

AUTOREFERAT

1. Imię i nazwisko: Jacek Horiszny

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

1986 – dyplom magistra inżyniera elektryka; Wydział Elektryczny Politechniki Gdańskiej

1996 – stopień naukowy doktora nauk technicznych w dyscyplinie Elektrotechnika, Wydział Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej; praca pt. „Analiza współpracy przekształtnika impulsowego z szeregowym silnikiem trakcyjnym”; promotor: prof. dr hab. inż. Paweł Zimny, recenzenci: prof. dr hab. inż. Kazimierz Mikołajuk, Wydział Elektryczny, Politechnika Warszawska, prof. dr hab. inż. Przemysław Pazdro, Wydział Elektryczny, Politechnika Gdańska.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

1985–1986 – asystent stażysta w Zakładzie Elektrotechniki Teoretycznej, Wydział Elektryczny Politechniki Gdańskiej

1986–1996 – asystent w Katedrze Elektrotechniki Teoretycznej, Wydział Elektryczny Politechniki Gdańskiej

1996–2013 – adiunkt w Katedrze Elektrotechniki Teoretycznej i Informatyki, Wydział Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej

od 2013 – starszy wykładowca w Katedrze Elektrotechniki Teoretycznej i Informatyki (od 2017 Katedra Elektrotechniki, Systemów Sterowania i Informatyki), Wydział Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej

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

Analiza i ograniczanie prądu załączeniowego transformatora energetycznego w stanie jałowym

b) wykaz prac naukowych, dokumentujących osiągnięcie (osiągnięcia) naukowe, stanowiące podstawę ubiegania się o stopień doktora habilitowanego

Monografia:

A1. Jacek Horiszny: *Analiza i ograniczanie prądów włączania transformatorów*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2016

Cykl publikacji:

- B1. Jacek Horiszny: *Implementation of power transformer controlled switching algorithm*, COMPEL-The International Journal For Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol 35, issue 4, 2016, pp. 1418-1427. 15 pkt. MNiSW lista A, JCR IF=0,43
- B2. Jacek Horiszny: *Reduction of inrush current by demagnetization of magnetic core*, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol 39, issue 1-4, 2012, pp. 1013-1019. 15 pkt. MNiSW lista A, JCR IF=0,384
- B3. Jacek Horiszny, Mirosław Wołoszyn: *A Circuital Model of Electric Arc in a Circuit Breaker*, Przegląd Elektrotechniczny, Vol 86, issue 1, 2010, pp. 74-76. 9 pkt. MNiSW lista B, JCR IF=0,242. Procentowy wkład Autora autoreferatu oszacowano na 90%
- B4. Jacek Horiszny: *Influence of circuit breaker operation upon transformer's residual flux and inrush current*, Przegląd Elektrotechniczny, Vol 83, issue 11, 2007, pp. 208-211. 6 pkt. MNiSW lista B, artykuł indeksowany w bazie: Web of Science.
- B5. Jacek Horiszny: *Analiza prądu załączania transformatora*, Pomiary Automatyka Kontrola, Vol. 53, nr 4, 2007, s. 139-141
- B6. Jacek Horiszny: *Numeryczne obliczenia prądu włączania transformatora energetycznego*, Przegląd Elektrotechniczny, nr 10, 2004, s. 909-912
- B7. Jacek Horiszny: *Research of Leakage Magnetic Field in Deenergized Transformer*, COMPEL-The International Journal For Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol. 37, issue 5, 2018, pp. 1657-1667. 15 pkt. MNiSW lista A, czasopismo w bazie JCR.

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

Transformator energetyczny podczas włączania go do sieci zasilającej pobiera prąd, nazywany prądem załączeniowym, którego wartość szczytowa może przekroczyć wielokrotnie prąd znamionowy. Dla danego transformatora maksymalny stosunek I_{zs}/I_n , osiąga wartość z przedziału 10÷20 (I_{zs} - wartość szczytowa prądu załączeniowego, I_n – prąd znamionowy transformatora). Dotyczy to pierwszego maksimum przebiegu prądu załączeniowego, ale następnym maksimum w tym przebiegu, mimo tego, że tworzą ciąg wartości malejących, również przekraczają wielokrotnie prąd I_n . Jest to stan przejściowy w obwodzie zasilającym transformator, trwający od dziesiątych części sekundy dla transformatorów małej mocy do kilku minut w przypadku transformatorów najwyższych mocy. Zjawisko to może być powodem nieuzasadnionego zadziałania zabezpieczeń nadprądowych transformatora oraz stanowi udar oddziałujący negatywnie na sam transformator i inne elementy systemu elektroenergetycznego. Z literatury dotyczącej tego problemu wynika, że prąd załączeniowy transformatora osiąga największe wartości przy załączaniu w stanie jałowym – przetężenia podczas włączania w stanie obciążenia lub zwarcia są mniejsze. Z tego względu przeprowadzone przez Autora autoreferatu badania dotyczyły głównie załączania transformatora w stanie jałowym. Stąd w dalszej części tego autoreferatu przez załączanie transformatora rozumie się załączanie w stanie jałowym, jeśli nie jest to wyraźnie określone inaczej.

Prace badawcze dotyczące prądu załączeniowego transformatora rozpoczęto wiele lat temu w licznych ośrodkach naukowych na świecie. Pozwoliły one poznać naturę zjawisk odpowiedzialnych za ich kształtowanie oraz ich wpływ na funkcjonowanie systemu elektroenergetycznego. Literatura światowa na ten temat jest bardzo bogata, a pierwsze publikacje pojawiły się już w latach czterdziestych i pięćdziesiątych ubiegłego wieku, np. [C1, C6, C11]. Następne dekady wniosły znaczny wkład w dorobek badawczy i piśmiennictwo dotyczące tego zagadnienia [C7]. Kolejne publikacje pojawiające się także w bieżącym stuleciu świadczą o tym, że prace w tej dziedzinie są nadal kontynuowane, np. [C3, C4, C5].

Analiza literatury dotyczącej tego tematu skłoniła Autora do podjęcia prac mających na celu uzupełnienie i rozszerzenie stanu wiedzy na temat prądów załączeniowych transformatora, a w szczególności:

- I. Analizę czynników kształtujących przebiegi prądów załączeniowych.
- II. Opis analityczny prądów załączeniowych, dający możliwość bardziej precyzyjnego określania warunków niezbędnych do realizacji metod ograniczania tych prądów.
- III. Opracowanie nowych, skuteczniejszych metod ograniczania prądów załączeniowych transformatora.

Realizacja wymienionego powyżej zadania III dotyczyła stworzenia nowych algorytmów sterowania pracą łączników w rozwijanej w ostatnich latach metodzie załączania synchronizowanego (ang. *controlled switching*) [C2, C9]. Wymagało to przeprowadzenia szczegółowych analiz teoretycznych i badań laboratoryjnych następujących zagadnień:

- IV. Kształtowanie się magnetyzmu szczątkowego rdzenia transformatora podczas wyłączenia transformatora.
- V. Wybór optymalnych momentów zamykania styków łącznika w metodzie załączania synchronizowanego przy określonym stanie namagnesowania rdzenia.
- VI. Możliwość wykorzystania demagnetyzacji rdzenia transformatora oraz analiza sposobów jej przeprowadzenia w metodzie załączania synchronizowanego.
- VII. Określanie wartości strumieni szczątkowych w kolumnach transformatora.

Wyniki tych badań umożliwiły opracowanie przez Autora koncepcji dwóch nowych metod załączania synchronizowanego, charakteryzujących się nieosiąganą do tej pory skutecznością w ograniczaniu prądów załączeniowych transformatora.

Czynniki kształtujące prąd załączeniowy transformatora

W tej części pracy Autor dokonał analizy wpływu, jaki na przebiegi prądów załączeniowych transformatora ma kąt włączenia napięcia zasilającego, remanent magnetyczny oraz kształt charakterystyki magnesowania rdzenia magnetycznego transformatora. W tym celu został opracowany przez Autora, nie opisany dotychczas w literaturze, analityczny opis przebiegu prądu załączeniowego dla transformatora jednofazowego. Uwzględniono w nim stan nasycenia rdzenia magnetycznego, pętle histerezy magnetycznej i strumień magnetyczny szczątkowy. Takie podejście umożliwiło badanie różnych czynników na kształt przebiegu i parametry tego prądu. Korzystając z opisu analitycznego zostały obliczone charakterystyki wartości szczytowej prądu załączeniowego w zależności od kąta włączenia napięcia i wartości strumienia szczątkowego w rdzeniu. Na podstawie tych charakterystyk sformułowano następujące wnioski:

- I. Analiza teoretyczna potwierdziła, że wartość szczytowa prądu załączeniowego bardzo silnie zależy od strumienia szczątkowego w rdzeniu transformatora oraz od momentu włączenia napięcia zasilającego.
- II. Zwiększenie strumienia szczątkowego powoduje proporcjonalny wzrost wartości szczytowej prądu załączeniowego;
- III. Dla każdej wartości strumienia szczątkowego istnieje taki kąt włączenia napięcia, dla którego wartość szczytowa prądu załączeniowego przyjmuje bardzo małą wartość, porównywalną z prądem stanu jałowego transformatora.

Opracowano analityczną zależność, pozwalającą obliczyć optymalny kąt włączenia napięcia w zależności od wartości strumienia szczątkowego w rdzeniu, dla którego to kąta prąd załączeniowy ma przebieg taki sam lub bardzo zbliżony do prądu transformatora w stanie jałowym.

Ze względu na to, że opis analityczny prądu załączeniowego byłby dla transformatora trójfazowego zbyt złożony w praktycznym wykorzystaniu, jego analizę przeprowadzono na podstawie wyników obliczeń numerycznych z programu ATP/EMTP. Obliczono wartości szczytowe prądu załączeniowego przy różnych kątach włączenia napięcia i dla różnych rozkładów strumieni szczątkowych w kolumnach rdzenia trójkolumnowego. Obliczenia wykazały, że dla każdego z rozważanych stanów namagnesowania rdzenia istnieje taki kąt włączenia napięcia, przy którym wartości szczytowe prądów we wszystkich fazach obwodu są najmniejsze i nie przekraczają prądu znamionowego transformatora. Prawidłowość ta może być wykorzystana do ograniczania prądów załączeniowych i daje możliwość znacznego ich zmniejszenia w stosunku do wartości maksymalnych, jakie pojawiają się w układach bez systemów ograniczających prąd załączeniowy. Wymaga to jednak określenia strumieni szczątkowych w poszczególnych kolumnach transformatora oraz zamknięcia wszystkich zestyków łącznika w ściśle określonym momencie, z bardzo niewielką tolerancją zadziałania (ok. ± 1 ms).

Stwierdzono również, że przy braku namagnesowania szczątkowego rdzenia wartości szczytowe prądów załączeniowych 3÷4-krotnie przewyższają prąd znamionowy. Nie jest w tym przypadku możliwy taki dobór kąta włączenia napięcia, aby prądy szczytowe we wszystkich fazach uległy zmniejszeniu poniżej wartości prądu znamionowego transformatora.

Przeprowadzone badania, o których jest mowa powyżej, stały się podstawą do opracowania pierwszego rozdziału monografii Autora [A1] oraz zostały przedstawione w publikacjach [B5, B6].

Magnetyzm szczątkowy rdzenia transformatora

Strumień magnetyczny szczątkowy ma bardzo duży wpływ na wartość prądu załączeniowego transformatora. Zasadniczą przyczyną trwałego namagnesowania rdzenia po odłączeniu transformatora od sieci zasilającej i zaniknięciu prądów w uzwojeniach jest histereza w charakterystyce magnesowania materiału magnetycznego rdzenia. Stan namagnesowania rdzenia zależy od tego, w jaki sposób zanikają prądy w poszczególnych uzwojeniach po wyłączeniu napięcia zasilającego. Na przebiegi prądów podczas wyłączenia transformatora wpływa konfiguracja jego obwodu pierwotnego i wtórnego oraz ilość energii zgromadzonej w polu elektromagnetycznym obu tych obwodów. Ilość energii zawartej w elementach dołączonych do transformatora, jak i w nim samym, zależy od momentu, w którym następuje wyłączenie transformatora. Jest to związane nie tylko z momentem rozdzielenia styków wyłącznika, ale również ze zjawiskami zachodzącymi w wyłączniku, a w szczególności z pojawieniem się łuku elektrycznego między stykami. Z tego względu

Autor podjął zadanie wyjaśnienia, jakie czynniki i w jaki sposób wpływają na wartości strumieni szczątkowych w kolumnach rdzenia. W tym celu zostały przeprowadzone badania symulacyjne, których celem było określenie, jakie stany namagnesowania szczątkowego są możliwe w rdzeniu transformatora trójfazowego, oraz jaki wpływ na ten stan mają następujące czynniki:

- moment wyłączenia napięcia zasilającego,
- pojawienie się łuku elektrycznego o określonej charakterystyce między stykami wyłącznika,
- niejednoczesność otwarcia zestyków łącznika w poszczególnych fazach,
- stopień obciążenia transformatora.

Symulacje komputerowe zostały wykonane przy wykorzystaniu programu ATP/EMTP, który zawiera model pętli histerezy magnetycznej, pozwalający na odwzorowanie różnych stanów namagnesowania. Dla potrzeb analizy zjawisk komutacyjnych w wyłączniku Autor opracował własny model wyłącznika z łukiem elektrycznym, zaimplementowany następnie w programie symulacyjnym. Szczegółowy opis tego modelu przedstawiono w artykule [B3]. W trakcie badań symulacyjnych zamodelowano następujące operacje i warunki ich przeprowadzenia:

- wyłączenie transformatora w stanie jałowym, w stanie obciążenia oraz w stanie zwarcia,
- wyłączenie transformatora przy jednoczesnym i niejednoczesnym rozdzieleniu styków łącznika,
- otwarcie styków łącznika z uwzględnieniem i przy pominięciu rezystancji łuku elektrycznego.

Wyniki badań symulacyjnych pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

- I. Po wyłączeniu transformatora ze stanu zwarcia, namagnesowanie szczątkowe rdzenia osiąga poziom znacznie niższy, niż po wyłączeniu w innych stanach pracy transformatora – stanie jałowym i stanie obciążenia. Wynika to z silnego działania rozmagnesowującego dużych prądów płynących po stronie wtórnej transformatora przy zwarcu.
- II. Po wyłączeniu transformatora w stanie jałowym i w stanie obciążenia powstają zasadniczo różne rozkłady strumieni szczątkowych. Przy wyłączaniu w stanie jałowym najczęściej uzyskuje się następujące rozkłady strumieni: strumień w dwóch kolumnach rdzenia osiąga wartości zbliżone do maksymalnych lecz przeciwnego znaku, w trzeciej kolumnie strumień przyjmuje wartość bliską zeru. Przy wyłączaniu w stanie obciążenia strumienie przyjmują wartości bardziej zróżnicowane.
- III. Rozkład strumieni szczątkowych przy wyłączaniu ze stanu obciążenia zależy od stopnia obciążenia transformatora. Zmiana wartości obciążenia wpływa na stan namagnesowania szczątkowego pośrednio. Dla różnych wartości obciążenia inaczej przebiega przerywanie prądów w wyłączniku i to jest przyczyną zmian wartości strumieni szczątkowych. Jednak zależność strumieni szczątkowych od wartości obciążenia jest trudna do usystematyzowania.
- IV. Niejednoczesność rozdzielania się styków wyłącznika w jednej fazie w odniesieniu do dwóch pozostałych faz, przyjmująca wartość rzędu 1 ms jest wystarczająca, aby rozkład strumieni szczątkowych w kolumnach rdzenia ukształtował się zupełnie

inaczej, w stosunku do przypadku jednoczesnego rozdzielania styków we wszystkich fazach.

- V. Wyłączenie bezłukowe skutkuje innym rozkładem strumieni szczytkowych w kolumnach niż wyłączenie przy obecności łuku elektrycznego między stykami łącznika. Łuk elektryczny podtrzymuje przepływ prądu w obwodzie. W efekcie ulegają zmianie przebiegi i momenty przerywania prądów fazowych i , w konsekwencji, wartości strumieni szczytkowych, jakie się ustalą po zaniknięciu prądów. Na przebiegi prądów ma także pewien wpływ zmienna rezystancja łuku.
- VI. Rozkład strumieni szczytkowych zależy również od chwili wyłączenia napięcia. Jeżeli wyłączenie następuje w chwili oznaczonej przez t_0 , a t_0 przyjmuje wartości z przedziału od 0 do 20 ms (przy częstotliwości sieci 50 Hz), strumień szczytkowy w danej fazie przyjmuje tylko kilka, w przybliżeniu stałych wartości, między którymi zmiana odbywa się skokowo. Skokowa zmiana wartości strumieni szczytkowych jest związana ze zmianą sekwencji przerywania poszczególnych prądów fazowych – następuje zmiana fazy obwodu, w której przejście prądu przez zero występuje wcześniej niż pozostałych fazach, licząc od momentu otwarcia styków łącznika. Zależność strumienia od chwili wyłączenia napięcia jest dla każdej fazy obwodu niemal identyczna, a jedynie przesunięta względem pozostałych o $1/3$ okresu napięcia sieci.
- VII. W przypadku wyłączania z ucięciem prądu przez wyłącznik, strumienie szczytkowe mogą przyjmować dowolne wartości z przedziału $(-\Psi_m, \Psi_m)$, gdzie Ψ_m oznacza maksymalną wartość strumienia szczytkowego, określoną przez rozpiętość pętli histerezy magnetycznej.

Badania i ich rezultaty stały się podstawą do opracowania drugiego rozdziału monografii [A1]. Wyniki tych badań posłużyły również do sporządzenia publikacji [B4].

Załączanie synchronizowane

Jak już stwierdzono powyżej przy charakteryzowaniu czynników kształtujących prąd załączeniowy transformatora, przeprowadzone przez Autora badania wykazały, że w transformatorze trójfazowym odpowiedni wybór momentu jednoczesnego zamknięcia styków łącznika we wszystkich fazach daje możliwość istotnego ograniczenia tego prądu. Można w ten sposób zmniejszyć wartość szczytową prądu załączeniowego do wartości prądu znamionowego transformatora. W metodzie załączania synchronizowanego zamykanie styków wyłącznika jest zsynchronizowane z przebiegiem napięcia zasilającego i w każdej fazie obwodu odbywa się w odpowiednio określonych momentach. Dla transformatora jednofazowego, w którego rdzeniu występuje strumień szczytkowy, najkorzystniejszym momentem włączenia jest chwila, w której spodziewany strumień magnetyczny w rdzeniu przyjmuje wartość strumienia szczytkowego. Przez spodziewany strumień magnetyczny należy rozumieć strumień, jaki jest związany z napięciem zasilającym w stanie ustalonym, zgodnie z prawem Faradaya. W takim przypadku prąd załączeniowy przyjmuje przebieg prądu stanu jałowego. Autor przeprowadził badania, mające na celu wyjaśnienie, czy taki efekt jest również możliwy w transformatorze trójfazowym. Podjęto zatem analizę, mającą określić czy, i przy spełnieniu jakich warunków, jest możliwe takie ograniczenie prądu załączeniowego poprzez odpowiednie sterowanie zamykaniem styków łącznika, by przebieg tego prądu był identyczny lub zbliżony do przebiegu prądu stanu jałowego. Podstawowym warunkiem dla osiągnięcia takiego efektu jest zrównanie bieżących wartości strumieni magnetycznych w poszczególnych kolumnach rdzenia z wartościami strumieni

oczekiwanych w stanie ustalonym. Momenty w których następuje takie zrównanie strumieni są optymalnymi chwilami dla zamknięcia styków łącznika.

Analizę tego zagadnienia przeprowadzono dla rdzenia trójkolumnowego i trzech układów połączeń uzwojenia pierwotnego: połączenia w gwiazdę w układzie czteroprzewodowym i trójprzewodowym oraz połączenia w trójkąt. Wstępnie założono, że zamykanie styków łącznika w poszczególnych fazach odbywa się w następujących po sobie chwilach t_1 , t_2 , t_3 , gdyż wspomniane zrównanie strumieni magnetycznych nie musi następować jednocześnie we wszystkich kolumnach rdzenia. Obliczenia wartości t_1 , t_2 , t_3 , dokonano dla różnych stanów namagnesowania rdzenia, które wynikały z analizy opisaną wcześniej w punkcie dotyczącym magnetyzmu szczątkowego rdzenia. Pozostałe warunki analizy były następujące:

- I. Dla każdego z przyjętych stanów namagnesowania rdzenia rozważono trzy możliwe sekwencje zamykania styków łącznika w fazach L1, L2, L3: sekwencja L1-L2-L3, sekwencja L3-L1-L2, sekwencja L2-L3-L1.
- II. W przypadku uzwojenia pierwotnego połączonego w trójkąt należało założyć relację $t_1=t_2<t_3$, gdyż włączenie zasilania pierwszego z uzwojeń wymaga załączenia dwóch faz. Podobna sytuacja występuje dla uzwojenia połączonego w gwiazdę bez przewodu neutralnego, z tym że, po załączeniu pierwszych dwóch faz, zasilane są dwa uzwojenia.
- III. Analizę przeprowadzono z założeniem symetrii magnetycznej rdzenia i z uwzględnieniem niesymetrii magnetycznej rdzenia, co ma znaczenie, gdy pierwsze z zasilanych uzwojeń nie jest umieszczone na kolumnie środkowej.
- IV. Chwile t_1 , t_2 , t_3 obliczano numerycznie ze względu na nieliniowość równań opisujących zachodzące zjawiska. Po dokonaniu odpowiednich uproszczeń stało się możliwe uzyskanie zależności analitycznych określających momenty zamykania styków łącznika.
- V. Wyznaczone wartości t_1 , t_2 , t_3 wykorzystano w symulacjach numerycznych załączania synchronizowanego dla wszystkich rozważanych układów połączeń uzwojenia pierwotnego i stanów namagnesowania rdzenia.

Wyniki przeprowadzonej w ten sposób analizy można podsumować następująco:

- I. Na podstawie obliczeń numerycznych i zależności analitycznych stwierdzono, że zrównanie bieżącej wartości strumienia magnetycznego z wartością strumienia oczekiwanego w stanie ustalonym następuje w każdej kolumnie, dla każdego z rozważanych układów uzwojenia pierwotnego i dla każdej sekwencji załączania faz. Różnice między wartościami t_1 , t_2 , t_3 obliczonymi numerycznie i z zależności analitycznych nie przekroczyły 0,8 ms.
- II. Symulacje numeryczne załączania synchronizowanego wykazały, że wartości szczytowe prądów załączeniowych, w przypadku załączenia w chwilach t_1 , t_2 , t_3 wyznaczonych numerycznie, nie przekroczyły $0,5I_n$. Wartości szczytowe prądów obliczonych dla chwil t_1 , t_2 , t_3 wyznaczonych z zależności analitycznych okazały się większe, nie przekroczyły jednak wartości $2I_n$.
- III. Porównanie wyników symulacji załączania transformatora przeprowadzonych z wykorzystaniem optymalnych momentów załączenia wyznaczonych numerycznie i

wyznaczonych analitycznie pozwoliło zaobserwować wpływ dokładności wyznaczenia momentów załączenia na wartość szczytową prądu załączeniowego. Różnice rzędu dziesiątych części ms między chwilami t_1 , t_2 , t_3 obliczonymi numerycznie i obliczonymi analitycznie powodowały niewielkie różnice w przebiegach strumieni magnetycznych, ale znaczne różnice w przebiegach i wartościach maksymalnych prądów – dla t_1 , t_2 , t_3 obliczonych analitycznie wartości maksymalne prądów są kilkakrotnie większe.

- IV. Stwierdzono również, że różnice pomiędzy numerycznie i analitycznie wyznaczonymi chwilami zamykania styków łącznika będą maleć w miarę wzrostu mocy transformatora, co jest związane z towarzyszącą tej tendencji wzrostem stałej czasowej przebiegów przejściowych. Obliczenia przeprowadzono dla możliwie najmniej korzystnego, z tego punktu widzenia, przypadku, tj. transformatora o niewielkiej mocy (rzędu 1 MVA).
- V. Zarówno analiza numeryczna, jak i analityczna, wykazały, że dla uzwojenia pierwotnego połączonego w gwiazdę z przewodem neutralnym chwile załączenia spełniają relację $t_1 < t_2 = t_3$, co oznacza, że zamknięcie styków łącznika w drugiej i trzeciej fazie musi nastąpić jednocześnie dla tego układu połączeń.

Na podstawie przeprowadzonych rozważań teoretycznych i badań symulacyjnych stwierdzono, że załączanie synchronizowane transformatora trójfazowego, w zależności od układu połączeń uzwojenia pierwotnego, należy realizować według dwóch możliwych sekwencji zamykania styków łącznika:

- jednoczesne zamknięcie styków łącznika w pierwszej i drugiej fazie, następnie zamknięcie z odpowiednim opóźnieniem styków w trzeciej fazie,
- zamknięcie styków w pierwszej fazie, następnie, po odpowiedniej zwłoce, jednoczesne zamknięcie styków w pozostałych fazach.

Każda z tych operacji łączeniowych musi być dokonana w precyzyjnie określonym momencie, wyznaczonym względem fazy napięcia zasilającego (czasy t_1 , t_2 , t_3).

Ze względu na to, że niezachowanie przez łącznik optymalnych wartości t_1 , t_2 , t_3 przy zamykaniu styków może powodować taki sam efekt, jak niedokładne ich wyznaczenie, dalsze badania przeprowadzono w celu określenia dopuszczalnych odchyłek dla chwil t_1 , t_2 , i t_3 , które nie spowodują istotnego wzrostu wartości szczytowej prądu załączeniowego. Przeprowadzono szereg symulacji załączenia transformatora w sytuacji, gdy optymalne wartości czasów t_1 , t_2 , t_3 , wyznaczone w opracowany przez Autora sposób, nie zostają zachowane. Jako kryterium skuteczności ograniczania prądu załączeniowego przyjęto, że jego wartość szczytowa nie może przekroczyć wartości znamionowej prądu transformatora. Wyniki symulacji, w których pierwsza i druga operacja łączeniowa zachodziła z różnymi odchyleniami Δt od czasów optymalnych (dodatnimi i ujemnymi), wykazały, że wymienione powyżej kryterium skuteczności ograniczania prądu jest spełnione dla $|\Delta t|$ nie przekraczającego 0,6 ms. Oznacza to, że dla osiągnięcia tak skutecznego ograniczenia prądu załączeniowego należy postawić bardzo wysokie wymagania dla łączników realizujących załączanie synchronizowane.

Metodzie załączania synchronizowanego – jej podstawom teoretycznym, koncepcjom realizacji i badaniom laboratoryjnym, jest poświęcony trzeci rozdział monografii [A1].

Określanie strumieni szczątkowych w kolumnach rdzenia

Do wyznaczenia momentów zamknięcia styków łącznika t_1 , t_2 , t_3 jest niezbędna znajomość strumieni szczątkowych, jakie występują w kolumnach rdzenia transformatora w chwili włączania go do sieci. Jest to kluczowa kwestia w metodzie załączania synchronizowanego. W opracowanych dotychczas przez różnych autorów realizacjach tej metody proponuje się rozwiązanie tego problemu dwoma sposobami:

- ukształtowanie pożądanego, przewidywalnego stanu namagnesowania rdzenia poprzez odpowiednio przeprowadzone wyłączenie transformatora, która to operacja poprzedza bezpośrednio planowane załączenie [C10],
- obliczenie strumieni szczątkowych poprzez całkowanie przebiegów napięć fazowych uzwojenia pierwotnego transformatora podczas wyłączania go z sieci, zachodzącego przed planowanym załączeniem [C8].

Pierwsza z wyżej wymienionych metod polega na otwieraniu łącznika w określonej sekwencji w poszczególnych fazach i z opóźnieniami następujących po sobie operacji łączeniowych dobranymi w taki sposób, aby uzyskać określony stan namagnesowania rdzenia. Następujące po tym włączenie transformatora odbywa się z zachowaniem stałych wartości czasów t_1 , t_2 , t_3 , gdyż spodziewany stan namagnesowania jest w założeniu zawsze taki sam. W drugiej metodzie napięcia fazowe uzwojenia pierwotnego transformatora są całkowane w stanie ustalonym przed wyłączeniem transformatora i podczas jego wyłączania, aż do ustalenia się zerowych wartości prądów fazowych w uzwojeniu. Strumienie szczątkowe są określone przez wartości końcowe tych obliczeń. Przy wykorzystaniu tego sposobu określania magnetyzmu szczątkowego, czasy t_1 , t_2 , t_3 muszą być obliczane przed włączeniem transformatora na podstawie obliczonych wartości strumieni szczątkowych w kolumnach. W obu przypadkach skuteczność ograniczania prądu załączeniowego zależy od odstępu czasu jaki dzieli operację załączenia i poprzedzającą operację wyłączenia transformatora. Jeśli okres dzielący te dwie operacje jest długi, może nastąpić w tym czasie zmiana namagnesowania rdzenia. Powodem tego mogą być np. prądy w uzwojeniach wyłączanego transformatora, które płyną przez kondensatory ograniczające przepięcia w wyłączniku. Biorąc to pod uwagę Autor zdecydował się na opracowanie metody określania stanu namagnesowania rdzenia bezpośrednio przed planowaną operacją włączenia transformatora. Ze względu na możliwości praktycznego zastosowania takiej metody, przyjęto założenie, że nie będzie ona wymagała ingerencji w wewnętrzną strukturę rdzenia, np. poprzez umieszczanie w jej wnętrzu czujników pomiarowych.

Za podstawę określania strumieni szczątkowych przyjęto wartości indukcji magnetycznej pola rozproszenia, jakie otacza rdzeń niezasilanego transformatora, mierzone za pomocą odpowiednio rozmieszczonych czujników pomiarowych. Opracowanie algorytmu obliczania strumieni szczątkowych poprzedzono szczegółową analizą pola magnetycznego występującego wokół rdzenia transformatora po jego wyłączeniu. Badania te przeprowadzono metodą symulacji komputerowej, a ich celem było wyjaśnienie następujących kwestii:

- I. Jaki jest rozkład pola magnetycznego wokół wyłączanego transformatora, wytworzonego przez magnetyzm szczątkowy rdzenia?
- II. W jakiej relacji pozostaje to pole w stosunku do pola magnetycznego Ziemi?
- III. Które punkty przestrzeni otaczającej transformator są najbardziej dogodnie do umieszczenia w nich czujników pomiarowych?

Obliczenia rozkładu pola magnetycznego przeprowadzono dla dwóch typów transformatora: suchego i olejowego. Wybór dwóch takich obiektów do analizy był uzasadniony spodziewanym ekranującym działaniem kadzi, którego efektem mógł być inny rozkład pola magnetycznego wokół rdzenia w obszarze wewnątrz kadzi i poza nią, w stosunku do transformatora bez kadzi. Obliczono następujące rozkłady pola magnetycznego:

- pola wytworzonego w nienamagnesowanym rdzeniu oraz wokół niego przez magnetyzm ziemski,
- pola rozproszenia wytworzonego przez namagnesowany rdzeń wyłączzonego transformatora przy pominięciu pola magnetycznego Ziemi,
- pola rozproszenia wytworzonego przez namagnesowany rdzeń wyłączzonego transformatora przy uwzględnieniu pola magnetycznego Ziemi.

Obliczenia zostały wykonane w oparciu o trójwymiarowy model utworzony w programie do obliczeń pola elektromagnetycznego Flux 3D. Rdzeń magnetyczny w modelu podzielono na odpowiednie części, dla których zdefiniowano, w zależności od umiejscowienia, charakterystykę magnesowania (I ćwiartka układu współrzędnych B-H) bądź odmagnesowania (II ćwiartka układu współrzędnych B-H). Dało to możliwość określania stanu namagnesowania poszczególnych kolumn rdzenia.

W pierwszym etapie badań symulacyjnych dotyczących transformatora suchego analizowano przypadek, w którym nienamagnesowany rdzeń został umieszczony w polu magnetycznym Ziemi. Obliczenia przeprowadzono przy założeniu, że pole ziemskie jest w rozpatrywanym obszarze przestrzeni jednorodny. Składowe wektora indukcji magnetycznej tego pola określono doświadczalnie. Przyjęto, że rdzeń ustawiono tak, aby kolumny były prostopadłe do powierzchni Ziemi. Układ współrzędnych xyz zorientowano w ten sposób, że oś z była równoległa do osi kolumn. Na podstawie wyników obliczeń stwierdzono, że rdzeń magnetyczny w istotny sposób zmienia rozkład pola magnetycznego w swoim otoczeniu w stosunku do rozkładu pola jednorodnego. Najważniejsze wnioski dotyczące wektora indukcji magnetycznej są następujące:

- Składowa B_z (pionowa) pola wytworzonego przez magnetyzm Ziemi przyjmuje wartości bliskie zera przy powierzchni rdzenia i zwiększa się (co do bezwzględnej wartości) przy oddalaniu się od niego, dążąc do wartości tej składowej w polu jednorodnym.
- Wartości składowych B_x i B_y zależą od orientacji rdzenia względem kierunków geograficznych.

Z powyższych obserwacji wynika, że wpływ pola ziemskiego na wynik pomiaru indukcji magnetycznej pola rozproszenia może być nieznaczący w odniesieniu do składowej B_z blisko powierzchni rdzenia.

Kolejny etap badań dotyczących transformatora suchego miał na celu analizę pola magnetycznego, jakie wytworzy wokół siebie namagnesowany rdzeń, znajdujący się w przestrzeni, w której pole magnetyczne Ziemi nie występuje. Przyjęcie takiego, jedynie teoretycznego, warunku miało na celu porównanie pól magnetycznych otaczających rdzeń transformatora, a wytworzonych z osobna przez magnetyzm ziemski oraz przez magnetyzm szczątkowy rdzenia. W symulacjach uwzględniono dwa stany namagnesowania rdzenia: namagnesowanie słabe i namagnesowanie silne. Namagnesowanie silnie było równoznaczne z namagnesowaniem maksymalnym, jakie wynika z kształtu pętli histerezy magnetycznej materiału rdzenia. Przy namagnesowaniu słabym stan magnetyzmu szczątkowego rdzenia osiągał ok. 10% namagnesowania maksymalnego.

Badania symulacyjne przeprowadzone w drugim etapie wykazały, że stopień namagnesowania rdzenia nie wpływa w sposób istotny na kształt rozkładu pola magnetycznego. Ze wzrostem namagnesowania rosną jedynie wartości indukcji magnetycznej w poszczególnych punktach całego obszaru. Porównanie rozkładów pola magnetycznego wytwarzanego przez magnetyzm szczątkowy rdzenia i magnetyzm ziemski wykazuje ich całkowicie inny kształt, zarówno wewnątrz rdzenia, jak i wokół niego. Pole pochodzące od namagnesowania szczątkowego ma w płaszczyźnie xy prostopadłej do osi kolumn, leżącej w połowie ich wysokości, praktycznie tylko jedną składową – równoległą do osi kolumn. Składowe wektora indukcji w osiach x i y są całkowicie pomijalne w stosunku do składowej w osi z . Biorąc pod uwagę wcześniejsze wnioski dotyczące rozkładu pola magnetycznego, którego źródłem jest magnetyzm ziemski, uznano, że czujniki pomiarowe należy umieszczać na wspomnianej powyżej płaszczyźnie. Daje to możliwość ograniczenia wpływu składowych pola magnetycznego Ziemi na pomiar.

Dalsze wnioski sformułowane na podstawie wyników uzyskanych w tym etapie badań są następujące:

- Wartości indukcji badanego pola magnetycznego, wytwarzanego przez magnetyzm szczątkowy rdzenia, są porównywalne z wartościami indukcji pola ziemskiego.
- Indukcja magnetyczna badanego pola szybko maleje do zera wraz ze wzrostem odległości od rdzenia. Wynika z tego, że pomiar powinien być dokonywany możliwie jak najbliżej niego.
- W punktach należących do rozważanej powyżej płaszczyzny xy , leżących naprzeciw kolumn, dominujące wartości przyjmuje składowa wektora indukcji w osi z .

Rezultaty drugiego etapu badań dały podstawę dla określenia położenia czujników pomiarowych. Ze względu na to, że celem pomiarów było wyznaczenie trzech wartości strumieni szczątkowych, zdecydowano się na rozmieszczenie w otoczeniu rdzenia trzech czujników pomiarowych. Punkty pomiarowe umiejscowiono wzdłuż osi leżących na przecięciu płaszczyzny symetrii rdzenia, prostopadłej do osi kolumn, z płaszczyznami symetrii kolumn. Z wymagania, aby odległość punktów pomiarowych od rdzenia była jak najmniejsza, wynikły dwie lokalizacje na wybranych osiach: na powierzchni rdzenia albo na powierzchni uzwojeń. Pierwsza z tych możliwości wymaga demontażu uzwojeń transformatora lub zamontowania czujników w trakcie montażu transformatora u wytwórcy. Wybór drugiej lokalizacji jest odpowiedni dla transformatorów już zmontowanych i eksploatowanych, gdyż demontaż uzwojeń nie jest konieczny.

W zaproponowanych punktach pomiarowych, spośród trzech składowych wektora indukcji magnetycznej, dominujące wartości przyjmuje składowa B_z - równoległa do osi kolumn. Przemawia to za wyborem tej składowej do określania magnetyzmu szczątkowego rdzenia. Dodatkowym uzasadnieniem tego wyboru jest stwierdzone w pierwszym etapie badań zmniejszanie się składowej w osi z wektora indukcji pola magnetycznego wytworzonego przez magnetyzm ziemski, przy zbliżaniu się do rdzenia. Ponadto za pomiarem składowej B_z przemawia jej niezależność od orientacji rdzenia względem kierunków geograficznych.

Trzeci etap badań symulacyjnych dotyczących transformatora suchego miał za zadanie wyjaśnić, w jaki sposób pole magnetyczne otaczające rdzeń wyłączonego transformatora jest kształtowane przez magnetyzm szczątkowy i magnetyzm ziemski łącznie. Obliczono rozkład pola magnetycznego wokół rdzenia dla słabego i silnego namagnesowania rdzenia przy uwzględnieniu magnetyzmu Ziemi. Na tej podstawie stwierdzono, że pole magnetyczne Ziemi w istotnym stopniu zmienia rozkład

indukcji magnetycznej wokół namagnesowanego rdzenia. Dalsza analiza wyników polegała na tym, że od wyznaczonych w tym etapie rozkładów pola odjęto pole magnetyczne otaczające rdzeń i wytworzone wyłącznie przez magnetyzm ziemski. Otrzymane w ten sposób rozkłady pól, pozbawione składnika pochodzącego od magnetyzmu Ziemi, porównano z rozkładami pól magnetycznych wytworzonych wyłącznie przez namagnesowanie szczątkowe rdzenia. Porównanie to wykazało znaczące różnice między tymi rozkładami, co oznacza, że wypadkowe pole magnetyczne nie jest superpozycją pól wytworzonych oddzielnie przez magnetyzm ziemski i magnetyzm szczątkowy. Wyklucza to możliwość dokonywania korekcji pomiarów pola magnetycznego w punktach pomiarowych poprzez odjęcie składnika pochodzącego od magnetyzmu Ziemi.

Powyższe trzy etapy badań symulacyjnych, przeprowadzone dla transformatora suchego, powtórzono dla transformatora olejowego. Model transformatora wykorzystywany w poprzednich symulacjach, uzupełniono o model prostopadłościennej kadzi. Wyniki kolejnych symulacji przeprowadzonych przy wykorzystaniu tego modelu pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

- Kadź transformatora w znaczący sposób ogranicza wnikanie ziemskiego pola magnetycznego do jej wnętrza. Pole magnetyczne występujące w kolumnach rdzenia jest o rząd wielkości mniejsze niż w przypadku rdzenia transformatora suchego. Indukcja magnetyczna pola w przestrzeni między rdzeniem a kadzią przyjmuje wartości rzędu dziesiątych części lub pojedynczych μT .
- Kadź również skutecznie zapobiega przenikaniu pola magnetycznego, wytwarzanego magnetyzmem szczątkowym rdzenia, do otaczającego ją środowiska. Rozkład tego pola wewnątrz kadzi jest zbliżony do rozkładu pola magnetycznego wokół rdzenia transformatora suchego, obliczonego przy pominięciu magnetyzmu Ziemi.
- Uwzględnienie w obliczeniach pola ziemskiego nie zmienia zasadniczo rozkładu pola wewnątrz kadzi. Pojawiające się w takim przypadku zmiany wartości indukcji magnetycznej na powierzchni rdzenia i na powierzchni uzwojeń są rzędu pojedynczych μT i nie zależą od stanu namagnesowania rdzenia.
- Ze względu na znikomy wpływ zakłócający pola magnetycznego Ziemi, wnętrze kadzi jest dogodną przestrzenią do umieszczenia czujników pomiarowych do pomiaru pola wytwarzanego przez magnetyzm szczątkowy rdzenia. Pomiar może być z zadowalającą dokładnością dokonywany przez czujniki umieszczone na powierzchni uzwojeń, co nie wymaga ingerencji w konstrukcję transformatora.

Ostatecznie, podsumowanie wyników opisanych powyżej badań symulacyjnych, wykonanych dla obu typów transformatora, jest następujące:

- I. Aby jak najlepiej wykorzystać własności rozkładu pola magnetycznego otaczającego rdzeń wyłączanego transformatora, czujniki pomiarowe należy umieścić jak najbliżej rdzenia, w połowie wysokości kolumn, w płaszczyznach symetrii pionowej kolumn i dokonywać pomiaru składowej wektora indukcji magnetycznej równoległej do osi kolumn.
- II. W transformatorze suchym najdogodniejszym miejscem pomiaru jest powierzchnia rdzenia. Za takim wyborem przemawia to, że wartość indukcji magnetycznej pola rozproszenia wytwarzanego przez magnetyzm szczątkowy rdzenia jest na tej powierzchni największa, natomiast składowa pionowa wektora indukcji

magnetycznej pola wytwarzanego przez magnetyzm ziemski jest na niej równa zeru. Rozwiązanie takie wymaga jednak ingerencji w konstrukcję transformatora. Czujniki muszą być zainstalowane na etapie montażu uzwojeń.

- III. W transformatorze olejowym, ze względu na ekranujące działanie kadzi na pole magnetyczne Ziemi, pomiar może być dokonywany w pewnej odległości od powierzchni rdzenia – np. na powierzchni uzwojeń. Dzięki temu montaż czujników pomiarowych nie jest skomplikowaną operacją i może być wykonany nawet w eksploatowanym transformatorze.

Kolejny etap badań symulacyjnych miał na celu zbadanie zależności między strumieniami szczątkowymi w kolumnach rdzenia a wartościami indukcji magnetycznej w punktach pomiarowych. Do obliczeń przyjęto założenie, że rozkład indukcji magnetycznej w przekroju poprzecznym kolumny rdzenia jest jednorodny. W takim przypadku do obliczenia strumienia w kolumnie wystarczyło określenie indukcji magnetycznej szczątkowej w jednym punkcie przekroju. Obliczenia wykonano dla 5 stanów namagnesowania rdzenia, w których indukcja magnetyczna szczątkowa w każdej kolumnie zmieniała się niezależnie od indukcji w pozostałych kolumnach. Obliczenia przeprowadzono przy uwzględnieniu pola magnetycznego Ziemi oraz przy jego braku. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że dla liniowych zmian stanu namagnesowania rdzenia zmiany indukcji rozproszenia w punktach pomiarowych zachodzą w przybliżeniu liniowo. Ponadto zauważono, że na stwierdzoną liniowość między stanem namagnesowania rdzenia i wartościami indukcji magnetycznej w punktach pomiarowych nie wpływa pole magnetyczne Ziemi. Magnetyzm ziemski powoduje jedynie to, że indukcje magnetyczne obliczone z jego uwzględnieniem i przy jego pominięciu różnią się o stałą wartość.

Na podstawie tych wniosków zaproponowano metodę obliczania indukcji szczątkowych w kolumnach rdzenia wykorzystującą wartości indukcji magnetycznej w punktach pomiarowych. Biorąc pod uwagę, wspomnianą w poprzednim akapicie, liniową zależność między rozważanymi wielkościami, przyjęto, że wartości indukcji magnetycznej w kolumnach rdzenia są liniową kombinacją wartości indukcji magnetycznej w punktach pomiarowych. Tę metodę przetestowano drogą symulacji komputerowej i na drodze badań laboratoryjnych.

W ramach badań symulacyjnych obliczono współczynniki kombinacji liniowych na podstawie założonych różnych stanów namagnesowania rdzenia i obliczonych dla nich wartości indukcji pola magnetycznego wokół rdzenia. Następnie w modelu symulacyjnym obliczono wartości indukcji magnetycznej w punktach pomiarowych dla innych rozkładów indukcji szczątkowych w kolumnach rdzenia, a otrzymane wyniki wykorzystano do obliczenia indukcji szczątkowych w kolumnach rdzenia jako kombinacji liniowych wartości indukcji magnetycznej w punktach pomiarowych. Porównanie indukcji szczątkowych obliczonych w ten sposób z założonymi do obliczeń symulacyjnych wykazało dobrą zgodność między nimi dla dużych wartości indukcji szczątkowych – błąd jest poniżej 10%. Przy zmniejszaniu namagnesowania rdzenia błąd tej metody wzrasta do kilkudziesięciu procent, jednak jeżeli weźmie się pod uwagę, że wartości szczytowe prądu załączeniowego transformatora dla małych strumieni szczątkowych są wyraźnie mniejsze, mniejsza dokładność w wyznaczeniu indukcji szczątkowych nie odgrywa istotnej roli.

Weryfikacja laboratoryjna przedstawionej metody polegała na wykonaniu pomiarów indukcji magnetycznej w punktach na powierzchni uzwojeń transformatora suchego. Przed pomiarem rdzeń transformatora był namagnesowany prądem stałym płynącym w jednym z uzwojeń. Stan

namagnesowania określano na podstawie kształtu pętli histerezy magnetycznej określonej dla strumienia magnetycznego w każdej kolumnie. Pomiary wykonano dla kilku wartości prądu magnesującego, dla których zostały zmierzone charakterystyki magnesowania kolumn. W celu wyeliminowania wpływu pola magnetycznego Ziemi obliczono różnice wyników pomiarów pola wykonanych dla rdzenia namagnesowanego i roznamagnesowanego. Wykorzystując wyniki pomiarów dla wybranych losowo wartości prądu magnesującego obliczono współczynniki kombinacji liniowych wiążących indukcje magnetyczne w punktach pomiarowych z indukcjami szczytkowymi w kolumnach rdzenia. Za pomocą tych współczynników obliczono indukcje szczytkowe dla indukcji zmierzonych w punktach pomiarowych. Otrzymano wartości pozostające w bardzo dobrej zgodności z wartościami rzeczywistymi indukcji magnetycznej w rdzeniu. Uzyskano zatem na drodze doświadczalnej i symulacyjnej potwierdzenie poprawności zaproponowanej metody określania strumieni szczytkowych.

Badania dotyczące właściwości pola magnetycznego otaczającego wyłączony transformator – jego zależności od stanu namagnesowania rdzenia, wpływu pola magnetycznego Ziemi, oddziaływania kadzi olejowej i metod określania strumieni szczytkowych w kolumnach posłużyły do opracowania piątego rozdziału monografii [A1] oraz publikacji [B7].

Autorskie algorytmy metody załączania synchronizowanego

Autor zaproponował dwie koncepcje realizacji metody załączania synchronizowanego transformatora, dające możliwość ograniczenia prądów załączeniowych do wartości porównywalnych z prądem stanu jałowego. Opracowanym algorytmom nadano nazwy:

- I. Załączanie synchronizowane przy namagnesowaniu naturalnym.
- II. Załączanie synchronizowane przy namagnesowaniu wymuszonym.

W obu rozwiązaniach podstawowym warunkiem jest zamykanie styków łącznika w momentach określonych dla każdej fazy obwodu przez odpowiednie zależności analityczne lub na bieżąco obliczanych w układzie sterującym. Nowością w tych algorytmach jest to, że chwile zamknięcia styków łącznika są we wszystkich fazach uzależnione od strumieni szczytkowych w kolumnach rdzenia transformatora a także od bieżących wartości strumieni magnetycznych, jakie powstają w rdzeniu po pojawieniu się prądów załączeniowych. Takiego podejścia nie zastosowano w dotychczas opracowanych realizacjach załączania synchronizowanego [C8, C9, C10], w których magnetyzm szczytkowy determinuje moment załączenia tylko pierwszej fazy, a pozostałe załącza się ze stałym opóźnieniem, wynoszącym kilka okresów zmienności napięcia sieci zasilającej. Algorytmy Autora dają możliwość skutecznego ograniczenia prądów załączeniowych.

W algorytmie nr I (spośród wyżej wymienionych) styki łącznika w poszczególnych fazach są zamykane według z góry określonej sekwencji, zależnej od układu połączeń uzwojenia pierwotnego transformatora, w momentach obliczanych na podstawie aktualnego stanu namagnesowania rdzenia. Podczas realizacji załączania synchronizowanego według tego algorytmu wykonywane są kolejno następujące operacje:

- Określenie strumieni szczytkowych w kolumnach transformatora. W tym zadaniu można wykorzystać opisaną wcześniej w tej pracy metodę wykorzystującą pomiary indukcji magnetycznej pola otaczającego wyłączony transformator.
- Obliczenie momentów zamknięcia styków łącznika. Do tego celu można wykorzystać opracowane przez Autora formuły matematyczne lub przeprowadzić rozwiązanie

numeryczne odpowiednich równań nieliniowych. Pierwszy sposób daje wartości przybliżone, gdyż wykorzystywane formuły uzyskano przy niezbędnych założeniach upraszczających. Z tego powodu należy się liczyć z mniej skutecznym ograniczeniem prądów załączeniowych w tym przypadku. Drugi sposób wyznaczania momentów zamknięcia daje wartości dokładniejsze, lecz wymaga więcej czasu na przeprowadzenie tej operacji. Jednak przy zastosowaniu odpowiednio szybkiego procesora nie sprawia to większych komplikacji. W obu przypadkach jest zatem konieczne zastosowanie w układzie odpowiedniego członu wykonującego operacje arytmetyczne i logiczne.

- Wygenerowanie sygnałów sterujących stykami łącznika, tak aby została zrealizowana zadana sekwencja zamykania z zachowaniem opóźnień w kolejnych fazach obwodu, wynikających z obliczonych momentów zamknięcia.

Opracowano model symulacyjny układu realizującego ten algorytm. Przeprowadzone przy jego wykorzystaniu testy wykazały, że operacja załączania synchronizowanego przebiega poprawnie, w rezultacie czego prądy załączeniowe zostają ograniczone do wartości porównywalnych z prądem stanu jałowego transformatora.

Konieczność określania momentów zamknięcia styków łącznika przed każdym załączaniem napięcia wynika z tego, że stan namagnesowania rdzenia przed każdą taką operacją może się ustalić w inny sposób. Wprowadzenie procedury obliczającej momenty załączenia znacznie zwiększa złożoność całego algorytmu. Z tego względu Autor zaproponował uproszczenie tej metody w taki sposób, aby załączanie odbywało się za każdym razem przy takim samym namagnesowaniu rdzenia. Zamykanie styków łącznika może w tym przypadku odbywać się zawsze według niezmiennego harmonogramu. Osiąganie założonego stanu namagnesowania w sposób powtarzalny jest stosunkowo łatwe w procesie rozmagnesowania rdzenia, który ma na celu sprowadzenie wszystkich strumieni szczątkowych do zera. Na tym założeniu oparto algorytm załączania synchronizowanego przy namagnesowaniu wymuszonym, w którym zasadniczą rolę pełni operacja demagnetyzacji rdzenia transformatora.

W trakcie realizacji załączania synchronizowanego według algorytmu nr II wykonywane są kolejno następujące operacje:

- Demagnetyzacja rdzenia. Do tego celu jest przeznaczony specjalny układ rozmagnesowujący, zaproponowany przez Autora.
- Wygenerowanie sygnałów sterujących stykami łącznika, tak aby została zrealizowana odpowiednia sekwencja zamykania z zachowaniem ustalonych opóźnień w kolejnych fazach obwodu.
- Opcjonalnie, między operacją pierwszą i drugą może być przeprowadzona kontrola stanu zerowego namagnesowania rdzenia za pomocą czujników pomiarowych rozmieszczonych tak, jak w opisanej wcześniej metodzie określania strumieni szczątkowych w kolumnach rdzenia. W przypadku, gdy rozmagnesowanie nie okazałoby się dostatecznie skuteczne, proces demagnetyzacji może zostać powtórzony.

Demagnetyzacja jest przeprowadzana w transformatorze wyłączonym, bezpośrednio przed zamierzonym włączeniem zasilania. Ta modyfikacja pozwala uprościć i przyspieszyć działanie algorytmu sterującego pracą łącznika, natomiast rozbudowuje układ elektryczny w stopniu zależnym od przyjętej metody demagnetyzacji. Dodatkową zaletą tej metody jest to, że samo usunięcie namagnesowania rdzenia sprzyja obniżeniu wartości szczytowych prądów załączeniowych.

Opracowanym przez Autora algorytmom metody załączania synchronizowanego poświęcono część rozdziału trzeciego monografii [A1]. Oprócz tego wyniki prac przedstawiono w publikacji [B1].

Demagnetyzacja rdzenia transformatora

Autor zaproponował metodę demagnetyzacji rdzenia transformatora, w której rozmagnesowanie odbywa się za pomocą wzbudzonego w nim przemiennego pola magnetycznego o malejącej do zera amplitudzie. Na wstępie zostało przyjęte, że realizacja tej metody powinna spełnić następujące warunki:

- do przemagnesowywania rdzenia są wykorzystywane uzwojenia robocze transformatora,
- sposób wykorzystania uzwojeń transformatora nie wymaga zmiany ich połączeń,
- przemienne pole magnetyczne w rdzeniu jest wytwarzane przez prąd swobodnie oscylujący w obwodzie RLC,
- układ demagnetyzacyjny ma możliwie najprostszą budowę.

Zasadniczym argumentem przemawiającym za przyjęciem takich założeń były niskie koszty realizacji i eksploatacji tego układu.

Rozważono różne możliwości wykorzystania uzwojeń poszczególnych kolumn, przy połączeniu uzwojenia w gwiazdę z dostępnym lub niedostępnym punktem neutralnym oraz przy połączeniu w trójkąt. Brano pod uwagę wykorzystanie jednego, dwóch lub trzech uzwojeń fazowych. Badania symulacyjne wykazały, że poszczególne układy różnią się wypadkową indukcyjnością oraz sposobem rozptyłu strumieni magnetycznych w rdzeniu. Stwierdzono, że najbardziej korzystne są układy zapewniające symetrię rozptyłu strumieni rozmagnesowujących względem kolumny środkowej. Wynika to z faktu, że taki jest najczęściej spotykany układ strumieni szczątkowych, zatem demagnetyzacja przy symetrycznym rozptywie strumieni jest najbardziej skuteczna.

Zaproponowano i przeanalizowano działanie trzech układów demagnetyzacyjnych, różniących się sposobem magazynowania energii wykorzystywanej następnie w procesie rozmagnesowania. Przewidziano w nich następujące możliwości gromadzenia energii:

- w pojemności, którą stanowi kondensator pracujący w obwodzie drgającym – układ demagnetyzacyjny I,
- w wypadkowej indukcyjności uzwojenia transformatora – układ demagnetyzacyjny II,
- w obu powyższych elementach łącznie – układ demagnetyzacyjny III.

Poszczególne układy demagnetyzacyjne różnią się złożonością układu sterowania (jeden lub dwa łączniki), uzależnieniem przebiegów prądu i strumienia magnetycznego od stanu namagnesowania szczątkowego rdzenia, ilością gromadzonej energii i skutecznością rozmagnesowania. Na drodze symulacyjnej przeanalizowano sposób doboru najważniejszych parametrów układu, do których należą:

- częstotliwość prądu rozmagnesowującego,
- pojemność kondensatora w obwodzie RLC,
- wartość początkowa napięcia na pojemności obwodu,
- oraz wartość początkowa prądu w indukcyjności obwodu.

Przyjęto, że górną granicą dla częstotliwości oscylacji w układzie jest wartość częstotliwości sieciowej (50 Hz), gdyż przy wyższych częstotliwościach proces demagnetyzacyjny może być mniej skuteczny,

ze względu na silniejsze oddziaływanie powstających w rdzeniu prądów wirowych. Badania laboratoryjne wykazały, że demagnetyzacja przy częstotliwościach prądu mieszczących się w zakresie od pojedynczych Hz do 50 Hz jest jednakowo skuteczna dla każdej częstotliwości, pod warunkiem zapewnienia tej samej ilości energii pola elektromagnetycznego zgromadzonej w układzie. Na podstawie pomiarów laboratoryjnych stwierdzono ponadto, że zgromadzenie tej samej ilości energii do demagnetyzacji w układzie I (w pojemności obwodu RLC) i w układzie II (w indukcyjności obwodu RLC) zapewnia taką samą skuteczność demagnetyzacji w obu układach. Oznacza to, że ilość energii niezbędnej do przeprowadzenia poprawnej demagnetyzacji jest odpowiednią podstawą doboru wartości początkowych napięcia i prądu w obwodzie RLC.

W oparciu o rozważania teoretyczne i badania eksperymentalne stwierdzono, że miarą minimum energii potrzebnej do rozmagnesowania rdzenia jest wartość prądu w indukcyjności obwodu RLC w punkcie nasycenia na charakterystyce strumienia $\Psi(i)$ określonej dla uzwojenia jednej fazy transformatora (lub układu uzwojeń kilku faz) wykorzystywanego w układzie demagnetyzacyjnym.

Zaproponowane metody demagnetyzacji rdzenia transformatora zbadano na stanowisku laboratoryjnym. Eksperyment polegał na magniesowaniu rdzenia transformatora przez zasilanie jego uzwojeń prądem stałym, a następnie rozmagnesowaniu przez układ demagnetyzacyjny. Stan namagnesowania rdzenia określona na podstawie pomiarów indukcji pola magnetycznego w wybranych punktach wokół rdzenia. Wyniki tych pomiarów porównywano z wartościami indukcji magnetycznej tych punktach, zmierzonymi dla rdzenia nienamagnesowanego. Uzyskano takie same wartości pomiarów przed namagnesowaniem i po demagnetyzacji, co potwierdziło skuteczność opracowanych układów demagnetyzacyjnych.

Opracowane metody i układy do demagnetyzacji rdzenia przedstawiono szczegółowo w rozdziale czwartym monografii [A1]. Tej tematyki dotyczy również publikacja [B2].

Podsumowanie rezultatów zgłoszonego osiągnięcia naukowego

Następujące rezultaty osiągnięcia naukowego należy wymienić jako najważniejsze:

- Wykonanie analizy czynników kształtujących prąd załączeniowy transformatora. Analiza została wykonana w celu powiązania kąta fazowego załączenia napięcia zasilającego i stanu namagnesowania rdzenia transformatora z wartością szczytową prądu załączeniowego. Analiza wykazała, że dla każdego z rozważanych stanów namagnesowania rdzenia istnieje taki kąt włączenia napięcia, przy którym wartości szczytowe prądów we wszystkich fazach są najmniejsze i nie przekraczają prądu znamionowego transformatora. Wykorzystanie tej własności daje możliwość ograniczenia wartości prądów załączeniowych. Tak szczegółowa analiza teoretyczna kształtowania się prądu załączeniowego transformatora, zwłaszcza w odniesieniu do transformatora trójfazowego, nie występuje w powszechnie dostępnej literaturze.
- Wykonanie analizy czynników kształtujących magnetyzm szczątkowy w rdzeniu transformatora. Przeprowadzone badania wyjaśniły, jakie są możliwe stany namagnesowania kolumn rdzenia, powstającego w wyniku wyłączenia transformatora z sieci, oraz jaki wpływ mają na to: kąt wyłączenia napięcia zasilającego, zjawiska komutacyjne w wyłączniku, niejednoczesność pracy zestyków wyłącznika, stopień obciążenia transformatora. W powszechnie dostępnej literaturze Autor nie spotkał się z podobnym ujęciem tego zagadnienia.

- Wykonanie analizy załączania synchronizowanego transformatora. Wykazano, że dla każdego z rozważanych układów połączeń uzwojenia pierwotnego transformatora istnieje możliwość takiego sterowania poszczególnymi fazami wyłącznika, aby prąd załączeniowy był porównywalny z prądem stanu jałowego transformatora. Chwile załączenia napięć w poszczególnych fazach są wyznaczone przez momenty zrównania się strumieni magnetycznych oczekiwanych w stanie ustalonym z aktualnymi strumieniami magnetycznymi w odpowiednich kolumnach rdzenia. Autorzy innych opracowań, dotyczących załączania synchronizowanego, najczęściej rozważają jeden układ połączeń uzwojenia transformatora, nie precyzując, czy opracowany algorytm załączania synchronizowanego sprawdza się w innych przypadkach. Nie podają także, jaka jest, w praktycznych realizacjach, relacja prądu załączeniowego do charakterystycznych parametrów transformatora, takich jak prąd znamionowy czy prąd stanu jałowego przy zastosowaniu ich metody załączania synchronizowanego.
- Opracowanie modelu matematycznego do określania optymalnych chwil zamykania styków łącznika przy załączeniu synchronizowanym. W oparciu o ten model wyznaczono formuły matematyczne dla każdego z trzech układów połączeń uzwojenia pierwotnego transformatora: w gwiazdę z przewodem neutralnym, w gwiazdę bez przewodu neutralnego oraz w trójkąt. Uwzględniono w nich zależność optymalnych chwil zamknięcia styków od wartości strumieni szczytkowych w kolumnach rdzenia transformatora. Formuły te podają przybliżone wartości czasów załączania ze względu na konieczne uproszczenia modelu. Popętniany błąd maleje wraz ze wzrostem mocy transformatora. Jako alternatywę o większej dokładności zaproponowano obliczanie momentów załączenia poprzez numeryczne rozwiązywanie odpowiednich równań nieliniowych. Obie metody przetestowano w symulacjach komputerowych i uzyskano potwierdzenie ich poprawności i skuteczności. W dostępnej literaturze nie występują kompletne, analityczne formuły do wyznaczania czasów załączania poszczególnych faz łącznika dla poszczególnych układów połączeń uzwojenia pierwotnego transformatora.
- Opracowanie dwóch koncepcji realizacji metody załączania synchronizowanego. Zaproponowane algorytmy ograniczają prąd załączeniowy transformatora do wartości porównywalnych z prądem stanu jałowego. Algorytm nr I opiera się na wykorzystaniu opracowanych przez Autora formuł określających momenty załączenia poszczególnych faz na podstawie zidentyfikowanego wcześniej rozkładu strumieni szczytkowych w kolumnach rdzenia. W przedstawionych przez innych autorów koncepcjach załączania synchronizowanego chwila zamknięcia styków łącznika jest uzależniona od aktualnej wartości strumienia magnetycznego w rdzeniu tylko w przypadku pierwszej fazy. Pozostałe fazy są załączane z arbitralnie określonym opóźnieniem. Może to powodować zmniejszenie skuteczności ograniczania prądu załączeniowego. W algorytmie nr II sekwencja załączania jest stała, dostosowana do zerowego stanu namagnesowania rdzenia, uzyskiwanego na drodze jego demagnetyzacji. Koncepcja demagnetyzacji rdzenia transformatora, jako składnika metody załączania synchronizowanego, nie była do tej pory w literaturze rozważana.
- Opracowanie metody i układu do demagnetyzacji rdzenia transformatora. Zbudowano model symulacyjny oraz model laboratoryjny zaproponowanego układu do demagnetyzacyjnego. Badania przeprowadzone przy wykorzystaniu tych modeli wykazały, że za pomocą opracowanego układu można skutecznie zmniejszyć

namagnesowanie szczątkowe rdzenia do wartości bliskich zeru. Przeanalizowano również sposób doboru parametrów układu demagnetyzacyjnego i ich wpływ na skuteczność demagnetyzacji.

Przeprowadzone badania zostały sfinansowane ze środków przyznanych Autorowi w ramach projektu badawczego habilitacyjnego nr N N510 537039 zatytułowanego: „Badanie wpływu procesów łączeniowych oraz właściwości transformatora energetycznego na ograniczanie prądów załączeniowych w stanie jałowym”, realizowanego w okresie 27.10.2010 – 26.10.2012.

Oprócz monografii [A1] i artykułów wymienionych w punkcie 4B Autoreferatu, badania dotyczące prądów załączeniowych transformatora stanowiły tematykę 20 artykułów zgłoszonych na międzynarodowe konferencje naukowe.

Możliwość aplikacji uzyskanych rezultatów osiągnięcia naukowego

Jednym z zasadniczych celów badań przedstawionych w monografii [A1] i artykułach wymienionych w punkcie 4B było opracowanie układu realizującego załączanie synchronizowane transformatora, który będzie ograniczał prąd załączeniowy w stopniu nie osiąganym przez dotychczas stosowane układy. Przeprowadzona analiza teoretyczna wykazała, że przy zastosowaniu załączania synchronizowanego jest możliwe załączenie transformatora w taki sposób, aby prądy załączeniowe przyjmowały przebiegi prądów stanu jałowego w stanie ustalonym. Jest to największe ograniczenie prądów załączeniowych, jakie można uzyskać tą metodą. W praktycznej realizacji tej metody osiągnięcie takiego efektu wymagałoby bardzo precyzyjnego spełnienia wszystkich niezbędnych warunków (np. dokładnego wyznaczenia stanu namagnesowania szczątkowego rdzenia, dokładnego obliczenia chwil załączenia faz łącznika, załączenia poszczególnych faz dokładnie w wyznaczonych chwilach), co byłoby trudne do osiągnięcia. Również względy ekonomiczne i związane z niezawodnością zasilania w energię elektryczną nie przemawiają za dążeniem do aż tak znacznego ograniczenia prądu załączeniowego. Przewidywane przez Autora realne ograniczenie wartości szczytowej tego prądu, osiąganego przy zastosowaniu tej metody, może być poniżej $0,5I_n \div I_n$. Jednak i w tym przypadku należy się liczyć z trudnością spełnienia przez stosowane obecnie aparaty wszystkich wymagań czasowych (niezależne załączanie poszczególnych faz w ściśle określonych chwilach, z bardzo niewielką tolerancją czasu działania – nie więcej niż 1 ms). Pełne wdrożenie metody załączania synchronizowanego w energetyce zawodowej z wykorzystaniem opracowanych przez Autora algorytmów jest możliwe po dokonaniu się znaczącego postępu w konstrukcji i parametrach elektroenergetycznych łączników hybrydowych lub półprzewodnikowych. Biorąc to pod uwagę, przeprowadzone badania należy taktować jako możliwe do realizacji w przyszłości. Realizacja praktyczna metody jest możliwa w warunkach laboratoryjnych dla transformatora małej mocy (kilka kVA), co ma nastąpić w ramach kontynuacji prac badawczych Autora. Układem, który może zostać najszybciej zrealizowany jest przedstawiony w monografii [A1] układ załączania synchronizowanego z demagnetyzacją rdzenia transformatora, gdyż nie występuje w nim potrzeba określania strumieni szczątkowych w kolumnach rdzenia.

Obecnie wyniki przeprowadzonych przez Autora prac można częściowo wykorzystać do ograniczania prądu załączeniowego transformatora poprzez demagnetyzację rdzenia. Jak wykazano w monografii [A1], przy załączaniu transformatora, którego rdzeń nie uległ trwałemu namagnesowaniu, wartość szczytowa prądu załączeniowego nie osiąga tak wielkich wartości, jak w przypadku rdzenia, w którym

występuje magnetyzm szczątkowy. Można zatem zaproponować zastosowanie do obniżenia wartości szczytowych prądów załączeniowych opracowanych przez Autora układów demagnesujących rdzeń bez załączania synchronizowanego.

Zaproponowana przez Autora metoda określania strumieni szczątkowych w rdzeniu transformatora na podstawie pomiarów indukcji magnetycznej pola otaczającego rdzeń wymaga przeprowadzenia dalszych badań, zwłaszcza eksperymentalnych. Ma to być przedmiotem dalszej działalności naukowej Autora.

Wybrane ważniejsze pozycje literatury światowej na temat załączania transformatorów

- C1. Blume L. F., Camilli G., Farnham S. B., Peterson H. A.: *Transformer Magnetizing Inrush Currents and influence on system operation*, AIEE Trans. Power. App. Syst., Vol 70, Jan. 1951, pp.323-327.
- C2. Brunke J. H., Frohlich K. J.: *Elimination of transformer Inrush Currents by Controlled Switching – Part I: Theoretical Considerations, Part II: Application and Performance Considerations*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 16, No.2, January 2001, pp. 276-285.
- C3. Cheng C. –K., Liang T.–J., Chen J. –F., Chen S.-D., Yang W. –H.: *Novel approach to reducing the inrush current of a power transformer*, IEE Proc. Electr. Power Appl., Vol 151, No.3, May 2004, pp. 289-295
- C4. Cheng C. L., Lin C. E., Hou K. C., Hsia Y. F.: *Effective Suppression Method of Three-Phase Transformer's Inrush Current*, Proceedings of IEEE TENCON'02, 0-7803-7490-8/02, 2002, pp. 2030-2033
- C5. Cipcigan L., Xu W., Dinavahi V.: *A New Technique to Mitigate Inrush Current Caused by Transformer Energization*, IEEE 0-7803-7519-X/02, 2002, pp. 570-574
- C6. Finzi L. A., Mutschler W. H.: *The Inrush of Magnetizing Current in Single-Phase Transformers*. AIEE Transactions vol. 50, 1951.
- C7. Holm A., Alvinsson R., Ukesson U., Karlen O.: *Development of controlled switching of reactors, capacitors and lines*, CIGRE, 1990 Session Paper 13_201_1990.pdf, dostępny: <http://www.cigre.org> (dostęp 4.01.2016).
- C8. Mercier A., Salibi A., Filion Y., Portales E.: *Transformer controlled switching taking into account the core residual flux - A real case study*, CIGRE, 2002 Session Paper 13_201_2002.pdf, dostępny: <http://www.cigre.org> (dostęp 4.01.2016).
- C9. Portales E., Mercier A.: *Controlled Switching of Unloaded Power Transformers*, CIGRE Electra, No. 212, February 2004, pp. 38-44.
- C10. Prikler L., Banfai G., Ban G., Becker P.: *Reducing the magnetizing inrush current by means of controlled energization and de-energization of large power transformers*, International Conference of Power System Transients, IPST 2003, 28 September – 2 October, New Orleans, USA, dostępny: <http://www.ipstconf.org> (dostęp 20.10.2017).
- C11. Spetch T. R.: *Transformer Magnetizing Inrush Current*, AIEE Trans. Power. App. Syst., Vol 63, Jan. 1944, pp.366-375.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych.

Oprócz prowadzenia samodzielnie prac badawczych opisanych powyżej, Autor uczestniczył również w badaniach zespołowych. Tematyka tych prac dotyczyła następujących zagadnień:

1. Analiza pracy wyłączników różnicowo-prądowych przy prądach odkształconych.
2. Zastosowanie systemów resztowych (RNS) w cyfrowym przetwarzaniu sygnałów.

Prace prowadzone przez Autora w ramach tematu I dotyczyły badań symulacyjnych działania wyłączników różnicowo-prądowych w przypadkach, w których przebieg prądu różnicowego w istotny sposób odbiega od sinusoidy o częstotliwości podstawowej. Analiza miała na celu wyjaśnienie, jaki wpływ na funkcjonowanie wyłącznika mają następujące czynniki:

- własności magnetyczne rdzenia przekładnika prądowego, a w szczególności kształt pętli histerezy w charakterystyce magnesowania,
- zwiększona częstotliwość prądu różnicowego,
- prąd różnicowy o dużej zawartości wyższych harmonicznym.

Wyniki badań wykazały, że czułość wyłącznika różnicowo-prądowego typu AC dla prądów jednokierunkowych zależy od kształtu pętli histerezy i w istotnym stopniu maleje, jeżeli kształt pętli bardziej zbliża się do prostokątnego.

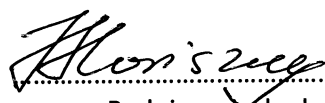
Zakres symulacji obejmował m. in. analizę wpływu kształtu prądu w uzwojeniu pierwotnym transformatora prądowego na pracę wyłącznika różnicowo-prądowego. Prowadzono badania symulacyjne układu wyzwalań wyłącznika różnicowo-prądowego dla wymuszenia sinusoidalnego i sinusoidalnego wyprostowanego o częstotliwości sieciowej. Analizowano również wpływ zwiększonej częstotliwości prądu różnicowego ponad częstotliwość sieciową aż do 1000 Hz. Badaniom podlegała czułość wyłącznika, jak również jakość funkcjonowania układu dopasowania mocowego. W symulacjach brano pod uwagę charakterystyki magnesowania o różnym kształcie pętli histerezy. Dalsza analiza dotyczyła prądów różnicowych odkształconych na skutek pracy łączników energoelektronicznych stosowanych w instalacjach mieszkaniowych lub podobnych. Badano zależność progu wyzwalań wyłącznika różnicowo-prądowego od kąta wysterowania łącznika energoelektronicznego. Przy analizie uzyskanych wyników symulacyjnych brano pod uwagę badań laboratoryjnych wyłączników różnicowo-prądowych. Sformułowano wnioski dotyczące poziomu bezpieczeństwa przeciwporażeniowego, jakie może być zapewnione w takich warunkach. Badania prowadzono również w kierunku wypracowania wskazań będących podstawą do zaprojektowania układu wyzwalań wyłącznika różnicowoprądowego poprawnie działającego w szerokim zakresie częstotliwości prądu różnicowego. Na podstawie wykonanych przy udziale Autora badań przygotowano niżej wymienione publikacje.

1. Stanisław Czapp, Jacek Horiszny: *The effect of current delay angle on tripping of residual current devices*, 2017 International Conference on Information and Digital Technologies (IDT), 5-7 July 2017, Zilina, Slovakia, IEEE Explore Digital Library <https://ieeexplore.ieee.org/document/8024277>
2. Stanisław Czapp, Jacek Horiszny: *Simulation of residual current devices operation under high frequency residual current*, Przegląd Elektrotechniczny, 2012, vol 88, issue 2, pp. 242-247.

3. Stanisław Czapp, Jacek Horiszny: *Badania symulacyjne układu wyzwalania wyłącznika różnicowoprądowego w warunkach zwiększonej częstotliwości prądu różnicowego*, XV Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Aktualne Problemy w Elektroenergetyce” APE’11, 8-10.06.2011, Politechnika Gdańska, Jurata, Polska
4. Stanisław Czapp, Jacek Horiszny: *Numerical Analysis of Magnetic Core Properties Influence on Residual Current Device Behaviour*, XXXII Międzynarodowa Konferencja z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów, IC-SPETO 2009, 20-23.05.2009, Politechnika Śląska, Gliwice-Ustroń, Polska

W ramach tematu II Autor uczestniczył w pracach badawczych dotyczących algorytmów i układów do szybkiego cyfrowego przetwarzania sygnałów. W dosyć szerokim spectrum tych badań Autor skupił się na zastosowaniu tej techniki do identyfikacji prądów udarowych transformatora. Jednym ze sposobów eliminacji zakłócającego oddziaływania prądów załączeniowych transformatora na aparaturę zabezpieczającą jest blokowanie wyzwalaczy nadprądowych w momencie włączania transformatora do sieci. Niezbędne w tym rozwiązaniu jest rozróżnianie prądów załączeniowych i prądów zwarciovych, przy których blokowanie wyzwalaczy nie powinno zachodzić. Temu służyły opracowane algorytmy krótkookresowej analizy widmowej prądu załączeniowego i prądu zwarciovego transformatora w czasie rzeczywistym z zastosowaniem procesora FFT zrealizowanego w FPGA. Za główny cel prowadzonych prac postawiono stworzenie algorytmu i kryteriów identyfikacji umożliwiających rozpoznanie prądu załączeniowego w czasie 1 ± 2 okresów napięcia sieci. Rezultaty prac przedstawiono w niżej wymienionych publikacjach.

1. Maciej Czyżak, Jacek Horiszny, Robert Smyk: *Pipelined Two-Operand Modular Adders*, Radioengineering, vol. 24, no. 1, April 2015, pp. 148 – 160, 20 pkt. MNiSW lista A, JCR IF=0,59
2. Jacek Horiszny, Maciej Czyżak, Robert Smyk: *Analiza widmowa w czasie rzeczywistym prądów udarowych transformatora z zastosowaniem procesora FFT w technologii FPGA*, Wiadomości Elektrotechniczne, 2012, nr 12, s. 59-63. 5 pkt. MNiSW lista B.
3. Jacek Horiszny, Maciej Czyżak, Robert Smyk: *Inrush and short circuit current identification based on real-time spectral analysis with the use of the FPGA FFT processor*, Konferencja „Modelowanie, Symulacja i Zastosowania w Technice”, 18-22 Czerwca 2012, Kościelisko, Polska.



 Podpis wnioskodawcy