

doi:10.15199/48.2018.10.09

Wpływ odkształcenia napięcia na przebiegi ziemnozwarciowe

Streszczenie. W artykule przedstawiono sposób modelowania odkształceń napięcia na szynach GPZ oraz sposób modelowania zwarć doziemnych. Zbadano wpływ odkształcenia napięcia na wartość szczytową oraz wartość ustaloną przepięć.

Abstract. The paper presents modeling of voltage distortions on 110/15 kV busbar and modeling of an earth faults. Impact of voltage distortions on transient peak voltage and voltage in stable overvoltage is investigated. (Impact of voltage distortions on overvoltage during phase to ground fault).

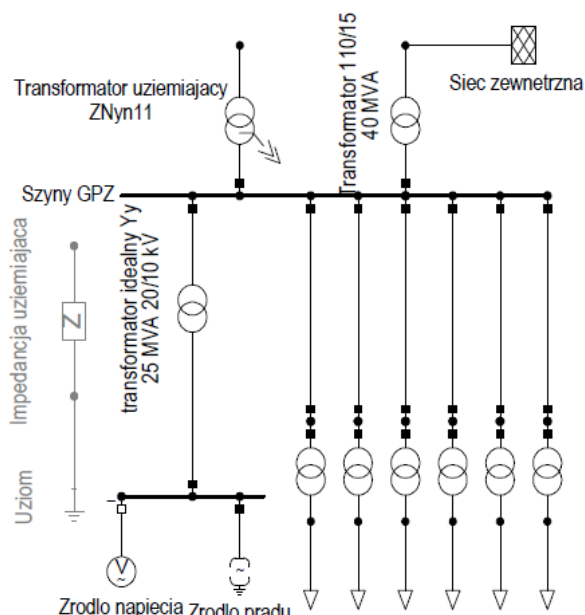
Słowa kluczowe: przebiegi ziemnozwarciowe, harmoniczne, odkształcenia, punkt neutralny

Keywords: phase to ground fault overvoltage, harmonics, distortion, neutral point

Wstęp

Odształcenie napięcia i prądu niesie za sobą szereg negatywnych skutków, do których zalicza się m. in. wzrost strat i związany z nim wzrost temperatury. Wzrost temperatury zależy od odkształcenia prądu oraz parametrów linii i urządzeń [1]. Jednym z najpopularniejszych wskaźników określających stopień odkształcenia przebiegu są wskaźniki THDi oraz THDu [2]. Innym popularnym wskaźnikiem jest factor-K, wykorzystywany do oceny skutków odkształcenia przebiegów w transformatorach [3]. Ponadto literatura poświęca dużą uwagę wpływowi odkształcenia na ryzyko wystąpienia zjawiska rezonansu. Zjawisko rezonansu można analizować w wielu różnych programach komputerowych np. PSCAD, ATP oraz Power Factory. W celu analizy zjawiska rezonansu konieczne jest stworzenie dokładnych modeli, które uwzględnią charakterystyki częstotliwościowe dla parametrów kolejności zgodnej, przeciwnej i zerowej. Identyfikacja zagrożeń związanych z rezonansem polega na odczytaniu częstotliwości, dla których charakterystyka osiąga ekstrema [4]. Dodatkowym problemem wynikającym z odkształcenia napięcia jest zniekształcenie prądu I_0 podczas zwarcia, co skutkuje między innymi zmniejszeniem skuteczności działania kompensacji ziemnozwarciowej [5], [6].

Niniejszy artykuł ma na celu przedstawienie wpływu odkształcenia napięcia na przebiegi ziemnozwarciowe.



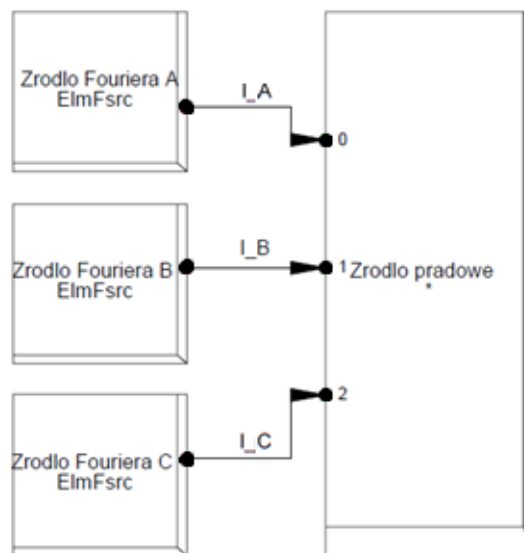
Rys.1. Schemat analizowanej sieci

Analizowana sieć

Analizie poddano typową sieć średniego napięcia złożoną z transformatora 110/15 kV, transformatora uzmięającego ZNyn11 wraz z impedancją uzmięającą, linii elektroenergetycznych o sumarycznym prądzie pojemnościowym wynoszącym 100 A, źródła prądowego, źródła napięciowego oraz idealnego transformatora. Schemat zamodelowanej sieci został przedstawiony na rysunku 1.

Źródła prądowe i napięciowe są wykorzystywane w celu modelowania odkształcenia napięcia, a idealny transformator wykorzystano do odseparowania bezpośredniego uzmięnienia źródła prądowego od sieci średniego napięcia.

Do zamodelowania linii wykorzystano model Martiego [7]. Źródłem prądowym steruje element model – composite model, który łączy poszczególne modele – źródła Furiera [8], [9]. Układ połączeń został przedstawiony na rysunku 2.

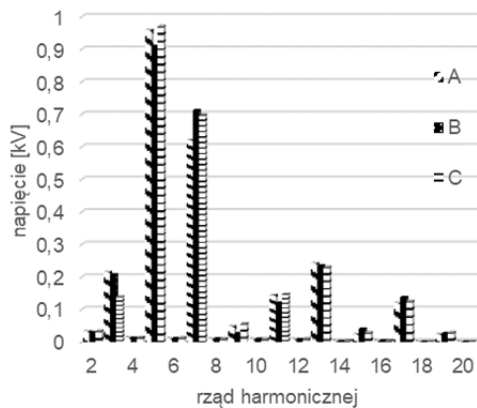


Rys.2. Układ sterowania źródłem prądowym

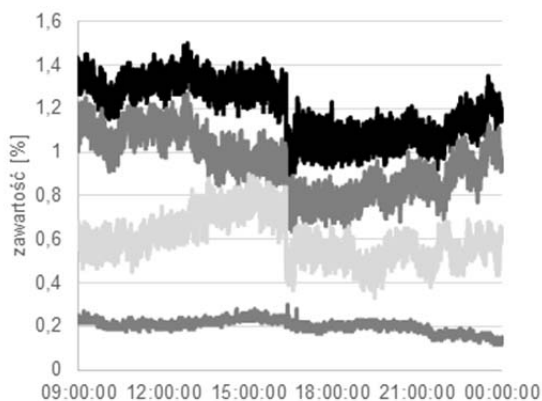
Pomiary odkształcenia napięcia

W celu określenia zawartości harmonicznych w napięciu na szynach stacji 110/15 kV wykonano pomiary w kilku stacjach elektroenergetycznych. Podczas wykonywania pomiarów amplitudy harmonicznych napięcia były stosunkowo stabilne, co zostało przedstawione na rysunku 4. Kąty przesunięcia poszczególnych harmonicznych zmieniały się w szerszym zakresie.

Po wykonaniu analizy wybrano typowe amplitudy i najczęściej występujące kąty przesunięć, które wykorzystano do wykonania obliczeń. Histogram napięć fazowych zarejestrowanych przez miernik Fluke 435 przedstawiono na rysunku 3 [10]. Ze względu na pomijalną zawartość harmonicznych wyższych rzędów histogram przedstawia jedynie pierwsze 20 harmonicznych. Największą amplitudę miały harmoniczne: 3, 5, 7, 11, 13 i 17.



Rys.3. Histogram napięcia w analizowanej sieci (do 20-tej harmonicznej); od lewej faza A, faza B i faza C



Rys.4. Zawartość harmonicznych oraz THD napięcia; od góry THD, 5h, 7h oraz 3h

Procedura modelowania

W procesie modelowania wykorzystano 2 moduły programu PowerFactory 2017 SP7 – moduł Harmonic Load Flow (rozpływy harmonicznych) oraz moduł RMS/EMT (przebiegi w funkcji czasu). Moduł Harmonic Load Flow jest wykorzystany w celu obliczenia wartości prądów płynących ze źródła napięciowego. Źródło zamodelowano jako źródło typu ideal RC-source i zdefiniowano amplitudę oraz kąt składowych symetrycznych poszczególnych harmonicznych napięcia. Do konwersji wielkości fazowych napięcia zarejestrowanych przez analizator wykorzystywane są wzory: (1) i (2) dla składowej kolejności zgodnej, (3) i (4) dla składowej przeciwnej, a dla składowej zerowej wzory (5) i (6). Sposoby obliczania składowych symetrycznych zostały przedstawione w [11] oraz [12]. Po zdefiniowaniu parametrów konieczne jest przeprowadzenie obliczeń rozplywu harmonicznych – Unbalanced Harmonic Load Flow, w wyniku których obliczane są amplitudy prądów i kątów przesunięcia dla poszczególnych harmonicznych.

Po wykonaniu obliczeń należy wyłączyć źródło napięcia, a wyniki obliczeń należy wykorzystać do zdefiniowania zawartości harmonicznych źródła prądu typu phase correct,

sterowanego przez model przedstawiony na rysunku 2, co pozwala na analizę przebiegów odkształconych w symulacjach typu EMT.

$$(1) \quad U_{1\%} = \sqrt{\frac{(U_a \cdot \cos \varphi_a + U_b \cdot \cos(\varphi_b + 120) + U_c \cdot \cos(\varphi_c - 120))^2 + (U_a \cdot \sin \varphi_a + U_b \cdot \sin(\varphi_b + 120) + U_c \cdot \sin(\varphi_c - 120))^2}{3}}$$

$$(2) \quad \varphi_1 = a \tan \frac{U_a \cdot \sin \varphi_a + U_b \cdot \sin(\varphi_b + 120) + U_c \cdot \sin(\varphi_c - 120)}{U_a \cdot \cos \varphi_a + U_b \cdot \cos(\varphi_b + 120) + U_c \cdot \cos(\varphi_c - 120)}$$

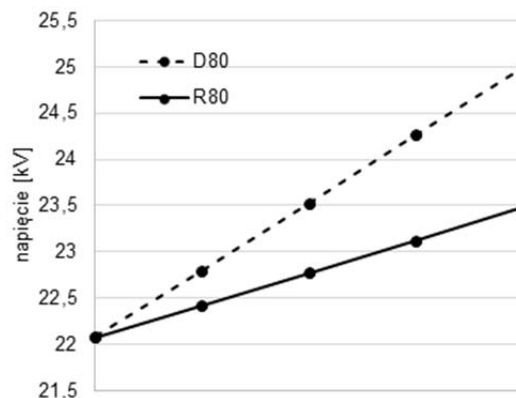
$$(3) \quad U_{2\%} = \sqrt{\frac{(U_a \cdot \cos \varphi_a + U_b \cdot \cos(\varphi_b - 120) + U_c \cdot \cos(\varphi_c + 120))^2 + (U_a \cdot \sin \varphi_a + U_b \cdot \sin(\varphi_b - 120) + U_c \cdot \sin(\varphi_c + 120))^2}{3}}$$

$$(4) \quad \varphi_2 = a \tan \frac{U_a \cdot \sin \varphi_a + U_b \cdot \sin(\varphi_b - 120) + U_c \cdot \sin(\varphi_c + 120)}{U_a \cdot \cos \varphi_a + U_b \cdot \cos(\varphi_b - 120) + U_c \cdot \cos(\varphi_c + 120)}$$

$$(5) \quad U_{0\%} = \sqrt{\frac{(U_a \cdot \cos \varphi_a + U_b \cdot \cos \varphi_b + U_c \cdot \cos \varphi_c)^2 + (U_a \cdot \sin \varphi_a + U_b \cdot \sin \varphi_b + U_c \cdot \sin \varphi_c)^2}{3}}$$

$$(6) \quad \varphi_0 = a \tan \frac{U_a \cdot \sin \varphi_a + U_b \cdot \sin \varphi_b + U_c \cdot \sin \varphi_c}{U_a \cdot \cos \varphi_a + U_b \cdot \cos \varphi_b + U_c \cdot \cos \varphi_c}$$

Przebiegi ziemnozwarciowe w analizowanej sieci

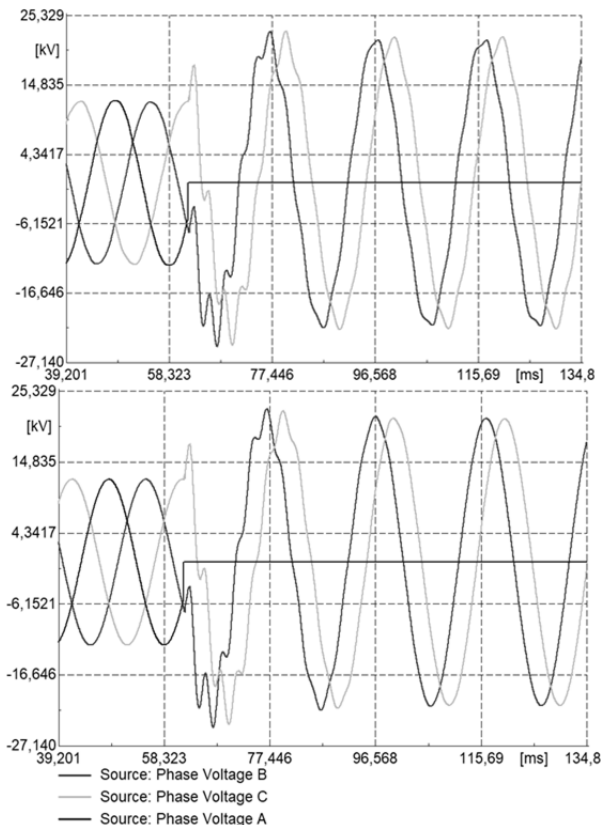


Rys.5. Wpływ odkształcenia napięcia na przebiegi ziemnozwarciowe (zachowane udziały poszczególnych harmonicznych)

Podczas badań zwrócono uwagę, że duży wpływ na wartość szczytową przepięć ma sposób modelowania linii średniego napięcia. W przypadku modeli typu Pi oraz Bergeron wartość szczytowa przepięć osiąga większą wartość niż dla modelu typu Marti. Rozważania teoretyczne wskazują, że do analizy stanów przejściowych wskazane jest wykorzystywanie modeli z parametrami rozłożonymi, do których zalicza się model Martiego i dlatego przedstawione wyniki symulacji uwzględniają ten sposób modelowania [13].

W przypadku analizy przepięć w rzeczywistych sieciach elektroenergetycznych należy uwzględnić wpływ pojemności transformatorów dystrybucyjnych oraz obciążenie sieci [14] i [15].

Wyniki symulacji wskazują, że dla analizowanego przypadku zawartość harmonicznych ma niewielki wpływ na wartość szczytową prądów – wzrasta o około 0,2 kV dla analizowanego przypadku. Odształcenie napięcia ma większy wpływ na wartości prądów ustalonych, co zostało przedstawione na rysunku 5. Jak można zauważyć dla sieci uziemionej przez dławik wartość ustalona prądów różnie o około 0,7 kV wraz ze zwielokrotnieniem zawartości harmonicznych dla analizowanego przypadku. W sieci uziemionej przez rezystor wzrost prądów spowodowany wzrostem zawartości harmonicznych wynosi około 0,35 kV. Rysunek 6 przedstawia przebiegi napięcia na szynach stacji w momencie wystąpienia zwarcia w sieci uziemionej przez dławik 80 Ω. Jak można zaobserwować przebieg przedstawiony na górnym rysunku jest wyraźnie odształcony.



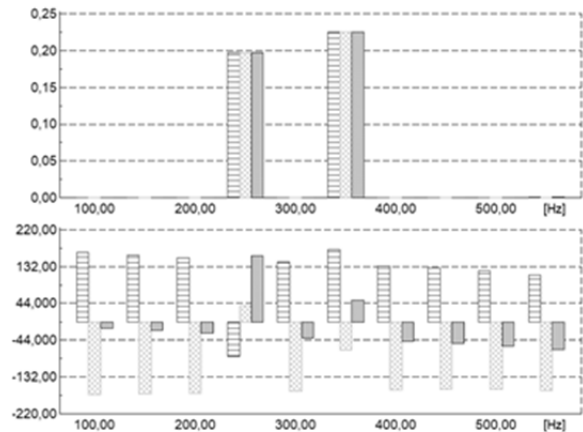
Rys.6. Porównanie wartości ustalonych prądów dla przebiegu sinusoidalnego (dół) oraz przebiegu zniekształconego o krotności 1 (góra)

Wpływ kształtu napięcia

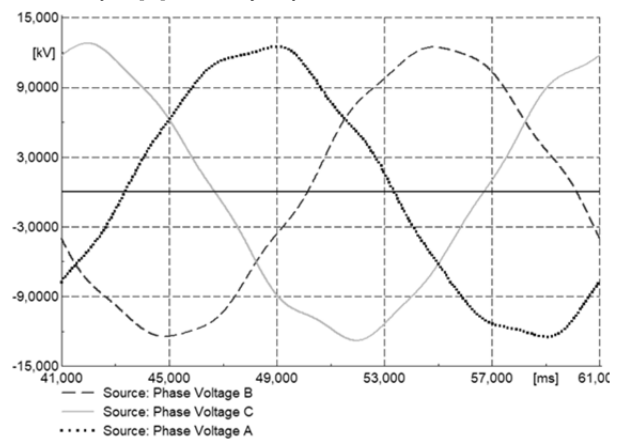
W celu zobrazowania wpływu kształtu napięcia na wartość szczytową prądów podczas zwarć doziemnych występujących w różnych momentach (ang. point on wave) zamodelowano sieć cechującą się dużą zawartością 5 i 7 harmonicznej. Zawartość harmonicznych oraz kąty przesunięcia zostały przedstawione na rysunku 7, z kolei na rysunku 8 przedstawiono przebieg napięcia w stanie normalnym. Zakres przedstawiony na rysunku odpowiada zakresowi wykonywanych zwarć tj. Od 41 do 61 ms z krokiem co 1 ms . .

W przypadku przebiegu sinusoidalnego wartość szczytowa prądów osiąga maksymalną wartość jeżeli zwarcie wystąpi w momencie, gdy napięcie osiąga wartość maksymalną. Gdy zwarcie wystąpi podczas przejścia przez zero, wartość szczytowa prądów jest silnie tłumiona – o około 10 kV. Zależność przedstawiająca wpływ momentu wystąpienia zwarcia na wartość szczytową prądów została przedstawiona na rysunku 9. Na rysunku widoczna

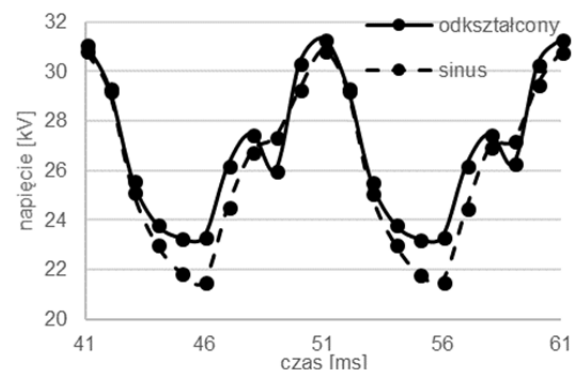
jest również wartość szczytowa prądów dla przebiegu odształconego. Zakładając, że prawdopodobieństwo wystąpienia zwarcia w poszczególnych momentach jest jednakowe można obliczyć średnią wartość szczytową prądów. W przypadku przebiegu odształconego występują dodatkowe ekstrema, które często zwiększają średnią wartość szczytową prądów, co z kolei przekłada się na wzrost prawdopodobieństwa uszkodzenia izolacji podczas zwarcia.



Rys.7. Zawartość harmonicznych [kV] oraz kąty poszczególnych harmonicznych [°]; od lewej fazy: B, C, A



Rys.8. Przebieg napięcia w stanie normalnym w zamodelowanej sieci



Rys.9. Wpływ momentu wystąpienia zwarcia na wartość szczytową prądów dla analizowanego przypadku; sin – idealny przebieg sinusoidalny; A – analizowany przebieg odształcony 5 i 7 harmonicznej

Funkcja sin przedstawiona na rysunku 9 zależy od poziomu napięcia w sieci. W przypadku, gdy poziom napięcia wzrasta funkcja przesuwana się do góry, a kiedy poziom napięcia spada funkcja sin przesuwana się w dół.

Analogiczna zależność dotyczy również przebiegu odkształconego. W analizowanym przypadku przebieg odkształcony znajduje się powyżej funkcji sin ponieważ do napięcia sin dodano dodatkowo napięcia 5 i 7 harmonicznej.

Wybrane czynniki wpływające na przebiegięcia

Poziom przebieg zależy głównie od poziomu składowej podstawowej napięcia w sieci elektroenergetycznej. Dodatkowo do czynników powodujących wzrost poziomu przebieg zalicza się propagację przebieg wzdłuż linii kablowych oraz lokalne podniesienie poziomu napięcia w pobliżu źródeł lokalnych w celu wyprowadzenia mocy. Ponadto w miejscu przyłączenia źródła współpracującego z siecią elektroenergetyczną przez przekształtnik obserwuje się zwiększony poziom zniekształcenia napięcia.

Bardzo duży wpływ na przebiegięcia ziemnozwarciowe mają zwarcia przerywane [16] oraz ferorezonans [17]. Szkodliwy wpływ na izolacje mogą mieć również drgania napięcia w transformatorze [18].

Podsumowanie

W artykule przedstawiono wybrane wyniki symulacji przedstawiające wpływ odkształcenia napięcia na wartość przebieg ziemnozwarciowych. Stwierdzono, że wpływ jest zauważalny nawet w stacjach elektroenergetycznych, w których spełnione są wymagania normy jakości energii elektrycznej. W celu ograniczenia negatywnych skutków odkształcenia na przebiegięcia ziemnozwarciowe należy dążyć do poprawy jakości energii elektrycznej w sieciach elektroenergetycznych. Jako przykład można wymienić instalacje filtrów w sieci elektroenergetycznej [19].

Autor proponuje stosowanie 2-giej nastawy czasowej, o krótszym czasie działania dla zwarć o małej rezystancji przejścia i dużej wartości przebieg, w urządzeniach automatyki zabezpieczeniowej w celu skrócenia czasu występowania naprężenia na izolacje.

W przypadku przebiegów odkształconych średnia wartość szczytowa przebieg może znacząco wzrosnąć, dodatkowo obserwuje się niekorzystny wzrost poziomu przebieg ustalonych. Wyniki symulacji wskazują, że problem jest wyraźniejszy w sieciach, w których punkt neutralny jest uziemiony przez dławik.

Wartości szczytowe przebieg zależą od wartości napięcia w momencie wystąpienia zwarcia, co pozwala na oszacowanie wartości szczytowych przebieg bez konieczności wykonywania symulacji.

Kolejnym etapem prac jest pomiar przebieg ziemnozwarciowych w rzeczywistej sieci o dużej zawartości harmonicznych w napięciu.

Autorzy: mgr inż. K. Łowczowski, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: krzysztof.lowczowski@put.poznan.pl.

LITERATURA

- [1] Chan S., Masri P. W., Determination of Transformer Rating Based on Total Harmonic Distortion Under Balanced Conditions, *Journal of Engineering Science*, (2011) nr 7, 51-61
- [2] Polski Komitet Normalizacyjny, PN-EN 50160:2010, 2010
- [3] Dias C. M., Comparative study of the derating of distribution transformers, 2015
- [4] Wasilewski J., Wiechowski W., Bak C. L., Harmonic Domain Modeling of a Distribution System Using the DigSILENT PowerFactory Software, *International Conference on Future Power*, Amsterdam, Netherlands, 2005
- [5] Branch of System Engineering, Electro-Magnetic Transients Program (EMTP) - Theory Book, Portland, 1994
- [6] DigSILENT, PowerFactory - User Manual, Gomaringen, Germany, DigSILENT, 2017
- [7] DigSILENT, Technical Reference Documentation - Fourier Source, 2017
- [8] Fluke, Fluke 434/435 Three Phase Power Quality Analyzer - User Manual, Netherlands, 2008
- [9] Tenti P., Willems J. L., Mattavelli P., Tedeschi E., Generalized Symmetrical Components for Periodic Non-Sinusoidal Three-Phase Signals, *Electrical Power Quality and Utilisation*, 2007
- [10] Muresan C., Zaharia V. D., Iudean D., Crisan T. E., Copindean R., Computing the Symmetrical Components of a Three Phase System Using TFD, 6th International Conference on Modern Power Systems, Cluj-Napoca, Romania, 2015
- [11] DigSILENT, PowerFactory - Technical Reference Documentation - Overhead Line Models, 2017
- [12] Chennamadhavuni A., Munji K. K., Bhimasingu R., Investigation of Transient and Temporary Overvoltages in a Wind Farm, *IEEE International Conference on Power System Technology*, 2012
- [13] Favela C. F., Hernandez C., Gonzalez J., Arjona M. A., Escarela-Perez R., Development of a Simplified Transformer Model for Transient Studies, *21st International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields*, 2017
- [14] Jakubowski J., Podstawy teorii przebieg w układach energoelektrycznych, PWN, 1968
- [15] Nowak W., Moskwa S., Tarko R., Problemy eksploatacji elektroenergetycznych sieci rozdzielczych średniego napięcia w aspekcie niezawodności elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej, *Acta Energetica (2011) nr 1*, 31-38
- [16] Mitra P., Ghosh A., Ghosh S., De A., Chakrabarti A., Analysis of Harmonics in Switching Transients of an Integrated Steel Plant – A Case Study, *Annual IEEE India Conference*, Kochi, India, 2012
- [17] Shirkovets A. I., Vasilyeva A. Y., Telegin A. V., Sarin L. I., Ilinykh M. V., Oscillography of Transient Processes at Physical Phase-to-ground Fault Modeling in Operational 6-35 kV Networks, *Proceedings of the 3rd International Youth Conference on Energetics*, Leiria, Portugal, 2011
- [18] Shirkovets A. I., Modeling of Transient Processes at Ground Faults in the Electrical Network with a High Content of Harmonics, *2nd International Conference on Electric Power Equipment*, Matsue, Japan, 2013
- [19] Hu H., He Z., Gao S., Harmonic Distortion Degradation and Filter Optimization Based on Sensitivity Studies with Considering Resonance Issue, *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2015