

**Załącznik nr 3** do Wniosku habilitacyjnego  
Wnioskodawca: dr inż. Adam Smolarczyk

**AUTOREFERAT HABILITACYJNY  
(W JĘZYKU POLSKIM)**

1. Imię i nazwisko: **Adam Smolarczyk**

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania, tytułu rozprawy doktorskiej i nazwisk osób, które pełniły funkcje promotora i recenzentów

- Stopień doktora nauk technicznych w zakresie elektrotechniki, nadany uchwałą Rady Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej z dnia 13 października 1999 r., promotor w przewodzie doktorskim: prof. dr hab. inż. Jan Machowski, recenzenci w przewodzie doktorskim: prof. dr hab. inż. Marian Sobierajski, prof. dr hab. inż. Antoni Dmowski, tytuł rozprawy doktorskiej: „Automatyka przeciwkołysaniowo-odciążająca nie powodująca wyłączenia generatorów”.
- Tytuł magistra inżyniera, uzyskany na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej, na kierunku Elektrotechnika, w zakresie elektroenergetyki uzyskany z wynikiem celującym w dniu 27 czerwca 1995 r., tytuł pracy: „Budowa i działanie zabezpieczenia mikroprocesorowego z wykorzystaniem procesora SAB 80C166”, promotor: mgr inż. Ryszard Kowalik.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

- 12/2018 – nadal  
Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny, Instytut Elektroenergetyki, Warszawa  
Starszy wykładowca
- 12/1999 – 11/2018  
Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny, Instytut Elektroenergetyki, Warszawa  
Adiunkt
- 10/1995 – 09/1999  
Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny, Warszawa  
Uczestnik studiów doktoranckich

4. Wskazanie osiągnięcia naukowego, uzyskanego po otrzymaniu stopnia doktora, stanowiącego znaczny wkład w rozwój dyscypliny **elektrotechnika** zgodnie z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki

a) tytuł osiągnięcia naukowego (zgodnie z wnioskiem): **„NOWOCZESNE METODY BADANIA POPRAWNOŚCI DZIAŁANIA BLOKAD KOŁYSANIOWYCH ZABEZPIECZEŃ ODLEGŁOŚCIOWYCH”**

b) wykaz prac naukowych (autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, nazwa czasopisma, tom, strony), dokumentujących osiągnięcie (osiągnięcia) naukowe, stanowiące podstawę ubiegania się o stopień doktora habilitowanego

Monografia habilitacyjna:

[H1] A.K. Smolarczyk, “Nowoczesne metody badania poprawności działania blokad kołysaniowych zabezpieczeń odległościowych”, Politechnika Warszawska, Prace Naukowe “Elektryka” z. 149, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2019, ISBN 978-83-7814-882-1, ISSN 0137-2319, 180 stron, recenzenci wydawniczy: dr hab. inż. Piotr Miller, prof. PL; prof. dr hab. inż. Adrian Halinka

*Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu całości monografii.*

*Mój udział procentowy wynosi: **100%***

c) omówienie celu naukowego w/w pracy i osiągniętych wyników, wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.

## 1. WSTĘP

### 1.1. WPROWADZENIE

Elektroenergetyczna automatyka zabezpieczeniowa eliminacyjna (EAZE) wchodzi w skład elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej (EAZ) [1, 2]. EAZE zajmuje się procesami eliminowania z pracy w systemie elektroenergetycznym (SEE) elementów (np. linii, transformatorów, generatorów) dotkniętych zakłóceniami, które nie mogą być tolerowane ze względu na dalszą bezpieczną pracę SEE. Układowi EAZE stawia się wymagania [3, 1, 4, 2]: (a) selektywności (wybiórczości) (ang. *selectivity*), (b) niezawodności (ang. *reliability*), (c) szybkości (ang. *speed*), czułości (ang. *sensitivity*).

Jako poprawne działanie układu EAZE, należy rozumieć jego działanie spełniające oczekiwania użytkownika zarówno w stanach normalnych jak i zakłóceń. Zwykle poprawne działanie układu EAZE jest kompromisem między wymaganiami dotyczącymi selektywności, niezawodności, szybkości i czułości.

Podstawowymi elementami układów EAZE są zabezpieczenia elektroenergetyczne. Różne rodzaje zabezpieczeń elektroenergetycznych są stosowane do ochrony elementów SEE takich jak linie, transformatory, generatory, silniki, dławiki kompensacyjne, baterie kondensatorów, sprzęgła, szyny zbiorcze. Zabezpieczenia odległościowe są jednymi z podstawowych urządzeń stosowanych do ochrony przed skutkami zakłóceń linii napowietrznych wysokich (WN) i najwyższych napięć (NN). Ponadto są one wykorzystywane (jako zabezpieczenia rezerwowe) do ochrony innych elementów SEE takich jak transformatory sieciowe, duże generatory, bloki wytwórcze generator-transformator, sprzęgła szyn stacji. Mimo stosowania w coraz szerszym zakresie zabezpieczeń odcinkowych do ochrony linii przesyłowych można założyć, że rola zabezpieczeń odległościowych jako "drugich" zabezpieczeń podstawowych nie będzie malała.

Z punktu widzenia zabezpieczeń odległościowych jako "typowe" zakłócenia w SEE można uznać zwarcia metaliczne lub zwarcia o małej rezystancji przejścia w chronionym elemencie SEE. Do "nietypowych" stanów zakłóceń, w których funkcja zabezpieczenia odległościowego może działać niezgodnie z oczekiwaniami można między innymi zaliczyć: (a) kotłowania mocy, (b) zwarcia występujące podczas kotłowania mocy w trakcie działania blokady kotłowania, (c) zmiany obciążeń ruchomych powodujące powolne zmiany impedancji ruchomej, (d) zwarcia wysokooporowe, (e) kotłowania mocy podczas przerwy bezprądowej cyklu SPZ 1-fazowego.

Zadaniem dodatkowych funkcji zabezpieczeniowych implementowanych w przekaźnikach odległościowych jest wspomaganie podstawowej funkcji zabezpieczenia odległościowego w nietypowych stanach zakłóceń SEE. Do funkcji dodatkowych "wspomagających" podstawową funkcję zabezpieczenia odległościowego można zaliczyć: funkcję blokady kotłowania, funkcję telezabezpieczenia, funkcję blokady przed załączeniem na zwarcie, funkcje prądowe, funkcje napięciowe, funkcję rezerwy wyłącznikowej i inne. **W monografii główną uwagę poświęcono funkcji blokady kotłowania, której głównym zadaniem jest blokowanie działania funkcji zabezpieczenia odległościowego podczas kotłowania mocy.**

Duże skomplikowanie przekaźników elektroenergetycznych oraz duża liczba funkcji zabezpieczeniowych, monitorujących i sterujących w nich zawartych powoduje, że wymagają one ciągłego sprawdzania. Sprawdzanie to wykonywane jest zarówno w fazie produkcji jak i eksploatacji. Mnogość rzeczy jakie powinny podlegać sprawdzeniu powoduje, że badania przekaźników elektroenergetycznych powinny być wykonywane wg określonych procedur badawczych. Jak ważną rolę odgrywa fakt badania przekaźników elektroenergetycznych można stwierdzić na podstawie tego, że w większości podręczników dotyczących EAZ wśród innych poruszanych zagadnień pewną uwagę poświęca się badaniom przekaźników elektroenergetycznych.

Stosowane są różne podziały badań przekaźników elektroenergetycznych. Według najbardziej obszernego podziału [5] rozróżnia się dwa główne rodzaje badań (testów) przekaźników: (a) testy typu

i (b) testy indywidualne. Wśród testów typu istotną rolę odgrywają: (a) funkcjonalne testy zgodności, (b) funkcjonalne testy działania i (c) systemowe testy działania.

Należy podkreślić, że w specyfikacjach technicznych wykorzystywanych przez spółkę Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A. [6] dotyczących wymagań technicznych związanych z urządzeniami EAZ, używanymi w krajowych stacjach elektroenergetycznych NN i WN obowiązuje podział badań urządzeń zabezpieczeniowych zbliżony do podziału opisanego w raporcie [5].

Od czasu pojawienia się raportu [5] minęło wiele lat. W międzyczasie pojawiły się nowe opracowania międzynarodowe dotyczące badania urządzeń zabezpieczeniowych. Można do nich zaliczyć normę organizacji IEEE [8] oraz raport organizacji CIGRE [7]. W raporcie [8] dokonano podziału testów urządzeń zabezpieczeniowych, który mimo różniącego się nazewnictwa zbliżony jest do opisu przedstawionego wyżej. W raporcie [7] opisano poszczególne fazy testowania urządzeń zabezpieczeniowych wzorując się na normie dotyczącej standardu IEC 61850.

W normie [9] dotyczącej zabezpieczeń odległościowych przedstawiono wytyczne, jak należy badać przekaźniki odległościowe, głównie pod kątem ich podstawowej funkcji zabezpieczenia odległościowego. **Nie ma w niej jednak wytycznych, jak należy je sprawdzać w przypadku kołysań mocy, a co za tym idzie jak należy sprawdzać funkcje blokad kołysaniowych.**

## 1.2. CEL NAUKOWY MONOGRAFII

Aby utrzymać stabilność pracy SEE i zapobiec zjawiskom kaskadowego wyłączenia bardzo ważne jest selektywne wyłączenie zwarć, również w trakcie kołysań mocy. **W monografii [H1] główny nacisk położono na analizę zagadnień związanych z poprawnością działania zabezpieczeń odległościowych w trakcie kołysań mocy w SEE i zakłóceń w ich trakcie występujących.** Główną uwagę poświęcono poprawności działania blokad kołysaniowych w różnych nietypowych sytuacjach.

Innym zagadnieniem, któremu poświęcono uwagę było zagadnienie badania przekaźników odległościowych pod kątem poprawności działania ich blokad kołysaniowych, w różnego rodzaju warunkach zakłóceń. Uwagę poświęcono sposobom modelowania różnego rodzaju zakłóceń zwarciovych podczas kołysań mocy i sprawdzeniu jak zmieniają się sygnały związane z kołysaniami mocy i jak zachowa się badany przekaźnik odległościowy. W ramach tej części pracy opracowano metody badań jakim powinny podlegać blokady kołysaniowe.

W ramach monografii [H1] opisano symulator IEn-RTS wykorzystywany do przeprowadzenia badań przekaźników elektroenergetycznych w zamkniętej pętli. Symulator taki powstał i jest ciągle rozwijany w Laboratorium Instytutu Elektroenergetyki Politechniki Warszawskiej (habilitant ma duży udział w powstaniu koncepcji jego działania, budowie i rozbudowie). Założeniem jest, aby zbudowany symulator był tańszą alternatywą w stosunku do bardzo drogich symulatorów komercyjnych.

Mając na uwadze powyższe spostrzeżenia, w monografii [H1] sformułowano następującą tezę: **Istnieją możliwości poprawienia istniejących, niezbyt doskonałych, metod badania (testowania) zabezpieczeń odległościowych, dzięki którym można poprawić poprawność ich działania, a co za tym idzie zwiększyć bezpieczeństwo systemu elektroenergetycznego.**

Do podstawowych celów monografii można zaliczyć:

- opracowanie modeli matematycznych do symulacji wybranych zakłóceń mogących mieć wpływ na poprawność działania zabezpieczeń odległościowych,
- udoskonalenie metod badania (testowania) zabezpieczeń odległościowych pod kątem poprawienia poprawności ich działania,
- sprawdzenie poprawności działania wybranych funkcji zabezpieczenia odległościowego podczas wybranych awaryjnych stanów pracy SEE.

## 1.3. SYSTEM ZABEZPIECZEŃ ZWIĄZANYCH Z KOŁYSANIAMI MOCY

Najsilniejszymi „prądowo” zakłóceniami w pracy SEE są zwarcia. Najczęściej występującymi zvarciami groźnymi dla SEE są zwarcia w sieci przesyłowej. Zvarciami te można podzielić na trzy rodzaje w sposób zasadniczy różniące się pod względem konsekwencji dla pracy SEE:

- zwarcia w głębi sieci przesyłowej dalekie od elektrowni nie stanowiące zagrożenia stabilności SEE i nie powodujące istotnych dla SEE kołysań mocy,
- zwarcia w sieci przesyłowej w pobliżu elektrowni nie stanowiące zagrożenia stabilności SEE lecz powodujące silne synchroniczne kołysania mocy,
- zwarcia w sieci przesyłowej w pobliżu elektrowni powodujące utratę stabilności SEE poprzez wypadnięcie z synchronizmu generatorów jednej lub więcej elektrowni oraz powodujące bardzo silne asynchroniczne kołysania mocy.

Z punktu widzenia bezpieczeństwa pracy SEE istotne są dwa ostatnie rodzaje zwarć. Należy podkreślić, że innymi przyczynami kołysań mocy w SEE oprócz zwarć mogą być nagłe zmiany obciążenia, działanie automatyki SPZ, operacje łączeniowe.

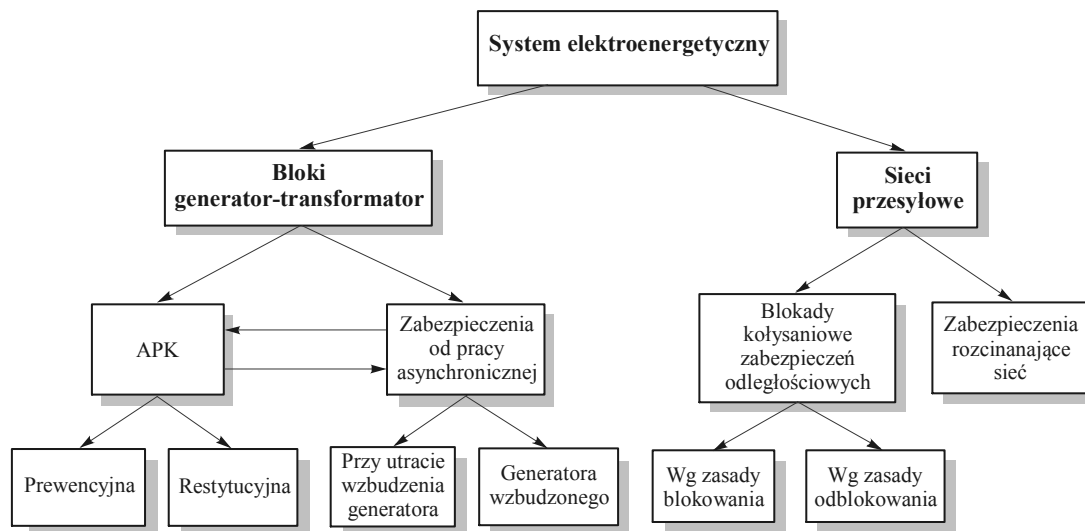
Gdy dane zwarcie nie powoduje utraty synchronizmu SEE w sieci pojawiają się kołysania mocy, którym towarzyszą duże zmiany prądów i napięć. Kołysania te charakteryzują się tym, że chwilowemu zwiększaniu się prądu w danej linii towarzyszy chwilowe zmniejszanie się napięcia. Równoczesne zwiększanie się prądu i malenie napięcia oznacza zmniejszanie się impedancji widzianej przez zabezpieczenia odległościowe. Gdy impedancja widziana przez zabezpieczenie odległościowe zmniejszy się do wartości odpowiadającej jej strefom pomiarowym może dojść do zbędnego wyłączenia linii. Wyłączenie takie może w sposób istotny osłabić sieć przesyłową powodując wystąpienie przeciążenia innych linii i w konsekwencji ich wyłączenie. W celu nie dopuszczenia do zbędnego działania zabezpieczeń odległościowych w trakcie kołysań mocy zabezpieczenia wyposaża się w *blokady kołysaniowe*. Blokady kołysaniowe rozróżniają zmianę impedancji wywołaną kołysaniem mocy od zmiany impedancji wywołanej zwarcie i w przypadku powstania kołysań mocy powodują zablokowanie działania zabezpieczenia odległościowego.

Zasada działania blokad kołysaniowych oparta jest na ocenie szybkości zmian impedancji lub innych sygnałów. Przy bardzo szybkich kołysaniach asynchronicznych następują szybkie zmiany amplitud prądów i napięć. Zmiany takie blokada kołysaniowa może błędnie zidentyfikować jako zwarcie i nie dojdzie do zablokowania zabezpieczenia. Nastąpi zbędne wyłączenie linii przesyłowej lub nawet kilku linii przesyłowych. Im szybsze są asynchroniczne kołysania mocy tym większe jest prawdopodobieństwo, że blokady kołysaniowe nie zadziałają poprawnie i dojdzie do zbędnych wyłączeń. Są również przypadki, przy których blokady kołysaniowe mogą pobudzać się zbędnie i zbędnie blokują zabezpieczenia.

Aby nie dopuścić do pracy asynchronicznej generatorów po wystąpieniu zwarć w sieci przesyłowej można stosować specjalne środki przeciwdziałające pracy asynchronicznej. W Polsce jedynym takim środkiem jest automatyka przeciwkołysaniowa (APK) [10, 11]. Automatyka ta charakteryzuje się bardzo prostymi algorytmami działania, co może być przyczyną zarówno zbędnego jak i brakującego działania automatyki. W przypadku działania brakującego dochodzi do pracy asynchronicznej generatorów. Praca taka nie jest dopuszczalna. Środkiem zapobiegającym uszkodzeniu generatorów przy pracy asynchronicznej mogą być *zabezpieczenia od poślizgu biegunów*.

Wyłączenie z SEE generatorów, które utraciły synchronizm nie zawsze jest korzystne z punktu widzenia odbudowy SEE po zaistniałym zakłóceniu. W niektórych konfiguracjach SEE generatory (elektrownie) tworzą grupy, które wskutek silnego powiązania z siecią mają tendencję utrzymywania między sobą synchronizmu. Po zaistnieniu silnego zakłócenia cała grupa generatorów (elektrowni) traci synchronizm i pracuje asynchronicznie względem pozostałej części SEE. W takim przypadku korzystnie jest rozciąć SEE na wyspy pracujące asynchronicznie w takich miejscach, które zapewniają w przybliżeniu zachowanie bilansu mocy wewnątrz wyspy. Do podziału SEE na wyspy służą specjalne *zabezpieczenia rozcinające sieć*.

Urządzenia zabezpieczeniowe związane z kołysaniami mocy w SEE tworzą razem system zabezpieczeń (ang. *out-of-step protection system*). Strukturę tego systemu zabezpieczeń ilustruje [rys. 1.1](#). Jest oczywiste, że dobór nastawień zabezpieczeń wchodzących w skład tego systemu musi być wzajemnie skoordynowany. W monografii [H1] skupiono się na zagadnieniach związanych z poprawnym działaniem blokad kołysaniowych zabezpieczeń odległościowych wchodzących w skład przedstawionego podziału zabezpieczeń.



Rys. 1.1. Podział zabezpieczeń związanych z kołysaniami mocy [12]

#### 1.4. ROLA ZABEZPIECZEŃ ODLEGŁOŚCIOWYCH W SYSTEMIE ZABEZPIECZEŃ ZWIĄZANYCH Z KOŁYSANIAMI MOCY

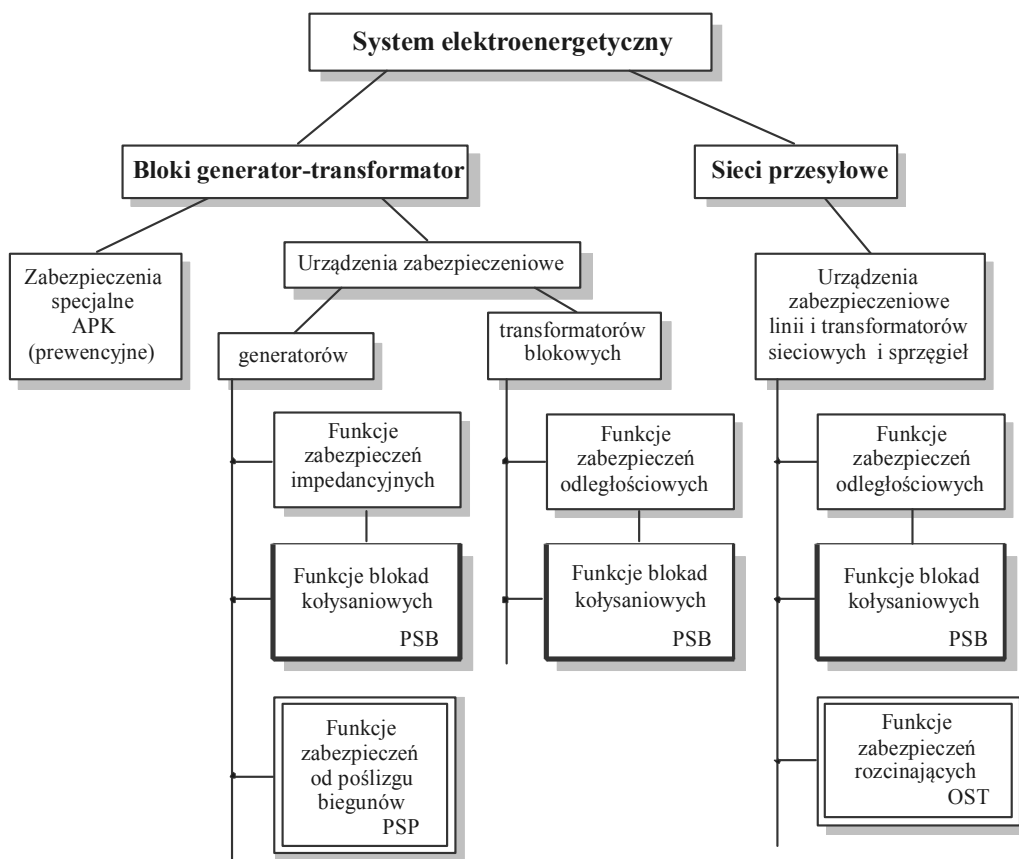
Zabezpieczenia odległościowe wykorzystywane są do ochrony większości elementów SEE od skutków zakłóceń. Kołysania mocy wywoływane są zakłóceniami w SEE. W przypadku zachowania synchronizmu (stabilność SEE) są to *kołysania synchroniczne*. W przypadku utraty synchronizmu (utrata stabilność SEE) są to *kołysania asynchroniczne*. Filozofia działania zabezpieczeń związanych z kołysaniami mocy jest prosta: unikać działania zabezpieczeń SEE podczas kołysań mocy synchronicznych i chronić system przed stanami pracy asynchronicznej.

Z kołysaniami mocy związany jest system zabezpieczeń elektroenergetycznych (ang. *out-of-step protection system, out-of-step relaying*), którego strukturę przedstawiono na rys. 1.2. W stosunku do wcześniej przedstawionego rys. 1.1 uwzględniono tu fakt, że w nowoczesnych urządzeniach cyfrowych poszczególne zabezpieczenia występują jako *funkcje zabezpieczeniowe*. Funkcje te mogą być aktywowane lub nie przez użytkownika.

W skład omawianego systemu zabezpieczeń wchodzi:

- zabezpieczenia specjalne (automatyka przeciwkołysaniowa APK) przeciwdziałające utracie synchronizmu generatorów,
- funkcje blokad kołysaniowych zabezpieczeń podimpedancyjnych generatorów PSB (ang. *power swing blocking*),
- funkcje zabezpieczeń generatorów od poślizgu biegunów (pracy asynchronicznej przy załączonym wzbudzeniu) PSP (ang. *pole slip protection*),
- funkcje blokad kołysaniowych zabezpieczeń odległościowych transformatorów blokowych PSB (ang. *power swing blocking*),
- funkcje blokad kołysaniowych PSB (ang. *power swing blocking*) zabezpieczeń odległościowych linii, transformatorów sieciowych i sprzęgieł szyn zbiorczych stacji WN,
- funkcje zabezpieczeń od pracy asynchronicznej w sieci nazywane funkcjami zabezpieczeń rozcinających sieć OST (ang. *out-of-step tripping*).

Jest oczywiste, że dobór nastawień wszystkich funkcji wchodzących w skład omawianego systemu zabezpieczeń powinien być wzajemnie skoordynowany w myśl wspólnej koncepcji ochrony SEE. Niestety, nie udało się znaleźć publikacji obejmującej opis koncepcji nastawień całego systemu omawianych zabezpieczeń. Poszczególne dokumentacje [13, 14, 15] traktują ten problem wyrywkowo.



Rys. 1.2. Podział zabezpieczeń i ich funkcji związanych z kołysaniami mocy [12]

Koncepcja nastawień systemu zabezpieczeń związanego z kołysaniami mocy w SEE powinna dotyczyć wszystkich zabezpieczeń wymienionych na rys. 1.2. Różne koncepcje nastawień zostały przeanalizowane w monografii [H1]. W proponowanym wariantcie koncepcji nastawień:

(a) W funkcje blokad kołysaniowych PSB wyposaża się te zabezpieczenia odległościowe sieci przesyłowej, które mogą działać w trakcie kołysań mocy. Wyboru dokonuje się na podstawie wielowariantowej analizy stabilności SEE wykonywanej dla wielu miejsc zwarć i rozmaitych stanów pracy SEE.

Funkcję blokady kołysaniowej PSB uruchamia się dla stref szybkich działających z czasem poniżej 1 s dla linii wewnątrz SEE.

W zabezpieczeniach dla których wymagane są blokady kołysaniowe, nie należy nastawiać dużych zasięgów stref pomiarowych i dużego zasięgu strefy rozruchowej. Wynika to z faktu, że przy dużym zasięgu strefy rozruchowej po likwidacji zwarcia trajektoria impedancji nie wyskoczy poza charakterystykę detektora kołysań i blokada nie zadziała poprawnie.

(b) Zabezpieczenia wszystkich generatorów dużej mocy wyposaża się w funkcje zabezpieczenia od poślizgu biegunów PSP, a dla stref pomiarowych funkcji zabezpieczeń odległościowych i podimpedancyjnych działających z czasem poniżej 1 s uaktywnia się blokady kołysaniowe PSB.

Dla generatorów małej mocy dopuszcza się, że w trakcie kołysań mocy mogą być wyłączone przez zabezpieczenia odległościowe lub podimpedancyjne i dla tych zabezpieczeń nie stosuje się blokad kołysaniowych;

(c) W sieci przesyłowej w miejscach z góry ustalonych w oparciu o analizy stabilności SEE instaluje się zabezpieczenia OST od pracy asynchronicznej w sieci powodujące rozcinanie sieci na wyspy o możliwie dobrze zbilansowanej generacji i poborze mocy. Wybór tych miejsc i decyzja użycia OST musi być poparta wielowariantowymi i szczegółowymi analizami stabilność SEE.



W przypadku zastosowania jako zabezpieczeń podstawowych w sieci WN zabezpieczeń odcinkowych, a zabezpieczeń odległościowych jedynie jako rezerwowych, można by przyjąć, że wszystkie zabezpieczenia odległościowe mają aktywną funkcję blokady kotłysaniowej pierwszych dwóch stref pomiarowych, dzięki czemu operator nie obciąża się kosztownymi analizami określającymi dla których zabezpieczeń, należy uaktywniać blokady kotłysaniowe.

### 1.5. ZASADY DZIAŁANIA I RODZAJE BLOKAD KOŁYSANIOWYCH ZABEZPIECZEŃ ODLEGŁOŚCIOWYCH

Funkcje blokad kotłysaniowych zabezpieczeń odległościowych do detekcji kotłysań mocy wykorzystują określone metody. Metody tradycyjne wykorzystują pomiar czasu przejścia impedancji ruchowej  $Z(t)$  między charakterystykami zewnętrzną i wewnętrzną blokady, natomiast metody zaawansowane wykorzystują zmiany sygnału  $d(U \cos \varphi)/dt$ , składniki nałożone (przyrostowe) prądów (ang. *superimposed components*), ciągły pomiar impedancji ruchowej.

Urządzenia blokujące służą do blokowania zabezpieczeń odległościowych w trakcie kotłysań mocy po to, by wskutek wejścia impedancji ruchowej do strefy działania zabezpieczenia nie doszło do zbędnego wyłączenia linii lub innego elementu SEE, do ochrony którego zastosowano tego typu zabezpieczenie. Powinny one też spowodować odblokowanie zabezpieczenia odległościowego w przypadku, gdy podczas kotłysań mocy powstanie zwarcie. Aktualnie w cyfrowych rozwiązaniach zabezpieczeń blokady kotłysaniowe występują jako funkcje w cyfrowych urządzeniach zabezpieczeniowych.

Są dwie przeciwstawne zasady pozwalające na realizację celu jakim jest blokowanie zabezpieczeń odległościowych w trakcie kotłysań mocy, są to:

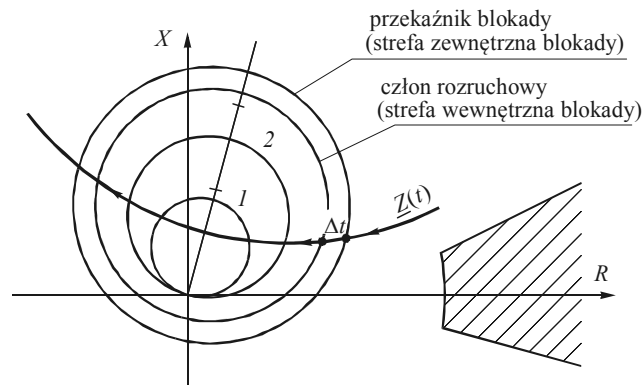
- (1) zasada blokowania zabezpieczenia w momencie pojawienia się kotłysań mocy,
- (2) zasada odblokowywania zabezpieczenia w momencie pojawienia się zwarcia.

Obie zasady mają swoje wady i zalety. Ideałem byłoby stosowanie obu zasad (blokowania i odblokowywania) w taki sposób, że jako podstawową stosowano by zasadę (1) a w trakcie kotłysań uruchamiano zasadę (2) pozwalającą na szybkie zdjęcie blokady (1) w przypadku powstania zwarcia w trakcie kotłysań. Należy podkreślić, że producenci wszystkich współcześnie produkowanych zabezpieczeń odległościowych starają się stosować zasadę (1) uzupełnioną o zasadę (2).

#### 1.5.1. Blokada typu $Z(t)$

Najczęściej stosowaną jest zasada blokowania wykorzystująca szybkość zmiany impedancji mierzonej przez zabezpieczenie odległościowe. Blokada taka współpracuje z członem rozruchowym zabezpieczenia odległościowego. Blokada tego typu do swego działania zwykle wykorzystuje obliczoną składową zgodną mierzonej impedancji ruchowej lub też mierzona jest impedancja ruchowa międzyfazowa, przy czym wymagane jest pobudzenie dla wszystkich trzech pętli zwarciovych. W innych rozwiązaniach wykorzystywane są pomiary trzech impedancji fazowych. Zasadę działania blokady ilustruje [rys. 1.3](#). Na rysunku tym przyjęto, że charakterystyki zabezpieczenia są kołowe. Pokazano charakterystyki dwóch stref pomiarowych zabezpieczenia odległościowego oraz strefę jego członu rozruchowego. Przekaznik (lub funkcja) blokady kotłysaniowej ma również charakterystykę kołową o zasięgu większym od charakterystyki rozruchowej zabezpieczenia odległościowego. Zgodnie z powyższymi rozważaniami w trakcie kotłysań wektor impedancji mierzonej przez zabezpieczenie może wkroczyć do strefy zabezpieczenia odległościowego.

W przypadku kotłysań asynchronicznych trajektoria impedancji  $Z(t)$  przechodzi przez strefy pomiarowe zabezpieczenia, ale wcześniej przez charakterystykę przekaznika blokady oraz charakterystykę członu rozruchowego. Człon czasowy blokady mierzy czas przejścia między charakterystyką przekaznika blokady oraz charakterystyką członu rozruchowego zabezpieczenia. Gdy czas ten jest dłuższy od nastawionej wartości ( $\Delta t$ ) następuje podanie sygnału na zablokowanie wybranych stref zabezpieczenia odległościowego. W trakcie zwarcia szybkość zmiany impedancji jest duża i czas przejścia jest krótszy od nastawionej wartości. Blokowanie nie jest uruchamiane. Charakterystyki członów rozruchowych oraz blokad kotłysaniowych nie muszą być kołowe jak na [rys. 1.3](#).



**Rys. 1.3.** Impedancyjne charakterystyki zabezpieczenia odległościowego i blokady kołysaniowej; 1, 2 – strefy zabezpieczenia odległościowego

Typowo czas  $\Delta t$  nastawiany jest na nie mniej niż 20 ms (1÷3 okresów częstotliwości podstawowej), a zasięg charakterystyki rozruchowej blokady nastawiany jest na 135÷150% zasięgu charakterystyki rozruchowej funkcji zabezpieczenia odległościowego.

### 1.5.2. Blokada typu $d(U \cos \varphi) / dt$

Alternatywnym sposobem identyfikowania kołysań mocy dla potrzeb pobudzenia blokady kołysaniowej jest zastosowanie pochodnej czasowej sygnału wrażliwego na zmiany kąta obciążenia  $\delta$ . Sygnałem takim jest sygnał  $U \cos \varphi$ . Zależność tego sygnału od kąta obciążenia określa wzór:

$$U \cos \varphi = \frac{E_a E_b \sin \delta}{\sqrt{E_a^2 + E_b^2 - 2E_a E_b \cos \delta}} \quad (1.1)$$

gdzie:  $E_a$ ,  $E_b$  - moduły napięć źródłowych w układzie jednomaszynowym,  $U$  - moduł napięcia w punkcie przełącznikowym,  $\delta$  - kąt obciążenia będący różnicą argumentów sił elektromotorycznych  $\underline{E}_a$  i  $\underline{E}_b$ ,  $\varphi$  - kąt opóźnienia prądu względem napięcia w punkcie przełącznikowym.

Dla przypadku, gdy  $E_a = E_b = E$  wzór (1.1) upraszcza się do wzoru:

$$U \cos \varphi = E \cos \frac{\delta}{2} \quad (1.2)$$

Pochodna czasowa tego sygnału dana jest wzorem:

$$\frac{d(U \cos \varphi)}{dt} \cong \frac{\partial(U \cos \varphi)}{\partial \delta} \cdot \frac{d\delta}{dt} = \beta \cdot \frac{d\delta}{dt} \quad (1.3)$$

gdzie:

$$\beta = \frac{\partial(U \cos \varphi)}{\partial \delta} \quad (1.4)$$

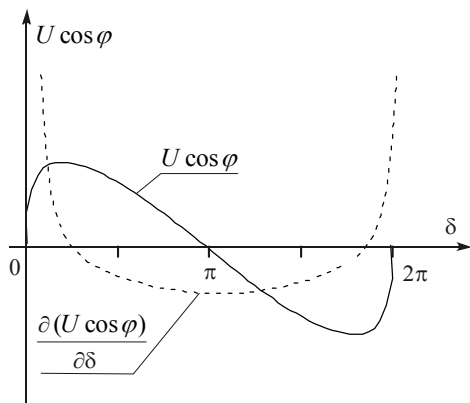
jest współczynnikiem zależnym od kąta nachylenia charakterystyki  $U \cos \varphi$ . Przykładową zależność sygnału  $U \cos \varphi$  mierzonego w punkcie przełącznikowym i jego pochodnej (współczynnik  $\beta$ ) od kąta obciążenia  $\delta$  pokazano na rys. 1.4.

W szerokim zakresie kątów obciążenia wokół  $\delta = 180^\circ$  (to jest wtedy, gdy trajektoria impedancji przechodzi przez strefy pomiarowe zabezpieczenia odległościowego) współczynnik  $\beta$  jest ujemny, gdyż charakterystyka  $U \cos \varphi$  jest nachylona tak, że sygnał  $U \cos \varphi$  maleje, gdy kąt  $\delta$  wzrasta. Oznacza to, że przy dodatnim poślizgu  $\Delta \omega = (d\delta / dt) > 0$  pochodna czasowa sygnału  $d(U \cos \varphi) / dt$  w tym obszarze jest ujemna. Tylko w pobliżu kątów  $\delta = 0^\circ$  oraz  $\delta = 360^\circ$  następuje zmiana kąta nachylenia.

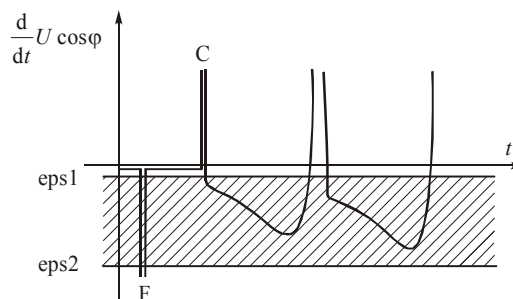
Przełącznik blokady kołysaniowej oparty na omawianym sygnale działa w następujący sposób. Dla pochodnej sygnału  $d(U \cos \varphi) / dt$  ustala się (rys. 1.5) dwie ujemne wartości progowe eps1 oraz eps2. Przełącznik blokady zostaje pobudzony, gdy sygnał  $d(U \cos \varphi) / dt$  znajdzie się między tymi progami. Próg eps1 służy do stwierdzenia, że sygnał osiągnął wartość ujemną. Próg eps2 służy do



wyeliminowania wpływu skoków sygnału w momentach zakłóceń (punkty F oraz C). Gdy próg ten jest przekroczony nie ma pobudzenia przekaźnika. Pobudzenie przekaźnika blokady następuje po wejściu sygnału w strefę między wartości progowe eps1 oraz eps2, gdy spełnione są dwa dodatkowe warunki: (a) człon rozruchowy zabezpieczenia odległościowego jest pobudzony, (b) w sieci występuje symetria fazowa.



**Rys. 1.4.** Przykładowa zależność sygnału  $U \cos \varphi$  mierzonego w punkcie przekąźnikowym i jego pochodnej od kąta  $\delta$



**Rys. 1.5.** Dwie wartości progowe sygnału  $d(U \cos \varphi) / dt$  [16]

Sygnał  $d(U \cos \varphi) / dt$  jest dość często wykorzystywany w algorytmach blokad kołysaniowych. Przykłady innych rozwiązań blokad opartych na tym sygnale opisano w [H1]. Dodatkowo w monografii [H1] opisano zasadę działania blokady typu  $\Delta I$  oraz detekcję kołysań mocy wykorzystującą: (a) ciągłe obliczanie impedancji ruchowej, (b) monitorowanie kątów napięć fazowych oraz przeanalizowano możliwość wykorzystania pomiarów synchronicznych do detekcji kołysań mocy i pracy asynchronicznej.

## 2. ANALIZA WYBRANYCH CZYNNIKÓW MOGĄCYCH MIEĆ WPŁYW NA POPRAWNOŚĆ DZIAŁANIA ZABEZPIECZEŃ ODLEGŁOŚCIOWYCH

Aby utrzymać stabilność pracy SEE i zapobiec zjawiskom kaskadowego wyłączenia jego elementów bardzo ważne jest selektywne wyłączanie zwarć, zwłaszcza w trakcie kołysań mocy. Poniżej dokonano analizy wybranych sytuacji i czynników, które mogą mieć wpływ na niepoprawne (nieselektywne) działanie zabezpieczeń odległościowych i blokad kołysaniowych (brakujące lub zbędne pobudzenia blokad), w które są one wyposażone. Należy podkreślić, że zwykle wymienione przyczyny błędnego działania blokad kołysaniowych nie występują samodzielnie. Przykładowo, zwarcia wysokooporowe występują w powiązaniu ze zwarciami łukowymi i mają zwykle charakter zwarć jednofazowych.

### 2.1. KOŁYSANIA MOCY W DŁUGICH SILNIE OBCIĄŻONYCH LINIACH

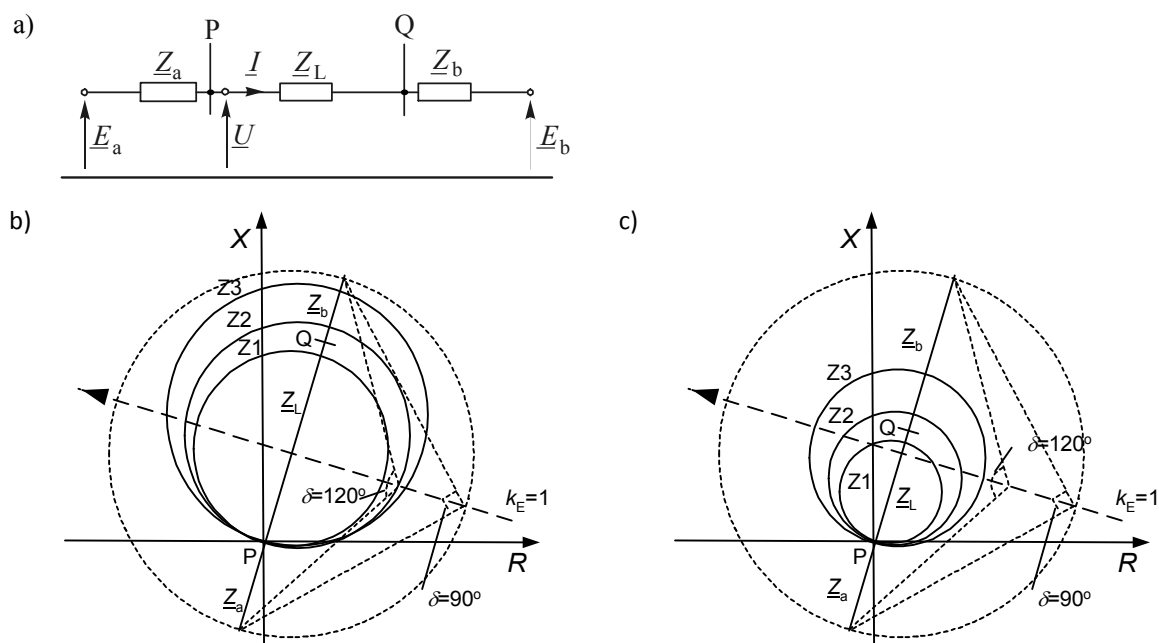
Klasyczne blokady impedancyjne typu  $Z(t)$  mogą niepoprawnie działać (bądź nie mieć warunków do poprawnego działania) w przypadku silnie obciążonych linii, ponieważ:

- w przypadku silnie obciążonych linii nie ma wystarczającej ilości miejsca (na płaszczyźnie  $X(R)$ ) dla charakterystyki blokady kołysaniowej, która powinna znajdować się między charakterystyką normalnego obciążenia linii i charakterystyką rozruchową zabezpieczenia odległościowego. W takim przypadku blokada nie jest w stanie poprawnie rozróżnić zwarć od szybkich kołysań mocy;
- w przypadku silnie obciążonych długich linii stany obciążenia linii mogą zmienić się podczas zwarć na tyle drastycznie, że impedancja ruchowa nie opuści strefy rozruchowej zabezpieczenia odległościowego po likwidacji zwarcia. W takim przypadku człon czasowy (timer) blokady nie wykryje żadnego opóźnienia, gdy impedancja ruchowa przemieści się (podczas kołysań po likwidacji zwarcia) ze strefy rozruchowej funkcji zabezpieczenia odległościowego, do strefy działania. Zatem podczas kołysania mocy zadziała funkcja zabezpieczenia odległościowego tak jak w przypadku zwarcia.

Na [rysunku 2.1a](#) przedstawiono uproszczoną reprezentację jednej linii łączącej dwa podsystemy zastępcze. W układzie tym trajektoria wektora impedancji podczas kołysań mocy przechodzi przez połowę odcinka reprezentującego impedancję zastępczą całego układu ( $\underline{Z}_a + \underline{Z}_L + \underline{Z}_b$ ) ( $k_E = E_b/E_a = 1$ ). Na [rysunku 2.1b](#) przedstawiono sytuację, w której impedancja linii  $\underline{Z}_L$  jest duża (słabe powiązanie podsystemów) w porównaniu z impedancjami zastępczymi  $\underline{Z}_a$  i  $\underline{Z}_b$  podsystemów elektroenergetycznych. Natomiast na [rysunku 2.1c](#) przedstawiono sytuację, w której impedancja linii jest dużo mniejsza (silne powiązanie podsystemów) w porównaniu z impedancjami zastępczymi  $\underline{Z}_a$  i  $\underline{Z}_b$  podsystemów elektroenergetycznych.

Na [rysunku 2.1b](#) można zaobserwować, że trajektoria impedancji podczas kołysań mocy wejdzie do strefy Z1 i strefy Z2 zabezpieczenia odległościowego zanim kąt  $\delta$  osiągnie wartość równą  $120^\circ$  (linie przerywane), np. podczas głębokich kołysań synchronicznych podczas których system nie traci synchronizmu. Dla tego przypadku może być trudno nastawić wewnętrzną i zewnętrzną charakterystykę blokady kołysaniowej typu  $\underline{Z}(t)$ , szczególnie, jeśli linia jest silnie obciążona, ponieważ wymagane nastawy impedancyjne blokady są na tyle duże, że impedancja obciążenia mogłaby spowodować niepoprawne blokowanie stref działania zabezpieczenia odległościowego.

Dla charakterystyk pokazanych na [rys. 2.1c](#) (krótkie linie przesyłowe) system stanie się niestabilny zanim wektor impedancji (podczas kołysań) wejdzie w strefę Z1 i strefę Z2 zabezpieczenia odległościowego. W tym przypadku jest dużo łatwiej nastawić strefy (wewnętrzną i zewnętrzną) blokady kołysaniowej typu  $\underline{Z}(t)$ .



**Rys. 2.1.** Wpływ impedancji linii i impedancji zastępczych SEE na kąt obciążenia  $\delta$  przy którym przecinane są charakterystyki zabezpieczenia odległościowego podczas kołysań mocy, a) schemat układu dwumaszynowego, b) charakterystyki w przypadku długich linii, c) charakterystyki w przypadku krótkich linii, Z1, Z2, Z3 – strefy działania funkcji zabezpieczenia odległościowego,  $\underline{Z}_a, \underline{Z}_b, \underline{Z}_L$  – impedancje zastępcze źródeł i linii przesyłowej; P, Q – stacje

## 2.2. WYSOKOOPOROWE ZWARCIA ROZWIJAJĄCE SIĘ

Błędne pobudzenie blokady może pojawić się w trakcie wysokooporowych zwarcí rozwijających się, podczas których powolne zmiany impedancji mogą zostać potraktowane błędnie jako kołysania mocy (błędne zadziałanie blokady). W nowych cyfrowych rozwiązaniach blokad kołysaniowych dla uniknięcia problemu z wysokooporowymi zvarciami rozwijającymi się wprowadza się m.in. śledzenie gładkości trajektorii wybranych sygnałów. Gdy trajektorie te nie są dostatecznie gładkie blokada kołysaniowa nie jest uruchamiana.

### 2.3. REZYSTANCJA PRZEJŚCIA, ZWARCIA ŁUKOWE

Większość zwarć w SEE stanowią zwarcia pośrednie, charakteryzujące się występowaniem w obwodzie zwarciovym dodatkowej rezystancji, zwanej *rezystancją przejścia*. Rezystancja ta ma mały wpływ na wartość prądu zwarciovego, a duży na przebieg napięć w SEE. Wpływa więc na działanie zabezpieczeń odległościowych (a co za tym idzie blokad kołysaniowych przez nie wykorzystywanych), które oparte jest na pomiarze impedancji pętli zwarciovwej.

W przypadku zwarć międzyfazowych pośrednich rezystancją przejścia jest głównie rezystancja łuku zwarciovego. W przypadku zwarć doziemnych rezystancją przejścia oprócz rezystancji łuku zwarciovego jest dodatkowo rezystancja przejścia do ziemi w punkcie zwarciovym lub rezystancja uziomu. Rezystancja łuku zwarciovego (pierwotnego) jest niewielka w kablach, a znaczna w liniach napowietrznych zwłaszcza WN i NN. Rezystancja łuku ma charakter nieliniowy.

W uproszczonych obliczeniach zakłada się, że rezystancja łuku pierwotnego jest zlinearyzowana i do jej obliczeń stosowane są wzory empiryczne. W przypadku uwzględniania charakteru nieliniowego łuku rozróżnia się dwa podstawowe modele łuku elektrycznego dla zwarć w linach:

- łuk pierwotny (ang. *primary arc*) z przepływem dużego prądu, który występuje w miejscu zwarcia od chwili jego wystąpienia do momentu, kiedy w linii przestanie płynąć prąd, czyli do wytworzenia trwałej przerwy izolacyjnej między stykami wyłącznika (do otwarcia biegunów wyłącznika),
- łuk wtórny (ang. *secondary arc*) po otwarciu jednobiegunowym wyłącznika (przerwa bezprądowa w cyklu SPZ 1-fazowego), który jest podtrzymywany wskutek sprzężenia magnetycznego faz linii, a więc z przepływem małego prądu. Łuk ten podtrzymywany jest przez indukowane napięcia w wyniku przepływu prądów w sąsiednich fazach zdrowych.

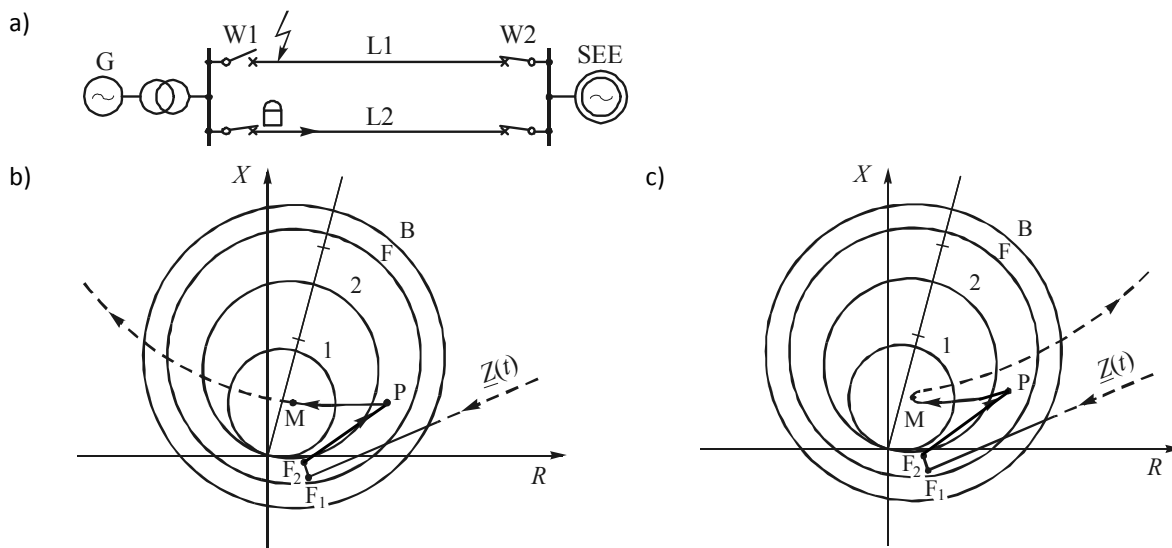
### 2.4. DŁUGOTRWAŁE ZEWNĘTRZNE ZWARCIA TRÓJFAZOWE I DUŻE ZMIANY KĄTÓW W TRAKCIE ZWARCIA

Możliwości złego działania blokad opartych na pomiarze szybkości zmian impedancji ruchowej  $\underline{Z}(t)$  występują też w przypadku długotrwałych zewnętrznych zwarć trójfazowych. Częste są przypadki, gdy w trakcie zwarcia trajektoria impedancji zbliża się lub wchodzi do stref pomiarowych zabezpieczenia odległościowego, mimo że z lokalizacji zwarcia nie wynika, aby strefy te miały być pobudzone. Takie wejście impedancji do stref pomiarowych jest wywołane zmianą kąta obciążenia w trakcie zwarć trójfazowych likwidowanych z długim czasem. O możliwości złego działania blokad kołysaniowych typu  $\underline{Z}(t)$  w przypadku zewnętrznych zwarć trójfazowych producenci zabezpieczeń zwykle nie piszą w swoich dokumentacjach.

W przykładzie pokazanym na [rys. 2.2](#) założono, że zwarcie trójfazowe występuje w linii L1 w pobliżu wyłącznika W1 w odległości 10% długości tej linii. Od strony W1 zwarcie jest likwidowane z czasem strefy pierwszej (szybkiej), zaś od strony wyłącznika W2 z czasem strefy drugiej (założono brak układu koordynacji działania przekaźników w linii L1). Analizowana jest sytuacja przekaźnika na początku linii L2. W momencie zwarcia trajektoria impedancji skacze do punktu  $F_1$  leżącego w czwartej ćwiartce, gdyż dla tego zabezpieczenia zwarcie jest „z tyłu”. Do momentu otwarcia wyłącznika W1 linii L1 trajektoria impedancji przesuwa się do punktu  $F_2$ . Po otwarciu wyłącznika W1 linii L1 trajektoria skacze do punktu P leżącego poza zasięgiem drugiej strefy działania przekaźnika, ale wewnątrz zasięgu jego członu rozruchowego F (będącego jednocześnie strefą wewnętrzną blokady kołysaniowej). Punkt ten leży w pierwszej ćwiartce, gdyż prąd zwarcia pochodzący od generatora G płynie linią L2 w kierunku od przekaźnika do SEE i dalej łącznie z prądem pochodzącym od SEE linią L1 do miejsca zwarcia (wyłącznik W2 w linii L1 jest nadal zamknięty). Podparcie prądowe SEE oraz duże rozchylenie kątowe wektorów napięć źródłowych reprezentujących generatora G i system SEE powodują, że mierzona impedancja jest bliska drugiej strefy działania zabezpieczenia. Dalej w przypadku pokazanym na [rys. 2.2a](#) generator G wypada z synchronizmu i wskutek wzrostu kąta obciążenia trajektoria przechodzi przez drugą i pierwszą strefę działania zabezpieczenia.

W punkcie M wewnątrz pierwszej strefy dochodzi do otwarcia wyłącznika na początku linii L2 przez analizowane zabezpieczenie. W omawianym przypadku otwarcie wyłącznika jest oczywiście zbędne (nie selektywne), gdyż linia L2 nie jest zwarta, a wyłącznik W2 (w linii L1) zostałby za chwilę otwarty wskutek działania zabezpieczenia na końcu zwartej linii L1 z czasem drugiej strefy. W omawianym

przypadku blokada kołysaniowa nie zablokowała zabezpieczenia odległościowego w linii L2, gdyż przejście impedancji  $Z(t)$  przez obszar między charakterystyką B oraz F nastąpiło w trakcie zwarcia, czyli bardzo szybko. W dalszym przebiegu zdarzeń trajektoria nie wyszła już poza charakterystyki F oraz B i sygnał informujący o zadziałaniu blokady nie został wytworzony. Blokada ma szansę zadziałać dopiero przy drugim obrocie asynchronicznym, gdy impedancja ruchowa przejdzie przez strefy zewnętrzną (B) i wewnętrzną (F) blokady (oczywiście z czasem dłuższym niż nastawiony czas działania blokady).



**Rys. 2.2.** Ilustracja przykładu nie zadziałania blokady kołysaniowej: a) schemat układu przesyłowego, b) przykład zmian impedancji w przypadku kołysań asynchronicznych, c) przykład zmian impedancji w przypadku kołysań synchronicznych [12]

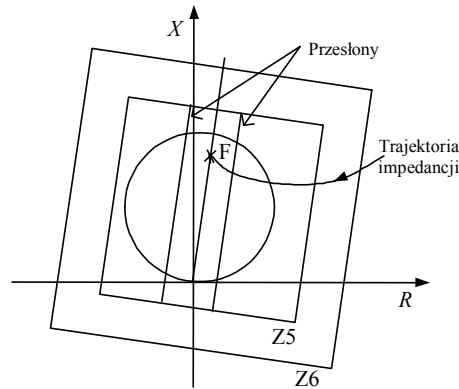
Analogiczny przypadek lecz dla kołysań synchronicznych pokazano na rys. 2.2b. W tym przypadku trajektoria zmienia kierunek wewnątrz pierwszej strefy w punkcie M. Przy kołysaniach synchronicznych zmiana kierunku odbywa się dość wolno, gdyż w otoczeniu momentu zmiany poślizgu wartości poślizgu są małe i ruch odbywa się powoli. Tak więc przy wejściu trajektorii do pierwszej strefy zabezpieczenia jest dość czasu na zadziałanie zabezpieczenia i zbędne wyłączenie linii L2.

## 2.5. WEWNĘTRZNE ZWARCIA TRÓJFAZOWE WYSTĘPUJĄCE PODCZAS KOŁYSAŃ MOCY I DZIAŁANIA BLOKADY KOŁYSANIOWEJ

Przełączniki odległościowe powinny mieć blokowane działanie funkcji blokady kołysaniowej automatycznie, gdy wystąpi wewnętrzne zwarcie trójfazowe podczas trwających kołysań mocy (i działania blokady). Gdy zwarcie trójfazowe wystąpi podczas kołysania mocy, to mierzona impedancja przemieszcza się w kierunku impedancji odpowiadającej kątowni zwarcia linii i pozostaje tam dopóki zwarcie nie zostanie zlikwidowane. Jednym z rozwiązań tego problemu jest nie blokowanie podczas kołysań mocy stref pomiarowych zabezpieczenia odległościowego działających z opóźnieniem, np. pozwala się działać z opóźnieniem (w przypadku zwarcia w strefie Z1) strefie Z2 zabezpieczenia [15]. Producenci zabezpieczeń odległościowych stosują też inne sposoby w celu rozwiązania powyższego problemu.

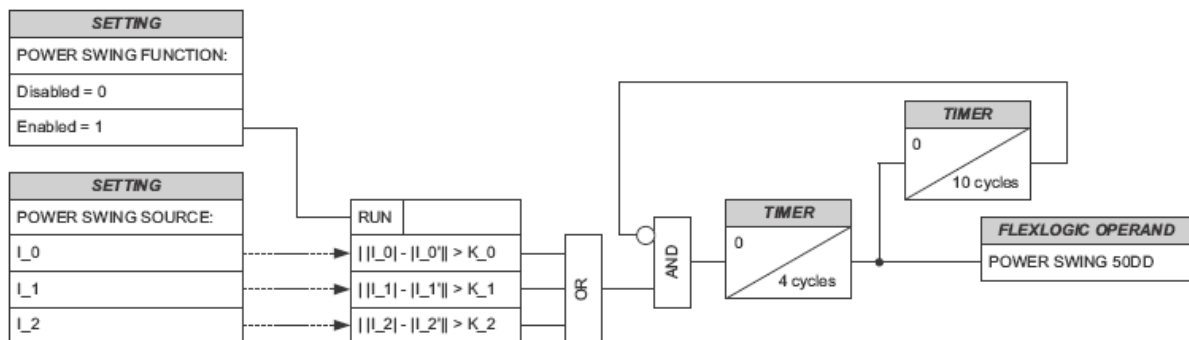
Niektórzy, w celu poprawnego wykrycia wewnętrznego zwarcia trójfazowego występującego w trakcie kołysań mocy, wyposażają swoje przełączniki odległościowe w dodatkowe (nastawiane) wewnętrzne przesłony (rys. 2.3). Zasięg rezystancyjny każdej przesłony wynosi jedną dziesiątą składowej zgodnej impedancji linii. Jeśli składowa zgodna impedancji znajdzie się między tymi dwiema przesłonami przez określony czas, to działanie blokady kołysaniowej jest blokowane, a co za tym idzie odblokowane jest działanie stref pomiarowych funkcji zabezpieczenia odległościowego. Przełącznik oblicza ten czas za każdym razem (czas timera nie jest stały i zależy od częstotliwości kołysań), gdy impedancja podczas kołysań mocy wejdzie w obszar strefy Z6 (strefy zewnętrznej blokady). Przy

obliczaniu czasu timera przekaźnik bazuje na aktualnym czasie przejścia impedancji podczas kołysań mocy ze strefy Z6 do strefy Z5 (strefy wewnętrznej blokady).



**Rys. 2.3.** Blokowanie działania blokady kołysaniowej podczas kołysania mocy i zwarcia trójfazowego [17]

Na [rysunku 2.4](#) przedstawiono układ odpowiedzialny w logice blokady kołysaniowej przekaźnika D60 firmy General Electric [18] za resetowanie logiki blokady kołysaniowej podczas wewnętrznych zwarć symetrycznych i niesymetrycznych występujących w trakcie kołysań mocy. Na rysunku tym:  $I_{0,1,2}$  oznaczają składową zerową, zgodną i przeciwną prądu mierzone w punkcie przekaźnikowym w danej chwili;  $I_{0',1',2'}$  oznaczają składową zerową, zgodną i przeciwną prądu mierzone w punkcie przekaźnikowym pół okresu wcześniej w stosunku do danej chwili. Wartości progowe  $K_0, K_2$  oznaczają pomnożone przez trzy wartości średnie zmian odpowiednich prądów w ciągu ostatniego okresu.



**Rys. 2.4.** Układ odpowiedzialny za resetowanie logiki blokady kołysaniowej podczas zwarć wewnętrznych, opis oznaczeń w tekście [18]

Wartość progowa  $K_1$  oznacza pomnożoną przez cztery wartość średnią zmian odpowiedniego prądu w ciągu ostatniego okresu. Wartości progowe zmian składowych symetrycznych prądu wykorzystywane do wykrywania zwarć nie są stałe i zmieniają się dynamicznie (adaptacja). Do wykrycia zwarcia podczas kołysań wystarczy, aby jedna z wartości symetrycznych prądu przekroczyła wartość progową, a sygnał informujący o tym przekroczeniu będzie podtrzymywany przez odpowiednie układy czasowe (timery). Opisany układ wykorzystywany jest przez blokadę kołysaniową przekaźnika D60. Wyniki badań blokady przedstawiono w monografii [H1]. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że zwarcia występujące podczas kołysań mocy są wykrywane przez układ przedstawiony na [rys. 2.4](#) z czasem równym około pół okresu.

W monografii [H1] dokonano obszernej analizy metod wykrywania wewnętrznych zwarć trójfazowych podczas kołysań mocy. Opisane metody detekcji zwarć symetrycznych podczas kołysań mocy dotyczyły zarówno rozważań teoretycznych jak i rozwiązań zastosowanych w rzeczywistych przekaźnikach odległościowych. W większości opisywanych rozwiązań detekcja zwarć symetrycznych następuje w czasie od jednego do dwóch okresów. Jedynie w przypadku metod detekcji opartych na

analizie falkowej jest ona szybsza i nie przekracza jednego okresu. Należy podkreślić, że wykrywanie zwarć podczas kołysań mocy i działania blokady kołysaniowej nie musi być „tak szybkie” jak w przypadku wykrywania zwarć, gdy nie ma kołysań mocy. Z tego powodu, niektórzy w swoich rozwiązaniach wprowadzają dodatkowe opóźnienia w wyłączeniu zwarć występujących podczas kołysań mocy, aby mieć pewne, a nie przypadkowe, zdjęcie sygnału blokady.

W monografii [H1] dokonano analizy innych czynników mogących mieć wpływ na poprawność działania zabezpieczeń odległościowych. Należą do nich:

- zwarcia niesymetryczne występujące podczas kołysań mocy i działania blokady kołysaniowej,
- określanie kierunku zwarcia przez zabezpieczenia odległościowe podczas zwarć niesymetrycznych występujących w trakcie kołysań mocy,
- zwarcia podczas kołysań mocy w trakcie przerwy bezprądowej cyklu SPZ jednofazowego,
- działanie blokad kołysaniowych podczas przeciążeń w sieci,
- linie z kompensacją szeregową,
- oscylacje podsynchroniczne w SEE,
- rozproszone źródła energii,
- wrażliwość algorytmów blokad kołysaniowych na kierunek kołysań mocy,
- wpływ przekładników prądowych i napięciowych na poprawność działania blokad kołysaniowych,
- przetwarzanie sygnałów w przekaźnikach odległościowych.

Analiza wyżej wymienionych czynników została przeprowadzona na podstawie dostępnej literatury tematu. Dodatkowo przedstawiono przykładowe rozwiązania stosowane w zabezpieczeniach odległościowych zapobiegające ich niepoprawnemu działaniu w opisanych sytuacjach występujących w SEE.

### 3. ZMIANY WYBRANYCH WIELKOŚCI FIZYCZNYCH WYSTĘPUJĄCYCH PODCZAS KOŁYSAŃ MOCY

Sygnały lokalnie mierzalne wykorzystywane przez blokady kołysaniowe powinny charakteryzować się:

- małą wrażliwością na zmiany konfiguracji SEE,
- możliwością identyfikacji kołysań synchronicznych i asynchronicznych (duża wartość sygnału) w szerokim zakresie częstotliwości poślizgu (można przyjąć, że kołysania „wolne” mieszczą się w zakresie (0,2÷3) Hz, natomiast „szybkie” w zakresie (4÷10) Hz),
- możliwością rozróżniania zwarć od kołysań mocy (powinna być stosunkowo duża różnica między wartościami wykorzystywanego sygnału w przypadku zwarcia i kołysania mocy),
- możliwością identyfikacji zwarć występujących podczas kołysań mocy (powinna być stosunkowo duża różnica między wartościami wykorzystywanego sygnału w przypadku zwarcia i kołysania mocy), w tym w przypadkach takich jak:
  - zwarcia trójfazowe występujące w trakcie kołysań mocy w najniekorzystniejszym przypadku, gdy kąt obciążenia  $\delta \approx 180^\circ$ ,
  - zwarcia jednofazowe wysokooporowe występujące w trakcie kołysania mocy.

Ze względu na fakt, że kołysania mocy mają charakter zjawisk dynamicznych często istotne jest rozpatrywanie szybkości zmian danego sygnału. O przydatności sygnału do identyfikacji kołysań mocy można stwierdzić na podstawie przebiegu zmian jego pochodnej w funkcji czasu. Jeśli oznaczyć jako  $q$  rozpatrywaną wielkość elektryczną, to jej pochodna w czasie może zostać wyrażona wzorem:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\partial q}{\partial \delta} \frac{d\delta}{dt} + \sum_{j=1}^n \frac{\partial q}{\partial x_j} \frac{dx_j}{dt} \quad (3.1)$$

gdzie:  $x_j$  są pozostałymi zmiennymi.

Przyjmując stałość tych zmiennych można napisać:

$$\frac{dq}{dt} \approx K(\delta) \cdot \Delta\omega \quad (3.2)$$



gdzie:  $K(\delta) = \frac{\partial q}{\partial \delta}$  jest pochodną cząstkową sygnału,  $\Delta\omega = \frac{d\delta}{dt}$  jest poślizgiem wirnika generatora, a  $\delta$  kątem obciążenia.

Z równania (3.2) widać, że zmiany wielkości  $q$  w czasie stanu nieustalonego (kołysania mocy) są proporcjonalne do poślizgu wirnika generatora  $\Delta\omega$  oraz pochodnej cząstkowej  $\partial q / \partial \delta$  sygnału  $q$ .

Pochodna cząstkowa  $K(\delta)$  sygnału  $q$  nadającego się do identyfikacji kołysań mocy:

- powinna być mało wrażliwa na konfigurację SEE oraz być ciągła w przedziale kątów obciążenia  $\delta$  od 0 do  $2\pi$ ,
- powinna posiadać dużą wartość dla jak najszerszego zakresu kątów w otoczeniu kąta  $\delta = \pi$ .

W pracy [20] w celu określenia wpływu zmian kąta  $\delta$  na przebieg wielkości elektrycznych widzianych z punktu pomiarowego dla prostego układu jednomaszynowego wyprowadzono wzory na wielkości lokalnie mierzalne i ich pochodne cząstkowe takie jak:  $P$ ,  $Q$ ,  $I$ ,  $U$ ,  $\arg \underline{I}$ ,  $\arg \underline{U}$ ,  $R$ ,  $X$  i inne poprzez ich kombinacje.

### 3.1. ANALIZA KOŁYSAŃ MOCY NA PŁASZCZYŹNIE IMPEDANCYJNEJ

W układzie przedstawionym na rys. 3.1 wprowadza się węzeł pośredni oraz dwie linie L1, L2 na końcach których umieszczone są przekładniki odległościowe w punktach r oraz s. Na lewo od punktu przekładnikowego r linia i system są zastąpione łącznie impedancją  $\underline{Z}_a$ , zaś na prawo od węzła s odpowiednio impedancją  $\underline{Z}_b$ . Po obu stronach rozważanego układu przesyłowego SEE jest zastąpiony źródłami o napięciach odpowiednio  $\underline{E}_a$  oraz  $\underline{E}_b$ . Na wykresie fazorowym przyjmuje się, że fazor  $\underline{E}_b$  leży na osi liczb rzeczywistych, czyli:

$$\underline{E}_b = E_b, \quad \underline{E}_a = E_a e^{j\delta} \quad (3.3)$$

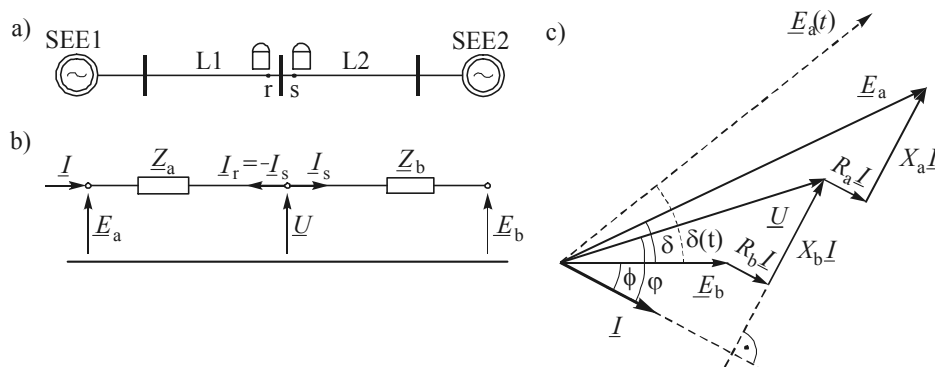
gdzie  $\delta$  jest kątem obciążenia będącym różnicą argumentów obu napięć. W trakcie kołysań mocy zmianie ulega przede wszystkim kąt  $\delta$  przyjmując wartości  $\delta(t)$ , co odpowiada nowym położeniom fazora  $\underline{E}_a$ .

Za dodatni kierunek prądów zasilających przekładniki przyjmuje się zawsze przepływ od szyn w kierunku linii. Tak więc przy przepływie prądu  $\underline{I}$  przez obie linie L1 oraz L2 otrzymuje się:  $\underline{I}_r = -\underline{I}$  oraz  $\underline{I}_s = \underline{I}$ .

Wprowadzono następujące definicje:

Węzeł przekładnikowy jest nazywany *węzłem wysyłającym* (ang. *sending node*), jeśli kierunek prądu w linii zgadza się z orientacją kierunku prądu przekładnika.

Węzeł przekładnikowy jest nazywany *węzłem odbiorczym* (ang. *receiving node*), jeśli kierunek prądu w linii jest przeciwny do orientacji prądu przekładnika.



Rys. 3.1. Układ dwumaszynowy z punktem przekładnikowym: a) schemat układu, b) schemat zastępczy, c) wykres fazorowy

W omawianym schemacie węzeł s jest węzłem wysyłającym, zaś węzeł r węzłem odbiorczym. W systemie wielomaszynowym nie zawsze można z góry ustalić, że dany węzeł przekaźnikowy jest węzłem wysyłającym lub węzłem odbiorczym. Dla niektórych konfiguracji sieci dany węzeł przekaźnikowy może się stawać węzłem wysyłającym dla jakiegoś zakłócenia, a dla innego zakłócenia odpowiednio węzłem odbiorczym. Dobrze zaprojektowane przekaźniki nie mogą być wrażliwe na kierunkowość w trakcie kołysań mocy i muszą same poprawnie reagować.

### 3.1.1. Zmiany impedancji na płaszczyźnie impedancyjnej

W monografii [H1] dokonano analizy zmian impedancji ruchowej (węzeł wysyłający) na płaszczyźnie  $X(R)$ . Po przekształceniach wzór na impedancję zgodną  $Z_s = U/I_s$  w węźle wysyłającym ma postać:

$$Z_s(t) = \frac{U}{I_s} = \frac{Z_a + k_E Z_b}{k_E - 1} \quad (3.4)$$

gdzie:

$$k_E = \frac{E_a}{E_b} = \frac{E_a}{E_b} e^{j\delta} = k_E e^{j\delta} = k_E (\cos \delta + j \sin \delta) \quad (3.5)$$

przy czym współczynnik

$$k_E = \frac{E_a}{E_b} \quad (3.6)$$

jest liczbą rzeczywistą odpowiadającą stosunkowi modułów napięć.

W omawianym modelu SEE zmiany impedancji  $Z_s(t)$  mogą wynikać z dwóch powodów: (a) zmiany kąta obciążenia  $\delta(t)$  oraz (b) zmiany stosunku modułów napięć  $k_E$ .

Po przekształceniach można otrzymać:

$$Z_s(t) = R_s(t) + jX_s(t) = \frac{R_a + jX_a + k_E \cdot (R_b + jX_b) \cdot (\cos \delta + j \sin \delta)}{k_E (\cos \delta + j \sin \delta) - 1} \quad (3.7)$$

Przekształcenia na obliczenia parametrów  $R_s(t)$  i  $X_s(t)$  z wzoru (3.7) są dość proste, ale żmudne. Wzory te mają następujące postacie:

$$R_s(t) = R_b + \frac{R_b \cdot (k_R + 1) \cdot (k_E \cos \delta - 1)}{k_E^2 - 2k_E \cos \delta + 1} + X_b \cdot \frac{k_E \cdot (k_X + 1) \cdot \sin \delta}{k_E^2 - 2k_E \cos \delta + 1} \quad (3.8)$$

$$X_s(t) = \frac{-R_b \cdot k_E \cdot (k_R + 1) \cdot \sin \delta}{k_E^2 - 2k_E \cos \delta + 1} + X_b \cdot \frac{(k_E^2 - k_X) - k_E \cdot (1 - k_X) \cdot \cos \delta}{k_E^2 - 2k_E \cos \delta + 1} \quad (3.9)$$

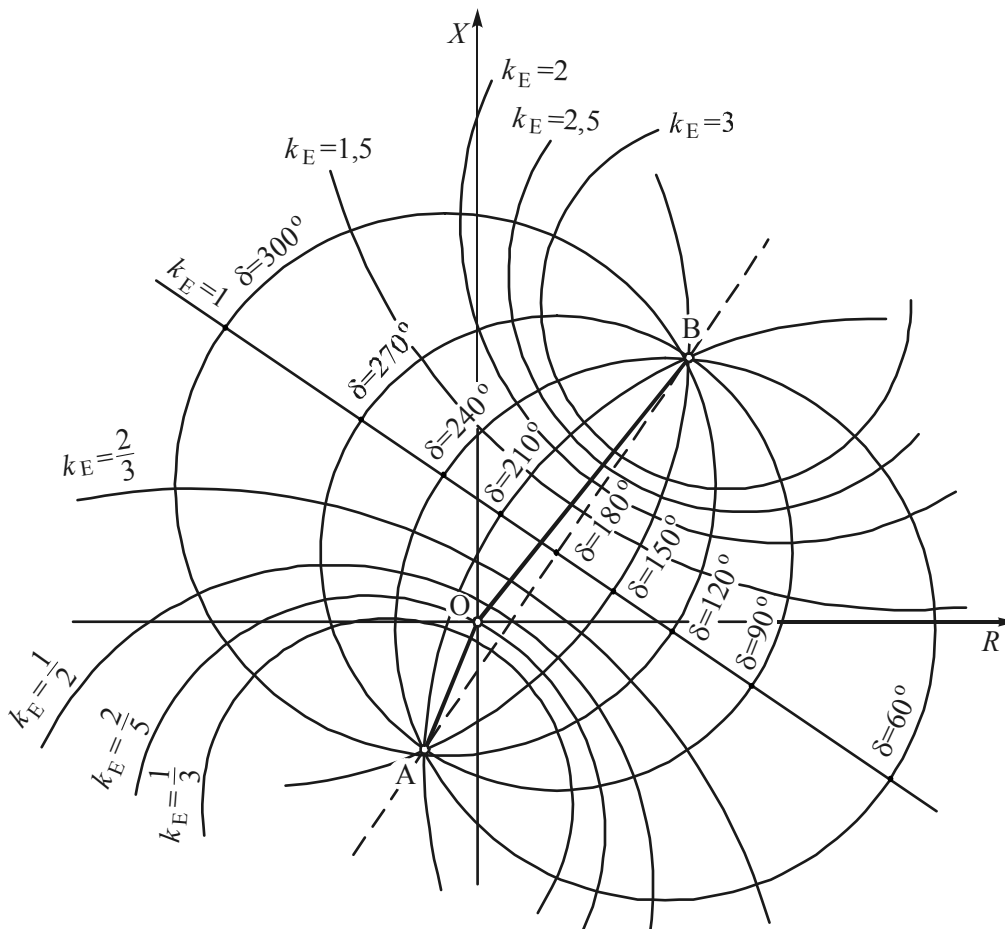
przy czym:  $k_X = \frac{X_a}{X_b}$ ,  $k_R = \frac{R_a}{R_b}$ .

Dla różnych wartości stosunku napięć  $k_E$  równanie (3.7) tworzy rodzinę okręgów pokazaną na rys. 3.2. Na rysunku tym znajdują się okręgi dla szerokich zmian wartości  $k_E$ . Ma to służyć jedynie zilustrowaniu rodziny krzywych odpowiadających  $k_E = \text{const}$ . W praktyce stosunek ten jest bliski jedności w zakresie  $0,7 \leq k_E \leq 1,3$ . Okręgi  $k_E = \text{const}$  odpowiadające takim wartościom mają dużą średnicę.

Przy analizie kołysań mocy na płaszczyźnie impedancyjnej istotną rolę odgrywają również krzywe odpowiadające stałej wartości kąta  $\delta$ . Różnym wartościom kąta  $\delta$  odpowiada rodzina okręgów pokazana na rys. 3.2. Można wykazać, że osie obu rodzin okręgów (odpowiadające stałym wartościom  $k_E$  oraz stałym wartościom kąta  $\delta$ ) pokazane na rys. 3.2 są ortogonalne.

W przypadku kołysań mocy w SEE zmianie w szerokich granicach ulega przede wszystkim kąt  $\delta$  oraz pod wpływem działania regulacji napięcia w niewielkich granicach stosunek napięć  $k_E$ . Impedancja  $\underline{Z}_S(t)$  zmienia się wzdłuż trajektorii zbliżonej do okręgów  $k_E = \text{const}$  przy czym w wyniku działania regulacji napięcia średnica okręgów ulega zmianie.

Gdy w SEE występuje praca asynchroniczna kąt  $\delta$  zmienia się cyklicznie od  $0^\circ$  do  $360^\circ$  co odpowiada pełnemu obrotowi na okrąg zmian impedancji. Gdy w SEE nie występuje praca asynchroniczna i są tylko kołysania synchroniczne kąt  $\delta$  nie przekracza wartości  $180^\circ$ , a impedancja zmienia się cyklicznie po części okręgu. Oczywiście w trakcie zakłócenia w sieci wywołującego kołysania impedancja  $\underline{Z}_S(t)$  ulega również zmianom stosownym do zmian parametrów sieci wywołanych zakłóceniem.



**Rys. 3.2.** Rodziny okręgów ortogonalnych na płaszczyźnie zmiennej zespolonej odpowiadające stałej wartości kąta  $\delta$  oraz stałej wartości stosunku modułów napięć  $k_E$

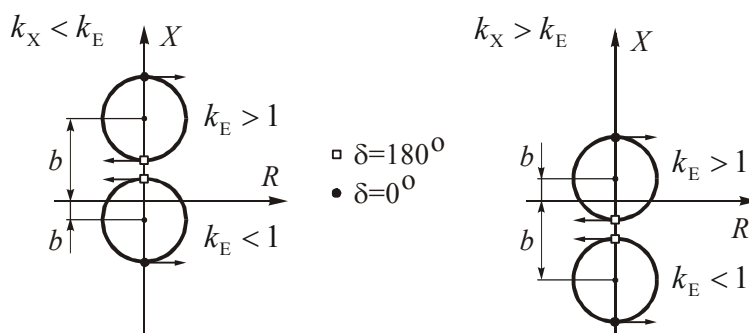
### 3.1.2. Kierunek wirowania dla węzła wysyłającego i odbiorczego

W monografii [H1] dokonano analizy położenia okręgów zataczanych przez wektor impedancji ruchowej w zależności od lokalizacji przekaźnika w układzie przesyłowym (współczynnik  $k_X$ ). Stwierdzono, że współczynnik  $k_X = X_a/X_b$  opisuje położenie okręgów opisujących kołysania mocy na płaszczyźnie  $X(R)$ , a poza tym ma pewien wpływ na promień okręgów. Dla  $k_E > 1$  większa wartość współczynnika  $k_X$  zwiększa promień okręgu, a dla  $k_E < 1$  większa wartość  $k_X$  zmniejsza promień okręgu.

Razem ze względu na wartości  $k_E$ ,  $k_X$  można wyróżnić cztery przypadki opisane w tabl. 3.1. Ilustrację czterech wyżej omówionych przypadków położenia okręgów podano na rys. 3.3. Lewa strona rysunku dotyczy przypadku  $k_X < k_E$ , czyli górnego wiersza w tabl. 3.1. Prawa strona rysunku dotyczy przypadku  $k_X > k_E$ , czyli dolnego wiersza w tabl. 3.1.

**Tablica 3.1.** Wpływ współczynników  $k_E, k_X$  na położenie okręgów

Przypadek	$k_E > 1$	$k_E < 1$
$k_X < k_E$	Przesunięcie środka jest dodatnie. Promień okręgu jest mniejszy od przesunięcia środka. Okrąg całkowicie leży po dodatniej stronie osi $X$ .	Przesunięcie środka jest ujemne. Promień okręgu jest większy od przesunięcia środka. Okrąg częściowo po ujemnej, a częściowo dodatniej stronie osi $X$ .
$k_X > k_E$	Przesunięcie środka jest dodatnie. Promień okręgu jest większy od przesunięcia środka. Okrąg częściowo po dodatniej, a częściowo ujemnej stronie osi $X$ .	Przesunięcie środka jest ujemne. Promień okręgu jest mniejszy od przesunięcia środka. Okrąg całkowicie leży po ujemnej stronie osi $X$ .



**Rys. 3.3.** Położenia okręgów i kierunki trajektorii dla różnych wartości współczynników  $k_E, k_X$  - węzeł wysyłający

Na rysunku 3.3 w dolnych i górnych częściach okręgów na przecięciu okręgu z osią liczb urojonych wstawiono małe kwadraciki oraz pogrubione kropki. Te skrajne punkty okręgów są nazywane odpowiednio *biegunem górnym* oraz *biegunem dolnym* okręgu. Bieguny oznaczone kwadracikami odpowiadają kątowi  $\delta = 180^\circ$ , zaś bieguny oznaczone kropką kątowi  $\delta = 0^\circ$ .

Współrzędne biegunów okręgów można obliczyć ze wzorów:

$$R_s(t) = X_b \frac{k_E(k_X + 1)}{k_E^2 - 2k_E \cos \delta + 1} \sin \delta \quad (3.10)$$

$$X_s(t) = X_b \frac{(k_E^2 - k_X) - k_E(1 - k_X) \cos \delta}{k_E^2 - 2k_E \cos \delta + 1} \quad (3.11)$$

Korzystając z wzoru (3.10) można również wyznaczyć kierunek trajektorii impedancji  $Z_s(t)$  przy przechodzeniu przez biegun, czyli przy przekraczaniu osi liczb zespolonych.

W biegunie okręgu kierunek trajektorii określa pochodna rezystancji mierzonej przez przekątnik, czyli:  $dR_s(t)/dt$ . Zgodnie z wzorem (3.10) rezystancja ta jest funkcją kąta  $\delta$  i z tego względu pochodna rezystancji jest wyrażona następującym wzorem:

$$\frac{dR_s(t)}{dt} = \frac{\partial R_s}{\partial \delta} \frac{d\delta}{dt} \quad (3.12)$$

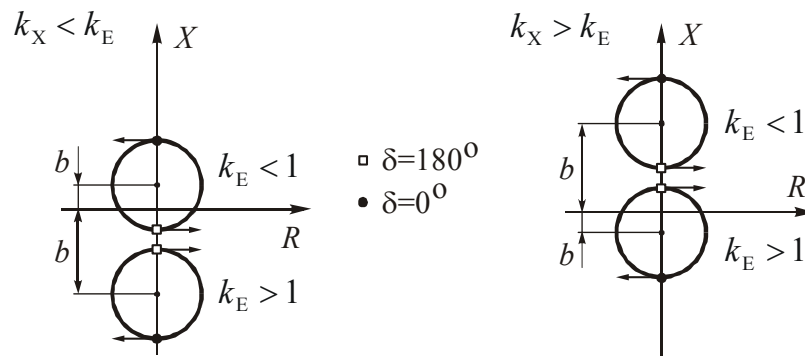
w którym pochodna kąta obciążenia  $d\delta/dt = \Delta\omega$  jest poślizgiem wirnika generatora zastępczego.

W trakcie wypadania generatora z synchronizmu oraz pracy asynchronicznej poślizg jest dodatni. Kierunek zmian rezystancji w czasie jest więc określony znakiem pochodnej cząstkowej  $\partial R/\partial \delta$ . Obliczając tę pochodną dla wzoru (3.10) ostatecznie otrzymuje się:

$$\frac{dR_s(t)}{dt} = X_b k_E (k_X + 1) \frac{k_E^2 \cos \delta - 2k_E + \cos \delta}{(k_E^2 - 2k_E \cos \delta + 1)^2} \cdot \frac{d\delta}{dt} \quad (3.13)$$

Podstawiając tu wartości  $\delta = 0^\circ$  oraz  $\delta = 180^\circ$  odpowiadające poszczególnym biegunom widać, że dla dodatniej wartości poślizgu pochodna rezystancji mierzonej przez przekąźnik jest zawsze dodatnia dla biegunów odpowiadających wartościom  $\delta = 0^\circ$  oraz zawsze ujemna dla biegunów odpowiadających wartościom  $\delta = 180^\circ$ . Na [rysunku 3.3](#) kierunki trajektorii odpowiadające tym pochodnym zaznaczono strzałkami umieszczonymi w biegunach. Oczywiście w przypadku synchronicznych kołysań mocy w trakcie powrotu wirnika poślizg zmienia znak i jest ujemny.

Podobną analizę jak dla węzła wysyłającego przeprowadzono dla węzła odbiorczego. Położenie okręgów dla poszczególnych przypadków ilustruje [rys. 3.4](#). Z porównania tego rysunku z [rys. 3.3](#) widać, że w poszczególnych biegunach trajektoria impedancji dla węzła odbiorczego ma kierunek przeciwny niż dla węzła wysyłającego.



**Rys. 3.4.** Położenia okręgów i kierunki trajektorii dla różnych wartości współczynników  $k_E, k_X$  - węzeł odbiorczy

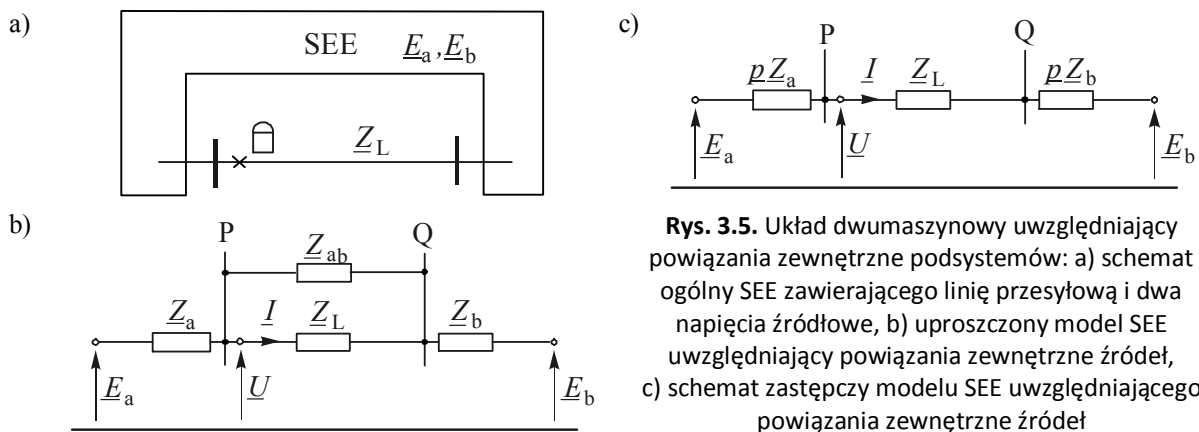
### 3.2. WPŁYW POWIĄZANIA ZEWNĘTRZNEGO NA IMPEDANCJĘ WIDZIANĄ PRZEZ ZABEZPIECZENIA PODCZAS KOŁYSAŃ MOCY

W większości przypadków zmiany impedancji ruchowej widzianej z punktu przekąźnikowego na płaszczyźnie  $X(R)$  podczas kołysań mocy rozważa się w układzie dwumaszynowym przedstawionym na [rys. 3.1](#). W rzeczywistości oprócz linii wiążącej ze sobą źródła zastępcze należy uwzględnić powiązanie zewnętrzne tych źródeł (pozostały fragment SEE), ponieważ powiązanie takie może mieć istotny wpływ na:

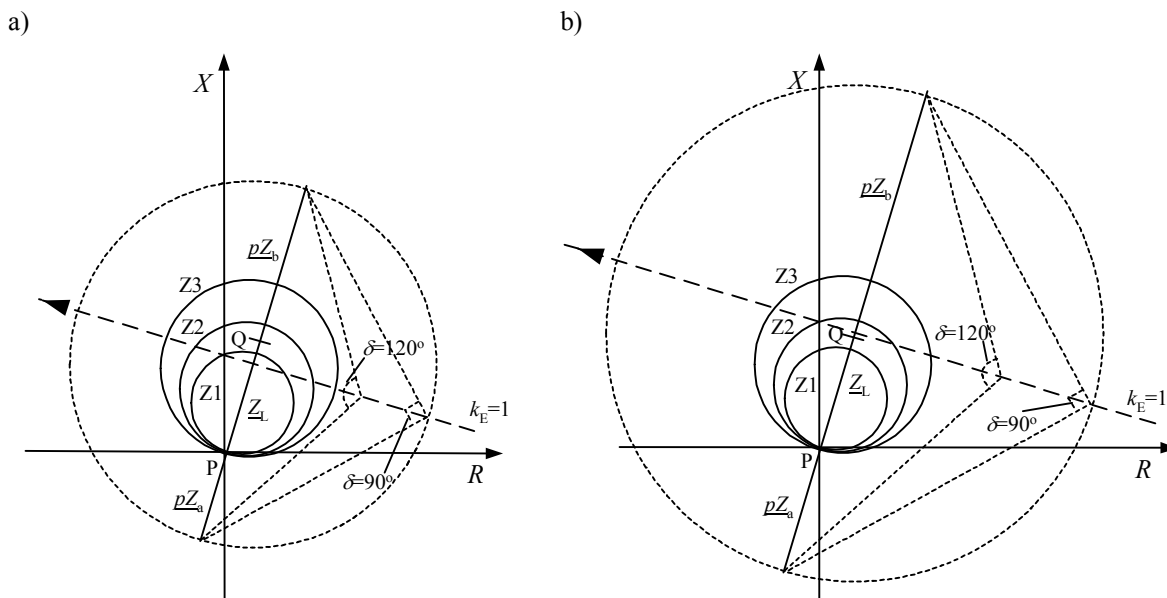
- środek kołysań, a co za tym idzie miejsce przejścia impedancji ruchowej podczas kołysań asynchronicznych przez strefy pomiarowe zabezpieczenia odległościowego,
- kąt obciążenia  $\delta$ , przy którym impedancja ruchowa wchodzi do stref pomiarowych zabezpieczenia odległościowego podczas kołysań synchronicznych i asynchronicznych.

Na [rysunku 3.5](#) przedstawiono schemat układu dwumaszynowego złożonego z dwóch zastępczych źródeł napięcia ( $\underline{E}_a, \underline{E}_b$ ), linii przesyłowej  $\underline{Z}_L$  wiążącej ze sobą te źródła oraz z linii zastępczej  $\underline{Z}_{ab}$  powiązania zewnętrznego tych źródeł. Impedancja  $\underline{Z}_{ab}$  reprezentuje wszystkie linie wiążące ze sobą źródła napięcia oprócz rozpatrywanej linii przesyłowej o impedancji  $\underline{Z}_L$ . Impedancje  $\underline{Z}_a, \underline{Z}_b$  reprezentują zarówno impedancje wewnętrzne źródeł napięcia  $\underline{E}_a, \underline{E}_b$  jak i impedancje sieci odbiorczych.

Interpretację graficzną wpływu powiązania zewnętrznego na położenie środka kołysań i kąt  $\delta$ , przy którym impedancja ruchowa wejdzie w obszar stref pomiarowych zabezpieczenia odległościowego przedstawiono na [rys. 3.6](#). Jak widać na rysunku w przypadku słabego powiązania zewnętrznego lub braku powiązania ([rys. 3.6a](#)) środek kołysań znajduje się w strefie Z1 zabezpieczenia odległościowego, a impedancja ruchowa dla kąta obciążenia  $\delta = 120^\circ$  charakteryzującego głębokie kołysania synchroniczne jest bliska strefy pomiarowej Z3 zabezpieczenia odległościowego. Wzrost powiązania zewnętrznego ([rys. 3.6a](#)) powoduje, że środek kołysań przesuwa się ze strefy Z1 od strefy Z2 zabezpieczenia odległościowego, a impedancja ruchowa dla kąta obciążenia  $\delta = 120^\circ$  charakteryzującego głębokie kołysania synchroniczne jest znacznie oddalona od strefy pomiarowej Z3 zabezpieczenia odległościowego.



Z tego powodu silne powiązanie zewnętrzne redukuje możliwość wejścia impedancji ruchowej w strefy pomiarowe zabezpieczenia odległościowego podczas głębokich kołysań synchronicznych oraz korzystnie „przesuwa” środek kołysań poza strefę  $Z_1$  zabezpieczenia odległościowego chroniącego daną linię w stronę SEE.



**Rys. 3.6.** Wpływ impedancji powiązania zewnętrznego na kąt  $\delta$ , przy którym przecinane są charakterystyki zabezpieczenia odległościowego podczas kołysań mocy, a) brak powiązania lub słabe powiązanie zewnętrzne ( $Z_{ab} \gg Z_L$ ), b) silne powiązanie zewnętrzne ( $Z_{ab} \ll Z_L$ );  $Z_1, Z_2, Z_3$  – strefy pomiarowe zabezpieczenia odległościowego,  $pZ_a, Z_L, pZ_b$  – impedancje zastępcze źródeł z uwzględnieniem powiązania zewnętrznego i linii przesyłowej; P, Q - stacje

#### 4. OPIS ZAMODELOWANYCH UKŁADÓW TESTOWYCH

Opracowano układy testowe do badania blokad kołysaniowych, które zostały wykorzystane do symulacji wybranych zakłóceń mogących mieć wpływ na poprawność działania zabezpieczeń odległościowych. Do wykonania modeli układów testowych wykorzystano program PSCAD/EMTDC [21]. Na potrzeby badań blokad kołysaniowych wykonano modele trzech systemów testowych, w tym: (a) jeden model do wykonywania badań blokad w zakresie podstawowym, (b) dwa modele do badań w zakresie rozszerzonym.

**Do badań w zakresie podstawowym** wykorzystano dwa sterowane trójfazowe źródła napięcia (SEE1, SEE2) połączone ze sobą za pomocą linii przesyłowej L1 (rys. 4.1). W układzie tym za pomocą

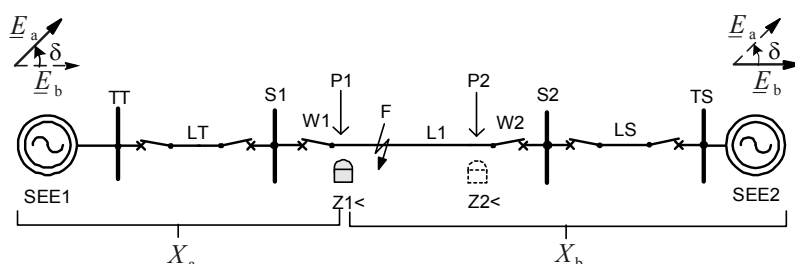


sterowanego źródła napięcia SEE1 ( $\underline{E}_a$  na rys. 4.1) dokonywane są zmiany amplitudy napięcia  $E_a$  oraz jego kąta  $\delta$  tak, aby przebiegi impedancji ruchowej na płaszczyźnie impedancyjnej miały kształty takie jak podczas kotłosań synchronicznych i asynchronicznych. Linia L1 jest zamodelowana za pomocą czwórników typu PI. Linie LT i LS wykorzystywane są jedynie w przypadku modelowania zwarcia podczas kotłosań mocy „za plecami” przekładników odległościowych Z1< , Z2< lub w ich drugiej bądź trzeciej strefie pomiarowej.

W przypadku modelowania kotłosań mocy kąt napięcia  $\underline{E}_b$  źródła SEE2 jest stały i wynosi 0, natomiast kąt  $\delta(t)$  napięcia  $\underline{E}_a$  źródła SEE1 jest zmieniany w przypadku kotłosań asynchronicznych zgodnie ze wzorem:

$$\delta(t) = \delta_{obc} + 2\pi f_n \cdot \Delta f \cdot t = \delta_{obc} + \omega_n \cdot \Delta f \cdot t \quad (4.1)$$

przy czym:  $\delta(t)$  - kąt napięcia  $\underline{E}_a$  w [deg],  $\delta_{obc}$  - kąt początkowy napięcia  $\underline{E}_a$  w [deg],  $f_n = 50$  Hz - częstotliwość znamionowa,  $\omega_n = 314$  rad/s - prędkość kątowna znamionowa,  $\Delta f$  - poślizg w [Hz],  $t$  - czas w [s].



Rys. 4.1. Układ do sprawdzania blokad kotłosiarniowych w zakresie podstawowym

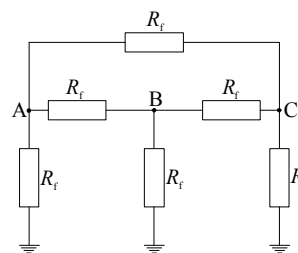
W przypadku kotłosań synchronicznych kąt  $\delta(t)$  napięcia  $\underline{E}_a$  źródła SEE1 jest zmieniany zgodnie z wzorem:

$$\delta(t) = \delta_{obc} + A_1(1 - e^{B_1 \cdot t}) + A_2 e^{B_2 \cdot t} \cdot \sin(\omega_n \cdot \Delta f \cdot t) \quad (4.2)$$

przy czym:  $\delta(t)$  - kąt napięcia  $\underline{E}_a$  w [deg],  $\delta_{obc}$  - kąt początkowy napięcia  $\underline{E}_a$  w [deg],  $f_n = 50$  Hz - częstotliwość znamionowa,  $\omega_n = 314$  rad/s - prędkość kątowna znamionowa,  $\Delta f$  - poślizg w [Hz],  $t$  - czas w [s];  $A_1, A_2, B_1, B_2$  - współczynniki wpływające na głębokość kotłosań, np.  $A_1 = 50$ ;  $A_2 = 80$ ;  $B_1 = -5$ ;  $B_2 = -0,01$ .

W różnych miejscach układu (linii LT, L1, LS) w trakcie kotłosań mocy istnieje możliwość zamodelowania pojedynczych zwarć typu K3, K3E, K2, K2E, K1 o różnych rezystancjach przejścia  $R_f$ . Schemat zwarcownika przedstawiono na rys. 4.2.

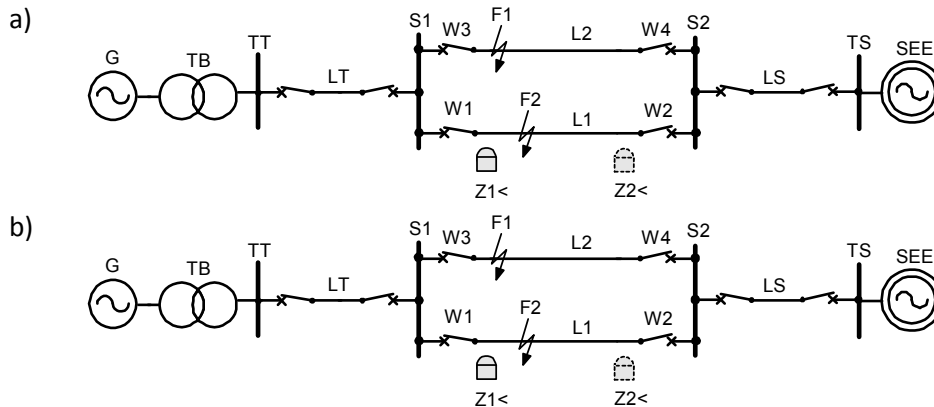
Przekładniki prądowe i napięciowe w punktach przekładnikowych P1, P2 układu przedstawionego na rys. 4.1 zamodelowano jako idealne.



Rys. 4.2. Schemat zwarcownika wykorzystywanego podczas badań

**Do badań blokad w zakresie rozszerzonym** wykorzystano układ generator-sieć sztywna, w którym generator i transformator blokowy połączono z siecią sztywną za pomocą linii dwutorowej. Schemat układu w dwóch wariantach przedstawiono na rys. 4.3. Układ w wariantcie przedstawionym na rys. 4.3b różni się od układu przedstawionego na rys. 4.3a tym, że w zabezpieczeniu odległościowym Z1< przewidzianym do zainstalowania przy wyłączniku W1 istnieje możliwość zamodelowania większej liczby stref pomiarowych „do przodu”.

Jako podstawowy układ do badań rozszerzonych w ramach monografii [H1] przyjęto układ przedstawiony na rys. 4.3a. W układzie tym generator G (i jego układy regulacji) oraz transformator blokowy TB zostały dokładnie zamodelowane. Jako system zastępczy SEE wykorzystane zostało sterowane źródła napięcia. Zamiast jednej linii jak na rys. 4.1, przewidziano dwa tory linii (podczas badań dodatkowo można uwzględnić sprzężenie magnetyczne między torami równoległymi linii). Linie LT, L1, L2, LS zostały zamodelowane za pomocą czwórników typu PI.



**Rys. 4.3.** Układ dwumaszynowy do sprawdzania blokad kołysaniowych w zakresie rozszerzonym:

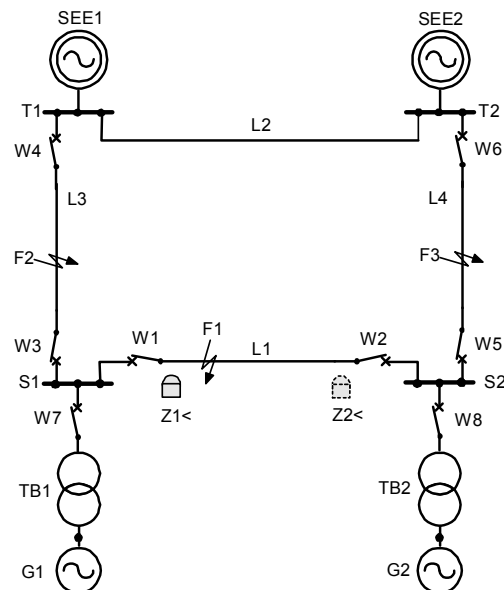
- a) w przypadku zastosowania dwóch stref „do przodu” zabezpieczenia odległościowego, b) w przypadku zastosowania więcej niż dwóch stref „do przodu” zabezpieczenia odległościowego

Oprócz układu dwumaszynowego do badań w zakresie rozszerzonym wykorzystano układ czteromaszynowy. Schemat układu przedstawiono na rys. 4.4. Jak widać w zaproponowanym układzie testowym jako podstawowe do badania blokad wykorzystywane są prądy i napięcia w punkcie przekątnikowym umieszczonym w linii L1 przy wyłączniku W1 (przełącznik Z1<). Specyfiką tego układu jest to, że można badać blokady kołysaniowe przy przepływie prądu podczas kołysań mocy od i do punktu przekątnikowego. Dzięki temu można sprawdzać zagadnienia związane z kierunkowością kołysań mocy. W przedstawionym na rys. 4.4 układzie dokładnie zamodelowano (wraz z układami regulacji) generatory G1, G2 oraz ich transformatory blokowe TB1, TB2. Jako podsystemy zastępcze SEE1, SEE2 wykorzystane zostały źródła napięcia. Linie L1, L2, L3, L4 zostały zamodelowane za pomocą czwórników typu PI.

Uproszczeniem układu testowego z rys. 4.4 może być wykorzystanie zamiast generatorów G1, G2 i transformatorów blokowych TB1, TB2 sterowanych źródeł napięcia. W takim przypadku kąt  $\alpha(t)$  napięcia tego źródła może być zmieniany z wykorzystaniem prostego układu regulacji bazującego na równaniu ruchu wału wirnika generatora.

Wykorzystanie w układzie dokładnych modeli generatorów i transformatorów blokowych skutkuje tym, że trudno jest zamodelować kołysania asynchroniczne o różnej częstotliwości i synchroniczne o różnej „głębokości” i częstotliwości bez ingerencji w parametry generatorów i transformatorów blokowych.

Dokładne opisy przedstawionych układów testowych wraz z możliwościami przeprowadzenia badań za ich pomocą można znaleźć w [H1].



**Rys. 4.4.** Układ czteromaszynowy do sprawdzania blokad kołysaniowych w zakresie rozszerzonym

## 5. SYMULATOR DZIAŁAJĄCY W CZASIE RZECZYWISTYM ZJAWISK DYNAMICZNYCH W SEE

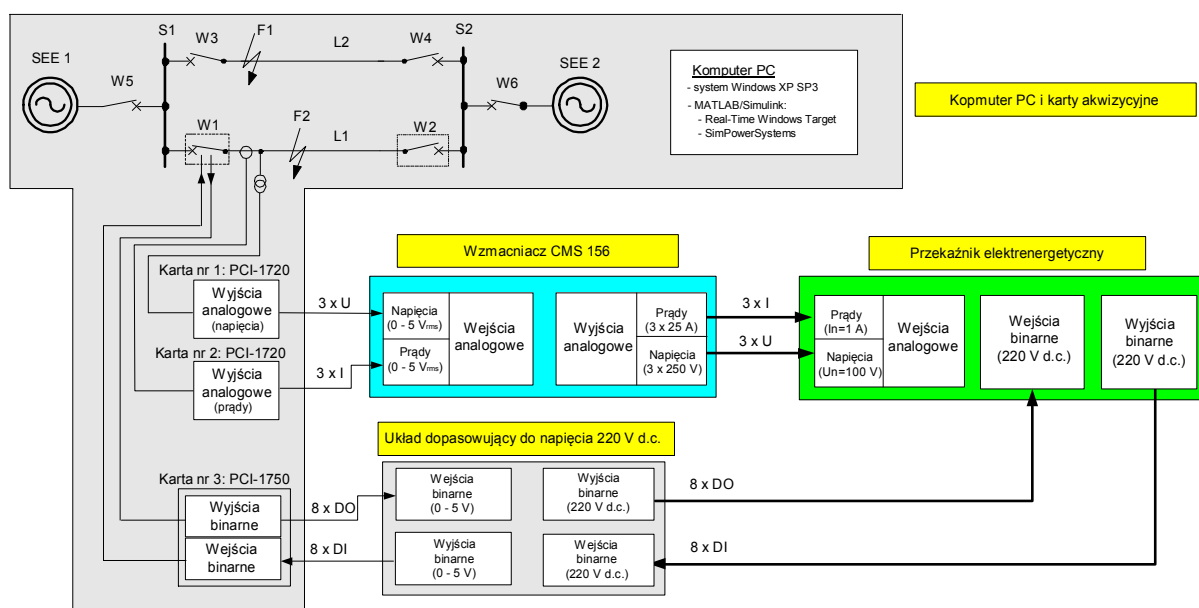
W monografii [H1] opisane zostały stosowane obecnie podziały badań przełączników elektroenergetycznych. Jednym z rodzajów badań jakim powinny one podlegać są systemowe testy działania. W tego typu metodzie badawczej wykorzystuje się symulatory SEE działające w czasie rzeczywistym zjawisk (ang. *real time simulators*).

Dzięki takim symulatorom wyniki symulacji wyprowadzane są tak samo szybko jak przebiegają zjawiska w systemie. Dysponując takim symulatorem można badany przełącznik włączyć do modelu SEE w ten sposób, że chwilowe wartości napięć i prądów uzyskane z symulatora zamieniane są na sygnały analogowe, odpowiednio wzmacniane i wprowadzane do przełącznika. Natomiast sygnały wyjściowe z przełącznika wprowadza się do modelu SEE odwzorowanego w symulatorze. Jeśli sygnałem wyjściowym jest sygnał na otwarciu wyłącznika jakiegoś elementu systemu i sygnał ten pojawia się w trakcie symulowanego przebiegu, to w modelu systemu zostaje przerwany odpowiedni obwód. Symulatory komercyjne są urządzeniami bardzo drogimi. Dlatego niektóre środowiska akademickie próbują zbudować (z mniejszym lub większym sukcesem) własne symulatory działające w czasie rzeczywistym zjawisk, które mogłyby być wykorzystane do badania pojedynczych przełączników elektroenergetycznych.

W monografii [H1] opisano stanowisko laboratoryjne do badania przełączników elektroenergetycznych w czasie rzeczywistym zjawisk, które powstało w Laboratorium Instytutu Elektroenergetyki PW. W skład stanowiska wchodzi zbudowany symulator IEn-RTS, który może być tańszą alternatywą (do badania pojedynczych przełączników) w stosunku do bardzo drogiego symulatorów komercyjnych. Habilitant ma duży udział w zbudowaniu oraz dalszej rozbudowie symulatora.

Zadaniem stanowiska jest symulacja różnych zjawisk (zwarcia, kotłowania mocy, przełączenia itd.) w zamodelowanych fragmentach SEE za pomocą programu MATLAB/Simulink. Przebiegi prądów i napięć oraz informacje o położeniu biegunów wyłącznika z wybranego punktu przełącznikowego będące wynikiem symulacji, po przeskalowaniu pojawiają się na wyjściach kart akwizycyjnych (zbierania danych). Po wzmocnieniu sygnałów do wartości odpowiadających stronom wtórnym przekładników prądowych i napięciowych (za pomocą wzmacniacza prądowo-napięciowego) i dopasowaniu (za pomocą układu dopasowującego do napięcia 220 V d.c.) sygnały analogowe i binarne są doprowadzane do badanego przełącznika. Zwrotnie z badanego urządzenia doprowadzane są sygnały binarne (np. informujące o podaniu sygnału na otwarciu lub zamknięciu biegunów odpowiedniego wyłącznika) wpływające (przez układy dopasowujące i kartę akwizycyjną) na stany łączników w zamodelowanym fragmencie SEE. Zmiany, będące wynikiem działania badanego przełącznika, w konfiguracji zamodelowanego fragmentu SEE zachodzą w czasie rzeczywistym zamodelowanych zjawisk.

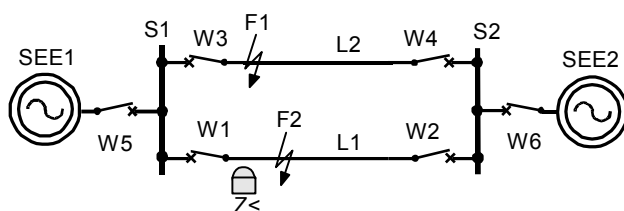
**W skład części sprzętowej** stanowiska laboratoryjnego z symulatorem IEn-RTS (rys. 5.1) wchodzi: (a) komputer klasy PC, (b) karty akwizycyjne (zbierania danych), (c) wzmacniacz sygnałów prądowych i napięciowych, (d) układ dopasowujący do napięcia 220 V d.c., (e) przełącznik elektroenergetyczny.



Rys. 5.1. Schemat blokowy symulatora IEn-RTS, DO – wyjścia binarne, DI – wejścia binarne

W skład części programowej symulatora wchodzi oprogramowanie MATLAB/Simulink wraz z biblioteką Real-Time Windows Target i biblioteką SimPowerSystems. Oprogramowanie MATLAB/Simulink wraz z wymienionymi bibliotekami wykorzystywane jest w symulatorze do symulowania zjawisk w zamodelowanym fragmencie SEE (zwarcia, kołysania mocy, przełączenia w sieci, działania automatyki SPZ w cyklach pracy 1- i 3-fazowej itp.) oraz do wymuszania (za pomocą wykorzystanych kart akwizycyjnych) sygnałów analogowych i cyfrowych, z określonych punktów pomiarowych (przełącznikowych) w systemie, będących wynikiem symulacji. Ponadto jest ono wykorzystywane do odczytu informacji będących wynikiem działania badanego przełącznika (np. sygnał na otwarcie biegunów wybranego wyłącznika), które mają wpływ na konfigurację zamodelowanego fragmentu SEE.

Wykonano następujące układy testowe: (a) źródło napięciowe pracujące na obciążenie (układ 1); (b) dwa źródła napięciowe (w tym jedno sterowane) połączone ze sobą za pomocą dwóch linii przesyłowych (układ 2); (c) generator (model 2. rzędu) i źródło napięcia połączone ze sobą za pomocą dwóch linii przesyłowych (układ 3); (d) generator (model 5. rzędu) i źródło napięcia połączone ze sobą za pomocą dwóch linii przesyłowych (układ 4). Schemat układów testowych nr 2, 3, 4 pokazano na rys. 5.2.



Rys. 5.2. Schemat zamodelowanego układu testowego

## 6. SPRAWDZENIE POPRAWNOŚCI DZIAŁANIA WYBRANYCH FUNKCJI PRZEKAŹNIKA ODLEGŁOŚCIOWEGO

W nowych opracowaniach [7, 8] oraz normie [9] dotyczących testowania przełączników elektroenergetycznych nie ma wytycznych jak konkretnie testować blokady kołysaniowe. W normie [8] wyraźnie podkreśla się, że podczas wyboru zestawu testów przełączników elektroenergetycznych ze względu na bardzo wiele możliwych wariantów zakłóceń nie da się przetestować wszystkich możliwych wariantów i należy iść na kompromis pod kątem tego co chce się dokładnie sprawdzić podczas badań. Z tego powodu w monografii [H1] zaproponowany został autorski zestaw badań blokad kołysaniowych. Na podstawie zaproponowanego zestawu badań wykonano i przedstawiono wybrane wyniki badań blokad kołysaniowych wybranego przełącznika odległościowego.

### 6.1. METODY BADANIA BLOKAD KOŁYSANIOWYCH

Metody badania blokad kołysaniowych powinny umożliwiać sprawdzenie poprawności ich działania w zakresie podstawowym oraz rozszerzonym. Sprawdzanie blokad w zakresie podstawowym powinno umożliwić wstępną ocenę poprawności ich działania, natomiast sprawdzenie w zakresie rozszerzonym powinno dodatkowo uwzględniać zamodelowanie zakłóceń nietypowych (rzadziej występujących). Badania w zakresie podstawowym można zaliczyć do funkcjonalnych testów zgodności, a badania w zakresie rozszerzonym obejmują funkcjonalne testy zgodności i funkcjonalne testy działania. Badania wykonywane za pomocą symulatora IEn-RTS można uznać za systemowe testy działania.

**Badania w zakresie podstawowym** mogą zostać wykonane w ten sposób, że za pomocą programu symulacyjnego zamodelowany jest układ testowy za pomocą którego generowane próbki prądów i napięć zapisywane są do plików w formacie COMTRADE. Pliki te są następnie odtwarzane za pomocą oprogramowania testera mikroprocesorowego i na ich podstawie tester generuje odpowiednie prądy i napięcia. Wygenerowane pliki typu COMTRADE z próbkami prądów i napięć odtwarzane były za pomocą testera typu CMC [19]. Wygląd modelu testowego wykorzystywanego do badań blokad w zakresie podstawowym przedstawiony został na rys. 4.1.

W monografii [H1] zaproponowano zakres badań jakim powinny podlegać blokady kotłysaniowe w ramach zakresu podstawowego. Zdaniem habilitanta blokady kotłysaniowe powinny zostać sprawdzone z uwzględnieniem następujących przypadków:

- kotłysań asynchronicznych o różnych częstotliwościach, np. w zakresie  $(0,2 \div 10)$  Hz;
- kotłysań synchronicznych o różnych częstotliwościach i różnej „głębokości” kotłysań;
- kotłysań o różnym stosunku modułów napięć źródłowych  $k_E = E_a/E_b$ ;
- kotłysań o różnym stosunku reaktancji  $k_X = X_a/X_b$  po lewej i prawej stronie punktu przekąźnikowego;
- pojedynczych zwarć typu K3, K3E, K2, K2E, K1 występujących w trakcie kotłysań mocy, gdy impedancja ruchowa znajdzie się w obszarze strefy wewnętrznej blokady kotłysaniowej;
- trajektorii impedancji podczas kotłysań mocy „przechodzących” (podczas kotłysań asynchronicznych) i „wchodzących” (podczas kotłysań synchronicznych) do stref pomiarowej pierwszej lub drugiej lub trzeciej lub wstecznej zabezpieczenia odległościowego zarówno z prawej strony płaszczyzny impedancyjnej jak i z lewej strony płaszczyzny impedancyjnej.

Podczas przeprowadzania badań blokad kotłysaniowych w zakresie podstawowym wyżej wymienione przypadki należy łączyć ze sobą.

**Badania w zakresie rozszerzonym** różnią się tym od badań w zakresie podstawowym, że w programie symulacyjnym modelowane są bardziej rozbudowane układy testowe. W układach tych dokładniej należy zamodelować elementy SEE. Badanie blokad kotłysaniowych w zakresie rozszerzonym powinno, w porównaniu z badaniami w zakresie podstawowym, dodatkowo uwzględniać zamodelowanie zakłóceń nietypowych. Do badań tego typu może zostać wykorzystany model układu dwumaszynowego, czteromaszynowego, siedmiomaszynowego lub inny bardziej rozbudowany. Proponowane układy modeli testowych wykorzystywanych do badań blokad w zakresie rozszerzonym przedstawione zostały na [rys. 4.3](#) i [rys. 4.4](#).

W monografii [H1] zaproponowano zakres badań jakim powinny podlegać blokady kotłysaniowe w ramach zakresu rozszerzonego. Zdaniem habilitanta blokady kotłysaniowe powinny zostać sprawdzone z uwzględnieniem następujących przypadków:

- kotłysań asynchronicznych (synchronicznych) modelowanych w ten sposób, że w różnych miejscach linii L2 generowane są zwarcia K3 (F1 na [rys. 4.3a](#)) o zdefiniowanym wcześniej czasie trwania. Po zdefiniowanym czasie trwania zwarcia otwierane są wyłączniki W3, W4 linii, a co za tym idzie linia L2 jest wyłączana. W punktach przekąźnikowych (przy wyłącznikach W1, W2) w linii L1 można zaobserwować zmiany impedancji jak dla kotłysań asynchronicznych (synchronicznych) w węźle odbiorczym i wysyłającym. W celu zamodelowania kotłysań synchronicznych czas trwania zwarcia F1 powinien być na tyle krótki, aby generator nie wypadł z synchronizmu;
- kotłysań (asynchronicznych i synchronicznych) modelowanych w ten sposób, że przy wyłączniku W4 linii L2 generowane jest zwarcie K3 (F1 na [rys. 4.3a](#) powinno być przy wyłączniku W4). Po czasie działania pierwszej strefy zabezpieczenia odległościowego otwierany jest wyłącznik W4, a po czasie działania drugiej strefy zabezpieczenia odległościowego otwierany jest wyłącznik W3 linii L2. Dzięki takiemu działaniu występuje nierównomierna likwidacja zwarcia F1. W punktach przekąźnikowych (przy wyłącznikach W1, W2) w linii L1 można zaobserwować zmiany impedancji jak dla kotłysań asynchronicznych w węźle odbiorczym i wysyłającym;
- zwarć zewnętrznych K3 (w linii L2 na [rys. 4.3a](#)), podczas których impedancja ruchowa w punktach przekąźnikowych linii L1 po likwidacji zwarcia zewnętrznego nie wychodzi poza strefę zewnętrzną blokady i wchodzi (na skutek powstałych po likwidacji zwarcia kotłysań) w obszar strefy pierwszej funkcji zabezpieczenia odległościowego;
- długotrwałych zwarć zewnętrznych K3 (w liniach L2, LT i LS na [rys. 4.3a](#)), podczas których impedancja ruchowa w punktach przekąźnikowych linii L1 wchodzi (w trakcie trwania zwarcia) w obszar strefy pierwszej funkcji zabezpieczenia odległościowego;
- zwarć wewnętrznych F2 (w linii L1) typu K3, K3E, K2, K2E, K1 występujących w trakcie kotłysań mocy (synchronicznych i asynchronicznych), gdy impedancja ruchowa znajdzie się w obszarze strefy wewnętrznej blokady. Zwarcia (F2 na [rys. 4.3a](#)) powinny być zamodelowane w strefie pierwszej, drugiej, trzeciej i wstecznej (jeśli jest nastawiona). Zamodelowane zwarcia powinny charakteryzować się różnymi rezystancjami przejścia  $R_f$ ;



- zwarć rozwijających się w linii L1, np. zwarcie K1 przechodzące po określonym czasie w zwarcie K2E, a potem w zwarcie K3E lub zwarcie K2 przechodzące po określonym czasie w zwarcie K3. Czas między kolejnymi zvarciami powinien być dłuższy od 50 ms;
- zwarć w linii L1 występujących podczas kołysań, w trakcie których występuje nasycenie przekładników prądowych;
- zwarć łukowych w linii L1, podczas kołysań (synchronicznych i asynchronicznych), gdy impedancja ruchowa znajdzie się w obszarze strefy działania funkcji zabezpieczenia odległościowego. Zwarcia powinny być zamodelowane w strefie pierwszej, drugiej, trzeciej i wstecznej (jeśli jest nastawiona);
- zvarcia K1 w linii L1 i występującego po nim cyklu SPZ 1-fazowego, podczas którego impedancje w dwóch zdrowych fazach zmieniają się jak podczas kołysań mocy;
- zvarcia K1 w linii L1 i występującego po nim cyklu SPZ 1-fazowego, podczas którego impedancje w dwóch zdrowych fazach zmieniają się jak podczas kołysań mocy. Podczas przerwy bezprądowej cyklu SPZ, należy zamodelować łuk wtórny;
- zvarcia K1 w linii L1 i występującego po nim cyklu SPZ 1-fazowego, podczas którego impedancje w dwóch zdrowych fazach zmieniają się jak podczas kołysań mocy. Dodatkowo w czasie przerwy bezprądowej, należy zamodelować kolejne zvarcie K1 (w jednej ze zdrowych faz);
- różnego miejsca umieszczenia przełącznika podczas kołysań (przy wyłączniku W1 lub wyłączniku W2) w celu sprawdzenia poprawności działania blokady kołysaniowej w węźle „wysyłającym” i „odbiorczym”.

Podczas przeprowadzania badań blokad kołysaniowych w zakresie rozszerzonym można wyżej wymienione przypadki testowe łączyć ze sobą.

Za pomocą zbudowanego **symulatora działającego w czasie rzeczywistym zjawisk** można wykonać większość zaproponowanych badań blokad kołysaniowych zarówno w zakresie podstawowym jak i rozszerzonym. Ze względu na fakt, że w przypadku badań w zakresie rozszerzonym opisanych wyżej nie ma możliwości sprawdzenia wpływu badanego przełącznika na zachowanie się układu testowego, sugeruje się wykonywanie za pomocą symulatora badań, w których istotne jest pokazanie wpływu działania badanego przełącznika na konfigurację układu testowego, a co z kolei ma wpływ na dalsze zachowanie się badanego przełącznika.

W monografii [H1] zaproponowano zakres badań jakim powinny podlegać blokady kołysaniowe za pomocą symulatora. Zdaniem habilitanta blokady kołysaniowe powinny zostać sprawdzone z uwzględnieniem m.in. przypadków:

- zvarcia jednofazowego w linii L1 i występującego po nim cyklu SPZ 1-fazowego, podczas którego impedancje w dwóch zdrowych fazach (w czasie przerwy bezprądowej) zmieniają się jak podczas kołysań mocy;
- zvarcia jednofazowego w linii L1 i występującego po nim cyklu SPZ 1-fazowego, podczas którego impedancje w dwóch zdrowych fazach (w czasie przerwy bezprądowej) zmieniają się jak podczas kołysań mocy. Dodatkowo w czasie przerwy bezprądowej, należy zamodelować kolejne zvarcie jednofazowe (w jednej ze zdrowych faz).

## 6.2. PRZEPROWADZONE BADANIA

Do przeprowadzenia zaproponowanych w monografii [H1] badań blokad kołysaniowych wykorzystano przełącznik odległościowy firmy General Electric o symbolu D60 [18]. Przełącznik wyposażony jest w blokadę typu  $\underline{Z}(t)$ , która do swego działania wykorzystuje składową zgodną impedancji.

Ze względu na dużą liczbę możliwych do przeprowadzenia scenariuszy testowych, zaproponowanych w rozdz. 6.1, w ramach badań w zakresie podstawowym funkcji blokady kołysaniowej przełącznika D60 sprawdzono:

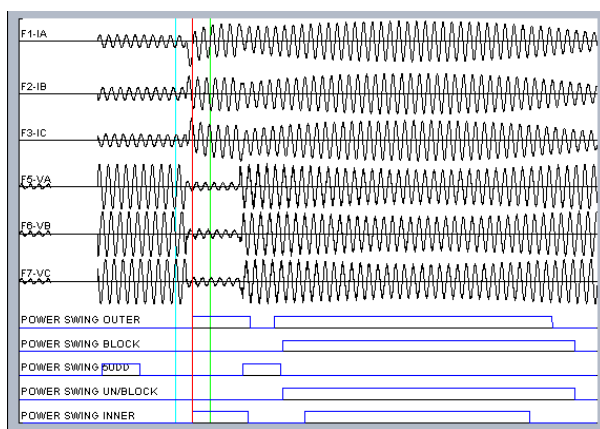
- poprawność działania funkcji zabezpieczenia odległościowego podczas zvarć typu K1, K2, K3, gdy jest aktywna funkcja blokady kołysaniowej;
- poprawność działania blokady kołysaniowej podczas kołysań mocy o różnej częstotliwości;
- poprawność działania blokady kołysaniowej podczas kołysań mocy o różnej częstotliwości i zvarć występujących w trakcie kołysań.



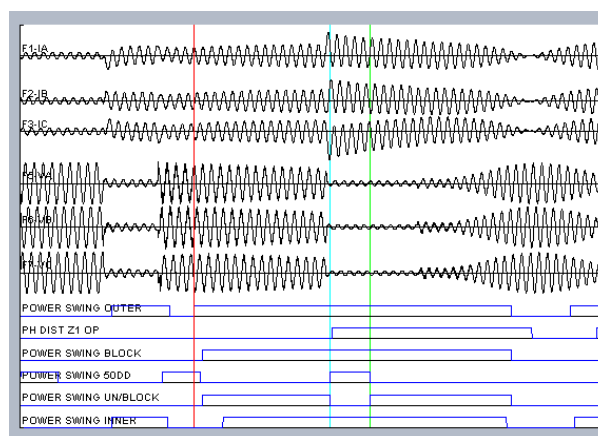
W ramach badań w zakresie rozszerzonym funkcji blokady kotysaniowej przełącznika D60 przeprowadzono:

- badania poprawności działania blokady kotysaniowej podczas kotysań mocy i zwarc wewnątrznych występujących w ich trakcie (kotysania asynchroniczne i synchroniczne);
- badania poprawności działania blokady kotysaniowej podczas kotysań mocy i zwarc występujących w trakcie przerwy bezprądowej cyklu SPZ 1-fazowego;
- długotrwałe zwarcia typu K3 (zewnątrzne w strefie „wstecznej”, wewnętrzne w strefie Z2 „do przodu”);
- zewnętrzne zwarcie K1 (w strefie Z2) podczas kotysań synchronicznych;
- zwarcie zewnętrzne K3 w strefie „wstecznej” i kotysania mocy po zwarcu;
- zwarcie zewnętrzne K1 w strefie „wstecznej” podczas kotysań mocy;
- zwarcie zewnętrzne K1 w strefie „wstecznej” podczas kotysań mocy;
- kotysania mocy o różnych kierunkach zmian impedancji ruchowej;
- badania poprawności działania blokady kotysaniowej podczas zwarc z nasycaniem się przekładników prądowych;
- badania poprawności działania blokady kotysaniowej podczas zwarc rozwijających się;
- badania poprawności działania blokady kotysaniowej w przypadku załączenia odbioru;
- badania poprawności działania blokady kotysaniowej podczas długotrwałego zwarcia w sąsiednim odcinku linii;
- badania poprawności działania blokady kotysaniowej w przypadku obciążenia pojemnościowego.

Przykładowe wyniki badań w zakresie rozszerzonym przedstawiono na rys. 6.1 i rys. 6.2. Na przedstawionych zrzutach ekranu oprócz przebiegów wartości chwilowych prądów i napięć przestawione zostały sygnały wewnętrzne przełącznika D60 związane z funkcją blokady kotysaniowej i funkcją zabezpieczenia odległościowego.



Rys. 6.1. Kotysania synchroniczne - brak zwarcia w trakcie kotysań



Rys. 6.2. Drugie zwarcie K3 w strefie Z1

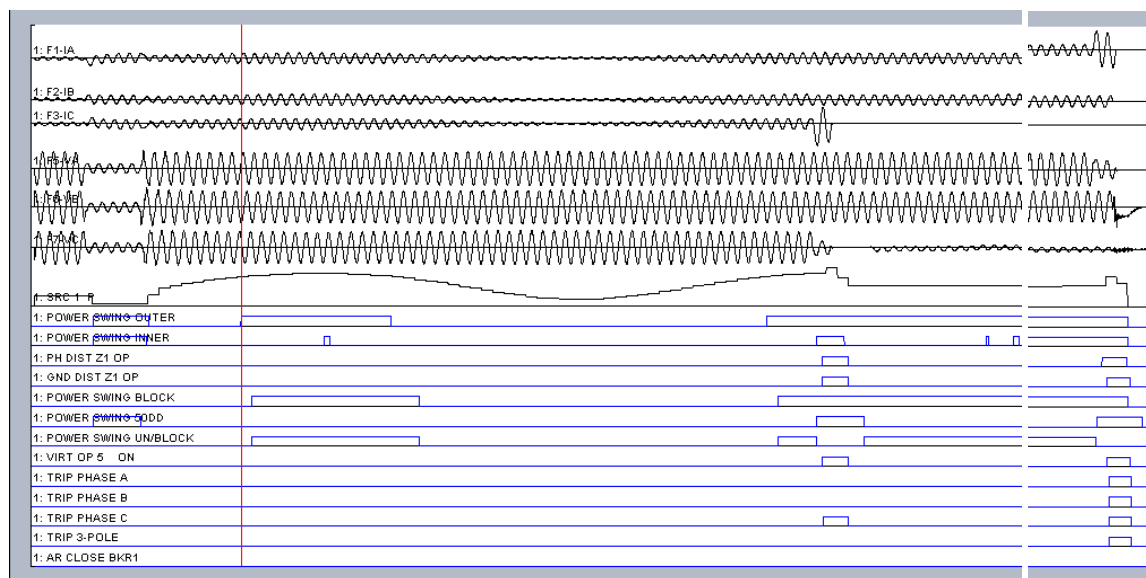
Podczas badania przełącznika D60 za pomocą symulatora IEn-RTS skupiono się na sprawdzeniu poprawności jego działania w przypadkach, gdy ma on wpływ na zmiany konfiguracji zamodelowanego fragmentu SEE. Aby badania były możliwe, należało skonfigurować i powiązać ze sobą za pomocą wewnętrznej logiki programowalnej przełącznika kilka funkcji sterujących i zabezpieczeniowych.

Badania przeprowadzono w układach 2 i 3 opisanych w rozdz. 5. W przypadku wykorzystania układu 2 sprawdzono poprawności niepobudzenia się blokady kotysaniowej podczas różnego rodzaju zwarc wewnątrznych w przypadku braku kotysań. W przypadku wykorzystania układu 3 sprawdzono poprawność zachowania się przełącznika D60 w przypadku:

- różnego rodzaju zwarc w linii z przełącznikiem w przypadku braku kotysań;
- zwarcia K3E w linii z przełącznikiem w trakcie trwania kotysań synchronicznych;
- zwarcia K1 w linii z przełącznikiem w trakcie trwania kotysań synchronicznych;

- zwarcia K1 w linii z przełącznikiem w trakcie trwania kotłusań synchronicznych i przerwy bezprądowej cyklu SPZ 1-fazowego.

Przykładowe wyniki badań wykonanych za pomocą symulatora IEn-RTS przedstawiono na [rys. 6.3](#). Na przedstawionym zrzucie ekranu oprócz przebiegów wartości chwilowych prądów i napięć przestawione zostały sygnały wewnętrzne przełącznika D60 związane z funkcją blokady kotłusaniowej, funkcją zabezpieczenia odległościowego oraz innymi funkcjami wykorzystanymi w zaprogramowanej logice wewnętrznej przełącznika.



**Rys. 6.3.** Zwarcie K1 w linii z przełącznikiem w trakcie trwania kotłusań synchronicznych i przerwy bezprądowej cyklu SPZ 1-fazowego

## 6.2. PODSUMOWANIE WYNIKÓW PRZEPROWADZONYCH BADAŃ

W monografii [H1] dokonano podsumowania wyników przeprowadzonych badań blokady kotłusaniowej przełącznika D60. Na podstawie przeprowadzonych badań w układzie do badań podstawowych stwierdzono, że:

- blokada przy braku kotłusań poprawnie nie pobudzała się podczas zasymulowanych zwarć typu K1, K2, K3;
- częstotliwość wykrywanych przez blokadę kotłusań synchronicznych i asynchronicznych zależy, dla stałego odstępu między strefą zewnętrzną i wewnętrzną blokady (nastawa  $\Delta Z$ ) i czasu przejścia impedancji ruchowej między tymi strefami (nastawa  $\Delta t$ ). W celu zwiększenia możliwości wykrywania kotłusań o większej częstotliwości należy: zmniejszyć nastawę  $\Delta t$  dla nastawy  $\Delta Z = \text{const}$  lub zwiększyć nastawę  $\Delta Z$  dla nastawy  $\Delta t = \text{const}$ ;
- w przypadku kotłusań synchronicznych i asynchronicznych sygnał blokady został poprawnie zdjęty (na ok. 88 ms) w przypadku zwarć metalicznych K1, K2, K3 i oporowego K1 ( $R_f = 10 \Omega$ ). Zwarcie wysokooporowe K1 ( $R_f = 100 \Omega$ ) nie zostało wykryte, ze względu na brak skoku prądu fazowego niezbędnego do zadziałania detektora zakłóceń blokady.

Na podstawie przeprowadzonych badań w układzie do badań rozszerzonych stwierdzono, że:

- blokada błędnie nie wykryje pierwszego obrotu asynchronicznego, gdy po likwidacji zwarcia zewnętrznego impedancja ruchowa nie wyjdzie ze strefy wewnętrznej blokady na czas dłuższy niż nastawiony czas działania blokady ( $\Delta t$ );
- zwarcia metaliczne K1, K2, K3 oraz oporowe ( $R_f = 10 \Omega$ ) i wysokooporowe ( $R_f = 100 \Omega$ ) występujące w trakcie kotłusania asynchronicznego nie zostały wykryte przez detektor zakłóceń blokady - detektor nie zadziałał ze względu na mały skok prądu będący podstawą jego działania;

- zwarcia metaliczne K1, K2, K3 i oporowe K1 ( $R_f = 10 \Omega$ ) występujące w trakcie kołysania synchronicznego zostały wykryte przez detektor zakłóceń blokady. Detektor zakłóceń zadziałał i zdjął sygnał blokady na ok. 85 ms. Zwarcie K1 wysokooporowe ( $R_f = 100 \Omega$ ) występujące w trakcie kołysania synchronicznego nie zostało wykryte przez detektor zakłóceń blokady;
- wystąpił niepoprawny brak zadziałania blokady, gdy podczas długotrwałego zwarcia zewnętrznego w strefie „wstecznej” Z3 impedancja ruchowa przemieściła się do strefy Z1 (strefa „do przodu”) funkcji zabezpieczenia odległościowego przekaźnika i wyszła z niej tak jak podczas obrotu asynchronicznego;
- blokada kołysaniowa poprawnie została zdjęta podczas zwarcia oporowego K1 występującego podczas kołysań synchronicznych. Po przeminięciu zwarcia K1 i wyłączeniu fazy zwartej podczas kołysań, w pozostałych dwóch zdrowych fazach poprawnie pojawił się sygnał blokady kołysaniowej. Sygnał blokady został poprawnie zdjęty podczas kołysań i wystąpienia zwarcia w jednej z pozostałych zdrowych faz podczas przerwy bezprądowej cyklu SPZ 1-fazowego;
- zewnętrzne zwarcie K1 oporowe w układzie do badań rozszerzonych z powodu zbyt małych zmian w przebiegach prądu i napięcia w zwartej fazie nie zostało wykryte i detektor zakłóceń nie pobudził się, a co za tym idzie sygnał blokady nie został zdjęty na czas zwarcia (zmiany wartości prądu były większe podczas zwarcia K1 metalicznego i sygnał blokady został zdjęty);
- w przypadku zwarcia zewnętrznego K3 w strefie „wstecznej” Z3, gdy czas trwania zwarcia był na tyle długi, że impedancja ruchowa po przeminięciu zwarcia nie wyszła ze strefy wewnętrznej blokady, blokada kołysaniowa nie pobudziła się i od razu zaczęły się kołysania asynchroniczne, podczas których impedancja ruchowa przechodziła przez strefę Z1 funkcji zabezpieczenia odległościowego;
- w przypadku zwarcia zewnętrznego K1 w strefie „wstecznej” Z3 podczas synchronicznych kołysań mocy poprawnie wykryte zostało zwarcie K1 występujące w strefie wstecznej funkcji zabezpieczenia odległościowego podczas kołysania. Blokada została poprawnie zdjęta na ok. 80 ms. Zwarcie występujące w strefie „wstecznej” widziane było podczas kołysania jako zwarcie występujące w strefie Z1. W tym przypadku położenie impedancji ruchowej zgodnej podczas zwarcia występującego w trakcie kołysania nie odwzorowuje właściwego miejsca wystąpienia zwarcia w układzie testowym;
- w przypadku zwarcia zewnętrznego, gdy impedancja ruchowa podczas kołysań asynchronicznych znajdowała się na zewnątrz stref blokady (mały kąt  $\delta$ ) impedancja ruchowa znalazła się w strefie wewnętrznej blokady. Zwarcie zostało poprawnie wykryte przez detektor zakłóceń i funkcja blokady poprawnie nie pobudziła się podczas zwarcia;
- w przypadku kołysań mocy o różnych kierunkach zmian impedancji ruchowej (do lub od punktu przekaźnikowego) badana blokada kołysaniowa zachowywała się zgodnie z oczekiwaniami tzn. poprawnie pojawiał się sygnał blokady, zarówno podczas kołysań synchronicznych jak i asynchronicznych;
- w przypadku badania poprawności działania blokady kołysaniowej podczas kołysań mocy synchronicznych i zwań wewnętrznych, podczas których nasycają się przekładniki prądowe, poprawnie został zdjęty sygnał blokady (na 80 ms) za pomocą funkcji detektora zakłóceń;
- w przypadku zwarcia rozwijającego się ( $K1 \rightarrow K2E \rightarrow K3E$ ) występującego podczas kołysań mocy synchronicznych, gdy impedancja ruchowa jest w strefie wewnętrznej blokady i ma zawracać, poprawnie został zdjęty (na 80 ms) sygnał blokady za pomocą funkcji detektora zakłóceń od chwili wystąpienia zwarcia K1;
- w przypadku kołysań synchronicznych występujących po załączeniu dużego odbioru blokada kołysaniowa poprawnie zadziałała;
- w przypadku zwań występujących podczas obciążenia pojemnościowego generatora i kołysań asynchronicznych, blokada poprawnie wykryła pierwszy obrót asynchroniczny. Zwarcie K3 występujące podczas pierwszego obrotu asynchronicznego zostało poprawnie wykryte przez detektor zakłóceń blokady (sygnał blokady został zdjęty na ok. 80 ms). Zwarcia K2 i K1 nie zostały wykryte przez detektor zakłóceń, a co za tym idzie sygnał blokady nie został zdjęty (niepoprawne działanie blokady);

- podczas długotrwałego zwarcia w sąsiednim odcinku linii blokada niepoprawnie nie została zdjęta podczas wolno likwidowanego zwarcia. Zwarcie tego typu zostało potraktowane przez algorytm blokady jak kołysanie mocy.

Na podstawie przeprowadzonych badań za pomocą symulatora IEn-RTS stwierdzono, że:

- badany przełącznik poprawnie wykrywał zwarcia K3, K2, K2E, K1 i poprawnie były wykonywane cykle SPZ jednokrotnego udanego (1- i 3-fazowego). Blokada kołysaniowa, zgodnie z oczekiwaniami, nie pobudziła się podczas całego cyklu SPZ;
- podczas kołysań synchronicznych zaobserwowano poprawne pobudzenie się blokady kołysaniowej, gdy impedancja ruchowa wchodziła w obszar działania blokady. Zaobserwowano poprawny brak pobudzania się funkcji zabezpieczenia odległościowego;
- podczas zwarć K3 i K2 w linii z przełącznikiem wykonano zostały udane cykle SPZ 3-fazowego, a podczas zwarcia K1 wykonany został udany cykl SPZ 1-fazowego. Blokada kołysaniowa poprawnie nie pobudziła się podczas udanych cykli SPZ;
- podczas zwarcia K3 w trakcie trwania kołysań synchronicznych występującego w chwili, gdy impedancja ruchowa podczas kołysania znalazła się w strefie wewnętrznej blokady, blokada kołysaniowa poprawnie została zdjęta i podany został sygnał na wyłączenie 3-fazowe. Wykonany został nieudany cykl SPZ 3-fazowego;
- podczas zwarcia K1 w trakcie trwania kołysań synchronicznych występującego, gdy impedancja ruchowa podczas kołysania znalazła się w strefie wewnętrznej blokady, blokada została poprawnie zdjęta przez sygnał detektora zakłóceń. Nastąpiło wyłączenie 1-fazowe i został wykonany cykl SPZ 1-fazowego udanego. Podczas przerwy bezprądowej cyklu SPZ 1-fazowego blokada kołysaniowa była aktywna. Po zamknięciu bieguna wyłącznika w wyniku udanego cyklu SPZ 1-fazowego wystąpiły kołysania synchroniczne podczas których blokada kołysaniowa pobudzała się zgodnie z oczekiwaniami;
- blokada kołysaniowa poprawnie została zdjęta podczas zwarcia K1 występującego w jednej z dwóch zdrowych faz w trakcie przerwy bezprądowej cyklu SPZ 1-fazowego. Nastąpiło poprawne definitywne wyłączenie 3-fazowe linii zwartej. Zgodnie z oczekiwaniami wykonany został cykl SPZ 1-fazowego jednokrotnego nieudanego.

Zaproponowane przez habilitanta w monografii [H1] scenariusze badań sprawdzone zostały na przykładzie jednego przełącznika odległościowego o określonej strukturze sprzętowo-programowej. Jednak mogą być one wykorzystane do badania blokad kołysaniowych innych przełączników wykorzystujących do swego działania sygnały lokalnie mierzone.

## **7. UWAGI DOTYCZĄCE PRACY BLOKAD KOŁYSANIOWYCH TYPU $\underline{z}(t)$**

Dobranie poprawnych nastaw funkcji blokad kołysaniowych typu  $\underline{z}(t)$ , nie jest proste i bardzo często wymaga dogłębnych i skomplikowanych analiz SEE, które pokażą maksymalny wpływ kołysań synchronicznych oraz przebieg trajektorii impedancji na płaszczyźnie  $X(R)$  podczas kołysań asynchronicznych w analizowanym fragmencie SEE.

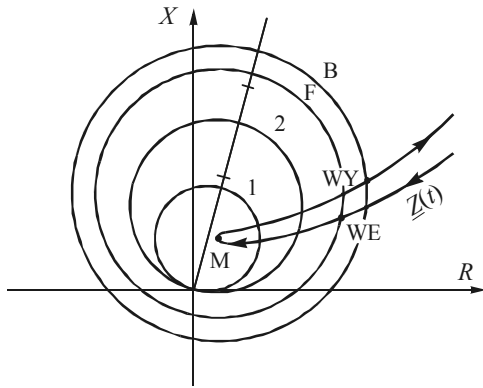
Najczęściej, podczas doboru nastaw blokad kołysaniowych SEE sprowadza się do układu dwumaszynowego, w którym grupa generatorów kołysze się względem pozostałej części systemu. W rzeczywistości SEE jest dużo bardziej skomplikowany, a jego parametry zmieniają się w czasie. Czas  $\Delta t$  będący kryterium rozróżniania kołysań mocy od zwarć w blokadach tradycyjnych nie obejmuje wszystkich sytuacji, które mogą wystąpić w systemie.

### **7.1. CZAS PRZEBYWANIA TRAJEKTORII IMPEDANCJI W CHARAKTERYSTYCE ZABEZPIECZENIA ODLEGŁOŚCIOWEGO**

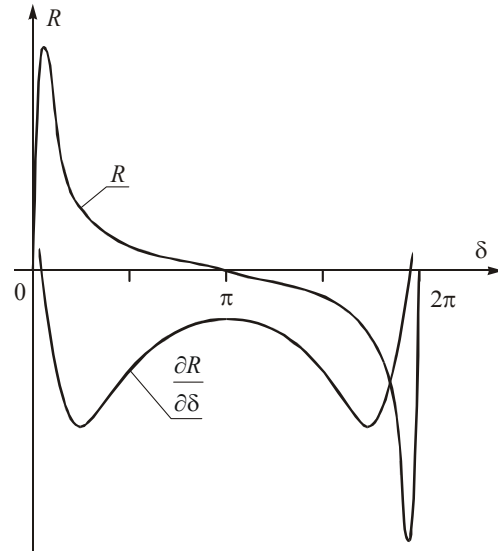
Do nastawiania blokad kołysaniowych przydatna jest znajomość czasu przez jaki trajektoria impedancji pozostaje wewnątrz stref pomiarowych zabezpieczenia odległościowego w trakcie typowych kołysań synchronicznych. Ilustruje to [rys. 7.1](#). W trakcie typowego kołysania synchronicznego blokada pobudza się w punkcie WE, w którym trajektoria impedancji  $\underline{z}(t)$  wkracza do

charakterystyki wewnętrznej F blokady (po spełnieniu kryterium czasowego przejścia impedancji między charakterystykami B i F) i odzwudcza się w punkcie WY (jeśli nie ustawiono czasu odpadania blokady), w którym trajektoria wychodzi z charakterystyki (strefy) zewnętrznej B blokady.

Oszacowanie czasu przebywania trajektorii impedancji w charakterystyce zabezpieczenia na podstawie części okresu typowych kołysań nie daje realnej wartości, gdyż szybkość ruchu na płaszczyźnie  $X(R)$  nie jest jednakowa. Dla niektórych wartości kąta obciążenia  $\delta$  przy tym samym poślizgu wirnika szybkość ruchu wektora impedancji na płaszczyźnie  $X(R)$  jest duża, a dla niektórych mała. Można to uzasadnić w następujący sposób.



**Rys. 7.1.** Wkroczenie trajektorii impedancji do stref zabezpieczenia odległościowego w trakcie kołysań synchronicznych



**Rys. 7.2.** Zależność rezystancji mierzonej w punkcie przekąźnikowym i jej pochodnej od kąta  $\delta$

Szybkość zmiany rezystancji mierzonej przez przekąźnik określa wzór:

$$\frac{dR(t)}{dt} = \frac{\partial R}{\partial \delta} \cdot \frac{d\delta}{dt} \quad (7.1)$$

gdzie  $d\delta/dt$  jest poślizgiem zaś pochodna  $\partial R/\partial \delta$  dana jest wzorem:

$$\frac{\partial R}{\partial \delta} = \pm X_b k_E (k_X + 1) \frac{k_E^2 \cos \delta - 2k_E + \cos \delta}{(k_E^2 - 2k_E \cos \delta + 1)^2} \quad (7.2)$$

przy czym plus dotyczy węzła wysyłającego zaś minus węzła odbiorczego. Przykład zależności rezystancji mierzonej przez przekąźnik od kąta obciążenia  $\delta$  pokazano na rys. 7.2. Osiąga ona wartość równą zero przy wartościach kąta  $\delta$  równych krotnościom  $\pi$ .

Charakterystyka  $R(\delta)$  jest najbardziej stroma w pobliżu małych wartości kąta oraz dość płaska w pobliżu wartości zbliżonych do  $\pi$ . Z tego względu w pobliżu kąta  $\pi$  pochodna  $\partial R/\partial \delta$  przyjmuje małe wartości. Zgodnie z wzorem (7.1) oznacza to, że w pobliżu dużych kątów  $\delta$  bliskich  $\pi$  przy tej samej wartości poślizgu  $d\delta/dt$  szybkość zmian rezystancji  $dR/dt$  jest mniejsza niż przy małych (ale nie zerowych) wartościach kąta obciążenia  $\delta$ . Wyciągnąć można wniosek, że szybkość zmian  $R(t)$  wzdłuż trajektorii  $\underline{Z}(t)$  nie jest jednakowa i zależy od wartości poślizgu w danym momencie oraz kąta obciążenia  $\delta$ .

W przypadku kołysań asynchronicznych w połowie obrotu asynchronicznego w pobliżu osi  $X$  poślizg  $d\delta/dt$  jest zawsze duży i mimo małej wartości  $\partial R/\partial \delta$  pochodna  $dR/dt$  osiąga tu dość duże wartości. Oznacza to, że w przypadku kołysań asynchronicznych trajektoria  $\underline{Z}(t)$  dość szybko przechodzi przez charakterystyki zabezpieczenia odległościowego. W przypadku kołysań asynchronicznych nie należy więc oczekiwać długiego czasu przebywania trajektorii  $\underline{Z}(t)$  wewnątrz charakterystyk zabezpieczenia odległościowego.

W przypadku kotłusań synchronicznych można natomiast oczekiwać, że czas przebywania trajektorii  $\underline{z}(t)$  wewnątrz charakterystyk zabezpieczenia odległościowego będzie dość długi. Wynika to z faktu, że w przypadku kotłusań synchronicznych oba czynniki we wzorze (7.1) określającym szybkość  $dR/dt$  są małe:

- na całej drodze trajektorii  $\underline{z}(t)$  wewnątrz charakterystyk zabezpieczenia poślizg jest mały, gdyż przy zawracaniu trajektorii (rys. 7.1) poślizg  $d\delta/dt$  musi zmienić znak, czyli najpierw z dodatnich wartości maleje do zera, a następnie powoli zwiększa swą ujemną wartość;
- wewnątrz charakterystyk zabezpieczenia odległościowego są duże wartości kątów obciążenia  $\delta$  bliskie  $\pi$ , a małe wartości pochodnej  $\partial R/\partial\delta$  (rys. 7.2).

Zatem, można wyciągnąć wniosek, że czas przebywania trajektorii  $\underline{z}(t)$  wewnątrz charakterystyk zabezpieczenia odległościowego dla kotłusań synchronicznych może być sporo dłuższy niż dla kotłusań asynchronicznych.

## 7.2. CZAS DEBLOKADY

Jednym z parametrów nastawianych w blokadach kotłusaniowych jest *czas deblokady* (ang. *maximum blocking time*). Deblokada polega na samoczynnym bezwarunkowym „zdjęciu” blokady kotłusaniowej (bez względu na inne kryteria) po upływie zadanego czasu nazywanego czasem deblokady. Czas deblokady powinien być na tyle długi by odblokowywanie zabezpieczenia odległościowego nie następowało w trakcie typowego kotłusania synchronicznego jak na rys. 7.1.

Kotłusania mocy między generatorami elektrowni wewnątrz zwartego SEE mają częstotliwość rzędu (0,8÷1,2) Hz. Przy takiej częstotliwości kotłusań trajektoria impedancji przebywa wewnątrz charakterystyk zabezpieczenia około (0,5÷1,2) s, z czego wynika, że czas deblokady powinien wynosić co najmniej 1,5 s. Producenci domyślnie w cyfrowych urządzeniach zabezpieczeniowych nastawiają (jeśli jest nastawiany) czas deblokady równy 2 s. Podkreślają, że taki czas był nastawiany w starszych elektromechanicznych i elektronicznych (statycznych) przekaźnikach odległościowych wyposażonych w blokady kotłusaniowe.

Kotłusania mocy między dużymi zwartymi podsystemami w liniach wymiany międzysystemowej mają mniejszą częstotliwość rzędu (0,2÷0,5) Hz. Przy takiej częstotliwości kotłusań trajektoria impedancji przebywa wewnątrz charakterystyk zabezpieczenia około (1,5÷3,5) s, z czego wynika, że czas deblokady powinien wynosić co najmniej 4 s. Zbyt szybkie zdjęcie blokady mogłoby spowodować zbędne zadziałanie zabezpieczenia odległościowego i zbędne wyłączenie linii wymiany międzysystemowej. Zatem, czas deblokady, należy nastawiać na nie krócej niż 2 s dla zabezpieczeń elementów sieci wewnątrz SEE oraz na nie krócej niż 5 s dla zabezpieczeń linii powiązań międzysystemowych. Deblokada ma dwa następujące cele:

- odblokowuje zabezpieczenie odległościowe w razie, gdyby z jakichś powodów zawiodło jego odblokowanie (zdjęcie blokady kotłusaniowej) przy wychodzeniu trajektorii impedancji z wnętrza charakterystyki,
- odblokowuje zabezpieczenie odległościowe w przypadku, gdy trajektoria impedancji nie wychodzi z wnętrza charakterystyki w zadanym czasie, na przykład w wyniku powstania w trakcie kotłusań kolejnego zwarcia trójfazowego.

W tym drugim przypadku deblokada daje szansę zadziałania zabezpieczenia odległościowego po upływie zadanego czasu deblokady.

W celu zwiększenia niezawodności rozpoznania zwarcia powstającego w trakcie kotłusań mocy producenci nowoczesnych urządzeń zabezpieczeniowych wprowadzają dodatkowe kryteria i algorytmy pozwalające odblokować zabezpieczenie bez konieczności czekania na upływ czasu deblokady (analizę takich kryteriów przeprowadzono w monografii [H1]). Ze względu na stosowanie tych nowych algorytmów rozpoznawania zwarcia rola deblokady w nowoczesnych cyfrowych urządzeniach zabezpieczeniowych jest mniejsza niż była w przypadku zabezpieczeń elektromechanicznych lub statycznych (elektronicznych).

Z powodu stosowania coraz lepszych algorytmów detekcji różnych zakłóceń (w tym zwarc) podczas kotłusań mocy i działania blokad kotłusaniowych obserwuje się stopniowe odchodzenie od nastawiania czasu deblokady. Przykładowo, w przekaźniku 7SA511 firmy Siemens istniała możliwość nastawiania



tego czasu choć fabrycznie był on nastawiony na nieskończoność. W przekaźniku 7SA513 czas deblokady mogą nastawiać osoby z serwisu firmy Siemens, a nie użytkownicy przekaźnika. W tym przypadku czas deblokady również jest nastawiony fabrycznie na nieskończoność. Natomiast w przekaźniku 7SA522 w ogóle nie ma możliwości nastawienia czasu deblokady zarówno przez serwisanta jak i zwykłego użytkownika.

W badanym przekaźniku D60 nie przewidziano możliwości nastawiania czasu deblokady. Zamiast tego przewidziano nastawienie czasu podtrzymania sygnału blokady (ang. *reset time*). Czas ten jest odliczany od chwili wyjścia impedancji ruchowej z charakterystyki zewnętrznej blokady. Dzięki temu w przypadku kołysań synchronicznych blokada kołysaniowa nie odzwbudza się za każdym razem, gdy impedancja ruchowa wyjdzie na chwilę z charakterystyki zewnętrznej blokady. W przypadku kołysań asynchronicznych dzięki odliczaniu tego czasu mogą być zliczane kolejne obroty asynchroniczne. Zdaniem habilitanta nastawianie czasu podtrzymania sygnału blokady ma sens, jeśli czas deblokady nie będzie nastawiony na zero.

## 8. PODSUMOWANIE

Blokady kołysaniowe zabezpieczeń odległościowych pełnią istotną rolę w systemie zabezpieczeń związanych z kołysaniami mocy. Są one integralnymi częściami zabezpieczeń odległościowych. Powinny one niezawodnie blokować wybrane strefy pomiarowe zabezpieczeń odległościowych w trakcie kołysań mocy po to, by wskutek wejścia impedancji ruchowej do stref pomiarowych zabezpieczenia nie doszło do zbędnego wyłączenia linii lub innych ważnych elementów SEE. W przyszłości rola blokad kołysaniowych nie będzie malała i będą one częścią dużego obszarowego systemu zabezpieczeń SIPS (ang. *special integrity protection system*). Można przyjąć, że w funkcje blokad kołysaniowych wyposaża się te zabezpieczenia odległościowe sieci przesyłowej, które mogą działać w trakcie kołysań mocy. Wyboru dokonuje się na podstawie wielowariantowej analizy stabilności SEE wykonywanej dla wielu miejsc zwarć i rozmaitych stanów pracy SEE. Funkcję blokady kołysaniowej uruchamia się dla stref szybkich działających z czasem poniżej 1 s dla linii wewnątrz SEE. W przypadku zastosowania jako zabezpieczeń odległościowych jako rezerwowych, można by przyjąć, że wszystkie zabezpieczenia odległościowe mają aktywną funkcję blokady kołysaniowej pierwszych dwóch stref pomiarowych.

Blokady kołysaniowe powinny poprawnie działać w różnych nietypowych sytuacjach, które mogą wystąpić w SEE. Blokowanie stref pomiarowych funkcji zabezpieczeń odległościowych (działanie blokady) powinno mieć miejsce w przypadku kołysań synchronicznych i asynchronicznych w szerokim zakresie częstotliwości kołysań (nawet do 10 Hz) zarówno podczas stanów symetrycznych (kołysania w trzech fazach) jak i podczas stanów niesymetrycznych (kołysania w dwóch zdrowych fazach podczas przerwy bezprądowej w cyklu SPZ 1-fazowego). Blokada kołysaniowa powinna być „zdejmowana” ze stref pomiarowych funkcji zabezpieczenia odległościowego (odblokować jej działanie) w przypadku zakłóceń, które mogą wystąpić w trakcie kołysań. Do takich sytuacji można m.in. zaliczyć: (a) zwarcia wewnętrzne symetryczne i niesymetryczne w blokowanych strefach pomiarowych, (b) długotrwałe zewnętrzne zwarcia symetryczne i niesymetryczne, (c) długotrwałe zwarcia doziemne wysokooporowe, (d) zwarcie w zdrowej fazie w trakcie przerwy bezprądowej cyklu SPZ 1-fazowego. W monografii [H1] na podstawie dostępnej literatury przeanalizowano stosowane i proponowane rozwiązania w celu poprawienia działania blokad kołysaniowych w trudnych sytuacjach. Z przeprowadzonej analizy można wywnioskować, że jednym z większych problemów jest wykrywanie zwarć 3-fazowych występujących podczas kołysań synchronicznych. Osobnym zagadnieniem, na które należy zwrócić uwagę jest coraz większe nasycenie SEE układami zawierającymi elementy energoelektroniczne (rozproszone źródła energii). Złe sterowanie tego typu układami, może doprowadzić do oscylacji wymuszonych o dużych częstotliwościach (oscylacje podsynchroniczne). W przypadku tego typu oscylacji blokady kołysaniowe mogą działać niepoprawnie.

Tradycyjne blokady kołysaniowe typu  $Z(t)$  wykorzystujące pomiar szybkości zmian impedancji ruchowej między strefą wewnętrzną i zewnętrzną blokady, są coraz częściej zastępowane blokadami o innej zasadzie działania i wykorzystującymi inne (niż impedancja) wielkości kryterialne. Analizę stosowanych obecnie blokad kołysaniowych przeprowadzono w monografii [H1]. Na uwagę zasługują

blokady: typu  $d(U \cos \varphi)/dt$ , typu  $\Delta I$ , wykorzystujące ciągłe obliczanie impedancji ruchowej, wykorzystujące przekształcenie falkowe.

Nastawianie tradycyjnych blokad kołysaniowych typu  $\underline{Z}(t)$  jest dość trudne i wymaga analizy stabilności SEE w celu właściwego doboru ich nastaw (zasięgi stref wewnętrznej i zewnętrznej blokady i czas przejścia impedancji między strefami). Z tego powodu nowe rozwiązania blokad kołysaniowych stosowanych w cyfrowych zabezpieczeniach odległościowych powinny być beznastawieniowe, a rola użytkowników powinna sprowadzać się jedynie do wyboru strefy pomiarowej funkcji zabezpieczenia odległościowego, która ma być blokowana oraz tego, czy zabezpieczenie odległościowe ma podać sygnał na otwarcie wyłącznika po wykryciu obrotu asynchronicznego.

Obecnie stosowane blokady kołysaniowe wykorzystują do swego działania sygnały (prądy, napięcia) lokalnie mierzalne. Intensywny rozwój techniki pomiarów synchronicznych powoduje, że do wykrywania pracy asynchronicznej i rozcinania SEE próbuje się wykorzystać sygnały obszarowe - fazory mierzone synchronicznie (nie było to jednak głównym przedmiotem zainteresowania w monografii [H1]). Zdaniem habilitanta blokady kołysaniowe jako funkcje ściśle powiązane z funkcjami zabezpieczeń odległościowych będą nadal bazowały (detekcja kołysań mocy) na sygnałach lokalnie mierzalnych, a pomiary synchroniczne (synchrofazory) będą mogły zostać wykorzystane do wsparcia decyzyjnego blokad dotyczącego blokowania lub nie funkcji zabezpieczeń odległościowych. Można też sobie wyobrazić zastosowanie pomiarów synchronicznych do adaptacji nastawień blokad kołysaniowych ze względu na aktualnie panujące warunki pracy SEE.

Funkcje blokad kołysaniowych powinny być badane. Badania powinny dotyczyć zarówno sprawdzenia poprawności nastawienia blokady jak i jej poprawności zachowania się podczas specyficznych warunków systemowych. W najnowszych normach oraz opracowaniach dotyczących badania zabezpieczeń odległościowych informacje dotyczące sposobu ich badania podczas kołysań mocy są bardzo lakoniczne lub nie ma ich wcale [7, 8, 9]. W wymienionych opracowaniach blokady kołysaniowe traktowane są jako integralna część zabezpieczeń odległościowych. Habilitant opracował zestawy badań jakim, jego zdaniem, powinny podlegać blokady kołysaniowe. Zaproponowane badania mogą mieć charakter badań w zakresie: podstawowym i rozszerzonym.

Badania w zakresie podstawowym służą do sprawdzenia poprawności działania blokad nie uwzględniającego sytuacji nietypowych, w których blokady mogą działać niepoprawnie. Są one zwykle wykonywane w prostych układach testowych. W przypadku badań blokad w zakresie rozszerzonym powinny one zostać sprawdzone w rozbudowanych układach testowych i uwzględniać sytuacje nietypowe, w których blokady mogą działać niepoprawnie. Układy testowe modelowane są w programach symulacyjnych, a przebiegi zakłóceniami (prądy, napięcia) zapisywane są do plików w formacie COMTRADE, które są odtwarzane za pomocą testerów mikroprocesorowych. Na podstawie zachowania się badanego urządzenia oceniana jest poprawności jego działania.

Wykorzystując opracowany zestaw badań oraz przygotowanie narzędzia badawcze habilitant wykonał i przedstawił wyniki wykonanych badań blokady kołysaniowej wybranego urządzenia zabezpieczeniowego. Na podstawie przeprowadzonych badań blokady kołysaniowej, stwierdzono, że blokada kołysaniowa dostępna w badanym przekaźniku D60 jest blokadą kołysaniową typu  $\underline{Z}(t)$  uzupełnioną o funkcję detekcji zwarć występujących podczas kołysań mocy. Po przeprowadzeniu badań stwierdzono, że zastosowana blokada kołysaniowa posiada wady typowe dla blokad typu  $\underline{Z}(t)$ , np. zakres wykrywanych częstotliwości kołysań jest silnie uzależniony od nastaw  $\Delta Z$  i  $\Delta t$  blokady.

Jeśli chce się obserwować wpływ badanego urządzenia na zmiany konfiguracji zamodelowanego fragmentu SEE np. w wyniku otwierania/zamykania łączników w modelu, to do tego celu należy wykorzystać symulatory typu RTS. W przypadku badania blokad kołysaniowych symulatory typu RTS mogą zostać wykorzystane do sprawdzenia zachowania się blokady kołysaniowej podczas kołysań występujących w dwóch zdrowych fazach podczas przerwy bezprądowej cyklu SPZ 1-fazowego oraz po udanym cyklu SPZ.

Symulatory komercyjne są urządzeniami bardzo drogimi. Z tego m.in. powodu został zbudowany i opisany w monografii symulator typu RTS działający w czasie rzeczywistym zjawisk dynamicznych w SEE do badania urządzeń zabezpieczeniowych. Zbudowany symulator został wykorzystany do badania blokady kołysaniowej przekaźnika m.in. podczas cyklu SPZ 1- i 3-fazowego. Dzięki symulatorowi

sprawdzone zostały sytuacje, gdy badane urządzenie miało wpływ na zachowanie się odwzorowanego fragmentu SEE w programie symulacyjnym. Podczas przeprowadzonych badań przełącznik zachowywał się zgodnie z oczekiwaniami, poprawnie wykonywane zostały cykle SPZ zarówno 1- jak i 3-fazowego. Blokada kołysaniowa poprawnie blokowała funkcję zabezpieczenia odległościowego podczas kołysań mocy i była zdejmowana podczas zwarć występujących w trakcie kołysań mocy.

W dalszych pracach badawczych związanych z blokadami kołysaniowymi habilitant zamierza:

- sprawdzić wybrane algorytmy detekcji kołysań mocy opisane w monografii [H1] i podjąć próbę ich modyfikacji lub opracowania własnego algorytmu detekcji;
- sprawdzić wybrane algorytmy detekcji zakłóceń podczas kołysań mocy opisane w monografii [H1] i podjąć próbę ich modyfikacji lub opracowania własnego algorytmu detekcji zakłóceń podczas kołysań mocy;
- wykonać badania zaproponowanych algorytmów pod kątem sprawdzania systemu zabezpieczeń związanego z kołysaniami mocy w tym z uwzględnieniem układów z dużym nasyceniem odnawialnych źródeł energii wyposażonych w elementy energoelektroniczne;
- zbadać blokady kołysaniowe dostępne w przełącznikach odległościowych producentów, których urządzenia zastosowano w KSE;
- rozbudować i wykorzystać rozbudowany symulator IEn-RTS do badania koordynacji działania zabezpieczeń odległościowych, w tym podczas kołysań mocy.

## 9. WKŁAD PRZEDSTAWIONEJ PRACY W ROZWÓJ DYSCYPLINY ELEKTROTECHNIKA

Jako wkład przedstawionej pracy [H1] w rozwój dyscypliny elektrotechniki habilitant uznaje:

- usystematyzowanie wiedzy, na bazie analiz własnych oraz studiów literaturowych, dotyczącej kołysań mocy i algorytmów wykorzystywanych do ich detekcji w blokadach kołysaniowych zabezpieczeń odległościowych,
- analizę stanów zakłóceńowych zarówno prostych jak i złożonych istotnych do oceny poprawności działania blokad kołysaniowych, a w konsekwencji zabezpieczeń odległościowych,
- opracowanie modeli matematycznych fragmentów SEE pozwalających na symulacje stanów zakłóceńowych wykorzystywanych do weryfikacji poprawności działania blokad kołysaniowych, a w konsekwencji zabezpieczeń odległościowych,
- udział w pracach koncepcyjnych, wykonaniu i uruchomieniu symulatora działającego w czasie rzeczywistym zjawisk dynamicznych występujących w SEE pozwalającego na interaktywne badania zachowania się zabezpieczenia odległościowego w trakcie symulowanych zakłóceń w zamodelowanej sieci elektroenergetycznej,
- udoskonalenie, poprzez opracowanie autorskich metod testowania, procesu weryfikacji poprawności działania blokad kołysaniowych, a w konsekwencji zabezpieczeń odległościowych,
- określenie zakresu i przeprowadzenie wszechstronnych i wielowątkowych badań symulacyjnych, w zakresie podstawowym i rozszerzonym, wybranego przełącznika odległościowego z wykorzystaniem symulatora IEn-RTS i opracowanych modeli symulacyjnych.

## 10. LITERATURA

- [1] Winkler W., Wiszniewski A., „Automatyka zabezpieczeniowa w systemach elektroenergetycznych”, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1999
- [2] Żydanowicz J., „Elektroenergetyczna automatyka zabezpieczeniowa”, W trzech tomach, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1979, 1985, 1987
- [3] Rosołowski E., „Cyfrowe przetwarzanie sygnałów w automatyce elektroenergetycznej”, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa, 2002
- [4] Szafran J., Wiszniewski A., „Algorytmy pomiarowe i decyzyjne cyfrowej automatyki elektroenergetycznej”, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2001
- [5] CIGRE, „Analysis and guidelines for testing numerical protection schemes”, CIGRE Report No 159, Working Group 34.10, August 2000

- [6] Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A., Standardowe specyfikacje techniczne. Tytuł: Wymagania techniczne dotyczące urządzeń elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej, używanych w krajowych stacjach elektroenergetycznych NN i WN. Nr kodowy: PSE-ST.EAZ.NN.WN/2013v1, Konstancin-Jeziorna, czerwiec 2013
- [7] CIGRE, „Acceptance, Commissioning and Field Testing Techniques for Protection and Automation Systems”, CIGRE Report No 637, Working Group B5.45, November 2015
- [8] IEEE Power & Energy Society, IEEE Guide for Power System Protection Testing, IEEE Std C37.233 – 2009 IEEE 3 Park Avenue New York, NY 10016-5997, USA 11 December 2009
- [9] PKN, PN-EN 60255-121, Przekładniki pomiarowe i urządzenia zabezpieczeniowe, Część 121: Wymagania funkcjonalne dotyczące zabezpieczeń odległościowych, nr ref. PN-EN 60255-121:2014-10, Warszawa 2014
- [10] Głaz M., „Stan automatyki w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym”, Automatyka Elektroenergetyczna, nr 1/2007
- [11] Machowski J. i inni., „Analiza porównawcza i ocena wyposażenia układów automatyki przeciwkołysaniowo-odciążającej”. Praca badawcza Nr 09/3-3.4.1./43/95 wykonana na zlecenie Konsorcjum Politechniki Gdańskiej-Politechniki Śląskiej-Politechniki Warszawskiej
- [12] Machowski J., Smolarczyk A., Brzeszczak L., „Opracowanie zasad nastaw blokad przeciwkołysaniowych zabezpieczeń pod kątem odbudowy systemu”, Instytut Elektroenergetyki Politechniki Warszawskiej, Praca badawczo-rozwojowa zlecona przez PSE-Operator S.A. w Warszawie, umowa nr SR/RB/IS/008/05, Warszawa 2005, 2006
- [13] IEEE PES, Power swing and out-of-step considerations on transmission lines. A report to the Power System Relaying Committee of IEEE Power Engineering Society. Raport zamieszczony na stronie (2005) <http://www.133.pair.com/psrc/> (Published Reports/Line protections)
- [14] Hou D., Tziouvaras D.A., „Out-of-step protection enhancements”, Developments in Power System Protection, 2004. Eighth IEE International Conference, 5-8 April 2004, ISSN: 0537-9989
- [15] Tziouvaras D.A., Hou D., „Out-of-step protection fundamentals and advancements” Protective Relay Engineers, 2004 57th Annual Conference, 30 Mar.-1 Apr. 2004
- [16] Machowski J., „Out-of-step relaying systems, Part 1: Critical review of existing devices, Part2: Improved version of blocking relays, Part 3: Selection of digital measuring systems, Part 4: Improved versions of measuring algorithms”. Universität Kaiserslautern, Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgung, Research project sponsored by AEG Frankfurt, 1989/90
- [17] Hou D., Chen S., Turner S., SEL-321-5 Relay Out-Of-Step Logic, Schweitzer Engineering Laboratories, Application Guide AG97-13, July 23, 1997
- [18] GE Multilin, D60 Line Distance Protection System, Instruction Manual, D60 Revision: 6.0x, Manual P/N: 1601-0089-X1 (GEK-113589), GE Multilin 2011, Dostępne na stronie (2011): <http://www.GEindustrial.com/multilin>
- [19] OMICRON electronics, Opis oprogramowania Test Universe v.2.41, Dostępne na stronie (2013): <http://www.omicron.at/>
- [20] Smolarczyk A., „Automatyka przeciwkołysaniowo-odciążająca nie powodująca wyłączeń generatorów”. Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa 1999
- [21] Manitoba HVDC Research Centre Inc., On-line help programu PSCAD/EMTDC v.4.2.1

5.Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych wnioskodawcy, świadczących o istotnej aktywności naukowej habilitanta

W swojej działalności badawczej zajmuję się zagadnieniami dotyczącymi:

- metod badania poprawności działania cyfrowych przekładników elektroenergetycznych;

- symulacji stanów dynamicznych w systemie elektroenergetycznym;
- symulatorów działających w czasie rzeczywistym zjawisk dynamicznych w systemie elektroenergetycznym;
- modelowania zabezpieczeń elektroenergetycznych;
- algorytmów sterowania poprawiających stabilności systemu elektroenergetycznego.

Do pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych zaliczam:

- realizację dwóch grantów badawczych dotyczących metod badania przekąźników elektroenergetycznych [1, 2];
- udział w realizacji projektu badawczego zamawianego [3];
- opracowanie metod badania i wykonanie badań cyfrowych przekąźników elektroenergetycznych, przykładowe publikacje: [4-6];
- współudział w opracowaniu i sprawdzeniu algorytmów sterowania dotyczących poprawy stabilności systemu elektroenergetycznego, przykładowe publikacje: [7-10];
- współudział w opracowaniu modeli symulacyjnych wybranych zabezpieczeń elektroenergetycznych, przykładowe publikacje: [11, 12];
- pełnienie funkcji opiekuna naukowego (promotora) dla 30 prac dyplomowych magisterskich i 17 prac dyplomowych inżynierskich obronionych na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej.

Poniżej podano tylko wybrane publikacje. Pełny wykaz publikacji habilitanta oraz zrealizowanych prac podano w załączniku nr 5 do wniosku.

#### Literatura

- [1] "Metody badania cyfrowych zabezpieczeń elektroenergetycznych". Grant KBN Nr 4 T10B 068 22, lata realizacji 2002-2003
- [2] "Nowe metody selektywnego rozróżniania kołysań mocy od zwarć oporowych, rozwijających się i innych złożonych zakłóceń zapewniające niezawodną pracę zabezpieczeń odległościowych". Projekt badawczy własny MNiSW, Nr N N511 358234, lata realizacji 2008-2010
- [3] Projekt Badawczy Zamawiany nr PBZ-MEiN-1/2/2006, „Bezpieczeństwo elektroenergetyczne kraju”. Organ przyznający fundusze na realizację projektu: Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego, lata realizacji 2007-2009
- [4] **A. Smolarczyk**, 2004, "Badanie przekąźników elektroenergetycznych", Przegląd Elektrotechniczny, Nr 11 (2004), pp. 1060-1065, PL ISSN 0033-2097
- [5] **A. Smolarczyk**, M. Lizer, 2009, "Badanie admitancyjnych funkcji zabezpieczeniowych za pomocą nowoczesnych testerów mikroprocesorowych", Automatyka Elektroenergetyczna, Nr 4/2009, pp. 4-11, ISSN 1230-7815
- [6] **A. Smolarczyk**, P. Sobczyński, 2011, "Sprawdzanie poprawności działania przekąźników elektroenergetycznych za pomocą programu PowerFactory", Wiadomości Elektrotechniczne Nr 4 (2011), pp. 36-41, ISSN 0043-5112
- [7] J. Machowski, **A. Smolarczyk**, J.W. Bialek, 2001, "Damping of power swings by control of braking resistors", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, tom 23, nr 7/2001, pp. 539-548, ISSN 0142-0615
- [8] J. Machowski, **A. Smolarczyk**, 2000, "Sterowanie rezystorów hamujących jako środek poprawy stabilności", Archiwum Energetyki tom XXIX (2000), Nr 1-2, pp. 3-26, ISSN 0066-684X
- [9] **A. Smolarczyk**, 2000, "Automatyka przeciwkołysaniowo-odciążająca typu restytucyjnego-propozycja", Archiwum Energetyki tom XXIX (2000), Nr 3-4, pp. 49-68 ISSN 0066-684X

[10] S. Robak, **A. Smolarczyk**, 2002, "Power System Stabilizer Modifications for Power System Stability Enhancement", International Conference Modern Electric Power Systems – MEPS'02, IEEE Polish Section, Wrocław, September 11-13, 2002, pp. 128–132, ISBN 83-87299-93-6

[11] **A. Smolarczyk**, 2008, "Modelowanie zakłóceń w sieciach wysokiego napięcia i zabezpieczeń odległościowych za pomocą programu PSCAD/EMTDC", Wiadomości Elektrotechniczne, Nr 11 (2008), pp. 28-32, ISSN 0043-5112

[12] **A. Smolarczyk**, E. Bartosiewicz, 2013, "Modeling Differential Protections of Power Transformers and Their Testing Using PSCAD/EMTDC Software", International Journal of Systems Applications, Engineering & Development, Issue 3, Volume 7, 2013, pp. 139- 147 (9 stron), ISSN: 2074-1308

  
.....  
Podpis wnioskodawcy