



Prof. zw. dr hab. inż. Józef PASKA  
POLITECHNIKA WARSZAWSKA  
Instytut Elektroenergetyki, Zakład Elektrowni  
i Gospodarki Elektroenergetycznej  
ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa  
tel. (22)2345864, e-mail: Jozef.Paska@ien.pw.edu.pl  
Adres prywatny: ul. Szwanowskiego 1 m 23, 01-318 Warszawa  
tel. 6651872

Warszawa, 3.08.2017

**Recenzja rozprawy doktorskiej**  
**mgr inż. Jakuba Jędrzejczaka**

Tytuł rozprawy:

**„Reliability assessment of protective relays in harmonic-polluted power systems”**  
**(„Ocena niezawodności przekładników zabezpieczeniowych w systemach elektroenergetycznych z zawartością składowych harmonicznnych”)**

**1. Podstawa formalna recenzji**

Podstawą opracowania recenzji rozprawy doktorskiej, wykonanej na Wydziale Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki Politechniki Łódzkiej, pod kierunkiem pana prof. dr hab. inż. Georga Andersa, jest pismo Prodziekana Wydziału, dr hab. inż. Michała Strzeleckiego, prof. PŁ, z dnia 13 kwietnia 2017, powołujące się na uchwałę Rady Wydziału z dnia 11 kwietnia 2017 r.

**2. Zagadnienie naukowe i jego sformułowanie**

Na świecie i w Polsce zagadnienia niezawodności systemu elektroenergetycznego oraz bezpieczeństwa zasilania w energię elektryczną cieszą się sporym, aczkolwiek o zmiennym nasileniu, zainteresowaniem naukowców i praktyków. Są one przedmiotem regulacji prawnych na poziomie Unii Europejskiej oraz krajowym (ustawa Prawo Energetyczne, rozporządzenia „systemowe”). Względnie nowym i mało zbadanym składnikiem tego obszaru badawczego jest problematyka niezawodności urządzeń i układów automatyki zabezpieczeniowej i/oraz niezawodności systemu elektroenergetycznego i/lub jego elementów w warunkach odkształconych prądów i napięć. W tym nurcie mieści się też rozprawa doktorska mgr inż. Jakuba Jędrzejczaka.

Podjęte przez Autora zagadnienie naukowe polega na udoskonaleniu metodyki modelowania, analizy i oceny niezawodności fragmentów systemów elektroenergetycznych (lub niewielkich systemów elektroenergetycznych) dzięki opracowaniu uproszczonego modelu Markowa dla niezawodności zabezpieczeń cyfrowych, analogowych oraz elektromechanicznych, pracujących w warunkach odkształconych prądów i napięć oraz wykorzystaniu go w symulacjach elektromagnetycznych. Metodyka ta ma mieć zastosowanie, przede wszystkim, w odniesieniu do fragmentów systemów elektroenergetycznych lub niewielkich systemów elektroenergetycznych.

Autor przeanalizował uzyskane dotychczas rezultaty badań i zaproponował własne, oryginalne rozwiązania tej metodyki obliczeniowej.

Tematyka rozprawy jest więc aktualna na tle obecnego stanu wiedzy i potrzeb elektroenergetyki.

### 3. Tytuł, cel i teza rozprawy

Tytuł rozprawy został sformułowany jako: „*Reliability assessment of protective relays in harmonic-polluted power systems*” co zostało w polskim streszczeniu rozprawy przetłumaczone przez Autora na: „*Ocena niezawodności przekaźników zabezpieczeniowych w systemach elektroenergetycznych z zawartością składowych harmonicznych*”. Jest to tematyka interesująca a tytuł odpowiada w zasadzie treści rozprawy, aczkolwiek niewłaściwe wydaje się sugerowanie w tytule rozprawy szerszego jej zakresu a zatem i stosowności uzyskanych wyników. Zdaniem recenzenta lepszy byłby następujący tytuł rozprawy: *Reliability assessment of protective relays in harmonic-polluted small-area power systems*.

Cel pracy Autor przedstawił na stronie 8: „*The goal of the project is to:*

- (1) *analyze the effects of harmonics on the experimental digital distance relay; compare the results with the commercially available protection; and test different relaying algorithms, including the custom-designed electromechanical MHO relay model in an electromagnetic transient program;*
- (2) *devise the stochastic Markov models for relay reliability considerations, taking into account harmonic effects on power system automation performance;*
- (3) *devise a method for finding missing transition rates which are needed for the computation of the steady-state probabilities in the Markov chains;*
- (4) *analyze the influence of protection reliability on the reliability of a small-area transmission system.”.*

Można by to przetłumaczyć jako: Celem projektu jest:

- (1) przeanalizować wpływ harmonicznych na eksperymentalne cyfrowe zabezpieczenie odległościowe; porównać wyniki z dostępnymi komercyjnie zabezpieczeniami; oraz przetestować różne algorytmy działania zabezpieczeń, w tym niestandardowego, elektromechanicznego modelu przekaźnika MHO, za pomocą programu do modelowania elektromagnetycznych procesów przejściowych;
- (2) opracować stochastyczne modele Markowa na potrzeby rozważań dotyczących niezawodności zabezpieczeń, z uwzględnieniem wpływu harmonicznych na funkcjonowanie automatyki zabezpieczeniowej systemu elektroenergetycznego;
- (3) opracować metodę wyznaczania nieznanymi intensywności przejść, potrzebnych do obliczenia prawdopodobieństw granicznych w łańcuchach Markowa;
- (4) zanalizować wpływ niezawodności zabezpieczeń na niezawodność małego systemu przesyłowego.

Tak zdefiniowany cel (cele) rozprawy znajdują odzwierciedlenie w jej treści i nie budzą zastrzeżeń.

Sformułowane na stronie 8 rozprawy tezy brzmią następująco:

- I. *It is possible to determine the reliability of power system protection relays by tracking their performance and calculating the probability of relay maloperation under fault conditions and during normal operation in a harmonic-polluted environment.*
- II. *It is possible to combine the results of the experimental research on protective relays with the reliability analysis of a fragment or bulk electric power system.”*

W streszczeniu polskim Autor tłumaczy je następująco:

- *„Jest możliwe określenie niezawodności przekaźników elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej, poprzez obliczenie prawdopodobieństwa ich błędnego działania w warunkach zwarciowych i przy braku zwarcia, w systemie, w którym występują wyższe składowe harmoniczne.*

- *Jest możliwe połączenie wyników badań doświadczalnych na przełącznikach zabezpieczeniowych, z analizą niezawodnościową fragmentu lub całego systemu elektroenergetycznego.*

Tezy rozprawy, aczkolwiek mogłyby być lepiej skonstruowane: są zbyt ogólne, wręcz oczywiste, a zatem nie wymagające udowodnienia; tłumaczenie sformułowania „*under fault conditions and during normal operation*” jako „*w warunkach zwarciovych i przy braku zwarcia*” jest błędne; stanowią pewną diagnozę stanu istniejącego metodyki modelowania, analizy i oceny niezawodności systemu elektroenergetycznego, zawierają jego krytyczną ocenę i propozycję nowego, zdaniem Autora lepszego, podejścia. Mimo tych zastrzeżeń tezy rozprawy mają cechy oryginalne, a ich prawdziwości Autor rozprawy dowodzi rozwiązując szereg zagadnień szczegółowych o charakterze, zarówno poznawczym, jak i aplikacyjnym, w szczególności:

- Uznając za główny przedmiot rozprawy analizę i ocenę niezawodności systemu przesyłowego w kategoriach zakłóceń w dostawie energii do punktów wyjścia z sieci (węzłów odbiorczych), spowodowanych niedyspozycyjnością elementów systemu.
- Uwzględniając w tej analizie i ocenie zawodność urządzeń i układów automatyki zabezpieczeniowej oraz występowanie harmonicznych.
- Dokonując testów i symulacji w odniesieniu do eksperymentalnych i komercyjnych zabezpieczeń, w celu oceny wrażliwości warstwy sprzętowej (hardware) i programowej (software) zabezpieczeń na wyższą zawartość harmonicznych.
- W oparciu na wynikach tych badań, opracowując modele Markowa niezawodności zabezpieczeń i wykorzystując je do oceny niezawodności praktycznych układów elektroenergetycznych.
- Proponując rozwiązanie problemu wyznaczania nieznanymi intensywności przejść łańcuchów Markowa i tworząc własne oprogramowanie hybrydowe z wykorzystaniem programów EMTP i MATLAB.

#### **4. Waga podjętego zagadnienia naukowego**

Podjęty w pracy problem badawczy jest istotny z uwagi na zmiany, które już nastąpiły i ciągle mają miejsce w elektroenergetyce. Przemiany strukturalne, własnościowe i technologiczne powodują, że odpowiedzialność za niezawodność systemów elektroenergetycznych i bezpieczeństwo zasilania odbiorców energią elektryczną jest obecnie zdekomponowane na wiele podmiotów (głównie są to operatorzy systemów: przesyłowego i dystrybucyjnych, ale nie tylko). Nie wszystkie te podmioty należycie wywiązują się ze swoich obowiązków. Tym bardziej potrzebne są prace badawcze z zakresu metodyki modelowania, analiz i oceny niezawodności systemów elektroenergetycznych, ujmujące te złożone zagadnienia choćby w wymiarze cząstkowym. W ten nurt wpisuje się rozprawa p. Jakuba Jędrzejczaka.

Problematyka niezawodności systemów i układów elektroenergetycznych oraz bezpieczeństwa zasilania odbiorców w energię zyskuje na ważności w obecnych uwarunkowaniach światowych, europejskich i krajowych, w szczególności zaś w obliczu polityki energetyczno-klimatycznej Unii Europejskiej. Bezpieczeństwo energetyczne, bezpieczeństwo elektroenergetyczne, bezpieczeństwo zasilania – to ważne elementy tej polityki.

## **5. Przegląd stanu wiedzy**

Rozprawa stanowi wartościowe kompendium aktualnego stanu wiedzy z zakresu metodyki modelowania, analiz i oceny niezawodności systemów elektroenergetycznych z uwzględnieniem niezawodności urządzeń i układów automatyki zabezpieczeniowej a także oddziaływania wyższych harmonicznych oraz stosowanych w niej technik obliczeniowych i mieści się w obszarze elektroenergetyki.

## **6. Oryginalność i zakres rozwiązania zagadnienia naukowego**

Praca bazuje na dorobku naukowym, głównie zagranicznym, w zakresie modelowania, analiz i oceny niezawodności systemów elektroenergetycznych (w tym układów elektroenergetycznych), a pewne szczególne wątki rozwija konsekwentnie z wykorzystaniem własnych koncepcji i rozwiązań. Do elementów nowości, stanowiących oryginalne i najważniejsze rezultaty rozprawy i osiągnięcia jej Autora, zaliczam:

- Analizę wpływu wyższych harmonicznych na działanie elementów systemu elektroenergetycznego, w szczególności układów automatyki zabezpieczeniowej.
- Zamodelowanie w środowisku EMTP-ATP wpływu odkształceń na działanie zabezpieczeń cyfrowych oraz elektromechanicznych.
- Stworzenie hybrydowego oprogramowania do symulacji modelowanego w środowisku EMTP-ATP układu zabezpieczeń, obróbki statystycznej wyników oraz obliczenia nieznanymi parametrami niezawodnościowymi (intensywności przejść) modeli Markowa (MATLAB).
- Opracowanie zestawu podstawowych stochastycznych modeli Markowa, łączących niezawodność zabezpieczenia i chronionego obiektu, przy uwzględnieniu wpływu harmonicznych.
- Integrację metody oceny niezawodności zabezpieczeń z metodą analizy drzewa uszkodzeń fragmentu sieci przesyłowo-dystrybucyjnej (małego systemu elektroenergetycznego).

## **7. Wiedza teoretyczna Autora w dyscyplinie naukowej**

Kompleksowa analiza i modelowanie złożonych zjawisk, będących przedmiotem rozprawy, wymagały szerokiej wiedzy w dyscyplinie „Elektrotechnika - Elektroenergetyka”. Autor ma dobrą orientację w dziedzinie szeroko pojętej elektroenergetyki, systemów elektroenergetycznych, automatyki zabezpieczeniowej, jakości energii elektrycznej, obliczeń niezawodnościowych. Autor wykazał, zarówno umiejętność formułowania i dowodzenia tez naukowych, jak i dobrą znajomość aspektów aplikacyjnych. Autor dość swobodnie porusza się w skomplikowanej problematyce.

## **8. Umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej**

Rozprawa jest obszerna (290 stron, w tym 7 rozdziałów merytorycznych, uwagi końcowe i kierunki dalszych prac, 7 załączników, bibliografia), jednak nie stwarza istotnych problemów z wyróżnieniem osobistego dorobku naukowego Doktoranta. Uważna lektura rozprawy pozwala zidentyfikować te elementy na szerszym tle przedstawionych rozważań. Niewątpliwie Autor wykazał, iż posiadał umiejętność:

- formułowania i rozwiązywania problemu naukowego,
- przyjmowania uzasadnionych założeń,
- wykorzystania i rozwijania właściwych podejść metodycznych,
- rozwiązywania postawionych zadań,
- przekonującej prezentacji uzyskanych rezultatów.

Praca ma odpowiedni poziom teoretyczny, odpowiada też realiom aplikacji oraz wymaganiom i oczekiwaniom potencjalnych użytkowników.

## 9. Uwagi polemiczne i dyskusyjne

### 9.1. Zagadnienia ogólne:

- 9.1.1. *Tytuł, cel i teza pracy.* Uwagi co do tytułu, celu i tezy rozprawy zostały sformułowane w punkcie 3. Proszę o odniesienie się do nich.
- 9.1.2. Autor, zdaniem recenzenta, nie dość precyzyjnie stosuje pojęcia pewność, niezawodność, wystarczalność, bezpieczeństwo. Proszę o podanie ich rozumienia zastosowanego w rozprawie, w postaci możliwie zwężonej systematyki pojęć.
- 9.1.3. Autor przez niezbyt dobre sformułowanie tytułu rozprawy niepotrzebnie rozszerzył stosowalność uzyskanych wyników. Czy i w jakim zakresie rezultaty rozprawy mają zastosowanie w odniesieniu do dużych systemów elektroenergetycznych?
- 9.1.4. Praca została napisana w języku angielskim, przez co istotnym jej elementem jest streszczenie w języku polskim, (chyba) wymagane stosownymi przepisami. Niestety nie zostało ono przygotowane z odpowiednią starannością. W uwagach szczegółowych zostało to zasygnalizowane; uwidacznia się w nim też niezajomość istniejącej przecież terminologii w języku polskim. Jest to również związane z sygnalizowanym dalej w uwagach szczegółowych pominięciem przez Autora w rozprawie krajowych publikacji dotyczących niezawodności systemu elektroenergetycznego, zabezpieczeń, jakości energii elektrycznej.

### 9.2. Wybrane uwagi szczegółowe:

1. W wykazie słów kluczowych (s. 5) Autor wymienia skróty nazw programów komputerowych (EMTP-ATP, MATLAB, PSCAD, WinAREP), co nie wydaje się być zbyt sensowne.
2. Na s. 7, długi akapit od góry, Autor pisze, że rozprawa częściowo zawiera (*dissertation partially includes*) wyniki jego pracy inżynierskiej i magisterskiej. Tak być nie powinno.
3. Na s. 27 wśród książek dotyczących automatyki zabezpieczeniowej Autor nie wymienił żadnej pozycji w języku polskim. Nie zna czy nie uważa za godne uwagi?
4. S. 28, jak wyżej tylko w odniesieniu do niezawodności.
5. S. 29, jak wyżej tylko w odniesieniu do harmonicznych.
6. S. 45, drugi akapit od dołu, Autor pisze o deterministycznych i probabilistycznych wskaźnikach niezawodności. Raczej chodzi tu o kryteria i podejścia a nie wskaźniki.
7. S. 45, pierwszy akapit od dołu, Autor podaje definicję *reliability engineering* odwołując się do hasła w Wikipedii. Nie uważam, by było to odpowiednie odwołanie.
8. Jak rozumieć *economy*, wymienione jako jedna z sześciu charakterystyk automatyki zabezpieczeniowej na stronie 46?
9. Na stronie 48 Autor wymienia i charakteryzuje 4 postaci z dziedziny niezawodności systemu elektroenergetycznego. Taki wybór jest oczywiście subiektywny, ale dlaczego zabrakło tu R.N. Allana i choćby jednej osoby z Polski, np. J. Sozańskiego?
10. Stwierdzenie z drugiego akapitu od góry strony 49 o nie stosowalności wskaźników SAIDI, SAIFI, CAIDI dla systemu przesyłowego nie jest prawdziwe.
11. W trzecim akapicie od góry strony 49 Autor potwierdza zastrzeżenia Recenzenta co do tytułu rozprawy: „... of a small area of an electric power system”.

12. W stosowanej przez NERC definicji *reliability* (s. 54) jako drugi atrybut niezawodności wymienia się obecnie niezawodność operacyjną (operational reliability).
13. S. 55, czwarty akapit od góry, Autor pisze o wyznaczaniu wskaźników niezawodności poprzez rozwiązanie liniowego układu równań algebraicznych (?). to jest prawdą tylko w przypadku jednorodnego procesu Markowa. Nieco dalej w tym samym akapicie Autor podaje nazbyt ograniczoną klasyfikację procesów Markowa.
14. S. 63, trzeci akapit od góry, Autor powinien najpierw podać listę źródeł harmoniczných a dopiero dalej je opisywać.
15. S. 70, pierwszy akapit podrozdziału 4.6 – kropka w środku zdania.
16. S. 71, drugi akapit od dołu, czy właściwa nazwa programu komputerowego (ETAP)?
17. S. 86, wyniki zależności (16) i (17) są błędne – powinno być 10 razy więcej.
18. S. 87, wynik zależności (20) jest błędny a zatem i znajdująca się poniżej konkluzja nie jest uprawniona.
19. S. 87, wynik zależności (29) jest błędny – powinno być 10 razy więcej.
20. S. 88, wynik zależności (30) jest błędny a zatem i znajdująca się poniżej konkluzja nie jest uprawniona.
21. S. 88, wynik zależności (33) jest błędny a zatem i znajdująca się poniżej konkluzja nie jest uprawniona.
22. S. 89, drugi akapit od dołu, jednostki (pu) powinny być pisane z odstępem po liczbie.
23. S. 96, tablica IV, jednostki ( $\Omega$ ) powinny być pisane z odstępem po liczbie.
24. S. 98, pierwszy akapit pod tytułem podrozdziału, wartości SCR i ESCR oraz oparte na nich wnioski są błędne (patrz uwagi 19, 21, 22).
25. S. 98, pierwszy akapit od dołu, jednostka (pu) powinna być pisana z odstępem po liczbie.
26. S. 99, pierwszy akapit od dołu, jest 16<sup>th</sup> frequency a powinno być 16<sup>th</sup> harmonic.
27. Trudno się zgodzić ze stwierdzeniem z początku ostatniego akapitu na s. 100 o braku dostępności aktualnych, rzeczywistych danych dotyczących harmoniczných w systemach elektroenergetycznych.
28. S. 101, ostatni akapit, nie *criteria* a *criteria*.
29. S. 103, podpis pod rys. 66, jednostką mocy biernej jest var.
30. S. 135, wykaz oznaczeń, określenie „*unavailability failure rate*” budzi wątpliwości.
31. S. 140, akapit pod tytułem podrozdziału, to stwierdzenie jest prawdziwe tylko przy określonych założeniach, tj. dla jednorodnego procesu Markowa i dla prawdopodobieństw granicznych (stacjonarnych).
32. S. 144, proszę o wyjaśnienie zależności (61) - (63).
33. S.154, wykaz oznaczeń, jak w uwadze 31.
34. S. 162, tablica VIII, prawdopodobieństwa podano w %.
35. S. 162 i 163, zależności (93) - (96), brak jednostek przy wyniku obliczeń.
36. S. 164, tablica IX, prawdopodobieństwa podano w %.
37. S. 170, akapit pod tablicą XVII, mowa jest o prawdopodobieństwie (*probability*) a jego wartość podano jako 0.43534 h/year.
38. S. 171, tablica XVIII, analogicznie jak wyżej jako jednostkę prawdopodobieństwa podano h/year.
39. S. 173, nowości naukowej rozprawy Autor doszukuje się w sformułowaniu jej tez, co do których recenzent podtrzymuje swoje zastrzeżenia.
40. S. 177, załączniki powinny być umieszczone po bibliografii a nie przed nią.

41. Załącznik pt. "*Harmonics Limits, Indices, and the Concept of Analysis*" wydaje się zbyt obszerny (ss. 227-267).
42. S. 275, w bibliografii brak jest podstawowych pozycji w języku polskim, są odwołania do Wikipedii ([45], [48], [49], [57]).
43. S. 2, 4, 5, 8, 22, 25 streszczenia, w języku polskim określenie podstacja jest stosowane tylko w odniesieniu do podstacji trakcyjnych a już na pewno nie jest to prawidłowe tłumaczenie słowa substation.
44. S. 4 streszczenia, co to są *stochastyczne wskaźniki niezawodnościowe*?
45. S. 4 streszczenia, zdanie „*Stochastyczne procesy Markowa potrzebują do wyliczenia prawdopodobieństw awarii wskaźniki niezawodnościowe, oszacowane w trakcie statystycznej analizy zapisów uszkodzeń danego urządzenia lub elementu sieci energetycznej*” to przykład niedostatecznej staranności w przygotowaniu streszczenia w języku polskim. W tej i w dalszych uwagach uwidacznia się też nieznamość istniejącej przecież terminologii w języku polskim.
46. S. 5 streszczenia, zdanie „*Uproszczone, generyczne modele Markowa dla przekładników, uwzględniające odkształcenia harmoniczne, a także niezawodność czynną (ang. *dependability*) i bierną (ang. *security*) są następnie użyte do analizy poprawności działania małego obszaru systemu elektroenergetycznego (analiza drzewa błędów).*” to kolejne potwierdzenie wcześniejszej uwagi.
47. S. 6 streszczenia, o jakie technologie chodzi w zdaniu „*Dysertacja to także przegląd najnowszych technologii z zakresu niezawodności ...*”?
48. S. 8 streszczenia, „*wskaźniki przejść*” to prawdopodobieństwa czy intensywności przejść? Analogicznie „*indeksy*” to zapewne intensywności.
49. S. 13 streszczenia, nazywanie tego co przedstawiono na rys. 4 „*siecią przesyłową*” a nawet „*systemem przesyłowym*” to lekka przesada.

## 10. Strona redakcyjno – wydawnicza

Rozprawa została zredagowana i wydana z dostateczną starannością – niektóre zastrzeżenia podano w uwagach szczegółowych. Mniej istotne, szczegółowe uwagi o charakterze w zasadzie redakcyjnym i stylistycznym umieszczono na recenzowanym egzemplarzu pracy, lecz ich zakres i waga nie umniejszają wartości pracy i nie wymagają autorskich ingerencji w tekst.

## 11. Wniosek końcowy

W przekonaniu recenzenta rozprawa doktorska mgra inż. Jakuba Jędrzejczaka pt. „*Reliability assessment of protective relays in harmonic-polluted power systems*” stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie naukowej Elektrotechnika (obszar elektroenergetyka), a także umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Rozprawa mgra inż. Jakuba Jędrzejczaka spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, sprecyzowane w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. Nr 65, poz. 595 z dnia 16 kwietnia 2003 r., z późniejszymi zmianami).

Stawiam wniosek o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgra inż. Jakuba Jędrzejczaka pt. „*Reliability assessment of protective relays in harmonic-polluted power systems*” do publicznej obrony.

*Grzegorz Józef*