej i uniwersalności pod względem algorytmów pozwoliła na opracowanie serii zabezpieczeń nazwanych zgodnie z nomenklaturą Lidera e<sup>2</sup>TANGO. Zabezpieczenia serii 2000 są przeznaczone do stosowania na poziomie wysokich napięć, natomiast seria 250/450/600/800/1000/1200 to urządzenia stosowane na średnim napięciu.

Opracowana rodzina zabezpieczeń pozwala na realizację funkcji zabezpieczeniowych możliwych do stosowania jako: zabezpieczenie różnicowe transformatora, zabezpieczenie różnicowe linii, zabezpieczenie odległościowe, zabezpieczenie szyn i lokalna rezerwa wyłącznikowa, automatyka regulacji napięcia transformatora, zabezpieczenie generatora, zabezpieczenie silnika, zabezpieczenie transformatora, zabezpieczenie linii wraz z algorytmami eliminacyjnymi i predykcyjnymi. Wyposażone w możliwość współpracy z różnymi rodzajami źródeł pomiarów, sensorami, kamerami oraz realizacją funkcji rejestracji, akwizycji i dostrajania nastaw zabezpieczeń.



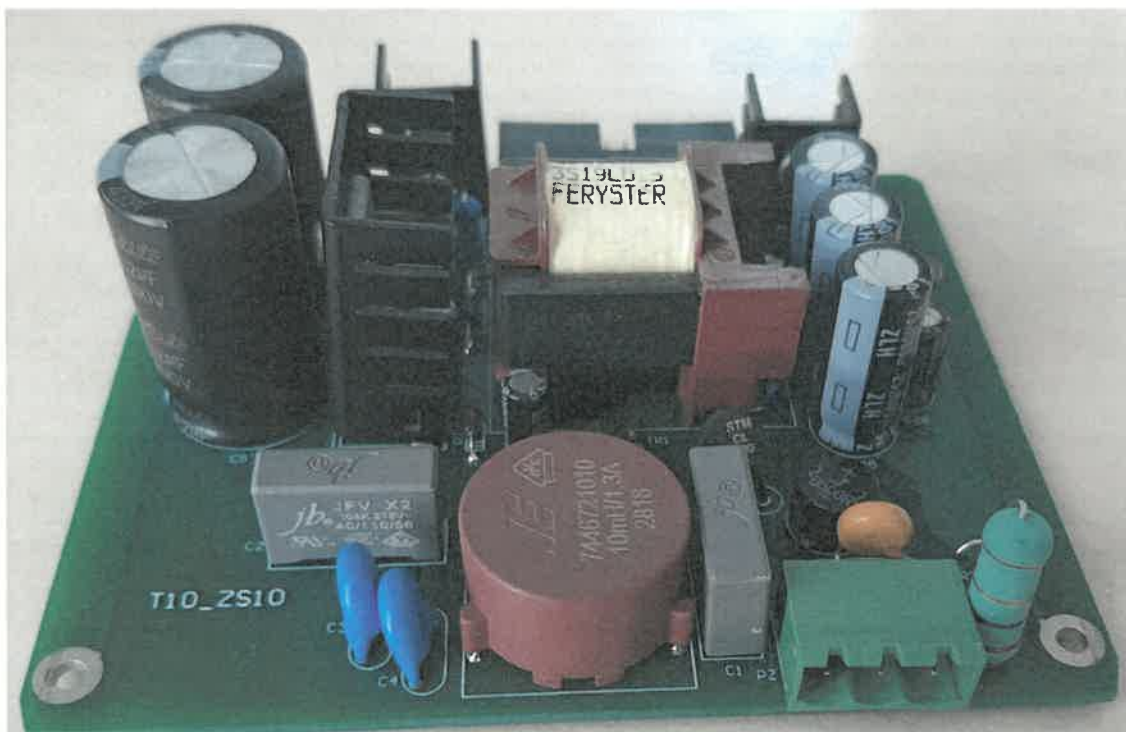
Fot. 1. Widok opracowanego w ramach prac rozwojowych prototypu zabezpieczenia linii wysokiego napięcia typu e<sup>2</sup>TANGO-2000



Fot. 2. Opracowana karta RC z podłączonymi sensorami prądowymi, sterownik polowy e<sup>2</sup>TANGO-800



Fot. 3. Widok opracowanych w ramach prac rozwojowych prototypów zabezpieczeń e<sup>2</sup>TANGO-250 i 450

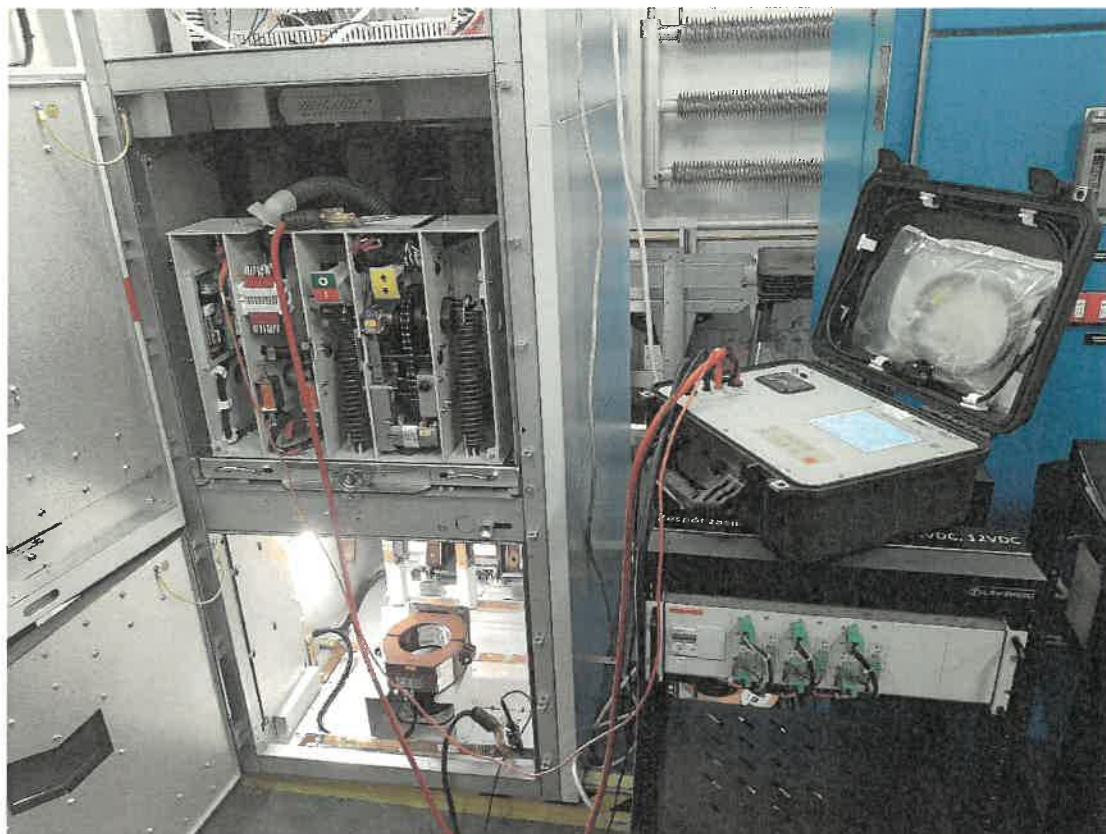


Fot. 4. Widok opracowanego w ramach prac rozwojowych prototypu redundantnego zasilacza zabezpieczeń e<sup>2</sup>TANGO-800

Prototypy urządzeń w ramach prac rozwojowych były badane zarówno w laboratorium Lidera, jak również w laboratoriach zewnętrznych w celu potwierdzenia spełnienia norm dla tego typu urządzeń. Po przeprowadzeniu badań i weryfikacji poprawności działania algorytmów, zostały zaimplementowane pierwsze urządzenia na obiektach rzeczywistych gdzie są testowane algorytmy predykcji i wykrywania zjawisk bazujące na AI jak np. ferrozenoans, uszkodzenia kłatek silnika. Lider posiada podpisane porozumienia z użytkownikami, którzy eksploatują po kilkaset zabezpieczeń w celu dalszego prowadzenia badań dla nowych urządzeń i algorytmów.

### 6.3 Wątek 2 — rozdzielnice średniego napięcia

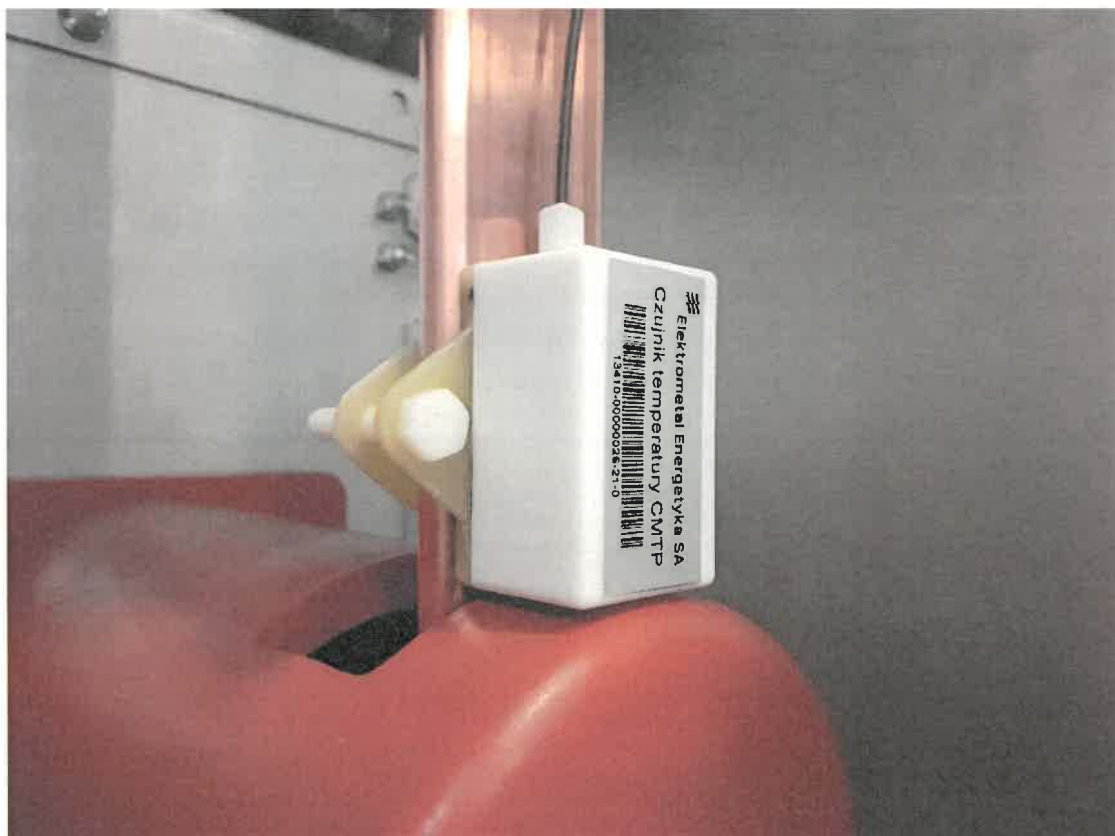
W pierwszym etapie opracowano i przygotowano prototyp pola e<sup>2</sup>ALPHA w standardowych gabarytach o prądzie znamionowym do 1 250 A. Obiekt ten miał na celu przeprowadzenie testów wewnętrznych pod kątem zainstalowania aparatów o prądach zwarciovych 40 kA. Jednocześnie najmniejsze gabaryty miały być podstawą do finalnego sprawdzenia wytrzymałości zwarciowej (40 kA/3 s) konstrukcji i wskazania ewentualnych słabych punktów. W ramach testów laboratoryjnych przeprowadzono: analizę aparatów, ich dostosowanie oraz przeprowadzono badania zwarciove dynamiczne i łukowe. Testy potwierdziły osiągnięcie zakładanych parametrów.



Fot. 5. Widok opracowanego w ramach prac rozwojowych prototypu rozdzielnic  $e^2$ ALPHA

Drugi etap zakładał zbudowanie docelowej konstrukcji rodziny rozdzielnic o parametrach zwarciovych 40 kA. Bazując na konstrukcji pól  $e^2$ ALPHA 24 kV, opracowano pakiet zmian konstrukcyjnych, polegający na wzmocnieniu konstrukcji oraz torów prądowych. Opracowano również system wymuszonej wentylacji pól, ze względu na podniesienie parametrów znamionowych do 4 000 A. Dobrane zostały wyłączniki, przekładniki, uziemniki oraz izolatory które spełniać będą wymagania dla obciążalności zwarciovej 40 kA/3 s. Została przygotowana specyfikacja całej rodziny pól 40 kA. Wykonano prototypy, przeprowadzono wewnętrzne testy funkcjonalne (napędy wózków, manewrowanie uziemnikiem) oraz zebrano uwagi montażowe. W zakresie badań napięć udarowych, nagrzewania torów prądowych, prób zwarciovych i łukowych ze względu na brak możliwości technicznych przeprowadzono te w Instytucie Elektrotechniki, wyniki badań potwierdziły osiągnięcie zakładanych parametrów.

W ramach prac nad rozdzielnicami i sensorami były prowadzone badania rozwojowe polegające na integracji opracowanych rozwiązań sensorów i zabezpieczeń w rozdzielnicach dla kompletnego układu. Badania dotyczyły czujników temperatury, sensorów napięciowych oraz dodatkowo cewek Rogowskiego i optycznych czujników łuku, które były włączane do zabezpieczeń zainstalowanych w rozdzielnicach.



Fot. 6. Widok opracowanego w ramach prac rozwojowych prototypu czujnika temperatury zamontowanego w torze prądowym rozdzielnic SN



Fot. 7. Widok opracowanego w ramach prac rozwojowych prototypu izolatora wsporczeo z wbudowanym sensorem napięciowym

Badania funkcjonalne, oraz podstawowe badania napięciowe i prądowe były prowadzone w siedzibie Lidera, natomiast część badań jak opisano wcześniej była realizowana w laboratoriach zewnętrznych. Przeprowadzone badania potwierdziły osiągnięcie zakładanych parametrów i funkcjonalności również w zakresie kompletnej instalacji wyników projektu w rozdzielnic. Na podstawie przeprowadzonych badań rozwojowych została przygotowana rodzina rozdzielnic jednosystemowych nazwanych zgodnie z nomenklaturą Lidera e<sup>2</sup>ALPHA o parametrach: Napięcie do 24 kV, prąd znamionowy do 4 000 A, odporność zwarciova do 40 kA/3 s,

odporność łukowa do 40 kA/1 s. konstrukcja została zoptymalizowana pod kątem gabarytów dzięki otrzymanym wynikom badań w zakresie rozkładu temperatur oraz wymaganych układów chłodzenia i dystrybucji powietrza wewnątrz przedziałów. Dodatkowo został opracowany prototyp rozdzielniczy o nowym układzie wewnętrznym do instalacji przyściennych, oraz rozdzielnica małogabarytowa z wewnętrzną dekompresją, bazujące na pośrednich wynikach badań przemysłowych. Możliwość stosowania w opracowanych rozdzielnicach różnych rodzajów sensorów i zabezpieczeń z funkcjami predykcji i eliminacji zakłóceń i zwarć otwiera wiele nowych możliwości aplikacji opracowanych rozwiązań.

#### **6.4 Osiągnięte rezultaty**

W ramach prac rozwojowych zostały przygotowane prototypy zabezpieczeń średniego i wysokiego napięcia wraz z algorytmami predykcyjnymi, zestaw sensorów, linia rozdzielnic SN. Prototypy opracowane w ramach zadania 8 są na poziomie TRLIX, część z nich do komercjalizacji wymaga uzyskania przez Lidera certyfikatów potwierdzających pełne badania typu na zgodność z normami. Badania typu i certyfikacja nie były przedmiotem projektu i Lider wykonuje je we własnym zakresie. Opracowane rozwiązania mogą być instalowane zarówno jako komplety, lub jako poszczególne elementy np. zabezpieczenia i również w takim przypadku stanowią innowacyjne rozwiązanie dla klienta.

## 7. Rozpowszechnianie wyników prac B+R

Ze względu na interdyscyplinarność projektu i uzyskane w nim wyniki prac naukowo-badawczych z zakresu elektrotechniki, elektroenergetyki i informatyki, wyniki projektu zostaną upowszechnione jako szereg publikacji monotematycznych prezentowanych na konferencjach naukowych oraz seminariach dla praktyków (osób projektujących, wykonujących inwestycje w energetyce oraz pracowników firm energetycznych).

Firma Elektrometal Energetyka S.A. aby być konkurencyjna na rynku i dostarczać nowe, wiarygodne rozwiązania dla klienta końcowego, musi dokonać wdrożenia opracowanych innowacyjnych rozwiązań i technologii powstałych w wyniku realizacji badań naukowych i prac badawczo-rozwojowych. Prace te wymagają czasu, gdyż opracowane rozwiązania muszą być poddane testom w warunkach rzeczywistych, przejść proces certyfikacji oraz muszą być zabezpieczone prawnie przed ich niepowołanym skopiowaniem i rozpowszechnianiem poprzez wzory przemysłowe, patenty krajowe. Działania te wymagają niestety czasu stąd nie jest możliwe od razu po zakończeniu projektu pełne upowszechnienie wyników badań, gdyż grozi to ich przejęciem przez konkurencję. Ogranicza to też możliwości wygłaszanie referatów i publikowania prac w czasopiśmie branżowych.

Wynikiem projektu jest również opracowanie, projektowanie urządzeń elektroenergetycznych wprowadzanych po badaniach typu do produkcji i sprzedawanych na rynku krajowym i zagranicznym. W tym przypadku są to nowe rozwiązania urządzeń automatyki zabezpieczeniowej oraz rozdzielnice o lepszych parametrach prądowych, wyposażone w nowe rozwiązania czujników do pomiaru temperatury i napięcia. Poniżej zostaną przedstawione działania jakie podjęła firma Elektrometal Energetyka SA w ramach upowszechniania wyników projektu w bieżącym roku:

1. II konferencja Elektroenergetyczna Automatyka Zabezpieczeniowa PTPiREE w Wiśle; uczestnicy: Tauron Dystrybucja; Energa Operator, Stoen Operator, poza tym wykonawcy, konkurencja, projektanci; prezentacja otrzymanych w projekcie wyników prac w postaci nowych zabezpieczeń, urządzeń EAZ;
2. Komisja Zasilania IGKM; uczestnicy: energetycy z zakładów komunikacji miejskiej i firmy wykonawcze, konkurencja; prezentacja otrzymanych w projekcie wyników prac w postaci urządzeń EAZ oraz nowych rozwiązań w rozdzielnicach;
3. XXVI Sympozjum Naukowo-Techniczne „SEMAG 2022”; uczestnicy: KGHM ZG: Lubin Rudna, KWB Bełchatów, Turów; prezentacja otrzymanych w projekcie wyników prac w postaci urządzeń EAZ oraz nowych rozwiązań w rozdzielnicach ALPHA oraz ALPHA-G;
4. XIX Seminarium szkoleniowe kadry inżyniersko-technicznej ELSEP 2022 pt. "Nowoczesne rozwiązania w sieciach elektroenergetycznych"; uczestnicy: spotkanie środowisk przedstawiciele uczelni, dystrybucji PGE Dystrybucja Białystok, pozostali wykonawcy i producenci, przedstawiciele; prezentacja otrzymanych w projekcie wyników prac w postaci nowych zabezpieczeń od ferorezonansu, urządzeń EAZ;
5. Konferencja naukowo-techniczna "Łączniki w eksploatacji"; uczestnicy: PGNiG, ZGH Bolesław, PSE, Azoty Police, Polsat (Eseleo); prezentacja otrzymanych w projekcie wyników prac w postaci urządzeń EAZ na wysokie napięcie;
6. Hannover Messe 2022 największe na świecie targi poświęcone rozwiązaniom dla przemysłu; uczestnicy: ponad 60 klientów firmy Elektrometal Energetyka SA z całego świata; prezentacja otrzymanych w projekcie wyników prac w postaci nowych zabezpieczeń odnośnie sieci i silników SN, nowych urządzeń EAZ oraz opracowanych rozwiązań w rozdzielnicach;
7. Konferencja PAEE 2022 skupia się na praktycznych osiągnięciach w zakresie elektrotechniki, elektroniki i automatyki; uczestnicy: zespoły badawcze z całego kraju — politechniki, instytuty, uczelnie wyższe; prezentacja otrzymanych w projekcie wyników prac w postaci nowych zabezpieczeń odnośnie silników średniego napięcia.

Referaty prezentowane na konferencjach i publikacje opublikowane dotychczas w ramach upowszechniania wyników projektu:

- [1] D Sajewicz, W. Łaguna, W. Chmielak, „Wykrywanie zdarzeń awaryjnych w silnikach asynchronicznych SN na podstawie analizy danych z rejestratorów zakłóceń” Prezentacja wyników prac na międzynarodowej konferencji naukowo-technicznej "Postępy w Elektrotechnice Stosowanej" (PES-16). Kościelisko, czerwiec 2022
- [2] W. Chmielak, „Nowe funkcjonalności systemów zabezpieczeń produkcji Elektrometal Energetyka S.A. wspomagające eksploatację urządzeń elektroenergetycznych” Prezentacja na konferencji pt. „Nowoczesne rozwiązania urządzeń energetycznych oraz układów napędowych górniczych lokomotyw akumulatorowych w przemyśle górniczym.” Organizowanej przez Sekcję Elektrotechniki i Automatyki Górniczej Oddziału Gliwickiego Stowarzyszenia Elektryków Polskich w KWK „Knurów Szczygłowice” Ruch Knurów 11.03.2022
- [5] W. Chmielak „Łukoodporność rozdzielnic w osłonie metalowej” Wiadomości elektrotechniczne 02.2022, str. 14-17.
- [6] W. Krajewski, K. Krasuski and T. Błażejczyk, "Some aspects of medium voltage switchgear designing with aid of numerical analysis," in IET Science, Measurement & Technology, vol. 14, no. 6, pp. 651-664, 8 2020, doi: 10.1049/iet-smt.2019.0325.
- [7] K. Krasuski, J. Bandel, A. Hejduk, B. Konratowicz-Kucewicz, G. Wojtasiewicz „Aparatura elektroenergetyczna projektowana i badana w Zakładzie Wielkich Mocy”, Kwartalnik Sieci Badawczej Łukasiewicz Instytutu Elektrotechniki- Inżynieria Elektryczna, Nr 04, 2020, str 42-50.
- [8] K. Krasuski, J. Sosnowski, A. Dzierżyński „Rozwój Zakładu Wielkich Mocy w 75-letniej historii Łukasiewicz Instytutu Elektrotechniki”, Kwartalnik Sieci Badawczej Łukasiewicz Instytutu Elektrotechniki- Inżynieria Elektryczna, Nr 05, 2021, str 38-41.
- [9] D. Sajewicz; M. Radziszewski: Aktualne potrzeby eksploatacyjne sieci i urządzeń SN — zjawisko ferorezonansu. Wiadomości elektrotechniczne 5/2022. Artykuł recenzowany. DOI 10.15199/74.2022.5.2.

Obecne przygotowywane artykuły i prezentacje opisujące wyniki prac projektu:

- [1] D Sajewicz, W. Łaguna, W. Chmielak, „Wykrywanie zdarzeń awaryjnych w silnikach indukcyjnych na podstawie analizy danych z rejestratorów zakłóceń”
- [2] D. Sajewicz, D. Rybak, T. Klonowski, „Automatyka zabezpieczeniowa stacji wysokiego i średniego napięcia z funkcjami predykcji i automatycznego dostrajania członów zabezpieczeniowych”, Ogólnopolska Konferencja '2022 „ZABEZPIECZENIA PRZEKAŹNIKOWE W ENERGETYCE”, Warszawa, 12÷14.10.2022r.
- [3] W. Chmielak, J. Jackiewicz, D. Rybak, „Łukoodporność rozdzielnic w osłonie metalowej -eliminacja zakłóceń”, XXIV Ogólnopolska Konferencja '2022 „ZABEZPIECZENIA PRZEKAŹNIKOWE W ENERGETYCE”, Warszawa, 12÷14.10.2022r.
- [4] W. Stępnia, A. Gawłowski, S. Jaworowicz, „Doświadczenia eksploatacyjne komunikacji IEC61850 na przykładzie sterowników zabezpieczeniowych SN i WN e<sup>2</sup>TANGO”, XXIV Ogólnopolska Konferencja '2022 „ZABEZPIECZENIA PRZEKAŹNIKOWE W ENERGETYCE”, Warszawa, 12÷14.10.2022r.
- [5] J. Bandel, M. Mykowiecki, K. Krasuski: "Problematyka technologii wytwarzania sensorów pomiaru napięcia z funkcją wsporcą"
- [6] B. Kondratowicz-Kucewicz, K. Krasuski, A. Hejduk, G. Wojtasiewicz: "Zastosowanie metod numerycznych w projektowaniu rozdzielnic średniego napięcia"

