

BUDOWA MODELU SYMULACYJNEGO REGULATORA PRZEŁĄCZNIKÓW ZACZEPÓW TRANSFORMATORA WN/SN

Jarosław KORPIKIEWICZ¹, Mostefa MOHAMED-SEGHIR²

1. Instytut Energetyki Instytut Badawczy Oddział Gdańsk, Zakład Strategii i Rozwoju Systemu
tel.: 58 349-82-11 e-mail: j.korpikiewicz@ien.gda.pl
2. Akademia Morska w Gdyni, Wydział Elektryczny, Katedra Automatyki Okrętowej
tel.: 58 558-62-05 e-mail: m.mohamed-seghir@we.am.gdynia.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono założenia, algorytm pracy oraz model elektromechanicznego regulatora podobciążeniowych przełączników zaczepów transformatora pracującego w trybie regulacji dolnego napięcia. Następnie model przetestowano symulacyjnie uzyskując charakterystyki czasowych. W dalszych etapach prac planowana jest walidacja eksperymentalna po implementacji modelu regulatora na wybranej platformie sprzętowej. Model ten ma służyć do badania wpływu algorytmu pracy regulatora na jakość regulacji napięcia.

Słowa kluczowe: podobciążeniowy przełącznik zaczepów (PPZ), model symulacyjny regulatora przełącznika zaczepów, regulacja napięcia w sieci SN.

1. WSTĘP

1.1. Koncepcja modelu symulacyjnego

Problem regulacji napięcia w sieciach elektroenergetycznych opisywany jest w wielu publikacjach m.in. [1]. Celem tego artykułu jest utworzenie i test modelu symulacyjnego regulatora przełączników zaczepów transformatora WN/SN zainstalowanego w Głównym Punkcie Zasilającym (GPZ). Model ten został opracowany w uniwersalnym środowisku Matlab/Simulink. Model ten ma służyć do badania wpływu algorytmu regulatora przełącznika zaczepów (RPZ) na jakość regulacji napięcia. Regulator tego typu pracuje w trybie regulacji dolnego napięcia. Transformatory dużej mocy (blokowe, sprzęgające, redukcyjne) wyposażone w urządzenia do zmiany przekładni pod obciążeniem nazywa się transformatorami regulacyjnymi [2, s. 136],[3, s. 415]. Transformator regulacyjny 110 kV /SN zasilany jest napięciem o zmiennej w czasie wartości skutecznej. Ponadto w stacjach SN/nn (średniego napięcia/niskie napięcie) zasilanych z rozważanego GPZ zapotrzebowanie na moc czynną i bierną zmienia się w czasie. Charakterystyki napięciowe w tych stacjach również ulegają zmianom, zależnie od składu aktualnie aktywnych odbiorników energii elektrycznej, stopnia ich obciążenia. Przedstawione czynniki mają wpływ na jakość regulacji napięcia w sieci SN oraz nn. Z tych powodów opracowany model jest elementem całego układu regulacji napięcia. Pozostałymi elementami będą zastępczy model systemu elektroenergetycznego (SEE) - układ Thevenina o zmiennej wartości skutecznej napięcia w czasie zależnym od rozprywu mocy czynnych i biernych w sieci zamkniętej WN(wysokiego napięcia) i NN (najwyższych napięć). Kolejnym elementem układu będą model

transformatora regulacyjnego WN/SN wraz z podobciążeniowym przełącznikiem zaczepów (PPZ). Ostatnim elementem jest model sieci elektroenergetycznej SN wraz z zastępczymi odbiorami (zmiennie w czasie obciążenia – moce czynne i bierne w stacjach SN/nn).

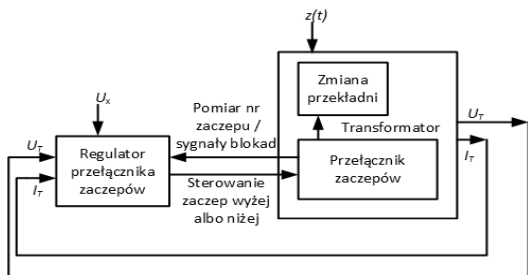
Istnieje tool-box do Simulinka umożliwiający symulację elementów sieci elektroenergetycznej Simscape Power System [4]. Jednak model regulatora przełącznika zaczepów posiada charakterystykę niezależną od uchybu napięcia – patrz (1) (tj. tryb stałego opóźnienia). Model RPZ jest zintegrowany z modelem transformatora regulacyjnego. Modyfikacja istniejących komponentów tego przybornika jest znacznie utrudniona. Fakt ten utrudnia syntezę regulatora nowego typu z wykorzystaniem tego przybornika.

W elektroenergetyce coraz częściej stosowane są urządzenia energoelektroniczne. Z tego względu zbadano wpływ zastosowania energoelektronicznego przełącznika zaczepów z regulatorem realizującym klasyczny algorytm [5], [6]. Wykazano znaczący wpływ typu PPZ na jakość regulacji napięcia.

W wielu publikacjach używa się uproszczonego modelu regulatora, transformatora regulacyjnego lub przełącznika zaczepów m.in. [4],[7]. Jednak w celu zbadania jakości regulacji napięcia wymagane jest odwzorowanie nieliniowości, właściwości dynamicznych wszystkich elementów układu regulacji. Opis matematyczny regulatora zawarty jest w [8]. Jednak nie zaprezentowano modelu symulacyjnego.

1.2. Układ regulacji dolnego napięcia za pomocą transformatora WN/SN

Wielkością sterowaną jest napięcie transformatora WN/SN po stronie dolnego napięcia U_T . Sygnałami sterującymi są sygnał binarny „zaczep wyżej” i sygnał binarny „zaczep niżej”. Pomiar prądu służy do ochrony przełącznika zaczepów przed operacjami łączeniowymi przy przeciążeniu, co może skrócić jego żywotność. Na układ regulacji działają zakłócenia m.in. zmiany zapotrzebowania mocy czynnej i biernej, zmiana konfiguracji sieci, zmiana wartości skutecznej napięcia zasilającego transformator. Elektromechaniczne przełączniki zaczepów ze względu na trwałość mają ograniczoną liczbę operacji łączeniowych. Układ regulacji napięcia zaprezentowano na rysunku 1.



Rys. 1. Układ sterowania napięcia dolnego za pomocą przełącznika zaczepów transformatora

Gdzie: U_x – wartość zadana napięcia; U_T i I_T – napięcie oraz prąd po wybranej stronie transformatora; $z(t)$ – zakłócenia układu regulacji.

1.3. Wymagania stawiane modelowi symulacyjnemu

Opracowany model symulacyjny ma spełniać następujące wymagania:

- Uniwersalność. Dzięki zastosowaniu klasycznego modelu Simulink możliwa jest modyfikacja, rozbudowa lub zmiana algorytmu sterowania.
- Podsystemy modelu powinny odpowiadać podziałowi na rzeczywiste urządzenia tj. osobny model regulatora, osobny model transformatora WN/SN i osobny model przełącznika zaczepów. Umożliwia to zbadanie wpływu algorytmu sterowania wybranego urządzenia na pracę całego układu.
- Sygnały wejściowe i wyjściowe odpowiadają rzeczywistym sygnałom wejściowym lub wyjściowym regulatora URT lub nastawom istotnym dla algorytmu sterowania.
- Zrezygnowano z implementacji algorytmów regulacji dla wersji z kilkoma transformatorami.
- Założono, że dostępny jest sygnał o bieżącym numerze zaczełu pochodzący z przetwornika numeru zaczełu np. [9],[10].

1.4. Algorytm działania klasycznego regulatora przełącznika zaczepów

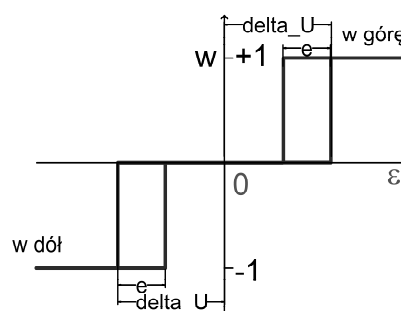
Opis regulacji przełącznikami zaczepów w stacjach elektroenergetycznych opisano m.in. w monografii [2]. Szczegółowy algorytm sterowania zawarto w dokumentacji technicznej regulatora przełącznika zaczepów opracowanego w Instytucie Energetyki [11]. W opracowanym modelu zrezygnowano z implementacji kompensacji prądowej, ponieważ w praktyce jest ona wyłączana. Jest to spowodowane trudnym doбором impedancji kompensacji [12],[13]. Problem ten wymaga kolejnych badań, co wpłynie na układ pomiarowy regulatora i ostateczną postać modelu. W modelu zastosowano charakterystykę opóźnienia zmiany zaczełu zależną od uchybu, ponieważ taki tryb pracy regulatora jest wybierany najczęściej. W trybie tym przy większych uchybach regulator po krótszym czasie zmienia zaczeł (patrz rys. 6).

RPZ posiada elementy regulacji przekładnikowej. Jest to spowodowane tym, że sygnał sterujący jest dyskretny (zaczeł w dół, praca na bieżącym zaczele, zaczeł w górę) a zmiana zaczełu zmienia napięcie dolne w sposób skokowy. Człon pomiarowy regulatora po wyznaczeniu uchybu napięcia (patrz zależność 1) wykorzystuje statyczną charakterystykę przekładnikową z martwą strefą $= 2 * \text{delta_U}$ i histerezą e (patrz rys. 2). Sygnał

wyjściowy przekładnika w ma znaczenie opisane w tabeli 1. Histereza e zapobiega cyklicznym zmianom stanu w , gdy uchyb zmienia się w pobliżu któregoś progu martwej strefy. Jeżeli

Tablica 1. Sygnał wyjściowy przekładnika trójpołożeniowego w

w	Znaczenie	Opis działania
+ 1	Uchyb powyżej górnego progu martwej strefy	Odmierzanie czasu do zmiany zaczełu „w górę” tj. w celu zwiększenia dolnego napięcia
0	Uchyb w zakresie martwej strefy	Praca na aktualnym zaczele.
- 1	Uchyb poniżej dolnego progu martwej strefy	Odmierzanie czasu do zmiany zaczełu „w dół” tj. w celu zmniejszenia dolnego napięcia



Rys. 2. Przekładnik trójpołożeniowy

$$\varepsilon = U_x - U_T \quad (1)$$

gdzie: U_x – wartość zadana napięcia po stronie SN, U_T – wartość skuteczna napięcia mierzona po stronie SN, ε – uchyb napięcia.

Jeśli sygnał $w \neq 0$ (patrz tabela 1) tj. napięcie mierzone znajduje się poza martwą strefą nastąpi zmiana zaczełu w górę lub w dół zależnie od znaku uchybu (sygnału w) po upływie określonego opóźnienia. Zapobiega to zmianom zaczełów spowodowanych chwilowymi zmianami napięcia. Całkowita liczba operacji łączeniowych ograniczona jest trwałością PPZ. Opóźnienie to zliczane jest w dół od wartości początkowej do zera. Jeśli sygnał w zmieni wartość na 0, naliczony czas opóźnienia „cofa się” – zlicza w górę do wartości początkowej. Odmierzanie czasu opóźnienia zależnego od uchybu napięcia nazywane jest kryterium całkowym[2]. Kryterium to opisano w postaci dyskretnej: (2)

$$A_1(t+1) = \begin{cases} A_1(0) = \text{pocz} \\ A_1(t) - |\varepsilon(t)|, w(t) = 1, A_1(t) \geq |\varepsilon(t)| \\ 0, w(t) = 1, A_1(t) > 0, A_1(t) < |\varepsilon(t)| \\ A_1(t) + \text{stala}, w(t) = 0, A_1(t) \leq \text{pocz} - \text{stala} \end{cases} \quad (2)$$

$$A_2(t+1) = \begin{cases} A_2(0) = \text{pocz} \\ A_2(t) - |\varepsilon(t)|, w(t) = -1, A_2(t) \geq |\varepsilon(t)| \\ 0, w(t) = -1, A_2(t) > 0, A_2(t) < |\varepsilon(t)| \\ A_2(t) + \text{stala}, w(t) = 0, A_2(t) \leq \text{pocz} - \text{stala} \end{cases} \quad (3)$$

gdzie: pocz – wartość początkowa integratorów, A_1 – wartość odmierzonej całki uchybu dodatniego, A_2 – wartość odmierzonej

całki uchybu ujemnego, *stala* -Stała odpowiadająca za szybkość odliczania w kierunku wartości *pocz* .

Kolejnym blokiem są blokady, które uniemożliwiają zmianę zaczezu z powodu m.in. uzyskania skrajnego zaczezu w danym kierunku, przeciążenia przełącznika zaczezów, obniżenie się napięcia poniżej ustawienia blokady podnapięciowej lub podwyższenie się napięcia powyżej ustawienia blokady nadnapięciowej. Blokady uwzględniają kierunek zmian zaczezu, oprócz przeciążeniowej i podnapięciowej (patrz tabela 2). Blokada podnapięciowa jest realizowana w obu kierunkach ze względu na ryzyko utraty stabilności napięciowej.

Tablica 2. Lista blokad regulatora [8]

Nazwa blokady	Rodzaj blokady
Nadnapięciowa U>	Zmiana zaczezu w kierunku zwiększenia dolnego napięcia
Podnapięciowa U<	Zmiany zaczezu w obu kierunkach
Przeciążeniowa S>	Zmiany zaczezu w obu kierunkach
Od skrajnego górnego położenia zaczezu Z>	Podwyższenie numeru zaczezu
Od skrajnego dolnego położenia zaczezu Z<	Obniżenie numeru zaczezu

Po spełnieniu kryterium całkowego i jeśli system blokad na to zezwala regulator włącza przekaźnik „sterowanie przełącznikiem wyżej”, gdy $w = 1$ albo przekaźnik „sterowanie przełącznikiem niżej”, gdy $w = -1$. Regulator wyłącza przekaźnik, gdy [8]:

- sygnał aktualnego numeru zaczezu zmieni wartość w porównaniu do wartości odczytanej w chwili włączenia przekaźnika,
- przekroczony został maksymalny czas na dokonanie zmiany zaczezu.

2. MODEL SYMULACYJNY REGULATORA PRZEŁĄCZNIKÓW ZACZEZÓW

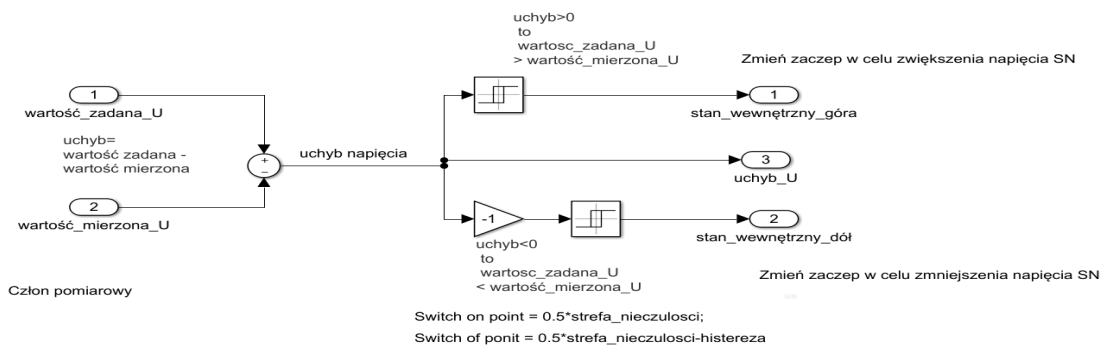
W tabeli 3 przedstawiono parametry regulatora przełącznika zaczezów, które determinują jego pracę. W modelu pominięto kontrolę poprawności wprowadzanych przez użytkownika nastaw. Nie modelowano też komunikacji za pomocą łącza cyfrowego, ponieważ są to

funkcjonalności nie wpływające na pracę regulatora w trybie sterowania dolnego napięcia.

Tablica 3. Parametry regulatora przełącznika zaczezów

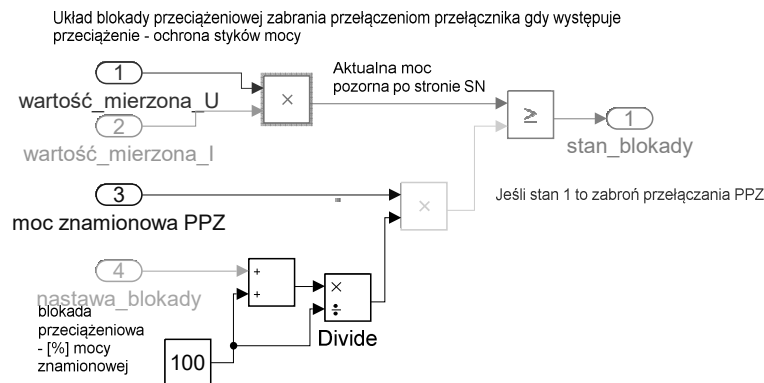
Symbol	Opis	Wartość	JM
<i>delta_U</i>	Połowa szerokości martwej strefy (patrz rys. 2).	350	V
<i>e</i>	Histereza (patrz rys. 2).	20	V
<i>Sn</i>	Moc znamionowa transformatora	26	MVA
<i>Blok_S></i>	Nastawa blokady przeciążeniowej	50	% Sn
<i>Liczba_Z</i>	Liczba zaczezów	27	-
<i>Un</i>	Napięcie znamionowe	15 000	V
<i>Ux</i>	Wartość zadana napięcia	15 500	V
<i>Blokada_U<</i>	Poziom aktywacji blokady podnapięciowej	80	% Un
<i>Blokada_U></i>	Poziom aktywacji blokady nadnapięciowej	120	% Un
	Typ regulacji. Określa czy czas opóźnienia zmiany zaczezu zależy od uchybu napięcia.	Zależny od uchybu napięcia	-
	Kierunek sterowania przełącznikiem zaczezów tj. Z+, U+ albo Z-,U+.	Z+U-	-
<i>stala</i>	Stała odpowiadająca za szybkość odliczania w kierunku wartości <i>pocz</i>	20	-
<i>pocz</i>	Wartość początkowa od której dobywa się odmierzenie czasu opóźnienia	105 000	Vs
<i>wart_gran_U</i>	Wartość graniczna dodatniego uchybu, powyżej której następuje zmiana zaczezu bez opóźnienia	3500	V

Pierwszy elementem regulatora jest człon pomiarowy przedstawiony na rysunku 3. Regulator posiada dwa wyjścia binarne odpowiadające „zaczezu w górę” oraz „zaczezu w dół”. Z tego powodu z jednego wyjścia trójstanowego utworzono dwa wyjścia binarne.



Przekaźnik trójpołożeniowy z dwoma wyjściami binarnymi

Rys. 3. Człon pomiarowy regulatora



Rys. 4. Blokada przeciążeniowa regulatora

Na rysunku 4 przedstawiono blok blokady przeciążeniowej uniemożliwiającej przełączenie zacze- pu w trakcie przeciążenia chroniąc elementy stykowe przed uszkodzeniem.

Na rysunku 5 zaprezentowano zbudowany schemat symulacyjny klasycznego regulatora PPZ. Jest on zbudowany z wielu podsystemów. Sygnałami wejściowymi modelu są: wartość zadana napięcia, wartość mierzona napięcia SN, wartość mierzona prądu transformatora, sygnał aktualnego numeru zacze- pu przełącznika, sygnał resetu awarii przełącznika zacze- pów. Sygnałami wyjściowymi modelu są: binarny sygnał sterujący „zwiększ numer zacze- pu”, binarny sygnał sterujący „zmniejsz numer zacze- pu”, awaria przełącznika zacze- pów, sygnały blokad – przeciążeniowej, podnapięciowej, nadnapięciowej, blokady zwiększenia numeru zacze- pu, blokady zmniejszenia numeru zacze- pu. Człon pomiarowy wyznacza uchyb napięcia oraz dokonuje jego oceny czy mieści się w obszarze martwej strefy. Zależnie czy uchyb przekracza górną lub dolną granicę aktywowane jest odpowiednie wyjście. Układ zwłoki czasowej zależnej realizuje opóźnienie zależne od wartości uchybu. Zbudowany jest on na integratorach. Układ blokad nad i pod napięciowych, blokada przeciążeniowa, blokada od skrajnych zacze- pów oraz układ blokad wynikowych blokują zmianę zacze- pu w sytuacji, gdy jest to niepożądane. Blok szybkiej redukcji wysokiego napięcia służy do realizacji bezzwłocznej zmiany zacze- pu w celu obniżenia napięcia jeśli jego wartość jest zbyt wysoka. Tak wysokie napięcie grozi awariami (uszkodzenie urządzeń, przebicie izolacji). Układ wyjściowy służy uwzględnienia kierunku sterowania, sygnałów zmniejsz napięcie, zwiększ napięcie, funkcji szybkiej redukcji wysokiego napięcia i wysterowania przekaźników wyjściowych regulatora. Układ diagnostyczny służy do detekcji i sygnalizacji przełącznika zacze- pów.

3. SYMULACJA MODELU – BADANIA CHARAKETRYSTYK CZASOWYCH

Metoda ta polega na przeprowadzeniu szeregu symulacji przy stałej wartości numeru zacze- pu zmieniając krokowo wartość uchybu napięcia. Wielkością wyjściową jest czas zmiany zacze- pu. Uzyskana charakterystyka (rys. 6) potwierdza poprawność realizacji charakterystyki zależnej – czym większy uchyb napięcia tym krótszy czas zmiany zacze- pów.



Rys. 6. Charakterystyka czasowa regulatora przełącznika zacze- pów w zależności od uchybu napięcia

5. WNIOSKI KOŃCOWE

Regulatory elektromechanicznych przełączników zaczepów są regulatorami wolnodziałającymi, krok po kroku (sekwencyjna zmiana zaczepów), nieciągłymi, nieliniowymi ze zmiennym opóźnieniem. Zespół blokad regulatora stanowi logiczny układ kombinacyjny. Cechy te wynikają z dyskretnego sygnału wyjściowego oraz właściwości eksploatacyjnych przełącznika zaczepów (ograniczona liczba i częstotliwość łączeń). Matematyczna analiza układu regulacji wymaga użycia zaawansowanych technik analizy dynamicznych układów nieliniowych. Zbudowanie modelu symulacyjnego uwzględniającego nieliniowości oraz właściwości dynamiczne umożliwia realizację badań układu regulacji dolnego napięcia transformatora. W modelu regulatora zidentyfikowano czternaście parametrów. Wymagane jest opracowanie modelu elektromechanicznego przełącznika zaczepów, transformatora WN/SN oraz sieci elektroenergetycznej. Modele te powinny uwzględniać zjawiska przejściowe aby wyznaczyć wpływ zjawisk komutacji zaczepów na jakość regulacji napięcia. Powszechnie stosuje się uproszczone modele statyczne, które są niewystarczające do realizacji tych badań.

Utworzony model symulacyjny pomimo założeń upraszczających (praca z jednym transformatorem, nie modelowano walidacji wprowadzanych nastaw, nie modelowano zjawisk komunikacji regulatora z urządzeniami nadrzędnymi) jest wielopoziomowym złożonym obiektem (18 elementów i podsystemów). Wymagana jest identyfikacja tych parametrów. Pełna prezentacja modelu nie jest możliwa w ramach jednej publikacji.

Testowano poszczególne podsystemy (bloki) generując zestawy danych wejściowych oraz analizując sygnały wynikowe (nie przedstawiono w publikacji). Utworzony cały model sprawdzono na podstawie uzyskanych na podstawie badań symulacyjnych charakterystyk czasowych. Wyniki symulacji potwierdzają poprawność działania modelu regulatora. Model posłużył do ułatwienia implementacji regulatora na mikrokontrolerze STM32 serii Nucleo.

Pełna analiza pracy układu regulacji dolnego napięcia możliwa jest dopiero po opracowaniu pozostałych modeli składowych i symulacji całego układu regulacji.

5. BIBLIOGRAFIA

1. A. Kot i W. L. Szpyra, „Optymalna regulacja napięcia w sieciach rozdzielczych średniego napięcia”, *Acta Energetica*, nr 2/2009, s. 89–105, 2009.

2. J. Machowski, *Regulacja i stabilność systemu elektroenergetycznego*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2007.
3. E. Jezierski i Z. Hasterman, *Transformatory*, 2. wyd. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1983.
4. Matworks, Hydro-Quebec, *Simscape Power Systems. User's guide (specialized technology)*. .
5. J. Korpikiewicz i P. Mysiak, „Classical and solid-state tap-changers of HV/MV regulating transformers and their regulators”, *Acta Energetica*, nr 32/2017, s. 110–117, 2017.
6. J. Korpikiewicz, „Dodatkowe możliwości regulacji energoelektronicznych przełączników zaczepów w transformatorach WN/SN”, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, t. 53/2017, s. 125–128, 2017.
7. B. Brusilowicz i J. Szafran, „Voltage stability estimation based on approximate model and voltage measurement”, *IEEE: 2015 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, 2015.
8. C. Joon-Ho i M. Seung-Il, „The dead band control of LTC transformer at distribution substation”, *IEEE Transactions on Power Systems*, t. 24, nr 1, s. 319–326, 2009.
9. „Nadajnik przetwornika numeru zaczepu transformatora typ PMD8. Karta informacyjna.” Instytut Energetyki Oddział Gdańsk, paź-2011.
10. „Przetwornik numeru zaczepu transformatora typ PNZT – 2L. Karta informacyjna.” Instytut Energetyki Oddział Gdańsk, paź-2011.
11. D. Kołodziej i J. Jemielity, „Układ regulacji transformatorowej typu URT. Dokumentacja techniczno-ruchowa.” Instytut Energetyki Oddział Gdańsk, 2012.
12. Ł. Czapla i J. Jemielity, „Opracowanie koncepcji i założeń technicznych do realizacji systemu zarządzania napięciem i mocą bierną obszaru sieci inteligentnej (SMART GRID). Praca statutowa Instytutu Energetyki Instytutu Badawczego Oddział Gdańsk”. Instytut Energetyki Oddział Gdańsk, 2010.
13. Ł. Czapla i T. Ogryczak, „System zarządzania napięciem i mocą bierną obszaru sieci inteligentnej (SMART GRID)”, *Elektro.Info*, nr 7–8, 2012.

DESIGN OF SIMULATION MODEL OF THE REGULATOR TAP CHANGERS FOR HV/MV TRANSFORMER

The article presents the created and tested model of the electromechanical tap changer. The transformer is treated as an executive element of the medium voltage control system. As the assumption, model does not take into account parallel work of transformers due to the fact that this is a very rare case. The current compensation was canceled due to the difficulty of determining the compensation impedance. For this reason, this function is deactivated in the controllers. The model assumes, according to the documentation of one of the regulators, that the characteristic is dependent on the value of the voltage error.

This model is to be used to study the influence of the tap changer controller algorithm on the quality of voltage regulation. The algorithm of the classic tap changer controller has been analyzed. Important parameters of the model have been defined. The structure of the created model in Matlab-Simulink and some component blocks are presented. One of the conducted tests was shown - time characteristic $t = f(\epsilon)$ of switching output relay according to changes of value of the voltage deviation.

Keywords: OLTC, simulation model of the tap changer controller, voltage regulation in the MV network.