

Prof. dr hab. inż. Jan IŻYKOWSKI
Politechnika Wrocławska
Instytut Energoelektryki



**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
MGR INŻ. MATEUSZA SZABLICKIEGO**

**p.t. „OBSZAROWA ADAPTACYJNA AUTOMATYKA ZABEZPIECZENIOWA LINII
ELEKTROENERGETYCZNYCH WN Z ODCZEPOWO PRZYŁĄCZONYMI ŹRÓDŁAMI
WIATROWYMI”**

I. Podstawa wykonania recenzji

Opiniowana rozprawa doktorska powstała w Instytucie Elektroenergetyki i Sterowania Układów Politechniki Śląskiej pod kierunkiem dr hab. inż. Adriana Halinki, prof. Pol. Śl. Niniejsza recenzja została sporządzona na wniosek Rady Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej, przesłany mi w piśmie Pana Dziekana prof. dr hab. inż. Pawła Sowy z dnia 20.03.2013 r.

II. Ogólna charakterystyka tematyki rozprawy

Przedmiotem badań w rozprawie doktorskiej mgr inż. Mateusza Szablickiego jest automatyka zabezpieczeniowa linii elektroenergetycznej WN z odczepowo przyłączonymi źródłami wiatrowymi. Jest ona rozpatrywana jako zadanie podstawowe realizowane w ramach zaprojektowanego w sposób ogólny układu Obszarowej Automatyki Zabezpieczeniowej Układów Odczepowych (OAZUO). W szczególności, przedmiotem zainteresowania jest zabezpieczenie odległościowe i możliwości poprawy jego działania poprzez zwiększenie dostępności pomiarowej sygnałów o fazory prądów mierzonych synchronicznie w pozostałych punktach zabezpieczeniowych.

Tematyka rozprawy jest bardzo interesująca, aktualna i ważna – zarówno z naukowego, jak i technicznego punktu widzenia. Obejmuje wiele zagadnień i stanowi duże bogactwo problemów naukowych i technicznych. Ze względu na złożoność analizy zakłóceń zwarciovych oraz braku odpowiedniej ilości zarejestrowanych danych pomiarowych, Autor rozprawy – co jest w pełni uzasadnione – zastosował metody symulacyjne do przygotowania bogatego zestawu sygnałów wejściowych badanych zabezpieczeń. Pozwoliło to na przeprowadzenie wszechstronnej analizy uwarunkowań pracy układów elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej, w tym nowo opracowanych przez Autora rozprawy. Takie podejście do realizacji postawionego w rozprawie celu uważam za właściwe, interesujące i trafne dla rozprawy doktorskiej.

Recenzowana rozprawa wpisuje się w **zakres nauk technicznych w dyscyplinę elektrotechnika i** dotyczy elektroenergetyki, a w szczególności elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej.

III. Główne rezultaty rozprawy

Recenzowana rozprawa liczy 152 ponumerowanych stron, a jej układ jest logiczny i nie budzi zastrzeżeń. W szczególności rozprawa składa się z następujących elementów:

- Wprowadzenie (**rozdział 1**) – wstęp, cel, teza i zakres rozprawy oraz założenia.
- **Rozdział 2** przedstawia wiadomości podstawowe o zabezpieczeniach odległościowych oraz charakterystykę ich działania.
- W **rozdziale 3** przedstawiono dogłębnie i ze zrozumieniem warunki pracy „klasycznych” zabezpieczeń odległościowych linii sieci dystrybucyjnej WN z odczepowo przyłączonymi źródłami wiatrowymi. W sposób metodyczny wykazano ograniczenia i wady takich zabezpieczeń, a tym samym wskazano na konieczność dokonania poprawy ich działania.
- W **rozdziałach 4 i 5** zaprezentowano ogólną koncepcję Obszarowej Automatyki Zabezpieceniowej Układów Odczepowych (OAZUO). Bez zbędnego wchodzenia w szczegóły, zaproponowano zbiór zadań przewidzianych do realizacji oraz zaprezentowano ten system jako wieloagentowy. W odróżnieniu od dotychczasowych prób wykorzystania systemów wieloagentowych zaproponowano zasadnicze zmiany w celu uzyskania poprawy działania zabezpieczeń odległościowych. Zaproponowano zastosowanie nowych algorytmów wyznaczania wielkości kryterialnych zabezpieczenia, którego podstawą jest odejście od tradycyjnego stosowania wyłącznie pomiarów lokalnych.
- **Rozdział 6**, w którym zawarto największy wkład własny Autora rozprawy, przedstawia szczegółowe wyprowadzenie nowatorskich algorytmów pomiarowych składowych impedancji pętli zwarcia. Odznaczają się one kompletnym odstrojeniem się od czynników fałszujących pomiar, z którymi mamy do czynienia w przypadku stosowania wyłącznie lokalnie mierzonych napięć i prądów trójfazowych. Uzyskano to w wyniku rozszerzenia dostępności pomiarowej o sygnały prądowe z pozostałych punktów zabezpieczeniowych. Weryfikacja zaproponowanych algorytmów została przeprowadzona z użyciem sygnałów pochodzących z symulacji komputerowej zwarć w testowym układzie. Przeprowadzone testy wykazały istotną poprawę działania zaproponowanego zabezpieczenia, w porównaniu do „klasycznego” zabezpieczenia.
- **Rozdział 7** przedstawia podsumowanie i wnioski końcowe. Zawarto właściwą interpretację uzyskanych rezultatów badań oraz wyciągnięto prawidłowe wnioski.
- Spis literatury zawiera 155 pozycji, a są to głównie: książki, publikacje, raporty (łącznie 129 pozycji), ale również 7 dokumentów o charakterze prawnym, 7 katalogów urządzeń oraz 12 źródeł internetowych. Wśród cytowanej literatury jest 11 prac współautorstwa mgr inż. Mateusza Szablickiego. Są to publikacje krajowe, lecz na podkreślenie zasługuje to, że 7 prac opublikowano w czasopiśmie z Master Journal List (lista filadelfijska): Przegląd Elektrotechniczny – 6 artykułów, Rynek Energii – 1 artykuł. Publikacje Autora ze spisu literatury dotyczą ściśle tematyki rozprawy



doktorskiej. Ten dorobek publikacyjny Autora rozprawy oceniam jako **wyróżniający**. Autor rozprawy korzystał zasadniczo z aktualnej literatury i jest ona w rozprawie właściwie cytowana.

- W dwóch załącznikach przedstawiono układ testowy, który zamodelowano w programie DIGSILENT oraz model cyfrowego zabezpieczenia odległościowego – odwzorowanego w programie Matlab.

Przyjęta w rozprawie teza mówi o tym, że: „*Wykorzystanie technik adaptacyjnych w obszarowych systemach automatyki bazujących na układach wieloagentowych umożliwia poprawę detekcji i eliminacji zakłóceń zwarciovych przez impedancyjne kryterium decyzyjne układów elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej ciągów liniowych z odczepowo przyłączonymi źródłami wiatrowymi.*” Oceniam, że teza ta została sformułowana prawidłowo i wiernie odzwierciedla uzyskane rezultaty rozprawy, które – w moim przekonaniu – w pełni ją udowadniają.

Przechodząc do ogólnej oceny rozprawy stwierdzam, że cel postawiony na wstępie rozprawy został przez jej Autora całkowicie osiągnięty. Opracowano koncepcję systemu obszarowej automatyki zabezpieczeniowej przeznaczonej do zastosowania w układach sieciowych o dużym nasyceniu źródłami wiatrowymi. W systemie tym zawarto zaproponowane nowatorskie rozwiązanie dla zabezpieczenia odległościowego, które, dzięki rozszerzeniu sygnałów wejściowych o prądy mierzone w pozostałych punktach zabezpieczeniowych, zapewnia poprawne działanie w różnorodnych warunkach zwarciovych. Przedstawione wyniki badań są poprawne i przekonujące.

Sposób rozwiązania problemów postawionych w rozprawie wskazuje na bardzo dobre opanowanie i zrozumienie przez Autora wielu różnorodnych zagadnień, co było konieczne do realizacji tej rozprawy. Doktorant ma dużą wiedzę z zakresu sieci elektroenergetycznych, modelowania elementów sieci oraz analizy zjawisk zakłóceńowych. Wykazał się bardzo dobrą znajomością układów automatyki zabezpieczeniowej, idei sieci *Smart Grid* i bardzo dobrze opanował dziedzinę cyfrowych pomiarów. Nabyta wiedza w trakcie realizacji rozprawy i uzyskane rezultaty można uznać za w pełni pozytywne efekty ocenianej rozprawy. Autor rozprawy jest dobrze przygotowany do twórczej pracy w tematyce elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej.

IV. Uwagi dotyczące redakcji pracy

Rozprawa została zredagowana bardzo starannie, z wzorową szatą graficzną. Występujące nieliczne usterki redakcyjne nie utrudniają czytania pracy. Przykładowe zauważone usterki zestawiam poniżej:

- W rozprawie nie zamieszczono wykazu ważniejszych oznaczeń, co trochę utrudnia śledzenie zamieszczonych wyprowadzeń wzorów.
- Str. 14, ostatni akapit: zamiast „... odpowiednich opóźnień czasowych, stosowanie do oczekiwanego rezultatu ...” winno być „... odpowiednich opóźnień czasowych, stosownie do oczekiwanego rezultatu ...”.

- Str. 75, ostatni akapit: zamiast "Nie ma konieczności rozszerzania ..." winno być " Nie ma konieczności rozszerzania ...".
- Według mnie Autor rozprawy zbyt często używa czasownika 'implementować' i niekiedy niepoprawnie. Jeśli już można uznać za poprawne sformułowanie: 'zaimplementować algorytm', to już następujące sformułowania nie są odpowiednie:
 - Str. 18: „niepoprawne zaimplementowanie w nastawieniach z a b e z p i e c z e n i a parametrów chronionego obiektu elektroenergetycznego”,
 - Str. 61: „Dowodzą one, że obecność w strukturze sieci źródła wiatrowego, nawet niewielkiej mocy może i m p l e m e n t o w a ć błędy tych algorytmów, prowadząc – w rezultacie – do niewłaściwego działania zabezpieczeń odległościowych”.

V. Uwagi szczegółowe i pytania

Poniżej zestawiam kilkanaście szczegółowych uwag i pytań, które nasuwają się przy czytaniu ocenianej rozprawy:

1. *Str. 11, Tablica 2.1:* Nie podano wzoru na współczynnik kompensacji prądowej w przypadku zwarć jednofazowych, co jest wymagane dla kompletności informacji zawartej w tej tablicy. Jednak w dalszych rozważaniach jest on już odpowiednio zdefiniowany.
2. *Str. 13:* Przedstawiony tu algorytm określania składowych impedancji bazujący na równaniu różniczkowym opisującym obwód zwarcia nie jest przydatny dla prowadzonych w pracy rozważań. Przyjmuje się bowiem, że nie próbki mierzonych sygnałów lecz fazory są przesyłane z punktów pomiarowych do systemu OAZUO.
3. *Str. 22, przed wzorem (3.12):* Przy przyjęciu, że $I_A = I_B$ należałoby jeszcze dodać, że w tym miejscu, jak również w całej pracy – co jest tu uzasadnione – pomija się pojemności poprzeczne linii.
4. *Str. 25:* Autor rozprawy stwierdza, że metody eliminowania błędów wywołanych złożoną konfiguracją linii wykorzystywane w lokalizatorach miejsca zwarcia nie mogą być stosowane w zabezpieczeniach odległościowych. Podzielam ten pogląd, lecz tylko w odniesieniu do przypadku stosowania pomiarów lokalnych. Inaczej jest jednak gdy lokalizacja jest przeprowadzana z użyciem pomiarów na wszystkich końcach linii. Wtedy idea takiego lokalizatora – według mnie – staje się bardzo atrakcyjna dla realizacji nowoczesnego zabezpieczenia odległościowego. Podam tu przykład lokalizatora zwarć stosującego sygnały z zabezpieczenia różnicowego (fazory prądów trójfazowych z końców linii), wzbogacone o lokalny pomiar napięć trójfazowych.
5. *Str. 43:* Podano, że symulowano zwarcia jednofazowe i trójfazowe. Dlaczego nie analizowano innych rodzajów zwarć: dwufazowych oraz naogół kłopotliwych dla zabezpieczeń zwarć dwufazowych z udziałem ziemi?

6. *Str. 44:* Przy definiowaniu stanu początkowego zwarcia stwierdzono, że dopuszczalny czas trwania zwarcia dla zabezpieczeń realizujących ochronę podstawową linii WN (150 ms) pomniejszono o czas potrzebny na dokonanie operacji łączeniowych. Nie podano jednak o ile pomniejszono.
7. *Str. 70:* W tym miejscu oraz jeszcze w innych, w odniesieniu do oceny systemu wieloagentowego stwierdzono, że potencjał poszczególnych agentów jest łatwy do zastąpienia w przypadku ich niedyspozycji, co stanowi ich cenną zaletę. Pojawia się pytanie: co będzie w przypadku stwierdzenia utraty przesyłu danych pomiarowych z jakiegoś końca linii?
8. *Str. 53:* Argumentacja, że uzyskany czas działania 23 ms dla przykładu z rys. 3.17, jako mieszczący się w dopuszczalnym przedziale (nie przekracza 30 ms) i zawierający się w zakresie rzeczywistych czasów działania zabezpieczeń (podanych w [52]) potwierdza poprawność opracowanego modelu zabezpieczenia nie jest wystarczająca. Zapewne weryfikacja poprawności modelu była bardziej złożona.
9. *Str. 86:* Czy w schemacie z rys. 5.2 zawarte są takie elementy jak: element kierunkowy i ewentualnie klasyfikacja zwarcia?
10. *Str. 89:* Upatruje się, że w dalszych pracach nad OAZUO należy skoncentrować się na opracowaniu nowych kryteriów decyzyjnych. Czy chodzi np. o wnioskowanie rozmyte?
11. *Str. 93:* Nie wyjaśniono co to są za impedancje Z_{0ABC} , Z_{ABC} występujące we wzorze na współczynnik prądowy (6.4).
12. *Str. 95:* Dla proponowanego zabezpieczenia odległościowego założono znajomość sygnałów prądowych ze wszystkich punktów zabezpieczeniowych chronionej linii oraz lokalnie mierzone napięcie. Przyjęto, że pomiary cyfrowe w poszczególnych punktach zabezpieczeniowych są przeprowadzane synchronicznie, np. z użyciem GPS. Co się będzie działo w przypadku utraty odbioru sygnału z systemu GPS?
13. *Str. 95:* Dla proponowanego zabezpieczenia odległościowego założono znajomość sygnałów prądowych ze wszystkich punktów zabezpieczeniowych chronionej linii oraz lokalnie mierzone napięcie. Należy zauważyć, że w ten sposób zabezpieczenie odległościowe staje się – podobnie jak prądowe zabezpieczenie różnicowe – zabezpieczeniem zależnym od przesyłu sygnałów. W przypadku wystąpienia utraty przesyłu sygnałów oba zabezpieczenia przestają stanowić ochronę linii. W związku z tym te dwa rodzaje zabezpieczeń (odległościowe i różnicowe) nie mogą wzajemnie siebie rezerwować, jak to ma miejsce dla klasycznych rozwiązań tych zabezpieczeń.
14. *Str. 95:* Czy można zastosować jeszcze inną dostępność pomiarową niż założona znajomość sygnałów prądowych ze wszystkich punktów zabezpieczeniowych chronionej linii oraz lokalnie mierzone napięcie, uzyskując przy tym pełną rozwiązalność dla impedancji pętli zwarciowej, tj. odstrajając się skutecznie od wszystkich czynników fałszujących pomiar – występujących przy stosowaniu tylko pomiarów lokalnych?

15. W całej pracy skoncentrowano się na podaniu i analizie wyników działania zabezpieczenia odległościowego „klasycznego” oraz tego zaproponowanego, tj. korzystającego z rozszerzonej dostępności pomiarowej (dodatkowo sygnały prądowe z pozostałych punktów zabezpieczeniowych). Nie pokazano jednak kompletnego przykładu z przedstawieniem mierzonych sygnałów oraz wyznaczonych składowych impedancji pętli zwarciowej. Np. dla przykładu dotyczącego „klasycznego” zabezpieczenia odległościowego (rys. 3.17) nie zamieszczono sygnałów wejściowych zabezpieczeń, a na trajektoriach (prawdopodobnie tylko końcowych fragmentach poszczególnych trajektorii) nie zaznaczono dyskretnych punktów czasowych, w których jest dokonywany pomiar. Trajektoria nie jest przecież linią ciągłą, lecz zbiorem punktów oddzielonych od siebie w czasie o okres próbkowania. Z kolei, dla zaproponowanego zabezpieczenia odległościowego z rozszerzoną dostępnością pomiarową nie podano nawet takiego przykładu jak na rys. 3.17.

VI. Wniosek końcowy

Wyszczególnione powyżej uwagi i pytania zmierzają do wyjaśnienia pewnych kwestii oraz wskazania niewielkich uchybień redakcyjnych, jednak bez podważania głównych osiągnięć rozprawy. Nie wpływają one więc na moją ocenę recenzowanej rozprawy, która jest **bardzo pozytywna**. Uważam, że rozprawa ta wnosi istotny wkład do rozwoju elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej, wymuszonego z jednej strony przez zmianę struktury systemu elektroenergetycznego wraz z wprowadzaniem źródeł energii odnawialnej, a z drugiej strony przez stawianie tej automatyce coraz to zwiększonych wymagań. Opiniowana rozprawa stanowi oryginalne podejście do rozwiązania interesującego, aktualnego i ważnego dla praktyki problemu naukowego z zakresu elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej. Przedstawione przez Autora rozprawy rezultaty badań oceniam jako przekonujące, bardzo interesujące i stanowiące bardzo dobry punkt wyjściowy do dalszych badań, do których Autor rozprawy ma predyspozycje i jest bardzo dobrze przygotowany. Doktorant wniósł istotny wkład własny i wykazał się dużymi umiejętnościami projektowania i prowadzenia analizy pracy układów automatyki zabezpieczeniowej, z użyciem nowoczesnych środków programowych.

Z pełnym przekonaniem stwierdzam, że rozprawa opracowana przez mgr inż. Mateusza Szablickiego **spełnia całkowicie** wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez Ustawę z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym. **Wnioskuje o dopuszczenie mgr inż. Mateusza Szablickiego do publicznej obrony przed Komisją Rady Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej w Gliwicach.**



A handwritten signature in black ink, which appears to read "J. Kijowski".