Załącznik nr 3 do *Wniosku habilitacyjnego*
Wnioskodawca: dr inż. Marcin Szewczyk

AUTOREFERAT HABILITACYJNY (W JĘZYKU POLSKIM)

1. Imię i nazwisko: **Marcin Szewczyk**

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

- Tytuł magistra inżyniera, uzyskany na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej, na kierunku Elektrotechnika, w zakresie elektrotechnologii, na specjalności Technika Wysokich Napięć, uzyskany z wynikiem bardzo dobrym w dniu 25 sierpnia 2000 r., tytuł pracy: „Opracowanie programu numerycznego obliczania wskaźnika zagrożenia piorunowego i częstości przepięć indukowanych w obiektach budowlanych", promotor: dr inż. Marek Łoboda.

- Stopień doktora nauk technicznych w zakresie elektrotechniki, nadany uchwałą Rady Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej z dnia 11 marca 2009 r., promotor w przewodzie doktorskim: dr hab. inż. Stanisław Kulas, prof. Politechniki Warszawskiej, recenzenci w przewodzie doktorskim: prof. dr hab. inż. Zbigniew Ciok, prof. dr inż. Edward Anderson, tytuł rozprawy doktorskiej: „Analiza podwyższonych napięć powrotnych w sieciach przemysłowych średnich napięć".

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

- **10/2016 – nadal**
  Instytut Elektroenergetyki, Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny, Warszawa
  10/2016 – nadal: Adiunkt
- **02/2010 – 06/2017**
  Pracownik Naukowo-Badawczy, Korporacyjne Centrum Badawcze ABB, Kraków
  08/2013 – 06/2017: Pracownik Naukowo-Badawczy „Principal Scientist"
  02/2010 – 08/2013: Pracownik Naukowo-Badawczy „Senior Scientist"
- **10/2000 – 07/2010**
  Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny, Warszawa
  05/2009 – 07/2010: Adiunkt
  11/2004 – 04/2009: Asystent
  10/2000 – 09/2005: 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 (wg pkt. 1.2 niniejszych *Zasad prowadzenia postępowań habilitacyjnych*)

a) tytuł osiągnięcia naukowego (zgodnie z wnioskiem): **„OGRANICZANIE SZYBKOZMIENNYCH PRZEPIĘĆ W ROZDZIELNICACH GAZOSZCZELNYCH TYPU GIS WYSOKICH I ULTRA WYSOKICH NAPIĘĆ"**

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

[H1] **M. Szewczyk**, „Multi-spark modeling of very fast transient overvoltages for the purposes of developing HV and UHV gas-insulated switchgear and of conducting insulation co-ordination studies," Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, vol. 65, no 6, Dec. 2017, pp. 871-882

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na:

- *opracowaniu założeń i struktury artykułu*
- *opracowaniu programu badań symulacyjnych*
- *opracowaniu założeń dla przedstawionych w pracy analiz*
- *przeglądzie stanu technologii i analizie metod modelowania szybkozmiennych przepięć w rozdzielnicach gazoszczelnych typu GIS*
- *opracowaniu użytych w pracy modeli symulacyjnych*
- *wykonaniu badań symulacyjnych*
- *wykonaniu analiz przedstawionych w pracy wyników badań symulacyjnych*
- *weryfikacji wyników badań*
- *całościowym opracowaniu tekstu manuskryptu*

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

[H2] **M. Szewczyk**, M. Kuniewski, „Controlled Voltage Breakdown in Disconnector Contact System for VFTO mitigation in Gas-Insulated Switchgear (GIS)," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 32, No. 5, Oct. 2017, pp. 2360-2366

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na:

- *opracowaniu założeń i struktury artykułu*
- *opracowaniu programu badań symulacyjnych*
- *opracowaniu założeń dla przedstawionych w pracy analiz*
- *przeglądzie stanu technologii i analizie metod modelowania szybkozmiennych przepięć w rozdzielnicach gazoszczelnych typu GIS*
- *współudziale w opracowaniu użytych w publikacji modeli symulacyjnych*
- *współudziale w wykonaniu badań symulacyjnych*
- *współudziale w wykonaniu analiz przedstawionych w pracy wyników badań symulacyjnych*
- *weryfikacji wyników badań*
- *całościowym opracowaniu tekstu manuskryptu*

Mój udział procentowy szacuję na: ***80%***

[H3] **M. Szewczyk**, K. Kutorasiński, M. Wroński, M. Florkowski, „Full-Maxwell Simulations of Very Fast Transients in GIS: Case Study to Compare 3-D and 2-D-Axisymmetric Models of 1100 kV Test Setup," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 32, No. 2, Apr. 2017, pp. 733-739

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na:

- *opracowaniu założeń i struktury artykułu*
- *opracowaniu programu badań symulacyjnych*
- *opracowaniu założeń dla przedstawionych w pracy analiz*
- *przeglądzie stanu technologii i analizie metod modelowania szybkozmiennych przepięć w rozdzielnicach gazoszczelnych typu GIS*
- *współudziale w opracowaniu użytych w pracy modeli symulacyjnych*
- *współudziale w wykonaniu badań symulacyjnych*
- *współudziale w wykonaniu analiz przedstawionych w pracy wyników badań symulacyjnych*
- *weryfikacji wyników badań*
- *całościowym opracowaniu tekstu manuskryptu*

Mój udział procentowy szacuję na: ***70%***

[H4] **M. Szewczyk**, W. Piasecki, M. Stosur, M. Florkowski, U. Riechert, „Damping of VFTO in Gas-Insulated Switchgear by a New Coating Material," IEEE Transactions on Power Delivery," Vol. 31, No. 6, Dec. 2016, pp. 2553-2558

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na:

- *opracowaniu założeń i struktury artykułu*
- *opracowaniu programu badań eksperymentalnych*
- *opracowaniu założeń dla przedstawionych w pracy analiz*
- *przeglądzie stanu technologii i analizie metod tłumienia szybkozmiennych przepięć w rozdzielnicach gazoszczelnych typu GIS przy użyciu materiałów magnetycznych*
- *współudziale w opracowaniu koncepcji tłumienia przepięć szybkozmiennych przy użyciu materiału magnetycznego*
- *wykonaniu pomiarów wysokonapięciowych i wysokoczęstotliwościowych*
- *opracowaniu i analizie wyników pomiarów wysokonapięciowych i wysokoczęstotliwościowych*
- *weryfikacji wyników badań eksperymentalnych*
- *całościowym opracowaniu tekstu manuskryptu*

Mój udział procentowy szacuję na: ***90%***

[H5] **M. Szewczyk**, M. Kuniewski, W. Piasecki, M. Florkowski, U. Straumann, „Determination of Breakdown Voltage Characteristics of 1'100 kV Disconnector for Modeling of VFTO in Gas-Insulated Switchgear," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 31, No. 5, Oct. 2016, pp. 2151-2158

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na:

- *opracowaniu założeń i struktury artykułu*
- *opracowaniu programu badań symulacyjnych*

- *opracowaniu założeń dla przedstawionych w pracy analiz*
- *przeglądzie stanu technologii i analizie metod modelowania szybkozmiennych przepięć w rozdzielnicach gazoszczelnych typu GIS*
- *współudziale w opracowaniu użytych w pracy modeli symulacyjnych*
- *współudziale w wykonaniu badań symulacyjnych*
- *współudziale w wykonaniu analiz przedstawionych w pracy wyników badań symulacyjnych*
- *weryfikacji wyników badań*
- *całościowym opracowaniu tekstu manuskryptu*

Mój udział procentowy szacuję na: ***75%***

[H6] **M. Szewczyk**, K. Kutorasiński, J. Pawłowski, W. Piasecki, M. Florkowski, „Advanced Modeling of Magnetic Cores for Damping of High-Frequency Power System Transients," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 31, No. 5, Oct. 2016, pp. 2431-2439

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na:

- *opracowaniu założeń i struktury artykułu*
- *opracowaniu programu badań symulacyjnych*
- *opracowaniu założeń dla przedstawionych w pracy analiz*
- *przeglądzie stanu technologii i analizie metod tłumienia szybkozmiennych przepięć przy użyciu materiałów magnetycznych*
- *współudziale w wykonaniu pomiarów wysokoczęstotliwościowych*
- *współudziale w opracowaniu przedstawionej w pracy metody modelowania rdzeni magnetycznych*
- *współudziale w opracowaniu przedstawionego w pracy modelu rdzeni magnetycznych*
- *współudziale w analizie wyników badań pomiarowych i symulacyjnych*
- *współudziale w opracowaniu i analizie wyników pomiarów wysokonapięciowych i wysokoczęstotliwościowych*
- *weryfikacji wyników badań eksperymentalnych i symulacyjnych*
- *całościowym opracowaniu tekstu manuskryptu*

Mój udział procentowy szacuję na: ***35%***

[H7] **M. Szewczyk**, J. Pawłowski, K. Kutorasiński, W. Piasecki, M. Florkowski, U. Straumann, „High-Frequency Model of Magnetic Rings for Simulation of VFTO Damping in Gas-Insulated Switchgear With Full-Scale Validation," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 30, No. 5, Oct. 2015, pp. 2331-2338

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na:

- *opracowaniu założeń i struktury artykułu*
- *opracowaniu programu badań symulacyjnych*
- *opracowaniu założeń dla przedstawionych w pracy analiz*

- *przeglądzie stanu technologii i analizie metod tłumienia szybkozmiennych przepięć w rozdzielnicach gazoszczelnych (typu GIS) przy użyciu materiałów magnetycznych*
- *wykonaniu pomiarów wysokonapięciowych i wysokoczęstotliwościowych*
- *opracowaniu i analizie wyników pomiarów wysokonapięciowych i wysokoczęstotliwościowych*
- *współudziale w opracowaniu wysokoczęstotliwościowych modeli rdzeni magnetycznych*
- *współudziale przy wykonaniu badań symulacyjnych*
- *współudziale w wykonaniu analiz przedstawionych w pracy wyników badań symulacyjnych*
- *weryfikacji wyników badań symylacyjnych i eksperymentalnych*
- *całościowym opracowaniu tekstu manuskryptu*

Mój udział procentowy szacuję na: ***75%***

[H8] **M. Szewczyk**, W. Piasecki, M. Wroński, K. Kutorasiński, „New Concept for VFTO Attenuation in GIS with Modified Disconnector Contact System," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 30, No. 5, Oct. 2015, pp. 2138-2145

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na:

- *opracowaniu założeń i struktury artykułu*
- *opracowaniu programu badań symulacyjnych*
- *opracowaniu założeń dla przedstawionych w pracy analiz*
- *przeglądzie stanu technologii i analizie metod tłumienia szybkozmiennych przepięć w rozdzielnicach gazoszczelnych (typu GIS)*
- *współudziale w opracowaniu przedstawionej w pracy koncepcji układu stykowego do tłumienia przepięć szybkozmiennych VFTO w rozdzielnicach gazoszczelnych (typu GIS)*
- *współudziale w opracowaniu użytych w pracy modeli symulacyjnych*
- *współudziale w wykonaniu badań symulacyjnych*
- *współudziale w wykonaniu analiz przedstawionych w pracy wyników badań symulacyjnych*
- *weryfikacji wyników badań*
- *całościowym opracowaniu tekstu manuskryptu*

Mój udział procentowy szacuję na: ***50%***

c) omówienie celu naukowego w/w prac i osiągniętych wyników, wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania wraz ze wskazaniem wkładu osiągnięć w rozwój dyscypliny naukowej, z zakresu której ma być nadany stopień naukowy doktora habilitowanego

1. Przepięcia szybkozmienne o bardzo stromym czole (VFTO) występujące w rozdzielnicach gazoszczelnych typu GIS

W literaturze anglojęzycznej, jak również niniejszym opracowaniu, przepięcia szybkozmienne o bardzo stromym czole występujące w rozdzielnicach gazoszczelnych izolowanych gazem SF6 typu GIS, oznaczane są skrótem VFTO (ang. *Very Fast Transient Overvoltages*).

a. Zagadnienie szybkozmiennych przepięć VFTO na tle aktualnych trendów rozwoju technologii rozdzielnic gazoszczelnych typu GIS wysokich i ultra wysokich napięć

Rozwój technologii rozdzielnic gazoszczelnych typu GIS (ang. *Gas-Insulated Switchgear*) w zakresie wysokich napięć (ang. *High Voltage*, HV) i ultra wysokich napięć (ang. *Ultra High Voltage*, UHV) wyznaczony jest przez wzrost napięć znamionowych sieci elektroenergetycznych. Pierwsze rozdzielnice typu GIS zostały wprowadzone na rynek produktów elektroenergetycznych w latach 60. XX wieku dla dolnego przedziału napięć wysokich (170 kV). Obecnie w eksploatacji są pilotażowe rozdzielnice typu GIS pracujące w sieci prądu przemiennego o znamionowym napięciu 1100 kV [1]. W systemach elektroenergetycznych charakteryzujących się znacznym oddaleniem odbiorów mocy od głównych węzłów wytwórczych budowane są obecnie sieci przesyłowe prądu przemiennego o napięciu znamionowym sięgającym 1200 kV.

Uznaje się [2], że dla poziomu napięć znamionowych począwszy od 550 kV, zachodzi potrzeba wykonywania szczegółowych analiz koordynacji izolacji z uwzględnieniem szybkozmiennych przepięć VFTO, a także, w uzasadnionych przypadkach, zachodzi potrzeba stosowania środków ograniczania wartości szczytowych tych przepięć. Zagadnienie to jest szczególnie istotne dla sieci o napięciach ultra wysokich (zwłaszcza 1100 kV i 1200 kV) ze względu na obniżony w tych sieciach poziom koordynacji izolacji [3, 4].

b. Generacja przepięć VFTO w rozdzielnicach typu GIS

Przepięcia VFTO generowane są wskutek przeskoków (zapłonów wyładowań łukowych) w gazie SF6. Gaz SF6 używany jest w rozdzielnicach gazoszczelnych typu GIS jako jedno z głównych mediów izolacyjnych w szynoprzewodach GIS oraz w aparatach elektrycznych, w tym w aparatach łączeniowych. Z równania Toeplera [5, 6] wynika, że czas przeskoku w gazie SF6 o parametrach typowych dla warunków eksploatacji rozdzielnic gazoszczelnych typu GIS, jest rzędu pojedynczych nanosekund. Ten czas przeskoku, bardzo krótki w skali czasu procesów typowych dla systemu elektroenergetycznego, powoduje powstawanie fal napięciowych o bardzo stromym zboczu. Czas narastania fal przepięciowych jest znacząco krótszy od czasu propagacji fali elektromagnetycznej wzdłuż torów prądowych komponentów GIS, co powoduje, że wskutek przeskoku powstają fale elektromagnetyczne, podlegające propagacji w przeciwnych względem siebie kierunkach oraz doznające odbić w punktach nieciągłości impedancji falowej komponentów GIS. Superpozycja wielokrotnie odbitych fal napięciowych tworzy przebieg czasowy przepięcia VFTO.

Opisany mechanizm powstawania przepięć VFTO zachodzi wskutek przeskoku w gazie SF6 w dowolnym miejscu izolacji głównej (gazowej) szynoprzewodów i aparatów elektrycznych, lub w przestrzeni międzystykowej aparatów łączeniowych. Przeskoki w izolacji głównej szynoprzewodów i aparatów elektrycznych są eliminowane na etapie projektowania komponentów GIS, co podlega weryfikacji w próbach typu wykonywanych w certyfikowanych laboratoriach według procedur IEC [7]. Przeskoki występujące w przestrzeni międzystykowej aparatów łączeniowych występują typowo w czasie otwierania lub zamykania aparatów łączeniowych.

Szczególne znaczenie dla koordynacji izolacji stacji elektroenergetycznych, a także dla doboru i projektowania metod ograniczania przepięć VFTO mają przeskoki występujące w trakcie operacji otwierania i zamykania odłącznika. Jest to spowodowane niewielką prędkością ruchu styków odłącznika w porównaniu z prędkością ruchu styków innych aparatów łączeniowych. Wolny ruch styków odłącznika prowadzi do występowania znacząco większej liczby przeskoków, w szczególności przeskoków prowadzących do przepięć VFTO o znacząco wyższych wartościach szczytowych, niż ma to

miejsce w przypadku operacji łączeniowych wykonywanych przez inne aparaty łączeniowe (np. wyłączniki).

Z tego względu jako istotne zagadnienie dla rozwoju technologii GIS w aspekcie szybkozmiennych przepięć VFTO, uznaje się [1, 4] przepięcia generowane w trakcie operacji otwierania i zamykania odłączników w rozdzielnicach gazoszczelnych typu GIS.

Wartości szczytowe przepięć VFTO są zależne od warunków napięciowych w przerwie międzystykowej odłącznika występujących w chwili poprzedzającej zapłon wyładowania łukowego, jak również od charakterystyki wytrzymałości napięciowej przerwy międzystykowej odłącznika, a także od parametrów komponentów GIS, do których przyłączony jest odłącznik. Charakterystyka zapłonu łuku w przerwie międzystykowej odłącznika warunkuje wysokoczęstotliwościowy charakter przepięć VFTO.

Ponieważ czas przeskoku w gazie SF6 zależy od warunków eksploatacyjnych rozdzielnicy GIS (a w szczególności od ciśnienia zastosowanego gazu SF6), nie istnieje znormalizowany kształt udaru napięciowego, który mógłby reprezentować przepięcia VFTO na potrzeby badań eksperymentalnych i symulacyjnych (tak jak to jest w przypadku znormalizowanych udarów piorunowych, czy innych niż VFTO udarów łączeniowych). Badania eksperymentalne i symulacyjne dla przepięć VFTO przeprowadzane są w układach próby typu [7], lub w innych analogicznych układach uzgodnionych pomiędzy producentem, dostawcą, a końcowym odbiorcą produktów i systemów rozdzielczych [8]. W układach tych przepięcia VFTO generowane są poprzez wykonywanie operacji otwierania i zamykania odłącznika o określonej konstrukcji, określonym składzie i ciśnieniu gazu SF6, przyjętej charakterystyce napędu układu stykowego, oraz przyjętej prędkości ruchu styków.

c. Znaczenie przepięć VFTO dla projektowania komponentów GIS oraz dla koordynacji izolacji stacji elektroenergetycznych wysokich i ultra wysokich napięć

Przebiegi czasowe przepięć stanowią podstawowy czynnik decydujący o koordynacji izolacji aparatów i urządzeń stacji rozdzielczych, a w szczególności o wymiarowaniu układów izolacyjnych oraz o doborze i projektowaniu środków ochrony przepięciowej [9, 10, 11].

W ujęciu deterministycznym koordynacji izolacji, obok poziomu wytrzymałości elektrycznej układów izolacyjnych określa się tzw. poziom ochrony wynikający z charakterystyk zastosowanych w stacji elektroenergetycznej środków ochrony przepięciowej. Różnica pomiędzy poziomem ochrony a poziomem wytrzymałości elektrycznej układów izolacyjnych określa wielkość tzw. marginesu koordynacyjnego, którego dobór warunkowany jest zapasem wytrzymałości elektrycznej, który wymagany jest dla zapewnienia określonej niezawodności układu izolacyjnego. Celem koordynacji izolacji jest zapewnienie niezawodności systemu elektroenergetycznego na wymaganym poziomie, przy jednoczesnym zapewnieniu minimalnych kosztów inwestycji i eksploatacji systemu. Zagadnienie to obejmuje zarówno dobór odpowiedniej konstrukcji i parametrów poszczególnych układów izolacyjnych, jak również decyzję o odpowiedniej konfiguracji systemu, a w szczególności o doborze zastosowanych środków ograniczania przepięć.

W odniesieniu do szybkozmiennych przepięć VFTO, podstawą projektowania układów izolacyjnych w rozdzielnicach gazoszczelnych typu GIS jest [1, 4] wytrzymywane napięcie udarowe piorunowe (ang. *Lightning Impulse Withstand Voltage*, LIWV). Poziom tego napięcia jest określony przez normę IEC [3] i jego wartość jest malejąco zależna od wartości znamionowego napięcia sieci. Przykładowo, dla układów o napięciu znamionowym 550 kV, poziom LIWV wynosi 1550 kV [3], natomiast dla układów o napięciu znamionowym 1100 kV, poziom LIWV wynosi 2400 kV [12].

Ponieważ wraz ze wzrostem napięcia znamionowego systemu, maleje względna wartość (względem napięcia znamionowego sieci) wytrzymywanego napięcia udarowego piorunowego LIWV, a z drugiej strony stały jest względny poziom (względem napięcia znamionowego sieci) spodziewanych wartości przepięć VFTO (wynikający z warunków napięciowych występujących na stykach odłącznika w chwili zapłonu wyładowania łukowego), przyjmuje się [2], że zagadnienie szybkozmiennych przepięć staje się istotne dla sieci o napięciu znamionowym począwszy od 550 kV.

Z tego względu projektowanie rozdzielnic gazoszczelnych typu GIS wysokich i ultra wysokich napięć, a także koordynacja izolacji sieci elektroenergetycznych zbudowanych z wykorzystaniem technologii GIS, wykonywana jest [13] z uwzględnieniem szczegółowej analizy przepięć VFTO poprzedzonej opracowaniem dokładnych i wiarygodnych modeli symulacyjnych. Analizy wykonywane w oparciu o modele symulacyjne wykorzystywane są również dla doboru oraz projektowania środków ograniczania szybkozmiennych przepięć VFTO [4]. W szczególnych przypadkach zasadne jest również prowadzenie prac badawczych nad nowymi koncepcjami ograniczania szybkozmiennych przepięć VFTO w rozdzielnicach gazoszczelnych typu GIS.

2. Cel naukowy prac przedstawionych jako osiągnięcie habilitacyjne

Celem naukowym prac przedstawionych w niniejszym wniosku jako osiągnięcie habilitacyjne w formie cyklu publikacji powiązanych tematycznie [H1-H8], jest rozwój metod ograniczania szybkozmiennych przepięć występujących w rozdzielnicach gazoszczelnych typu GIS wysokich i ultra wysokich napięć.

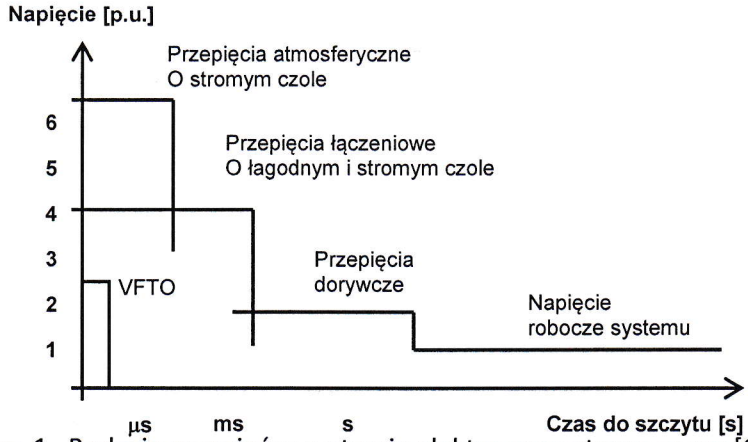
3. Zakres przedstawionych prac

Zakres przedstawionych prac [H1-H8] obejmuje prace koncepcyjne, symulacyjne i eksperymentalne dotyczące rozwoju metod ograniczania szybkozmiennych przepięć VFTO w rozdzielnicach gazoszczelnych typu GIS [H2, H4, H7, H8], jak również obejmuje prace modelowe i symulacyjne [H1, H3, H5, H6] niezbędne na etapie rozwoju nowych technologii.

a. Zakres prac na tle tematyki szybkozmiennych przepięć występujących w systemie elektroenergetycznym

W przypadku systemów GIS wysokich i ultra wysokich napięć, powszechnie stosowane są produkty rozdzielnic i aparatów elektrycznych, w których poszczególne fazy zabudowane są w osobnych, gazoszczelnych obudowach. Pojęcie przepięć w takich systemach definiuje się [6] jako napięcie, którego wartość w dowolnej chwili przebiegu czasowego przekracza maksymalną znamionową wartość napięcia systemu podzieloną przez $\sqrt{3}$.

Ze względu na różnorodność zjawisk fizycznych występujących w systemie elektroenergetycznym w czasie normalnej bądź zakłóceniowej pracy systemu, podaje się [14] klasyfikację rodzajów przepięć według głównych parametrów przepięć, takich jak wartość szczytowa, czas do szczytu, oraz czas trwania przepięcia. Wartość szczytową przepięć wyraża się w jednostkach względnych (p.u.), przyjmując że 1 p.u. = $U_s\sqrt{2/3}$, gdzie U_s jest napięciem systemu.



Rys. 1 Rodzaje przepięć w systemie elektroenergetycznym wg [6];
1 p.u. = $U_s\sqrt{2/3}$, U_s – napięcie systemu

Według podanej na Rys. 1 klasyfikacji, przepięcia dzieli się na trzy główne rodzaje: przepięcia dorywcze, przepięcia łączeniowe oraz przepięcia atmosferyczne. Przepięcia dorywcze pochodzą głównie od zwarć w sieciach z izolowanym punktem neutralnym, a zatem są typowe dla sieci rozdzielczych średnich napięć. Przepięcia łączeniowe pochodzą od stanów nieustalonych (procesów wyrównawczych) zachodzących w systemie elektroenergetycznym wskutek operacji łączeniowych wykonywanych przy użyciu aparatów łączeniowych takich jak wyłączniki, rozłączniki, odłączniki, uziemniki. Przepięcia łączeniowe dalej klasyfikuje się jako przepięcia o łagodnym czole i przepięcia o stromym czole. Przepięcia o stromym czole pochodzą od operacji łączeniowych wykonywanych przy użyciu wyłączników lub styczników próżniowych [15], zaś przepięcia o łagodnym czole pochodzą od operacji łączeniowych wykonywanych przy użyciu łączników pozostałych typów. Przepięcia atmosferyczne [16] pochodzą od wyładowań piorunowych: bezpośrednich w linię napowietrzną, bezpośrednich w przewód odgromowy linii napowietrznej lub pośrednich w pobliżu linii napowietrznej lub w pobliżu stacji elektroenergetycznej. Przepięcia atmosferyczne charakteryzują się wartościami szczytowymi, typowo przekraczającymi kilkukrotną wartość amplitudy napięcia znamionowego systemu, oraz częstotliwościami, odpowiadającymi stromościom czasowych przebiegów napięć o nachyleniu rzędu pojedynczych mikrosekund. Stromościom tym odpowiadają częstotliwości rzędu pojedynczych MHz.

Przedmiotem badań przedstawionych w pracach [H1-H8] są przepięcia łączeniowe VFTO o bardzo stromym czole, powstające wskutek przebicia izolacji w rozdzielnicach gazoszczelnych typu GIS. Przepięcia te charakteryzują wartości szczytowe sięgające trzykrotnych wartości amplitudy napięcia znamionowego systemu [1] oraz stromości sięgające pojedynczych nanosekund [17]. Stromościom tym odpowiadają częstotliwości sięgające $100\ \mathrm{MHz}$ – wartość ta stanowi najwyższą częstotliwość przebiegów stanów nieustalonych (rozumianych według klasyfikacji podanej na Rys. 1), jaka obserwowana jest w systemie elektroenergetycznym.

Zakres prac [H1-H8] przedstawionych w niniejszym wniosku habilitacyjnym **obejmuje** szybkozmienne przepięcia VFTO występujące w rozdzielnicach gazoszczelnych typu GIS, powstające w trakcie operacji otwierania i zamykania odłącznika GIS. **Poza zakresem** prac [H1-H8] są pozostałe rodzaje przepięć i stanów nieustalonych występujących w systemie elektroenergetycznym.

b. Zakres prac na tle istniejących metod ograniczania szybkozmiennych przepięć występujących w rozdzielnicach gazoszczelnych typu GIS

Przez ograniczanie przepięć VFTO rozumie się ograniczanie wartości szczytowej przebiegu czasowego przepięcia VFTO powstałego wskutek przebicia izolacji w rozdzielnicy gazoszczelnej typu GIS, a w szczególności wskutek przebicia przerwy międzystykowej odłącznika w trakcie operacji otwierania i zamykania odłącznika.

Metody ograniczania przepięć VFTO są w ogólności dwojakiego rodzaju. Pierwszy rodzaj metod bazuje na rozpraszaniu energii fal elektromagnetycznych powstałych wskutek przeskoku w przerwie międzystykowej odłącznika. Drugi rodzaj metod bazuje na kształtowaniu warunków napięciowych występujących na stykach odłącznika w chwili poprzedzającej zapłon wyładowania w przerwie międzystykowej odłącznika.

Metody bazujące na rozpraszaniu energii fali elektromagnetycznej obejmują zastosowanie rezystora w układzie stykowym odłącznika [18], zastosowanie materiałów magnetycznych w szynoprzewodach GIS (stosowane są w tym celu materiały ferromagnetyczne [19, 20, 21], amorficzne [22], nanokrystaliczne [19, 23]), zastosowanie wnęk rezonansowych w układzie stykowym odłącznika bądź w szynoprzewodach GIS [24], zastosowanie ograniczników przepięć w szynoprzewodach GIS [25]. Metody te obejmują również nowy układ stykowy odłącznika zaproponowany w pracy [H8], jak również nowy materiał magnetyczny zaproponowany w pracy [H4].

Metody bazujące na kształtowaniu warunków napięciowych w chwili zapłonu wyładowania w przerwie międzystykowej odłącznika obejmują dobór parametrów odłącznika dla ograniczenia wartości napięcia występującego po otwarciu odłącznika po stronie obciążenia (ang. *Trapped Charge Voltage*, TCV) [2, 4, 26] oraz inicjowanie dodatkowych zapłonów w przerwie międzystykowej odłącznika [H2, 35].

Zakres prac [H1-H8] przedstawionych w niniejszym wniosku habilitacyjnym **obejmuje** metody ograniczania szybkozmiennych przepięć VFTO w oparciu o zastosowanie materiałów magnetycznych nanokrystalicznych [H7, H6, H8] oraz w oparciu o sterowanie zapłonami wyładowań w przerwie międzystykowej odłącznika [H2]. Do prac nad rozwojem metod ograniczania przepięć szybkozmiennych VFTO w rozdzielnicach gazoszczelnych typu GIS zaliczono również zaproponowany w pracy [H8] nowy układ stykowy odłącznika oraz zaproponowany w pracy [H4] nowy materiał magnetyczno-rezystywny. **Poza zakresem** prac [H1-H8] są pozostałe metody ograniczania przepięć VFTO.

W toku badań nad rozwojem metod tłumienia szybkozmiennych przepięć VFTO opracowano nowe modele symulacyjne oraz wykonano analizy w oparciu o opracowane modele symulacyjne. Prace symulacyjne bazują na opracowanych modelach obwodowych i polowych zjawiska generacji szybkozmiennych przepięć VFTO [H1, H5, H3] oraz na opracowanych modelach materiałów magnetycznych w zastosowaniu do tłumienia stanów nieustalonych wysokoczęstotliwościowych i wielkoprądowych, jakimi w szczególności są przepięcia szybkozmienne VFTO [H6, H7].

4. Modelowanie przepięć szybkozmiennych VFTO

a. Założenia fizyczne dla modelowania przepięć VFTO

Założenia fizyczne przyjęte dla modelowania procesu generacji przepięć VFTO przedstawiono szczegółowo w pracach: [H1] – w ujęciu obwodowym oraz [H3] – w ujęciu polowym.

Punktem wyjścia dla modelowania procesu generacji przepięć VFTO w ujęciu zarówno obwodowym jak i polowym jest empiryczne równanie Toeplera opisujące czas zapłonu wyładowania łukowego w przerwie międzystykowej odłącznika [5, 6]:

$$t_B = 13.3 \frac{k_T}{E_0 \cdot \eta \cdot p}, \quad (1)$$

gdzie: k_T, η – współczynniki empiryczne o wartościach wyznaczanych dla danego gazu, ciśnienia i rozkładu pola elektrycznego w przerwie międzystykowej odłącznika, p – ciśnienie gazu.

Zapłony łuku następują w trakcie operacji otwierania lub zamykania odłącznika, gdy chwilowa wartość napięcia międzystykowego, wynikająca z napięcia systemu oraz z procesów wyrównawczych i falowych występujących wskutek zapłonu i zgaszenia łuku w przestrzeni międzystykowej odłącznika, przekracza chwilową wartość napięcia wytrzymywanego charakteryzującego przerwę międzystykową odłącznika. Wskutek przeskoku w przerwie międzystykowej odłącznika powstaje kanał łukowy, który przewodzi prąd pojemnościowy o wartości skutecznej 1-5 A, oraz prąd wysokoczęstotliwościowy o wartości szczytowej dochodzącej do 10 kA [27]. Czas przepływu prądu przez kanał łukowy wynosi 50-100 μs [27].

Jako model kanału łukowego przyjmuje się [13, 17] rezystancję nieliniową o przebiegu czasowym opisanym funkcjami eksponencjalnymi o stałej czasowej określonej równaniem (1). Przykładową postać tych funkcji przyjmowaną dla modelowania przepięć VFTO podano w pracy [H1] – dla obliczeń obwodowych, oraz w pracy [H3] – dla obliczeń polowych.

O warunkach napięciowych określających warunki zapłonu łuku w przerwie międzystykowej odłącznika, obok chwilowych wartości napięć po obu stronach układu stykowego odłącznika, oraz obok charakterystyki wytrzymałości przerwy międzystykowej, decyduje wartość tzw. napięcia spułapkowanego (ang. *Trapped Charge Voltage*, TCV), które występuje na układzie stykowym odłącznika po stronie odłącznika nie zasilanej z systemu (tj. od strony wyłącznika). Napięcie to w ujęciu obwodowym modeluje się przy użyciu pojemności skupionej, a w ujęciu polowym – przy użyciu odpowiednio dobranych warunków brzegowych i początkowych.

Charakterystyka napięcia wytrzymywanego przerwy międzystykowej odłącznika (zależność napięcia wytrzymywanego od czasu operacji otwierania lub zamykania odłącznika) zależna jest od konstrukcji układu stykowego odłącznika, parametrów gazu SF6 (w szczególności od ciśnienia gazu), oraz charakterystyki napędu styku ruchomego (w szczególności od prędkości rozchodzenia się styków). Sposób wyznaczania charakterystyki wytrzymałości przerwy międzystykowej na podstawie pomiarów wykonanych dla odłącznika 1100 kV przedstawiono w pracy [H5].

Gdy modelowany jest pojedynczy zapłon wyładowania łukowego (ang. *single-spark approach*), jako warunki napięciowe poprzedzające zapłon łuku typowo wybierana jest najmniej korzystna, czyli maksymalna różnica pomiędzy napięciem TCV po stronie odłącznika nie zasilanej z systemu, a chwilową wartością napięcia na odłączniku występującą po stronie zasilanej przez system (stanowi to punkt wyjścia dla analizy tzw. najgorszego przypadku). W pracach [H1, H5] zastosowano metodę modelowania i analizy procesu VFTO pozwalającą na przyjęcie w obliczeniach warunków napięciowych odpowiadających rzeczywistej charakterystyce wytrzymałości napięciowej odłącznika o określonej konstrukcji układu stykowego, co pozwoliło na wykonanie analiz przepięć VFTO dla rzeczywistych, a nie najgorszych możliwych warunków napięciowych.

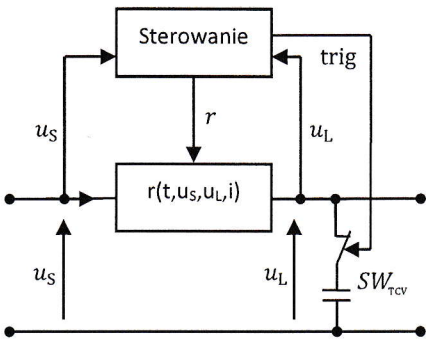
Modelowanie pełnego procesu otwierania i zamykania odłącznika (ang. *multi-spark approach*), zaproponowane w pracach [H1, H5], pozwala na obliczenie zależnej od konstrukcji odłącznika całkowitej liczby przepięć VFTO występujących w całym proce-

sie otwierania i zamykania odłącznika, jak również czasów łukowych, liczby zapłonów łuku, oraz rozkładów statystycznych napięć TCV. Tak wyznaczone charakterystyki przepięć pozwalają na wykonanie kompleksowych analiz koordynacji izolacji stacji elektroenergetycznej, stanowią podstawę do projektowania układów izolacji odłączników GIS jak również stanowią podstawę do planowania certyfikowanych prób typu odłączników GIS, a także są podstawą doboru i projektowania metod tłumienia przepięć VFTO.

b. Ujęcie obwodowe modelowania przepięć VFTO

W pracy [H1] opisano ujęcie obwodowe modelowania przepięć VFTO dla pełnego procesu otwierania i zamykania odłącznika (ang. *multi-spark approach*). Model odłącznika zbudowany jest w oparciu o metodę modelowania wyłączników próżniowych, opisaną w pracach [28, 29]. Przeskok w przerwie międzystykowej odłącznika modelowany jest przy użyciu rezystancji nieliniowej, której wartość obliczana jest w każdym kroku rozwiązywania równań obwodu opisujących układ odłącznika GIS wraz z pozostałymi komponentami stacji elektroenergetycznej. Rezystancja nieliniowa sterowana jest w oparciu o wartości chwilowe napięć i prądów reprezentujące odpowiednie wielkości na zaciskach odłącznika, oraz na podstawie charakterystyki wytrzymałości przerwy międzystykowej odłącznika.

Na Rys. 2 przedstawiono schemat modelu odłącznika GIS do analiz VFTO w pełnym procesie otwierania i zamykania odłącznika. Rezystancja nieliniowa r sterowana jest sygnałem TACS (ang. *Transient Analysis of Control Systems*, implementacja w programie symulacyjnym EMTP-ATP [26]), na podstawie napięcia u_S – na odłączniku po stronie systemu, napięcia u_L – na odłączniku po stronie wyłącznika, charakterystyki wytrzymałości przerwy międzystykowej odłącznika określonej w pracy [H5], prądu i przepływającego przez odłącznik w stanie zamknięcia, a przez kanał łukowy w przerwie międzystykowej odłącznika w stanie otwarcia, SW_{TCV} jest łącznikiem pomocniczym, służącym do sterowania napięciem TCV zadawanym przez pojemność skupioną dołączoną przez ten łącznik.



Rys. 2 Sposób modelowania odłącznika GIS do analiz VFTO w pełnym procesie otwierania i zamykania odłącznika [H1]

Pozostałe komponenty systemu elektroenergetycznego (takie jak wyłączniki, uziemniki, przekładniki, szynoprzewody GIS, etc.) modelowane są dla analiz VFTO zgodnie z zaleceniami ujętymi w pracach [13, 17].

W ujęciu obwodowym, dla stanów obwodu określonych wartością chwilową nieliniowej rezystancji r (Rys. 2), rozwiązywane są równania Kirchhoffa dla napięć w wybranych punktach modelu systemu i dla prądów w wybranych gałęziach modelu systemu. Przebiegi czasowe napięć pozwalają na określenie wartości szczytowych przepięć VFTO.

Metoda obwodowa modelowania pełnego procesu otwierania i zamykania odłącznika zaproponowana w pracach [H1, H5] została zastosowana do wykonania analiz metody tłumienia przepięć VFTO przy użyciu sterowanych zapłonów łuku w przerwie międzystykowej odłącznika, zaproponowanej w pracy [H2]. Metoda obwodowa modelowania pojedynczego przeskoku w przerwie międzystykowej odłącznika, użyta zgodnie z pracami [H1, 13, 17], została zastosowana w pracy [H7] do oceny skuteczności metody tłumienia VFTO przy użyciu rdzeni nanokrystalicznych.

c. Ujęcie polowe modelowania przepięć VFTO

Dla sformułowania równań Maxwella do obliczeń polowych przepięć VFTO w rozdzielnicach gazoszczelnych typu GIS, w pracach [H3, H8] posłużono się pojęciem potencjału wektorowego $\vec{A}$ (jako funkcji wektora położenia $\vec{r}$ oraz czasu t), zdefiniowanego poprzez zależności określające wektor pola elektrycznego $\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$ oraz wektor indukcji magnetycznej $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$.

W tym ujęciu, równanie pola ma postać [31]:

$$\vec{\nabla} \times \mu_r^{-1}\left(\vec{\nabla} \times \vec{A}\right) + \mu_0 \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \mu_0 \frac{\partial}{\partial t}\left(\varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}\right) = 0, \qquad (2)$$

gdzie: μ_0 – przenikalności magnetyczna próżni, μ_r – względna przenikalność magnetyczna ośrodka, ε_0 – przenikalność elektryczna próżni, ε_r – względna przenikalność elektryczna ośrodka, σ – przewodność ośrodka.

Dla obliczeń propagacji fal elektromagnetycznych w gazie SF6, jako wartości względne przenikalności ośrodka przyjęto: $\mu_r = 1$ oraz $\varepsilon_r = 1$. Dla obliczeń w dziedzinie czasu, przyjęto zerowe warunki początkowe dla potencjału magnetycznego w całej przestrzeni podlegającej obliczeniom: $\vec{A}(\vec{r}, 0) = 0$. Dla zamodelowania metalowych elementów komponentów GIS, przyjęto warunki brzegowe odpowiadające idealnemu przewodnikowi (ang. *Perfect Electric* Conductor, PEC), prowadzące do zerowej składowej stycznej do powierzchni metalu: $\vec{n} \times \vec{E} = 0$ (gdzie $\vec{n}$ jest wektorem normalnym do powierzchni).

Obliczenia rozkładów pola elektromagnetycznego wykonano dla przestrzeni komponentów GIS wypełnionej gazem SF6. Napięciowe warunki początkowe dla obliczeń zdefiniowano przy użyciu tzw. portów (implementacja w oprogramowaniu symulacyjnym COMSOL Multiphysics [32]). Warunki początkowe potencjału magnetycznego na powierzchni portu $\vec{A}(\vec{r}, 0) = 0$ obliczano na podstawie zadanych parametrów napięcia oraz impedancji falowej.

Kanał łukowy w przerwie międzystykowej odłącznika modelowano przy użyciu eksponencjalnej funkcji, której postać podano w pracy [H3].

Przedstawione w pracy [H3] obliczenia polowe wykonane zostały dla pełnej geometrii 3D układu próby typu odłącznika GIS według specyfikacji podanej w normie IEC [7]. Obliczenia powtórzono dla tego samego układu, zamodelowanego z użyciem uproszczonej geometrii osiowo-symetrycznej 2D.

Metoda polowa modelowania przepięć VFTO zaproponowana w pracy [H3] została zastosowana do analizy nowej metody tłumienia przepięć VFTO przy użyciu zmodyfikowanego układu stykowego odłącznika zaproponowanej w pracy [H8].

5. Metody ograniczania przepięć szybkozmiennych VFTO

a. Zastosowanie materiałów magnetycznych

W pracach [H7, H4] zaproponowano metodę ograniczania przepięć VFTO przy użyciu materiałów magnetycznych. W metodzie tej elementy wykonane ze stratnych materiałów magnetycznych umieszczane są w przestrzeni, w której odbywa się propagacja fal elektromagnetycznych powstałych wskutek przeskoku w przerwie międzystykowej odłącznika. Wytracanie energii fal elektromagnetycznych powoduje ograniczenie wartości szczytowej skojarzonych z tymi falami przepięć VFTO.

W pracy [H7], jako materiał magnetyczny do tłumienia przepięć VFTO użyto rdzenie nanokrystaliczne. Badania przeprowadzono w układzie eksperymentalnym GIS, dla którego wykonano modele symulacyjne komponentów GIS i modele symulacyjne materiałów magnetycznych. Badania eksperymentalne wykonano przy napięciu probierczym o wartości szczytowej 550 kV. W modelach symulacyjnych materiałów magnetycznych odtworzono pomierzone charakterystyki częstotliwościowe rdzeni magnetycznych (w przedziale częstotliwości od 10 MHz do 100 MHz) oraz uwzględniono efekt nasycenia rdzeni wynikający z ich nieliniowej charakterystyki magnesowania B-H. Badania przeprowadzono dla materiałów magnetycznych różnego typu oraz dla różnej liczby zastosowanych rdzeni, jak również zbadano wpływ umiejscowienia rdzeni w szynoprzewodzie GIS na skuteczność ograniczania przepięć VFTO. Obliczenia symulacyjne porównano z wynikami pomiarów, uzyskując dobrą zgodność. Metodę modelowania rdzeni magnetycznych dla zastosowań wysokoczęstotliwościowych i wielkoprądowych rozwinięto następnie w osobnej pracy [H6].

W pracy [H4], jako materiał magnetyczny do tłumienia przepięć VFTO wykorzystano nowy materiał magnetyczno-rezystywny. W pracy [H4] zaproponowano sposób wytwarzania materiału w oparciu o elementy nanokrystaliczne zanurzone w rezystywnej żywicy. Badania eksperymentalne wykonano w układzie GIS przy napięciu probierczym o wartości szczytowej 550 kV. Zaproponowana w pracy [H4] metoda tłumienia przepięć VFTO przy użyciu materiału magnetyczno-rezystywnego została zastrzeżona w patencie [34].

b. Sterowanie zapłonami wyładowań w przerwie międzystykowej odłącznika

W pracy [H2] zaproponowano metodę ograniczania przepięć VFTO poprzez inicjowanie dodatkowych zapłonów w przerwie międzystykowej odłącznika. W metodzie tej zapłony łuku inicjowane są w chwilach czasowych zależnych od warunków napięciowych występujących na zaciskach odłącznika, a także od charakterystyki wytrzymałości elektrycznej odłącznika. Wybór warunków napięciowych poprzedzających zapłon łuku pozwala na sterowanie wartością szczytową spodziewanych przepięć VFTO. Analizy przedstawione w pracy [H2] zostały wykonane przy użyciu metody symulacyjnej zaproponowanej w pracach [H1, H5].

W pracy [H2] zaproponowano algorytmy sterowania zapłonem łuku dla ograniczania przepięć VFTO. Obliczenia przepięć VFTO wykonano dla zaproponowanych algorytmów na modelu układu prób rzeczywistej stacji GIS o napięciu znamionowym 1100 kV oraz na modelu rzeczywistego odłącznika GIS o napięciu znamionowym 1100 kV. Model odłącznika wykonano przy użyciu metody opisanej w pracy [H1]. Charakterystykę wytrzymałości przerwy międzystykowej odłącznika wyznaczono na podstawie pomiarów wykonanych na rzeczywistym odłączniku 1100 kV, zaprezentowanych w pracy [H5].

Zaproponowana w pracy [H2] metoda tłumienia przepięć VFTO poprzez inicjowanie dodatkowych zapłonów w przerwie międzystykowej odłącznika została zastrzeżona w patencie [35].

c. Nowy układ stykowy odłącznika

W pracy [H8] zaproponowano nowy układ stykowy odłącznika służący do ograniczania przepięć VFTO. Zaproponowany układ stykowy pozwala na zastosowanie materiałów magnetycznych do tłumienia przepięć VFTO, przy czym materiały te mogą zostać umieszczone wewnątrz przewodnika szynoprzewodu GIS (zamiast w przestrzeni pomiędzy przewodnikiem a obudową szynoprzewodu GIS). W pracy przedstawiono analizę rozkładu napięć wewnątrz zaproponowanego układu stykowego odłącznika, analizę procesów falowych opisujących propagację fali elektromagnetycznej powstałej wskutek zapłonu łuku w przerwie międzystykowej odłącznika, a także analizę stopnia tłumienia przepięć VFTO w zależności od przyjętej konstrukcji układu stykowego odłącznika.

Analizy przedstawione w pracy [H8] zostały wykonane przy użyciu metody symulacyjnej zaproponowanej w pracy [H3].

6. Podsumowanie

a. Wkład przedstawionych prac w rozwój dyscypliny Elektrotechnika

Za główne osiągnięcia przedstawionych prac [H1-H8], stanowiące wkład w rozwój dyscypliny Elektrotechnika, autor niniejszego wniosku habilitacyjnego uważa:

- Opracowanie zaproponowanej w pracy [H7] metody modelowania rdzeni magnetycznych do obliczeń szybkozmiennych przepięć VFTO, z zastosowaniem pomierzonych charakterystyk częstotliwościowych rdzeni magnetycznych wraz z efektem nasycenia wynikającym z nieliniowej charakterystyki magnesowania rdzeni. Wykazano eksperymentalnie, że zaproponowana metoda modelowania rdzeni magnetycznych prowadzi do wyników obliczeń symulacyjnych zgodnych z pomiarami przepięć VFTO wykonanymi w układzie GIS o napięciu probierczym 550 kV.
- Opracowanie zaproponowanej w pracy [H6] metody modelowania rdzeni magnetycznych do obliczeń szybkozmiennych przepięć VFTO, z zastosowaniem pomierzonych charakterystyk częstotliwościowych rdzeni dla różnych punktów pracy rdzeni na charakterystyce magnesowania B-H.
- Opracowanie i wykonanie badań symulacyjnych nowej metody tłumienia VFTO przy użyciu sterowanych zapłonów łuku, zaproponowanej w pracy [H2] i zastrzeżonej w patencie [35]. Zaproponowanie i wykonanie badań symulacyjnych algorytmów sterowania. Opracowanie modelu generacji przepięć VFTO w ujęciu obwodowym z określeniem założeń fizycznych i sposobu implementacji modelu w profesjonalnym środowisku obliczeniowym [H1, H5].
- Opracowanie i wykonanie badań eksperymentalnych w układzie GIS o napięciu probierczym 550 kV metody tłumienia przepięć VFTO przy użyciu nowego materiału rezystywno-magnetycznego, opisanej w pracy [H4] oraz zastrzeżonej w patencie [34].
- Zaproponowanie i wykonanie badań symulacyjnych nowego układu stykowego odłącznika GIS, w zastosowaniu do tłumienia przepięć VFTO, zaproponowanej w pracy [H8]. Opracowanie modelu generacji przepięć VFTO w ujęciu polowym z określeniem założeń fizycznych i sposobu implementacji modelu w profesjonalnym środowisku obliczeniowym [H3].

Wymienione wyżej główne osiągnięcia powstały przy zastosowaniu analiz symulacyjnych, które zostały wykonane w oparciu o zaproponowaną w pracach [H1, H5] metodę *obwodową* modelowania przepięć VFTO dla pełnego procesu otwierania i zamy-

kania odłącznika GIS (ang. *multi-spark approach*), oraz w oparciu o zaproponowaną w pracy [H3] metodę *polową* modelowania przepięć VFTO dla pojedynczego zapłonu łuku w przerwie międzystykowej odłącznika GIS (ang. *single-spark approach*).

b. Oryginalność przedstawionych osiągnięć na tle aktualnego stanu techniki

W pracach [H7, H6] zaproponowano oryginalne, nowe modele rdzeni magnetycznych dla analiz szybkozmiennych przepięć VFTO w rozdzielnicach gazoszczelnych typu GIS. Zaproponowane modele bazują na pomierzonych charakterystykach częstotliwościowych rdzeni magnetycznych z uwzględnieniem nieliniowej charakterystyki magnesowania B-H rdzeni.

W pracach [H2, H4, H8] zaproponowano oryginalne, nowe metody tłumienia szybkozmiennych przepięć VFTO w rozdzielnicach gazoszczelnych typu GIS, z których dwie zostały zastrzeżone w patentach [34, 35]. Nowe metody ograniczania przepięć VFTO zostały zaproponowane jako rozwiązania alternatywne dla istniejącej metody opartej o zastosowanie dodatkowego rezystora w układzie stykowym odłącznika [18].

W pracach [H1, H2, H4] zaprezentowano oryginalne wyniki analiz przepięć VFTO w GIS, w ujęciu obwodowym i polowym, wykonanych dla rzeczywistych układów odłączników GIS testowanych lub pracujących w układach prób typu lub w innych układach o napięciu znamionowym 1100 kV.

W pracach [H4, H7] zaprezentowano oryginalne wyniki wysokonapięciowych pomiarów szybkozmiennych przepięć VFTO wykonanych w układzie GIS przy napięciu probierczym o wartości szczytowej 550 kV.

c. Wnioski końcowe

Trudno jest wyobrazić sobie, aby przedstawione powyżej prace badawcze mogły zostać wykonane inaczej niż jako wynik współdziałania wielu osób pracujących w efektywnym zespole naukowo-badawczym.

Prace badawcze przedstawione w niniejszym wniosku habilitacyjnym w formie publikacji [H1-H8], zostały opracowane przez Autora niniejszego wniosku habilitacyjnego w ramach kierowanego przez Autora zespołu badawczego w Korporacyjnym Centrum Badawczym ABB w Krakowie.

Za główne osiągnięcia własne w przedstawionych pracach [H1-H8], Autor niniejszego wniosku habilitacyjnego uważa:

- W pracach [H1] i [H5]:

  Opracowanie modelu pełnego procesu generacji przepięć szybkozmiennych VFTO w odłączniku GIS (ang. *multi-spark approach*), w ujęciu obwodowym, bazującego na metodzie modelowania wyłączników próżniowych. Zaproponowanie i opracowanie założeń fizycznych dla modelu oraz opracowanie sposobu implementacji modelu w profesjonalnym programie numerycznych obliczeń wysokoczęstotliwościowych stanów przejściowych w systemie elektroenergetycznym (EMTP-ATP). Wykonanie implementacji modelu oraz wykonanie analiz symulacyjnych dla weryfikacji zaproponowanego modelu. Zaproponowanie sposobu określania napięciowej wytrzymałości przerwy międzystykowej odłącznika GIS na potrzeby symulacji przepięć szybkozmiennych VFTO na podstawie pomiarów w układzie próby typu odłącznika GIS. Zaproponowanie sposobu weryfikacji modelu odłącznika GIS o napięciu znamionowym 1100 kV poprzez analizę procesów przejściowych uzyskanych z użyciem opracowanego modelu.

- W pracy [H2]:

  Zaproponowanie i opracowanie metody tłumienia przepięć VFTO poprzez kształtowanie warunków napięciowych w chwili poprzedzającej przeskok w przerwie międzystykowej odłącznika. Opracowanie algorytmów sterowania kontrolowanymi przeskokami w przerwie międzystykowej odłącznika. Implementacja algorytmów sterowania w opracowanym w pracach [H1] i [H5] modelu odłącznika GIS w układzie 1100 kV. Wykonanie analiz symulacyjnych dla oceny zaproponowanych algorytmów. Wykonanie kompleksowych prac (w tym również symulacji numerycznych) związanych z ochroną patentową zaproponowanej metody.

- W pracy [H4]:

  Opracowanie metody tłumienia przepięć VFTO przy użyciu materiału magnetyczno-rezystywnego, uzyskanego na bazie materiału nanokrystalicznego i żywicy. Budowa demonstratora w skali dla zaproponowanego materiału magnetyczno-rezystywnego. Przeprowadzenie niskonapięciowych badań właściwości magnetycznych zaproponowanego materiału. Wykonanie pomiarów w układzie GIS przy wymuszeniu udarem napięciowym o kształcie 1.2/50 μs i o wartości szczytowej 550 kV oraz 200 kV. Analiza wyników prób wysokonapięciowych dla oceny skuteczności zaproponowanej metody tłumienia.

- W pracach [H6] i [H7]:

  Zaproponowanie sposobu modelowania rdzeni magnetycznych dla oceny tłumienia przepięć szybkozmiennych VFTO. Opracowanie programu badań i wykonanie pomiarów wysokonapięciowych w układzie GIS z wymuszeniem udarem napięciowym o kształcie 1.2/50 μs i o wartości szczytowej 500 kV dla oceny dokładności zaproponowanego modelu. Wykonanie niskonapięciowych pomiarów charakterystyk częstotliwościowych impedancji zespolonej rdzeni nanokrystalicznych dla różnych punktów pracy rdzeni na charakterystyce magnesowania.

- W pracach [H3] i [H8]:

  Zaproponowanie modelu zjawisk przepięciowych w układzie próby typu odłącznika GIS w ujęciu polowym. Opracowanie nowej metody tłumienia przepięć szybkozmiennych VFTO z zastosowaniem nowej konstrukcji układu stykowego odłącznika GIS. Zastosowanie opracowanego modelu w ujęciu polowym dla oceny tłumienia przepięć szybkozmiennych VFTO z zastosowaniem nowej konstrukcji układu stykowego odłącznika GIS.

d. Możliwość wykorzystania przedstawionych prac w rozwoju technologii GIS

Autor niniejszego wniosku habilitacyjnego, w latach 2010-2017 kierował projektami badawczymi i wykonywał prace badawcze jako pracownik naukowo-badawczy Korporacyjnego Centrum Badawczego ABB w Krakowie, we współpracy z zagranicznymi ośrodkami badawczymi i biznesowymi ABB, a także we współpracy z krajowymi i zagranicznymi ośrodkami akademickimi.

Wyniki prac badawczych przedstawione w publikacjach [H1-H8] zostały wykorzystane przez koncern ABB w pracach rozwojowych dotyczących technologii GIS, w zakresie projektowania i badań komponentów oraz stacji GIS wysokich i ultra wysokich napięć, jak również analiz oraz ograniczania przepięć VFTO w stacjach GIS wysokich i ultra wysokich napięć.

Dodatkowo, jak zaznaczono w pracy [H5], część wyników symulacji zaprezentowana w pracy [H5] w oparciu o zaproponowaną przez Autora niniejszego wniosku w pracy [H1] metodę modelowania generacji przepięć VFTO dla pełnego procesu otwierania i zamykania odłącznika (ang. *multi-spark approach*), została wykorzystana jako wkład ABB w opracowanie broszury technicznej CIGRE TB 542 [33].

7. Literatura

[1] U. Riechert and W. Holaus, "Ultra high-voltage gas-insulated switchgear – A technology milestone," Eur. Trans. Elect. Power, vol. 22, pp. 60–82, 2011.

[2] M. Szewczyk, W. Piasecki, M. Stosur, U. Riechert, and J. Kostovic, "Impact of disconnector design on very fast transient overvoltages in gas-insulated UHV switchgear," presented at the 17th Int. Symp. High Voltage Eng., Hannover, Germany, Aug. 22–26, 2011.

[3] High-Voltage Switchgear and Controlgear—Part 203: Gas-Insulated Metal-Enclosed Switchgear for Rated Voltages Above 52 kV, IEC Standard 62271-203, Nov. 2003.

[4] U. Riechert, M. Bösch, M. Szewczyk, W. Piasecki, J. Smajic, A. Shoory, S. Burow, S. Tenbohlen, "Mitigation of very fast transient overvoltages in gas insulated UHV substations," in Proc. CIGRE, 2012.

[5] CIGRE Working Group SC 33 and 13, "Very Fast Transient Phenomena associated with gas insulated substations," CIGRE Session 1988.

[6] IEC TR 60071-1 Insulation co-ordination – Part 1: Definitions, principles and rules

[7] High-Voltage Switchgear and Controlgear – Part 102: Alternating Current Disconnectors and Earthing Switches, IEC 62271-102.

[8] Y. Shu, W. Chen, Z. Li, M. Dai, C. Li, W. Liu, X. Yan, "Experimental research on very-fast transient overvoltage in 1100-kV Gas-Insulated Switchgear," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 28, no. 1, pp. 458–466, Jan. 2013.

[9] Z. Flisowski, „Technika Wysokich Napięć", WNT1999.

[10] W. Nowak, „Identyfikacja narażeń przepięciowych układów elektroenergetycznych wysokich napięć przy wyładowaniach atmosferycznych", Rozprawy i Monografie, 139, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2005.

[11] A. Hileman, „Insulation Coordination for Power Systems", Power Engineering Series, ABB Electric Systems Technology Institute, Raleigh, North Carolina, 1999.

[12] CIGRE Working Group B3.22: „Technical Requirements for Substation Exceeding 800 kV", Brochure 400, December 2009.

[13] J. A. Martinez, D. Povh, P. Chowdhuri, R. Iravani, and A. J. F. Keri, "Modeling Guidelines for Very Fast Transients in Gas Insulated Substations," IEEE PES Special Publication of the IEEE Working Group on Modeling and Analysis of System Transients, 1998.

[14] IEC TR 60071-4 Insulation co-ordination – Part 4: Computational guide to insulation co-ordination and modelling of electrical networks

[15] T. Kuczek, M. Florkowski, W. Piasecki, „Transformer Switching with Vacuum Circuit Breaker: Case Study of PV Inverter LC Filters Impact on Transient Overvoltages", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 31, No. 1, Feb. 2016

[16] M. Szewczyk, T. Kuczek, M. Stosur, W. Piasecki, M. Florkowski, M. Fulczyk, „Influence of HV LC filter on lightning overvoltages in Gas-Insulated Switchgear substations," Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), ISSN 0033-2097, R. 88 NR 5a/2012, pp. 204-207

[17] D. Povh, H. Schmitt, O. Volcker, R. Witzmann, P. Chewdhuri, A. E. Imece, R. Iravani, J. A. Martinez, A. Keri, and A. Sarshar, "Modeling and Analysis Guidelines for Very Fast Transients," IEEE Power Engineering Review, vol. 17, no. 13, 1996.

[18] Y. Yamagata, K. Tanaka, S. Nishiwaki, N. Takahashi, T. Kokumai, I. Miwa, T. Komukai, K. Imai, "Suppression of VFT in 1100 kV GIS by adopting resistor-fitted disconnector," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 1, no. 2, pp. 872–880, Apr. 1996.

[19] W. D. Liu, L. J. Jin, and J. L. Qian, "Simulation test of suppressing VFT in GIS by ferrite rings," in Proc. 2001 Int. Symp. Electr. Insulating Mater., Beijing, China, 2011, pp. 245–247.

[20] J. V. G. Rama Rao, J. Amarnath, and S. Kamakshaiah, "Simulation and measurement of very fast transient overvoltages in a 245 kV GIS and research on suppressing method using ferrite rings," ARPN J. Eng. Appl. Sci., vol. 5, no. 5, pp. 88–95, May 2010.

[21] S. Burow, U. Riechert, W. K¨ohler, and S. Tenbohlen, "New mitigation methods for transient overvoltages in gas insulated substations," in Proc. Stuttgarter Hochspannungssymposium, Stuttgart, Germany, 2012, pp. 169–181.

[22] Y. Guan, G. Yue, W. Chen, Z. Li, and W. Liu, "Experimental research on suppressing VFTO in GIS by magnetic rings," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 28, no. 4, pp. 2558–2565, Oct. 2013.

[23] S. Burow, U. Straumann, W. K¨ohler, and S. Tenbohlen, "New methods of damping very fast transient overvoltages in gas-insulated switchgear," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 29, no. 5, pp. 2332–2339, Oct. 2014.

[24] J. Smajic, A. Shoory, S. Burow, W. Holaus, U. Riechert, and S. Tenbohlen, "Simulation-based design of HF resonators for damping very fast transients in GIS," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 29, no. 6, pp. 2528–2533, Dec. 2014.

[25] S. Burow, U. Straumann, W. K¨ohler, and S. Tenbohlen, "New methods of damping very fast transient overvoltages in gas-insulated switchgear," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 29, no. 5, pp. 2332–2339, Oct. 2014.

[26] S. Yinbiao, H. Bin, L. Ji-Ming, C. Weijiang, B. Liangeng, X. Zutao, C. Guoqiang, "Influence of the switching speed of the disconnector on very fast transient overvoltage," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 28, no. 4, pp. 2080–2084, Oct. 2013.

[27] G. Ecklin and D. Schlicht, "Overvoltages in GIS caused by the operation of isolators," in Proc. 1979 of the Brown Boveri Research Centre, Baden, Switzerland, September 3-4, 1979.

[28] J. Helmer and M. Lindmayer, "Mathematical Modeling of the High Frequency Behaviour of Vacuum Interrupters and Comparison with Measured Transients in Power Systems", *Proc. 1996 XVIIth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*, Berkeley, USA, 1996.

[29] S. M. Wong, L. A. Snider, and E. W. C. Lo, "Overvoltages and reignition behaviour of vacuum circuit breaker," in *Proc. 2013 International Conference on Power Systems Transients (IPST)*, New Orleans, USA, 2003.

[30] H. W. Dommel, W. S. Meyer, "Computation of electromagnetic transients," *Proceedings of IEEE*, vol. 62, no. 7, pp. 983-993, July 1974.

[31] D. J. Griffiths, "Introduction to Electrodynamics", 3rd edition, Prentice Hall, 1999.

[32] COMSOL Multiphysics. [Online]. Available: www.comsol.com.

[33] Working Group C4.306, Insulation coordination for UHV AC systems, CIGRE Technical Brochure 542, Jun. 2013.

[34] M. Szewczyk, M. Stosur, W. Piasecki, „Warstwa ochronna do tłumienia wysokoczęstotliwościowych przepięć," Patent PL224090, Nov. 2016, pp. 1-8

[35] M. Szewczyk, M. Stosur, W. Piasecki, U. Riechert, J. Kostovic, „A method for controlling arc ignition in the intercontact break of a disconnector during the operation of opening and closing disconnector," Patent EP2731213, Feb. 2016, pp. 1-19

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

Do pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych zaliczam:

- Kierowanie i udział merytoryczny w kilkunastu projektach badawczo-rozwojowych w Korporacyjnym Centrum Badawczym ABB w Krakowie, we współpracy z zagranicznymi ośrodkami badawczymi i biznesowymi ABB, a także we współpracy z krajowymi i zagranicznymi ośrodkami akademickimi.
- Współautorstwo w opracowaniu analiz w zakresie koordynacji izolacji stacji elektroenergetycznych wysokich i ultra wysokich napięć z aparaturą napowietrzną oraz z rozdzielnicami gazoszczelnymi typu GIS; przykładowa publikacja: [1].
- Współautorstwo w opracowaniu nowej metody ograniczania przepięć powstałych w wyniku wyładowań piorunowych w linie napowietrzne dochodzące do stacji elektroenergetycznej; przykładowe publikacje: [2, 3].
- Współautorstwo w wykonaniu analiz dla systemów z przekształtnikami energoelektronicznymi; przykładowa publikacja: [4].
- Współautorstwo w opracowaniu koncepcji zabezpieczeń dla systemu zasilającego zespół napędów przekształtnikowych; koncepcja ta została zastrzeżona patentem [5].

- Współautorstwo w pracach dotyczących określania charakterystyk rdzeni magnetycznych; przykładowa publikacja: [6].
- Pełnienie funkcji opiekuna naukowego dla dwóch prac dyplomowych magisterskich i jednej pracy dyplomowej inżynierskiej obronionych na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej, oraz pełnienie funkcji konsultanta naukowego dla pracy dyplomowej magisterskiej obronionej na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.

Literatura:

[1] **M. Szewczyk**, M. Stosur, W. Piasecki, T. Kuczek, T. Chmielewski, J. Kostovic, U. Riechert, „Impact of Disconnector Design on Insulation Co-ordination in Gas-Insulated UHV Switchgear Substations", *Przegląd Elektrotechniczny* (Electrical Review), ISSN 0033-2097, R. 89 NR 8/2013 (IF 2013 = brak; punkty MNiSW 2013 = 10)

[2] T. Kuczek, M. Stosur, **M. Szewczyk**, W. Piasecki, M. Steiger, „Investigation on new mitigation method for lightning overvoltages in high-voltage power substations", *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 7, issue 10, 03.10.2013, ISSN :1751-8687, pp. 1055-1062 (IF 2013 = 1.307; punkty MNiSW 2013 = 30)

[3] **M. Szewczyk**, T. Kuczek, M. Stosur, W. Piasecki, M. Florkowski, M. Fulczyk, „Influence of HV LC filter on lightning overvoltages in Gas-Insulated Switchgear substations", *Przegląd Elektrotechniczny* (Electrical Review), ISSN 0033-2097, R. 88 NR 5a/2012, pp. 204-207 (IF 2012 = brak; punkty MNiSW 2012 = 15; czasopismo nieuwzględnione w bazach JCR w roku 2012, uwzględnione na liście A MNiSW w roku 2012)

[4] P. Dawidowski, **M. Szewczyk**, W. Piasecki, T. E. Moen, J. Wiik, „A subsea system with ride-through protection", *European Patent Application: EP 2744062 A1* (data zgłoszenia: 14.12.2014, data publikacji: 18.06.2014), *European Patent Granted EP 2690450 B1, European Patent Office (*date of publication and mention of the grant of the patent: 21.10.2015*)*

[5] P. Dawidowski, K. Sowa, M. Stosur, **M. Szewczyk**, W. Piasecki, P. Balcerek, „Impact of power-cable length on operation of NPC inverter fed induction motor drive for various LC filter topologies", *Przegląd Elektrotechniczny* (Electrical Review), ISSN 0033-2097, R. 89 NR 9/2013 (IF 2013 = brak; punkty MNiSW 2013 = 10)

[6] **M. Szewczyk**, K. Kutorasiński, W. Piasecki, „Quantitative Analysis of High Frequency Material Properties in Thin-Ribbon Magnetic Cores", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, no. 8, Aug. 2015 (IF 2015 = 1.277; punkty MNiSW 2015 = 25)

6. Podziękowania

Autor niniejszego wniosku habilitacyjnego miał szczęście pracować w latach 2010-2017 we wspaniałym Zespole w Korporacyjnym Centrum Badawczym ABB w Krakowie. Dziękuję w tym miejscu wszystkim Koleżankom i Kolegom z ABB – współpracownikom oraz współautorom prezentowanych tu prac – dzięki których pasji, zaangażowaniu i życzliwości wykonanie tych prac było możliwe.

.....

podpis wnioskodawcy