

## Asymetria napięć i prądów w elektroenergetycznych układach przesyłowych

**Streszczenie.** W artykule zostały omówione zagadnienia dotyczące zjawiska asymetrii prądów i napięć w elektroenergetycznych układach przesyłowych. Przedstawiono źródła i przyczyny występowania asymetrii, omówiono jej wpływ na urządzenia pracujące w systemie elektroenergetycznym. W artykule uwagę skupiono na elektroenergetycznych liniach przesyłowych wysokiego i najwyższych napięć. Omówiono możliwe sposoby i skutki wykonywania przeplotów linii napowietrznych WN i NN. Rozważania teoretyczne zostały wzbogacone wynikami badań symulacyjnych dla wybranych wariantów układów testowych.

**Abstract.** This paper presents an issues of voltage and current asymmetry in transmission systems. The analysis has been focused on HV and EHV transmission lines. The article shows sources and causes of the asymmetry and presents the effect of asymmetry on devices which are working in power system. In the article were discussed possible ways of transmission line transposition. Theoretical considerations were supplemented by simulation results in case simple test systems. (**The analysis of the voltage and current asymmetry in the power transmission lines**).

**Słowa kluczowe:** asymetria napięć, asymetria prądów, linie elektroenergetyczne, system przesyłowy.

**Keywords:** voltage asymmetry, current asymmetry, power lines, transmission system.

doi:10.12915/pe.2014.07.04

### Wstęp

Współczesne systemy elektroenergetyczne to bardzo złożone układy integrujące podmioty świadczące różnego rodzaju usługi z zakresu wytwarzania, przesyłu i rozdziału, a także użytkowania energii elektrycznej. Do kluczowych zadań systemów elektroenergetycznych należy zagwarantowanie bezpieczeństwa energetycznego przy uwzględnieniu rachunku ekonomicznego. Realizacja tego zadania jest trudna, bowiem wzrastające zużycie energii elektrycznej musi być zaspokojone przez ograniczone zasoby energetyczne. Dodatkowo obecnie obowiązujące uwarunkowania gospodarcze, stymulowane w Europie w dużej mierze przez organy ustawodawcze oraz administracyjne Unii Europejskiej, sprawiają, że energia elektryczna jest produktem relatywnie drogim. Stąd przy wzrastających cenach energii elektrycznej zaobserwować można coraz większy nacisk, aby wraz ze wzrostem cen poprawiała również się jakość produktu jakim jest energia elektryczna.

Aby odbiorca finalny mógł otrzymać energię elektryczną o odpowiednich parametrach jakościowych, konieczne jest utrzymywanie jej jakości również w procesie wytwarzania, przesyłu i rozdziału. Powyższe kwestie mają duże znaczenie zarówno na etapie planowania rozwoju jaki i na etapie eksploatacji systemów elektroenergetycznych.

W Polsce są już realizowane lub też są planowane do realizacji liczne inwestycje związane z rozwojem Krajowej Sieci Przesyłowej [1], dotyczące budowy wielu setek kilometrów linii o napięciu 400 kV. Równocześnie spółki dystrybucyjne, zarządzające między innymi siecią 110 kV, planują rozbudowę swojej sieci zgodnie z planami wzrostu zapotrzebowania na energię, czy też planami budowy źródeł wytwórczych. Powyższe plany mają swoje odbicie również w kwestiach jakości energii, o czym można przeczytać między innymi w publikacji [2]. Obniżenie części kosztów inwestycji w zakresie budowy nowych linii elektroenergetycznych poprzez zmniejszenie szerokości korytarzy przesyłowych wymaga projektowania linii dwutorowych, a nawet kilku ciągów liniowych na wspólnych konstrukcjach. To z kolei może mieć wpływ na kwestie parametrów energii elektrycznej.

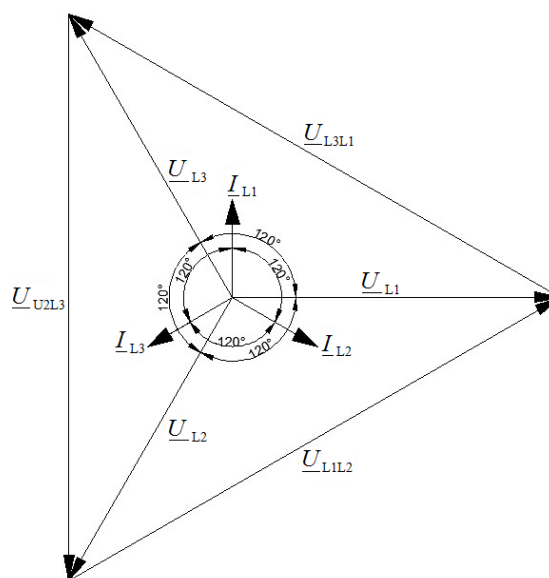
Pojęcie jakości energii elektrycznej związane jest z wieloma parametrami napięcia i prądu zasilającego. Wśród najczęściej utożsamianych i podlegających kontroli należy wymienić: częstotliwość, amplitudę napięcia, kształt przebiegu, wahania, skoki napięcia, harmoniczne napięcia i

prądu oraz asymetrię [3]. Poniższy artykuł stawia sobie za cel przybliżenie oraz omówienie problematyki asymetrii napięć i prądów w elektroenergetycznych układach przesyłowych wchodzących w skład sieci elektroenergetycznych. Znaczenie tej problematyki wynika między innymi z dokumentów [4][5], w których wskazuje się, że poprawne funkcjonowanie systemu elektroenergetycznego musi być związane z zachowaniem symetrii napięć w układach trójfazowych.

W artykule omówiono kolejno: zjawisko asymetrii napięć i prądów, skutki asymetrii napięć i prądów, źródła powstawania zjawiska asymetrii, wielkości charakteryzujące poziomy asymetrii i metody ich wyznaczania, współczynniki asymetrii według norm i zaleceń, wymagania dotyczące poziomu asymetrii zawarte w dokumentach prawnych, wyniki badań symulacyjnych.

### Opis zjawiska asymetrii

Poprawne zdefiniowanie zjawiska asymetrii prądów i napięć wymaga określenia układu, jaki jest nazywany symetrycznym napięciowo jak i prądowo.



Rys. 1. Wykres wektorowy symetrycznego układu prądów i napięć

Na podstawie rysunku 1 można zapisać następujące, podstawowe zależności:

$$(1) \quad \begin{aligned} \underline{U}_{-L1} &= \underline{U}_{L1} \\ \underline{U}_{-L2} &= a^2 \underline{U}_{L1} \\ \underline{U}_{-L3} &= a \underline{U}_{L1} \end{aligned}$$

$$(2) \quad \begin{aligned} \underline{U}_{L1L2} &= \underline{U}_{L1L2} \\ \underline{U}_{U2L3} &= a^2 \underline{U}_{L1L2} \\ \underline{U}_{L3L1} &= a \underline{U}_{L1L2} \end{aligned}$$

$$(3) \quad \begin{aligned} \underline{I}_{L1} &= \underline{I}_{L1} \\ \underline{I}_{L2} &= a^2 \underline{I}_{L1} \\ \underline{I}_{L3} &= a \underline{I}_{L1} \end{aligned}$$

gdzie:  $\underline{U}_{L1}, \underline{U}_{L2}, \underline{U}_{L3}$  - napięcia fazowe,  $\underline{I}_{L1}, \underline{I}_{L2}, \underline{I}_{L3}$  - prądy fazowe,  $\underline{U}_{L1L2}, \underline{U}_{L2L3}, \underline{U}_{L3L1}$  - napięcia międzyfazowe,  $a$  - operator obrotu o  $120^\circ$ ,  $a^2$  - operator obrotu o  $240^\circ$ .

Układ trójfazowy jest symetryczny napięciowo, jeśli wektory napięć fazowych są przesunięte względem siebie o  $120^\circ$  oraz ich wartości skuteczne są sobie równe. Wynika z tego, że w układzie symetrycznym suma wartości zespolonych napięć fazowych będzie równa 0. Identyczne warunki można zapisać dla napięć międzyprzewodowych oraz prądów fazowych płynących w obwodzie elektrycznym. Na podstawie powyższych tez, można stwierdzić, że układ określa się niesymetrycznym, gdy napięcia lub prądy nie są przesunięte w fazie o wartości operatorów obrotu  $a$  i  $a^2$  oraz gdy ich wartości skuteczne nie są sobie równe. W rzeczywistych układach dopuszcza się pewne poziomy odchylenia, które zostaną omówione w dalszej części artykułu.

Zjawisko asymetrii może mieć różne źródła. W przypadku sieci niskiego napięcia głównym źródłem jest niejednakowy rozkład obciążeń prądowych na poszczególne fazy oraz stosowanie odbiorników jednofazowych [3][6]. W przypadku napowietrznych linii wysokiego napięcia (WN) i najwyższych napięć (NN) asymetria pojawia się głównie z powodu różnych impedancji własnych i wzajemnych poszczególnych faz, co jest wynikiem rozłożenia przewodów fazowych (torów prądowych) na stopie wsporczy.

Istnieją układy rozłożenia torów prądowych w napowietrznych liniach elektroenergetycznych, dla których można przyjąć, iż linia jest symetryczna (bez wykonywania przepłotów). W przypadku układu jednotorowego jest to układ, gdzie przewody są rozmieszczone w wierzchołkach trójkąta równobocznego, natomiast dla linii dwutorowych przy rozmieszczeniu w wierzchołkach sześcioboku foremnego przy zachowaniu odpowiedniej kolejności faz [7]. W pozostałych układach nie osiąga się symetrii z powodu braku proporcjonalności między strumieniem skojarzonym z danego przewodu linii, a prądem płynącym w tym przewodzie. Indukcyjne straty napięcia powodują deformację układu napięciowego. Wraz z niesymetrią pod względem indukcyjnym pojawiają się w układzie również dodatkowe rezystancje przewodów. Ich suma wypadkowa będzie równa zero, w związku z czym jeśli w jednej fazie jej wartość jest dodatnia, to w innych musi pojawić się o wartości ujemnej. Spoglądając na to zjawisko od strony mocy czynnej, jeśli w jednej fazie moc przesyłana wzrośnie, to pozostałych musi dojść do skompensowania i nastąpi

zmniejszenie przesyłanej mocy, tzw. przerzucenie mocy z jednej fazy do drugiej [8][9]. Warto zauważyć, że asymetria całkowita nie zniknie, nawet przy zastosowaniu układów wspomnianych powyżej. Wynika to z faktu, iż rozłożenie przewodów względem ziemi i konstrukcji słupa nie jest identyczne dla każdego przewodu i skutkiem jest pojawienie się asymetrii związanej z przepływem składowej zerowej prądu.

### Skutki asymetrii napięć i prądów

Występowanie zjawiska asymetrii napięć i prądów ma szereg negatywnych skutków wpływających na działanie elementów systemu energetycznego. Przyczynia się do wzrostu strat mocy czynnej podczas przesyłu, ale także do wzrostu strat w transformatorach, głównie trójfazowych. Wraz z pojawieniem się składowej przeciwnej prądów dochodzi do dodatkowego nagrzewania urządzeń, co w przypadku linii przesyłowych skutkuje obniżeniem ich przepustowości. Składowa przeciwna prądów pojawiająca się w uzwojeniach maszyn wirujących może prowadzić do nadmiernego ich nagrzewania i przy zastosowaniu zabezpieczeń termicznych może wywoływać częste wyłączenia [9][10]. Asymetria napięć i prądów może również negatywnie wpływać na pracę elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej, między innymi powodując zwiększenie błędów lokalizacji zwarć.

### Wielkości charakteryzujące poziomy asymetrii i metody ich wyznaczania

W celu opisu ilościowego zjawiska asymetrii napięć i prądów stosowane są odpowiednie współczynniki [3]. Dotychczas opracowano kilka metod wyznaczania wskaźników asymetrii, przy czym można je podzielić na dwie grupy: metody bezpośrednie i metody pośrednie. Do bezpośrednich zalicza się metody: analityczne, wykreślno-analityczne, nomograficzne i pomiarowe. Natomiast do metod pośrednich należą: metoda oparta na obliczeniach w układzie odniesienia oraz metoda bazująca na obliczeniach w układzie składowych symetrycznych [3]. Dla potrzeb badań zjawiska asymetrii najpopularniejszą jest metoda bezpośrednia, analityczna oparta na rozkładzie układu trójfazowego wektorów napięć i prądów na sumę składającą się z trzech symetrycznych układów: kolejności zerowej, zgodnej oraz przeciwnej. Opis rozkładu do postaci składowych symetrycznych można odnaleźć w ogólnodostępnej literaturze [11]. Znając wartości składowych symetrycznych poszczególnych napięć i prądów zdefiniować można odpowiednie współczynniki.

Generalnie współczynniki asymetrii bazują na wielkościach napięć fazowych, napięć międzyfazowych oraz prądów przewodowych. Zazwyczaj współczynniki odnoszą wartości składowej kolejności przeciwnej lub/zerowej do wartości składowej symetrycznej kolejności zgodnej. Dla napięć współczynniki asymetrii określają następujące zależności.

$$(4) \quad \begin{aligned} \alpha_{u2} &= \frac{U_2}{U_1} \cdot 100 \% \\ \alpha_{u0} &= \frac{U_0}{U_1} \cdot 100 \% \\ \alpha_u &= \frac{|U_2 + U_0|}{U_1} \cdot 100 \% \end{aligned}$$

gdzie:  $U_1, U_2, U_0$  - składowe symetryczne napięcia kolejności zgodnej, przeciwnej i zerowej;  $\alpha_{u2}, \alpha_{u0}, \alpha_u$  - kolejno współczynniki asymetrii przeciwnej, zerowej i całkowitej napięć fazowych.

W wielu dokumentach podnoszących kwestię zjawiska asymetrii współczynnik asymetrii przeciwnej jest określany domyślnie współczynnikiem asymetrii, natomiast współczynnik asymetrii zerowej jest określany jako współczynnik niezrównoważenia [3]. Nazewnictwo to będzie wykorzystywane w dalszej części artykułu.

Analogicznie podstawiając w miejsca składowych symetrycznych napięć fazowych wartości składowych symetrycznych prądów otrzymać można współczynniki asymetrii prądów.

$$\alpha_{i2} = \frac{I_2}{I_1} \cdot 100 \%;$$

$$\alpha_{i0} = \frac{I_0}{I_1} \cdot 100 \%;$$

$$\alpha_i = \frac{|I_2 + I_0|}{I_1} \cdot 100 \%$$

gdzie:  $I_1, I_2, I_0$  – składowe symetryczne prądu kolejności zgodnej, przeciwnej i zerowej;  $\alpha_{i2}, \alpha_{i0}, \alpha_i$  – kolejno współczynniki asymetrii przeciwnej, zerowej i całkowitej prądu.

W przypadku napięć międzyfazowych zaburzenie ich symetrii jest powodowane przez wystąpienie składowej symetrycznej przeciwnej, składowa zerowa nie występuje. W związku z czym wprowadza się tylko jeden współczynnik asymetrii napięć przewodowych.

$$(6) \quad \alpha_{um} = \frac{U_{m2}}{U_{m1}} \cdot 100\%;$$

gdzie:  $U_{m1}, U_{m2}$  – składowe symetryczne prądu kolejności zgodnej, przeciwnej i zerowej;  $\alpha_{um}$  – współczynnik asymetrii napięć przewodowych.

Współczynnik asymetrii napięć międzyfazowych jest równy wartości współczynnika asymetrii przeciwnej napięć fazowych. Powoduje to częste pomijanie tego współczynnika w dokumentach prawnych i normalizacyjnych. Ze względu na różne skutki niesione przez składową symetryczną przeciwną i zerową, współczynnik asymetrii całkowitej jest wykorzystywany sporadycznie. Przedstawione współczynniki można wyrazić w postaci zespolonej, jednak forma ta nie jest powszechnie stosowana [3].

#### Współczynniki asymetrii według norm i zaleceń

Innym możliwym podejściem do wyznaczenia współczynników asymetrii napięć jest skorzystanie z zależności podawanych przez poszczególne normy (międzynarodowe oraz państwowe). Zależności te opierają się na pomiarach wartościach skutecznych napięć fazowych lub międzyfazowych. W tabeli 1, podano przykłady dokumentów zawierających zależności opisujące współczynniki asymetrii.

Tabela 1. Wzory na wyznaczenie współczynnika asymetrii napięć podane w normach (opracowano wg pracy [12])

Dokument (międzynarodowe lub krajowe normy i zalecenia)	Wzór na współczynnik asymetrii
IEC 61000-2-12	$K_{2U} = \sqrt{\frac{6(U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2)}{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}} - 2$
IEC 61000-4-30 IEEE P1159.1	$K_{2U} = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 + 6\beta}}} \cdot 100 \%$ $\beta = \frac{U_{AB}^4 + U_{BC}^4 + U_{CA}^4}{(U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2)^2}$
Gost 13109-97	$U_{1(1)} = \sqrt{\frac{1}{12} \left[ \left( \sqrt{3}U_{AB} + \sqrt{4U_{BC}^2 - \left( \frac{U_{BC}^2 - U_{CA}^2}{U_{AB}} + U_{AB} \right)^2} \right)^2 + \left( \frac{U_{BC}^2 - U_{CA}^2}{U_{AB}} \right)^2 \right]}$ $U_{2(1)} = \sqrt{\frac{1}{12} \left[ \left( \sqrt{3}U_{AB} - \sqrt{4U_{BC}^2 - \left( \frac{U_{BC}^2 - U_{CA}^2}{U_{AB}} + U_{AB} \right)^2} \right)^2 + \left( \frac{U_{BC}^2 - U_{CA}^2}{U_{AB}} \right)^2 \right]}$ <p>Wzór przybliżony: <math>U_{2(1)} = 0,62 (U_{pmax} - U_{pmin})</math> gdzie: <math>U_{pmin}</math> oraz <math>U_{pmax}</math> są minimalnymi i maksymalnymi wartościami napięć międzyfazowych</p>
IEC 61000-2-1 IEC 61000-4-27 ANSI C84.1 ER P29	$K_{2U} = \frac{\Delta U_{max}}{U_{sr}} \cdot 100 \%$ <p>gdzie: <math>\Delta U_{max}</math> jest maksymalnym odchyleniem dowolnego z trzech napięć fazowych od wartości średniej napięć fazowych <math>U_{sr}</math></p>
ER P29	$K_{2U} = \frac{\sqrt{3}I_2U_p}{S_K}$ <p>gdzie: <math>I_2</math> jest składową przeciwną pierwszej harmonicznej odbieranego prądu, <math>U_p</math> napięciem fazowym, a <math>S_K</math> mocą zwarciovą w punkcie wspólnego przyłączenia. Dla pojedynczego odbioru 1-fazowego o mocy <math>S</math>:</p> $K_{2U} = \frac{S}{S_K} \cdot 100\%$

## Wymagania dotyczące poziomu asymetrii zawarte w dokumentach prawnych

Jednym z podstawowych dokumentów dotyczących systemu elektroenergetycznego jest Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego (Dz. U. z dnia 29 maja 2007 r.).

Rozporządzenie to podaje dopuszczalne zawartości składowej symetrycznej przeciwnej napięcia w ciągu każdego tygodnia 95% ze zbiorów dziesięciominutowych średnich wartości skutecznych. Dla podmiotów pierwszej i drugiej grupy przyłączeniowej (WN i NN) zawartość ta nie powinna przekraczać 1% wartości składowej zgodnej. Natomiast dla podmiotów zaliczonych do trzeciej, czwartej oraz piątej grupy przyłączeniowej (SN i nN) poziom asymetrii napięcia nie może przekroczyć 2%.

Dokumentem, który rozszerza zapisy rozporządzenia [4] w kwestii sieci WN i NN jest standard [5] wprowadzony przez krajowego operatora sieci przesyłowej. Zgodnie ze standardem [5] poziom zawartości składowej przeciwnej w sieciach o napięciu 400 kV, 220 kV i 110 kV nie powinien przekraczać 1%, jednakże mogą pojawić się chwilowo wartości dochodzące do 2%. Standard [5] jako jedyny odnosi się do dopuszczalnego poziomu asymetrii przeciwnej prądów w sieciach WN i NN. Według tego standardu zawartość składowej symetrycznej przeciwnej prądu nie powinna przekraczać 10% wartości maksymalnie dopuszczalnego prądu znamionowego linii lub 3,5% maksymalnie dopuszczalnego przeciążenia.

Odniesienie w standardzie [5] poziomu asymetrii prądowej do znamionowego prądu linii (prądu dopuszczalnego długotrwale) może budzić pewne wątpliwości. Biorąc pod uwagę fakt, że linie elektroenergetyczne NN oraz WN zazwyczaj pracują z obciążeniem mniejszym od ich zdolności przesyłowej, przyjęcie do oceny asymetrii wartości prądu znamionowego linii, powoduje zaniżenie rzeczywistego procentowego udziału składowej symetrycznej przeciwnej prądu, a tym samym zaniżenie wartości współczynnika asymetrii. Z drugiej strony uzasadnieniem stosowania takiego podejścia może być fakt, że przy bardzo słabo dociążonych liniach bądź pracujących w stanie jałowym, procentowy udział składowej przeciwnej przy odniesieniu go do składowej zgodnej jest stosunkowo duży. W konsekwencji prowadzi to do dużych wartości współczynnika asymetrii pomimo niskiej szkodliwości asymetrii dla małych wartości prądów obciążenia linii.

Kolejnym dokumentem poruszającym kwestię asymetrii napięć i prądów jest norma PN-EN 50160:2010 [13]. Norma ta, obowiązująca w Polsce, podaje poziom asymetrii ale w odniesieniu do sieci średniego napięcia (SN) i niskiego napięcia (nN). Zgodnie z normą [13] poziom asymetrii napięć w sieci nN nie powinien przekraczać 2% wyznaczonych na podstawie identycznej zasady jak we wcześniej omówionym rozporządzeniu [4]. Dopuszczane są jednak szczególne przypadki, przy których poziom asymetrii może być wyższy. Na obszarach, gdzie znajdują się instalacje odbiorców przyłączone pomiędzy dwie fazy lub częściowo jednofazowo, dopuszcza się asymetrię w sieci trójfazowej na poziomie 3% dla sieci nN. Dla sieci SN nie wyszczególniono konkretnych przypadków i asymetria napięcia może dochodzić do poziomu 3%. W przypadku instalacji w zakładach przemysłowych dopuszczalne wartości współczynników asymetrii napięć są wymienione w normie PN-EN-61000-2-4 [14]. Uwzględniono tutaj charakter urządzeń i w zależności od przydziału ich do poszczególnych klas, wartości współczynników asymetrii mogą się wahać od 2% do nawet chwilowo 4%.

Dokumentem uzupełniającym polskie przepisy w kwestii asymetrii jest norma PN-72/E-06000 [15]. Norma [15] za układ symetryczny napięciowo przyjmuje taki, w którym wartość składowej symetrycznej przeciwnej i zerowej napięcia nie przekracza 2% wartości składowej symetrycznej zgodnej. Z kolei za układ prawie symetryczny prądowo przyjmuje układ, w którym wartości składowej symetrycznej przeciwnej i zerowej prądu nie przekraczają poziomu 5% składowej symetrycznej zgodnej.

Warto zwrócić uwagę na fakt, iż w żadnym z dokumentów krajowych oraz międzynarodowych, poziom asymetrii napięć nie jest ustalony poniżej wartości 1%. Jak podano w opracowaniu [16] występuje pewien poziom asymetrii, który wynika z istnienia naturalnego poziomu niesymetrii impedancji elementów sieci elektroenergetycznej. Dlatego też współczynniki asymetrii nie mogą być ustalone na zbyt rygorystycznym poziomie, gdyż spełnienie tych warunków może okazać się bardzo kosztowne, a czasami niemożliwe.

Porównując wymagania zestawione w tabeli 2 z wymaganiami dotyczącymi Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE) można spostrzec, że dopuszczalne poziomy asymetrii w KSE są ustalone dość rygorystycznie i nie odbiegają od standardów przyjmowanych na świecie.

Tabela 2. Dopuszczalne współczynniki asymetrii w dokumentach międzynarodowych (opracowano wg pracy [12])

Dokument	Wartości współczynnika asymetrii	Uwagi
IEC 1000-2-5	Definiowane są dwa stopnie zakłócenia: stopień 1 - $K_{2U} = 2\%$ stopień 2 - $K_{2U} = 3\%$	Klasyfikacja zjawiska
IEC 1000-2-12	$K_{2U} = 2\%$ W warunkach szczególnych do 3%	Poziom kompatybilności
PN-EN 50160	$K_{2U} = 2\%$ W pewnych rejonach może wystąpić do 3%	Charakterystyki napięcia. Kwantyl 0,95
Gost 13109-97	$K_{2U} = 2\%$ - w odniesieniu do kwanty la 0,95 $K_{2U} = 4\%$ - w odniesieniu do wartości maksymalnej	Charakterystyki napięcia
ANSI	$K_{2U} = 3\%$	
ER P29	$K_{2U} = 2\%$ W warunkach szczególnych: $K_{2U} = 1\%$ - dla układów o napięciu 33 kV – 132 kV $K_{2U} = 1,3\%$ dla napięć 33 kV	Poziomy planowane
UIE	Poziomy kompatybilności dla sieci nn i SN: $K_{2U} = 2\%$ Poziomy planowane dla sieci WN: $K_{2U} = 1\%$ Poziomy kompatybilności dla sieci przemysłowych: Klasa 1, 2: $K_{2U} = 2\%$ Klasa 3: $K_{2U} = 3\%$ - kwantyl 0,95; $K_{2U} = 4\%$ - wartość maksymalna	
UNIPEDA	$K_{2U} = 2\%$ , W pewnych przypadkach może wystąpić asymetria do 3%	Kwantyl 0,95

## Badanie wpływu parametrów konstrukcyjnych linii elektroenergetycznej na asymetrię prądów i napięć

### A. Założenia

Głównymi czynnikami, które mają znaczący wpływ na poziom asymetrii napięć są konstrukcja oraz konfiguracja linii WN i NN.

Linie elektroenergetyczne mogą być zbudowane z wykorzystaniem słupów o różnych sylwetkach, a tym samym o różnym rozłożeniu przewodów fazowych i odgromowych. Ponadto linie elektroenergetyczne mogą tworzyć bardzo różne układy, począwszy od linii jednotorowych i wielotorowych jednonapięciowych po linie wielotorowe wielonapięciowe. Ciągi takie mogą pracować równolegle na wspólne szyny zbiorcze bądź w układzie typu Y (linia składa się z dwóch odcinków: odcinek 1 – linia dwutorowa, odcinek 2 - dwie linie jednotorowe).

Poniżej zostaną zaprezentowane wyniki badań symulacyjnych, które posłużyły do oceny wpływu konfiguracji linii na asymetrię napięć i prądów. Badania symulacyjne przeprowadzono w środowisku PSCAD [17].

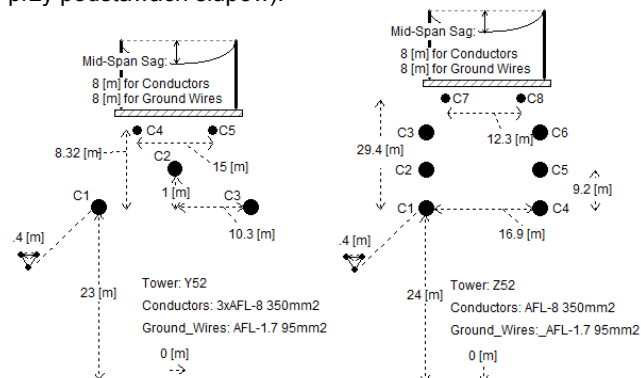
We wszystkich układach testowych pomiar asymetrii napięć następował w punkcie końcowym ciągu przesyłowego (w punkcie zasilania znajduje się idealne źródło napięciowe, więc asymetria równa jest 0). Natomiast asymetrię prądową mierzono w punkcie początkowym tj. przy źródle napięcia (przy modelowaniu odbioru jako element o zadanej mocy czynnej i biernej, asymetria prądowa przy odbiorze przyjmuje identyczne wartości co asymetria napięciowa). Jako przewody fazowe wybrano, zalecane przez operatora sieci przesyłowych, AFL-8 350 mm<sup>2</sup> [18] tworzące wiązkę trzech przewodów rozłożonych w wierzchołkach trójkąta równobocznego o boku 0,4m na poziomie napięcia 400 kV oraz pojedynczy przewód dla poziomu napięcia 110 kV. Jako przewody odgromowe przyjęto AFL-1.7 95 mm<sup>2</sup> [19].

W ramach przeprowadzonej analizy wykonano następujące badania:

- porównanie asymetrii występującej w liniach pracujących równolegle: dwutorowej jednonapięciowej oraz w dwóch liniach jednotorowych;
- ocena wpływu odległości pomiędzy liniami jednotorowymi na zjawisko asymetrii;
- ocena zjawiska asymetrii w układzie przesyłowym typu Y;
- ocena zjawiska asymetrii w linii wielotorowej dwunapięciowej

### B. Badanie 1

Pierwszą część badań stanowiło porównanie wielkości asymetrii występujących w linii dwutorowej jednonapięciowej z dwoma liniami jednotorowymi pracującymi równolegle, wzajemnie na siebie oddziaływanymi, oddalonymi od siebie o 30 m (mierząc przy podstawach słupów).



Rys. 2. Zamodelowane sylwetki słupów Y52 oraz Z52 w programie PSCAD

W obu przypadkach nie wykonywano przeplotów. Każdy z torów był zasilany napięciem o  $U_n = 400$  kV. Zamodelowano sylwetki zgodnie ze specyfikacją techniczną słupów Y52 oraz Z52 (rys. 2). Przyjęto, że oba odcinki linii będą miały długość 90 km. Na końcu obu układów znajdował się odbiór o mocy czynnej 750 MW i mocy biernej 50 Mvar.

Wyniki symulacji zawarte w tabeli 3 wskazują jednoznacznie, że w przypadku linii dwutorowej asymetria napięć i prądów jest większa niż w przypadku układu dwóch linii jednotorowych. Jest to spowodowane silnym oddziaływaniem na siebie obu torów leżących w niewielkiej odległości. Przewody fazowe nie leżą w wierzchołkach sześciokąta foremnego, co powoduje, że wraz ze zwiększoną liczbą przewodów nasilają się wzajemne oddziaływania i pojawiają się niezbilansowane impedancje wzajemne. Warto zauważyć również, że rośnie poziom współczynnika nierównoważenia napięć, uległ on ponad dwukrotnemu wzrostowi. Przyczyną tego stanu rzeczy jest wzrost liczby przewodów oddziaływujących z konstrukcją słupa.

Tabela 3. Wartości współczynników asymetrii

Typ linii	$\alpha_{u2}$	$\alpha_{u0}$	$\alpha_{i2}$	$\alpha_{i0}$
L. dwutorowa	0,830	0,664	2,360	1,107
2x L. jednotorowa	0,333	0,045	0,992	0,209

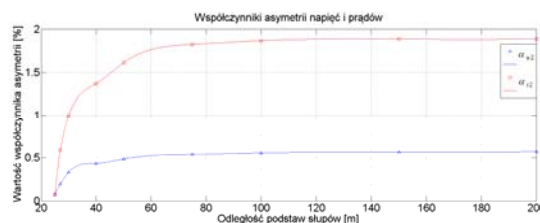
### C. Badanie 2

Aby lepiej zobrazować wzajemny wpływ dwóch linii jednotorowych przeprowadzono dalsze badania, określające wpływ odległości pomiędzy liniami jednotorowymi na zjawisko asymetrii. Konfiguracja linii jednotorowych jest identyczna jak w przypadku Badania 1.

Na podstawie wyników przedstawionych w tabeli 4 można stwierdzić, że wzajemne zbliżanie dwóch linii prowadzi do zmniejszenia wartości współczynników asymetrii. Przy czym od odległości 75 m zmiany współczynników asymetrii są niewielkie. Ty samym wraz z oddalaniem się obu linii zmiany maleją, by ustalić się na prawie niezmiennym poziomie, co przedstawia rysunek 3.

Tabela 4. Wielkości współczynników asymetrii w zależności od położenia linii jednotorowych

Odległość podstaw słupów [m]	$\alpha_{u2}$	$\alpha_{u0}$	$\alpha_{i2}$	$\alpha_{i0}$
25	0,077	0,038	0,069	0,032
27	0,197	0,039	0,590	0,094
30	0,333	0,045	0,992	0,209
40	0,435	0,082	1,372	0,376
50	0,487	0,096	1,612	0,440
75	0,539	0,104	1,824	0,495
100	0,556	0,109	1,867	0,511
150	0,567	0,113	1,886	0,524
200	0,571	0,117	1,890	0,531



Rys. 3. Przebieg współczynnika asymetrii prądów i napięć

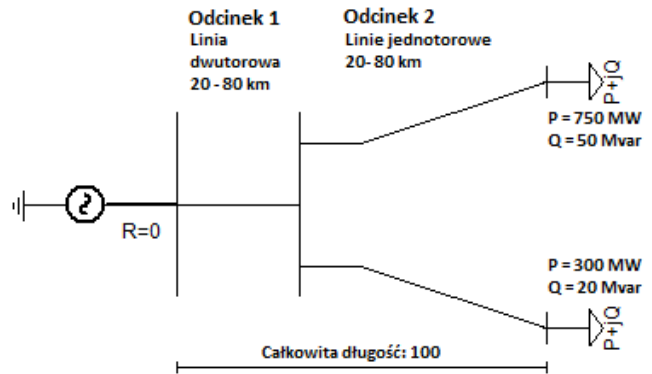
### D. Badanie 3

Kolejnym etapem badań była analiza zjawiska asymetrii w układzie przesyłowym typu Y. W tym celu został zamodelowany układ przesyłowy o długości 100 km, w którym odcinek 1 (od strony źródła) stanowi linia dwutorowa, natomiast odcinek 2 (bliżej odbiorów) dwie linie

jednotorowe (linie niemające na siebie wzajemnego wpływu, zasilające oddzielne odbiory o różnych mocach). Długość odcinka dwutorowego zmieniano w granicach od 20% do 80% całkowitej długości układu przesyłowego. Jako sylwetki słupów przyjęto ponownie Y52 oraz Z52. Wszystkie tory linii zostały zasilone napięciem o  $U_n = 400$  kV. Moce odbiorów ustalono na poziomie  $P_A = 750$  MW i  $Q_A = 50$  Mvar oraz  $P_B = 300$  MW i  $Q_B = 20$  Mvar. Podział na poszczególne odcinki wraz z mocami odbiorów przedstawia rysunek 4.

Z wyników symulacji przedstawionych w tabeli 5 wynika, że wydłużanie odcinka linii dwutorowej prowadzi do zwiększenia każdego z wyznaczanych wskaźników asymetrii prądów i napięć. Największy wzrost zanotowano w odcinku obciążonym mniejszą mocą. Jest on bardziej podatny na oddziaływanie drugiego toru. Wyniki pokrywają się z poprzednią częścią badań. Wraz z stosowaniem linii dwutorowych wzrostowi ulega poziom asymetrii. Fakt ten jest potęgowany przez zwiększanie strefy, w której dwa tory

o różnych obciążeniach, mogą na siebie bezpośrednio oddziaływać. Ma to związek z ich różnym obciążeniem prądowym, gdyż strumienie nie mogą się kompensować.



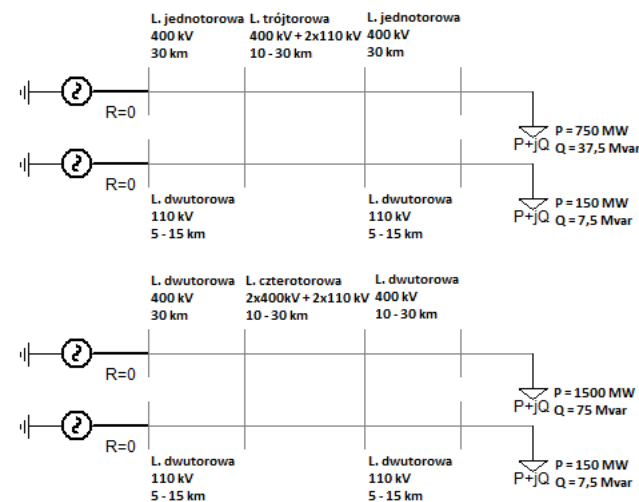
Rys. 4. Model linii dwutorowej zasilającej dwa niezależne odbiory

Tabela 5. Współczynniki asymetrii prądów w węźle początkowym oraz asymetrii napięć w węzłach końcowych

Dł. linii dwutorowej [km]	Dł. linii jednotorowej [km]	$\alpha_{u2A}$	$\alpha_{u0A}$	$\alpha_{u2B}$	$\alpha_{u2B}$	$\alpha_{i2}$	$\alpha_{i0}$
20	80	1,271	0,352	0,653	0,217	2,159	0,657
30	70	1,275	0,415	0,722	0,336	2,195	0,731
40	60	1,281	0,487	0,791	0,455	2,231	0,811
50	50	1,288	0,565	0,859	0,572	2,267	0,895
60	40	1,297	0,646	0,928	0,685	2,302	0,981
70	30	1,308	0,729	0,996	0,794	2,337	1,069
80	20	1,320	0,814	1,063	0,900	2,371	1,157

#### E. Badanie 4

Następny etap badań dotyczył analizy zjawiska asymetrii w linii wielotorowej dwunapięciowej. Pod uwagę wzięto linię trójtorową i linię czterotorową. Analizowana linia trójtorowa posiadała dwa tory o napięciu  $U_n = 110$  kV oraz jeden tor o napięciu  $U_n = 400$  kV. Natomiast linia czterotorowa posiadała 2 tory o napięciu  $U_n = 110$  kV i dwa tory o napięciu  $U_n = 400$  kV. W obu przypadkach linia 110 kV miała długość 40 km i składała się z trzech odcinków. Linie 400 kV również składały się z trzech fragmentów o łącznej długości 70 km. Długość odcinków dwunapięciowych zmieniano w granicach od 10 km do 30 km. Wraz ze zmianami długości odcinka dwunapięciowego zmianie ulegały długości linii jednonapięciowych tak, aby utrzymać stałą długość całkowitą ciągów przesyłowych. Szczegóły podziału ciągów liniowych wraz z obciążeniami pokazano na rysunku 5.



Rys. 5. Modele zawierające linie trójtorowe oraz czterotorowe

General Line Geometry Data Input  
Tower: EWND M9 Tower Centre 0 [m]  
Conductors: AFL-8 350mm2 --> Ground\_Wires: AFL-1.7 95mm2

Cond. #	Connection Phasing #	X (from tower centre)	Y (at tower)	GW. #	Connection Phasing #	X (from tower centre)	Y (at tower)
1	1	-5.3 [m]	20 [m]	1	7	-3.2 [m]	23.5 [m]
2	2	-6.3 [m]	16.5 [m]	2	8	1.6 [m]	23.5 [m]
3	3	-5.3 [m]	13 [m]				
4	4	3.1 [m]	20 [m]				
5	5	4.2 [m]	16.5 [m]				
6	6	3.1 [m]	13 [m]				

Mid-Span Sag: 8 [m] for Conductors, 8 [m] for Ground Wires

General Line Geometry Data Input  
Tower: W411 P1 Tower Centre 0 [m]  
Conductors: AFL-8 350mm2 --> Ground\_Wires: AFL-1.7 95mm2

Cond. #	Connection Phasing #	X (from tower centre)	Y (at tower)	GW. #	Connection Phasing #	X (from tower centre)	Y (at tower)
1	1	6.1 [m]	53 [m]	1	10	-1.1 [m]	56.5 [m]
2	2	6.1 [m]	42.5 [m]	2	11	4.1 [m]	56.5 [m]
3	3	6.1 [m]	32 [m]				
4	4	-2.7 [m]	53.1 [m]				
5	5	-2.7 [m]	48.2 [m]				
6	6	-2.7 [m]	43.3 [m]				
7	7	-2.7 [m]	38.4 [m]				
8	8	-2.7 [m]	33.5 [m]				
9	9	-2.7 [m]	28.6 [m]				

Mid-Span Sag: 8 [m] for Conductors, 8 [m] for Ground Wires

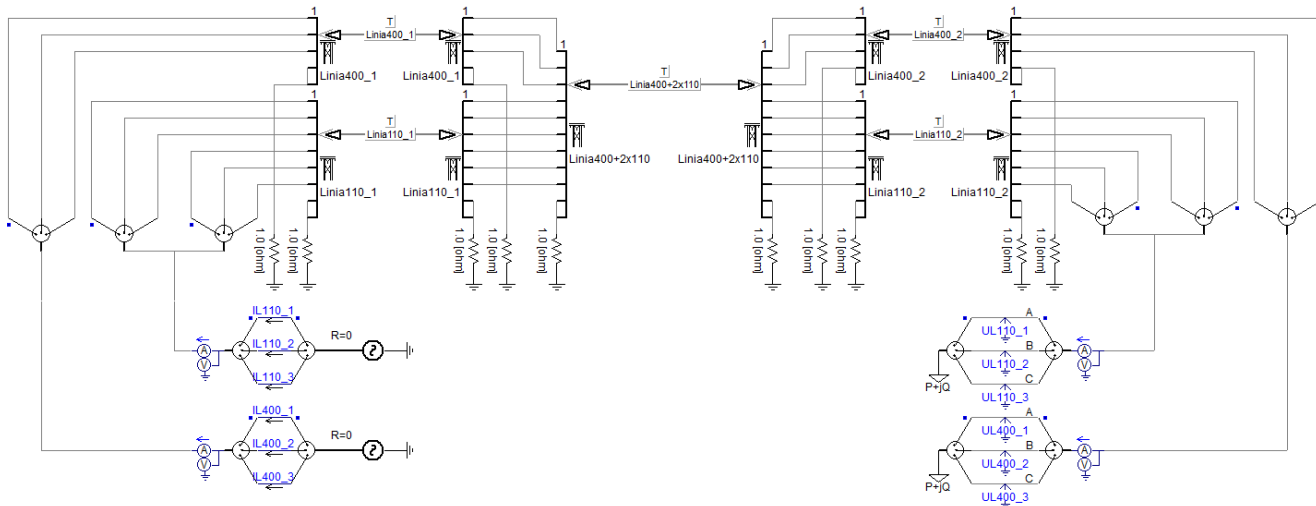
General Line Geometry Data Input  
Tower: LH-P4 Tower Centre 0 [m]  
Conductors: AFL-8 350mm2 --> Ground\_Wires: AFL-1.7 95mm2

Cond. #	Connection Phasing #	X (from tower centre)	Y (at tower)	GW. #	Connection Phasing #	X (from tower centre)	Y (at tower)
1	1	-3.3 [m]	45.1 [m]	1	13	-3.35 [m]	55.4 [m]
2	2	-6.8 [m]	36.3 [m]	2	14	3.35 [m]	55.4 [m]
3	3	-7.8 [m]	27.5 [m]				
4	4	3.3 [m]	45.1 [m]				
5	5	6.8 [m]	36.3 [m]				
6	6	7.8 [m]	27.5 [m]				
7	7	-3.93 [m]	22.51 [m]				
8	8	-10.1 [m]	15.71 [m]				
9	9	-4.1 [m]	15.71 [m]				
10	10	3.93 [m]	22.51 [m]				
11	11	10.1 [m]	15.71 [m]				
12	12	4.1 [m]	15.71 [m]				

Mid-Span Sag: 8 [m] for Conductors, 8 [m] for Ground Wires

Rys. 6. Geometria słupów EWND M9, W411 P1 oraz LH-P4

W układach testowych wykorzystano następujące sylwetki słupów rurowych oraz kratowych: dla linii jednotorowych – słup Y52, dla linii dwutorowych słup EWND M9 (napięcie 110 kV) oraz słup Z52 (napięcie 400 kV). Dla linii trójtorowej wykorzystano słup W411 P1 oraz dla linii czterotorowej słup LH-P4. Dane konstrukcyjne omawianych sylwetek słupów pokazano na rysunkach 2 i 6.



Rys. 7. Zamodelowany układ testowy ciągu przesyłowego z fragmentem linii trójtorowej 400kV + 2x110kV.

Tabela 6. Wartości współczynników asymetrii – układ z linią trójtorową 400kV + 2x110kV

Długość odcinka trójtorowego [km]	400 kV				110 kV			
	$\alpha_{u2}$	$\alpha_{u0}$	$\alpha_{i2}$	$\alpha_{i0}$	$\alpha_{u2}$	$\alpha_{u0}$	$\alpha_{i2}$	$\alpha_{i0}$
10	0,974	0,397	1,490	0,556	1,008	1,397	1,171	1,467
20	0,941	0,493	1,433	0,616	1,097	1,754	1,289	1,849
30	1,006	0,619	1,485	0,738	1,385	2,393	1,617	2,478

Tabela 7. Wartości współczynników asymetrii – układ z linią czterotorową 2x400kV + 2x110kV

Długość odcinka czterotorowego [km]	400 kV				110 kV			
	$\alpha_{u2}$	$\alpha_{u0}$	$\alpha_{i2}$	$\alpha_{i0}$	$\alpha_{u2}$	$\alpha_{u0}$	$\alpha_{i2}$	$\alpha_{i0}$
10	1,186	1,078	1,473	1,830	1,021	2,589	1,856	4,754
20	1,108	0,970	1,641	1,974	1,124	4,099	2,243	7,085
30	1,162	0,953	2,391	2,467	1,356	5,910	3,018	10,435

Wyniki analizy zjawiska asymetrii przedstawiono w tabeli 6 (przypadek linii trójtorowej) oraz w tabeli 7 (przypadek linii czterotorowej).

W celu uzyskania lepszego obrazu pojawienia się torów 110 kV wykonano dodatkowo symulacje dla dwóch linii o napięciu  $U_n = 400\text{kV}$  o długości 70 km. W pierwszym przypadku była nią linia jednotorowa (obciążenie identyczne jak dla toru 400 kV w linii trójtorowej), drugi układ tworzyła linia dwutorowa (obciążenie identyczne jak dla torów 400 kV w linii czterotorowej).

Tabela 8. Współczynniki asymetrii linii jednotorowej oraz dwutorowej 400 kV o długości 70 km

Typ linii 400kV	$\alpha_{u2}$	$\alpha_{u0}$	$\alpha_{i0}$	$\alpha_{i0}$
Jednotorowa	0,894	0,218	1,401	0,373
Dwutorowa	1,265	1,002	1,820	1,176

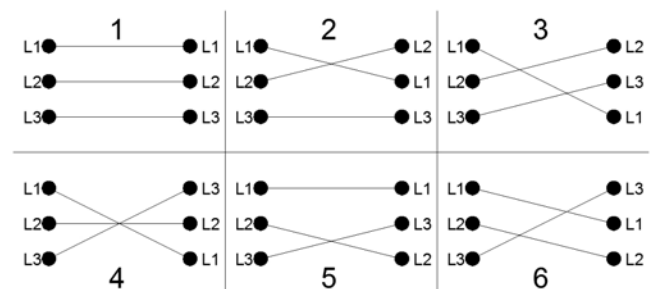
Porównując wartości współczynników asymetrii dla linii jednotorowej 400 kV z tabeli 8 z wartościami współczynników dla linii trójtorowej (400kV + 2x110kV) z tabeli 6 można zauważyć, że wartości wszystkich współczynników asymetrii wzrastają wraz z pojawieniem się torów 110 kV. Dodatkowo wzrost długości odcinka wielotorowego przyczynia się do wzrostu wartości współczynników asymetrii. Należy jednak zauważyć, że gdy długość odcinka wielotorowego nie przekracza 20 km, to wartość współczynnika asymetrii przeciwnej napięć nie przewyższa znacznie wymaganego poziomu.

Warto podkreślić również, że z tabel 7 oraz 8 wynika, iż podczas przesyłu mocy linią czterotorową można uzyskać niższe wartości współczynników asymetrii napięć i prądów dla torów 400 kV niż w przypadku linii dwutorowej 400 kV. Wskazuje to na korzystny wpływ pojawienia się torów 110 kV. Z drugiej strony zauważyć można silne i niekorzystne oddziaływanie torów 400 kV na tory 110 kV, dla których współczynniki asymetrii uzyskują wartości przekraczające

wartości dopuszczalne. Tym samym wyniki przeprowadzonych symulacji linii dwunapięciowych pokazują, że bardziej podatne na asymetrię są tory pracujące z niższym poziomem napięcia znamionowego.

### Eliminacja asymetrii napięć i prądów za pomocą przeplotów

W układach linii WN i NN najpowszechniejszym sposobem ograniczenia zjawiska asymetrii jest zastosowanie przeplotów przewodów lub ich wiązek. Odpowiednie wykonanie takiej transpozycji prowadzi do zbliżenia układu pod względem indukcyjnym do symetrycznego [4]. Symetryzacja linii zależy między innymi od sposobu wykonania przeplotów oraz od ich ilości. Możliwe kombinacje zostały przedstawione na rysunku 8.



Rys. 8. Możliwe sposoby wykonania przeplotów (opracowano wg [20]) dla linii jednotorowej

Najczęściej zalecanymi sposobami wykonywania są opcje trzecia i szоста (rysunek 8). Należy pamiętać, że nie zawsze wykonanie przeplotu będzie wiązać się z redukcją asymetrii [21].

Równie ważne, co ocena poprawności sposobu transpozycji, jest wybranie liczby miejsc wykonywanych przeplotów. Ilość kombinacji na jakie możemy wykonać

przeploty wyraża się wzorem  $6^n$ , gdzie  $n$  oznacza liczbę miejsc, w których dokonuje się przeplotu.

W pracy [21] wykazano, że w przypadku linii jednotorowych zastosowanie już jednego przeplotu może powodować ponad dwukrotne obniżenie wartości współczynników asymetrii. Jednocześnie w pracy [21] najlepsze wyniki osiągnięto dla trzech miejsc przeplotów, co jest zgodne z rozważaniami teoretycznymi zawartymi w pracy [8].

### Badanie wpływu przeplotów w liniach wielotorowych na asymetrię prądów i napięć

Linie wielotorowe są już bardziej złożonym problemem. Przy liniach dwutorowych, gdy osie przewodów w obu torach są symetryczne względem środka układu, podobnie jak przy liniach jednotorowych wystarczy wykonanie jednego cyklu przeplotów. Warunkiem koniecznym jest równe rozłożenie obciążeń obu torów. Jeśli oba tory pracują na oddzielne odbiory to, aby osiągnąć pełną symetrię należy wykonać na jednym z torów trzy razy więcej przeplotów, tzn. na jedną sekcję przeplotów w torze pierwszym, powinno przypadać trzy przeploty w torze sąsiadującym [8]. Metoda z gęstszymi przeplotami w jednej sekcji jest w praktyce niestosowana ze względu na znaczące podniesienie kosztów przy nieznacznej redukcji asymetrii prądów i napięć.

Sytuacja przedstawiona powyżej komplikuje się jeszcze bardziej w przypadku linii dwunapięciowych. Linie takie zazwyczaj nie pracują na wspólne odbiory i są w różny

sposób obciążone. Wykonywanie przeplotów przy takich konstrukcjach jest już dużym wyzwaniem dla inżynierów, zarówno na etapie budowy linii jak i jej późniejszej eksploatacji.

W celu analizy zjawiska asymetrii w liniach z przeplotami przeprowadzono badania z wykorzystaniem układu zawierającego linię czterotorową (rysunek 5), przy czym długość odcinka czterotorowego wynosił 30 km. Dla potrzeb badań odcinek czterotorowy podzielony został na 3 równe odcinki. Przeploty zrealizowano tylko na fragmencie linii czterotorowej, w dwóch miejscach według sposobu 6 przedstawionego na rysunku 8. Dwa tory były zasilane napięciem  $U_n = 400\text{kV}$  a dwa napięciem  $U_n = 110\text{kV}$ . W trakcie badań wyznaczono poziomy asymetrii w linii bez przeplotów, z przeplotami w torach 110 kV, z transpozycją przewodów w torach 400 kV oraz przy wykonaniu przeplotów na dwóch poziomach napięcia. Wyniki badań przedstawiono w Tabeli 9.

Na podstawie wyników przedstawionych w tabeli 9 można stwierdzić, że zastosowanie przeplotów znacząco zmniejsza wartość współczynników asymetrii. Największą redukcję asymetrii zanotowano w przypadku jednoczesnego wykonania przeplotów w torach 400 kV oraz 110 kV. Warto zaznaczyć, że wykonanie przeplotów tylko w torach 400 kV obniża wartości współczynników asymetrii poniżej 1,0. Tym samym symetryzacja torów linii 400 kV wpływa bardzo korzystnie na tory 400 kV oraz na pracę torów 100 kV.

Tabela 9. Wyniki z poszczególnych prób wykonywania przeplotów

Miejsce wykonania przeplotów	400 kV				110 kV			
	$\alpha_{u2}$	$\alpha_{u0}$	$\alpha_{i2}$	$\alpha_{i0}$	$\alpha_{u2}$	$\alpha_{u0}$	$\alpha_{i2}$	$\alpha_{i0}$
Bez przeplotów	1,162	0,953	2,391	2,467	1,356	5,910	3,018	10,435
Przeplot torów 110 kV	1,261	1,275	3,965	3,574	0,304	7,159	0,374	14,070
Przeplot torów 400 kV	0,462	0,365	0,686	0,335	0,192	0,416	0,235	0,790
Przeplot torów 110 kV i 400 kV	0,464	0,303	0,690	0,304	0,339	0,420	0,424	0,478

### Podsumowanie

Przeprowadzone rozważania teoretyczne jak i badania symulacyjne można podsumować następująco:

1. Wraz z rosnącym poziomem złożoności systemu elektroenergetycznego i budową linii wielotorowych wielonapięciowych zasadne wydaje się przeprowadzanie złożonych prac badawczych odnośnie asymetrii na etapie projektowania nowych obiektów.
2. Na wielkość asymetrii ma wpływ szereg czynników, jednak do najbardziej istotnych należą konfiguracja linii, jej długość oraz wartość prądu obciążenia.
3. W przypadku linii wielotorowych znaczenia nabiera wielkość asymetrii zerowej napięć oraz prądów. W związku z tym należy zastanowić się nad uwzględnieniem wielkości współczynników niezerowności w poszczególnych dokumentach podnoszących tematykę jakości energii w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym.
4. Najbardziej skuteczną metodą walki z asymetrią jest wykonywanie przeplotów. Niemniej jednak przed każdym transponowaniem linii należy przeprowadzić szereg badań symulacyjnych ze względu na nie zawsze pozytywne efekty takich zabiegów oraz na rachunek ekonomiczny. Każdy przeplot niesie ze sobą zwiększenie kosztów budowy linii oraz trudniejszą eksploatację, co również przekłada się na aspekty finansowe. Szczególnie ważne jest wykonanie takich rozważań przy liniach wielonapięciowych.
5. Przeprowadzone symulacje pokazują, że w liniach wielotorowych wielonapięciowych większą wrażliwością na zmiany poziomów asymetrii cechują się tory pracujące na niższym poziomie napięcia.

### LITERATURA

- [1] Plan rozwoju w zakresie zaspokojenia obecnego i przyszłego zapotrzebowania na energię elektryczną na lata 2010 – 2025, Wyciąg., Konstancin – Jeziorna, marzec 2010. [http://www.pse-operator.pl/uploads/kontener/Plan\\_Rozwoju\\_2010\\_2025.pdf](http://www.pse-operator.pl/uploads/kontener/Plan_Rozwoju_2010_2025.pdf)
- [2] Sylwester Robak, Jacek Wasilewski: "Analiza asymetrii napięć i prądów w układzie sieci elektroenergetycznego połączenia Polska - Litwa", Energetyka, Zeszyt tematyczny nr XXIII, ISSN 0013-7294, pp. 61-65
- [3] Kowalski Z., Jakość energii elektrycznej, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź, 2007
- [4] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego (Dz. U. z dnia 29 maja 2007 r.)
- [5] PSE-SF.KSE1/2005v1, Krajowy System Elektroenergetyczny – Standardowe specyfikacje funkcjonalne, PSE-Operator S.A., Warszawa, 2005
- [6] Rogoż M., Rozprawa doktorska Systemy oceny jakości energii elektrycznej dla potrzeb kontraktu na dostawę energii i określenia warunków technicznych przyłączenia odbiorników, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, 2007
- [7] Wiśniewski Z.: Sieci elektroenergetyczne I, Wydanie II, Państwowe Wydawnictwa Naukowe, Warszawa 1967
- [8] Kończykowski S., Obliczanie sieci elektroenergetycznych Tom I, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1953
- [9] Kowalski Z., Asymetria w układach elektroenergetycznych, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1987
- [10] Davis M.W., Broadwater R., Hambrick J., Modeling and Testing of Unbalanced Loading and Voltage Regulation, National Renewable Energy Laboratory, USA, 2007
- [11] Stanisław Bolkowski: Teoria Obwodów Elektrycznych. Wydanie piąte, WNT, Warszawa, 1995.
- [12] Polskie Partnerstwo Jakości Zasilania, Seminarium nt. Zaburzenia w napięciu zasilającym, Łódź, 2003
- [13] PN-EN 50160:2010, Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych., PKN, 2010.



- [14] PN-EN-61000-2-4:1997, Kompatybilność elektromagnetyczna. Środowisko. Poziomy kompatybilności dotyczące zaburzeń przewodzonych małej częstotliwości w sieciach zakładów przemysłowych
- [15] PN-72/E-06000, Maszyny elektryczne wirujące. Ogólne wymagania i badania
- [16] Baggini A., Handbook of Power Quality, Wydawnictwo John Wiley & Sons Ltd., Chichester, 2007
- [17] Manitoba Hydro International Ltd., Division Manitoba HVDC Research Centre, <https://hvdc.ca/pscad/>
- [18] Tele-Fonika Kable Sp. z o. o. S.K.A., Karta katalogowa AFL-8 350 357-AL.1/46-ST1A MT/03.2012, dostęp na dzień 21.03.2013
- [19] Tele-Fonika Kable Sp. z o. o. S.K.A., Karta katalogowa AFL-1,7 95 85-AL.1/49-ST1A MT/02.2012, dostęp na dzień 21.03.2013
- [20] G. V Moodley, D. Dama, R. Vajeth, „Consideration of electromagnetic induction during Transposition Studies”, IEEE AFRICON 2004
- [21] Pawlicki A., Praca inżynierska Analiza asymetrii napięć i prądów w wybranych układach linii elektroenergetycznych, Politechnika Warszawska, Warszawa, 2013

---

**Autorzy:**

prof. nzw. dr hab. inż. Sylwester Robak, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, Zakład Sieci i Systemów Elektroenergetycznych. E-mail: [sylwester.robak@ien.pw.edu.pl](mailto:sylwester.robak@ien.pw.edu.pl)

inż. Adrian Pawlicki, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, Zakład Sieci i Systemów Elektroenergetycznych. E-mail: [pawlicka@ee.pw.edu.pl](mailto:pawlicka@ee.pw.edu.pl),

mgr inż. Bartosz Pawlicki, doktorant, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, Zakład Sieci i Systemów Elektroenergetycznych. E-mail: [bartosz.pawlicki@ien.pw.edu.pl](mailto:bartosz.pawlicki@ien.pw.edu.pl)