

## DWUKRYTERIALNA OPTIMALIZACJA KOLEJNOŚCI FAZ W WYBRANYCH UKŁADACH LINII ELEKTROENERGETYCZNYCH NN W KRAJOWYM SYSTEMIE ELEKTROENERGETYCZNYM

Jacek WASILEWSKI<sup>1</sup>, Paweł KUBEK<sup>1,2</sup>

1. PSE Innowacje sp. z o.o.  
tel.: 22 242 13 02, e-mail: jacek.wasilewski@pse.pl
2. Politechnika Śląska, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów  
tel.: 32 237 26 40, e-mail: pawel.kubek@polsl.pl

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono model i wyniki dwukryterialnej optymalizacji kolejności faz dla wybranych układów ciągów liniowych NN w KSP, w kontekście minimalizacji wartości współczynników asymetrii napięć i prądów. Scharakteryzowano szczegółowo funkcję celu, zmienne decyzyjne, parametry zadania oraz zmienne stanu. Rozważono kryteria takie jak: nakład inwestycyjny konieczny do wykonania przepłotu symetryzacji linii (przeplotu) i współczynniki asymetrii napięć. Do rozwiązania przedstawionego wyżej modelu optymalizacyjnego wykorzystano algorytm ewolucyjny. W celu priorytetyzacji rozważanych kryteriów, zastosowano podejście quasi-leksykograficzne. Przedstawiono szczegółową analizę otrzymanych wyników wraz z analizą wpływu niepewności danych wejściowych na otrzymane wyniki.

**Słowa kluczowe:** asymetria napięcia, optymalizacja kolejności faz, układy przesyłowe, algorytmy ewolucyjne.

### 1. WPROWADZENIE

W układach przesyłowych, występowanie asymetrii napięć i prądów wynika z różnych impedancji własnych i wzajemnych poszczególnych faz, co jest wynikiem określonego rozłożenia przewodów fazowych (torów prądowych) na konstrukcji wsporczej linii. Zgodnie ze standardem KSE, poziom zawartości składowej przeciwnej napięcia w sieciach 400 kV, 220 kV i 110 kV nie powinien przekraczać 1% [1]. W wyjątkowych sytuacjach dopuszcza się maksymalny udział składowej przeciwnej do wartości 2%. Jako wyjątkowe sytuacje należy rozumieć układy sieci inne niż normalne (stany remontowe, stany awaryjne skutkujące np. wyłączeniem toru linii) [2].

### 2. PRZEDSTAWIENIE PROBLEMU I ZAŁOŻENIA OGÓLNE

Celem przeprowadzonej analizy była optymalizacja układów (kolejności) faz dla wybranych projektowanych ciągów liniowych NN, w kontekście asymetrii napięć i prądów.

Obiektem prowadzonej analizy jest Krajowy System Przesyłowy (KSP) w procesie jego rozwoju do roku 2025 [3]. Dla wybranych planowanych inwestycji liniowych, należało dokonać doboru kolejności faz lub zdecydować o konieczności zastosowania przepłotu w kontekście

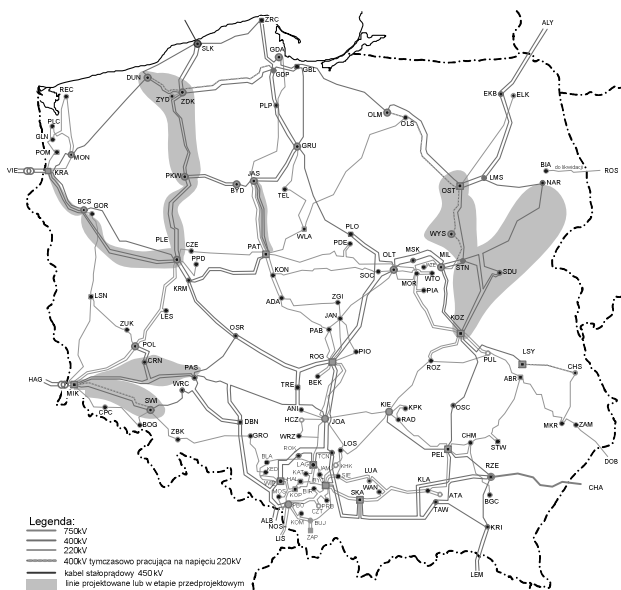
zachowania dopuszczalnych wartości współczynników asymetrii napięć i prądów. Są to następujące ciągi liniowe:

- linia dwutorowa 400 kV: Baczyna Systemowa – Krajnik – inwestycja w realizacji (2020 r.);
- linia dwutorowa 400 kV: Mikułowa – Pasikurowice (z wcięciem jednego toru do SE Czarna) – inwestycja w realizacji (2020 r.);
- linia dwutorowa 400 kV: Piła Krzewina – Plewiska – inwestycja w realizacji (2020 r.);
- linia dwutorowa 400 kV: Jasiniec – Pątnów – inwestycja w realizacji (2018 r.);
- linia dwutorowa 400 kV: Mikułowa – Świebodzice – inwestycja w przygotowaniu przedinwestycyjnym (2022 r.);
- linia dwutorowa 400 kV: Baczyna Systemowa – Plewiska – inwestycja w przygotowaniu przedinwestycyjnym (2022 r.);
- linia jednotorowa/dwutorowa 400 kV Siedlce – Narew oraz 400 kV Kozienice – Stanisławów i Siedlce – Stanisławów – inwestycja częściowo w przygotowaniu przedinwestycyjnym (2020 r.), częściowo wybudowane;
- linia dwutorowa 400 kV: Piła Krzewina – Dunowo (z wcięciem jednego toru do SE Żydowo Kierzkowo) – inwestycja w przygotowaniu przedinwestycyjnym (2022 r.);
- linia dwutorowa 400 kV: Ostrołęka – Stanisławów (z wcięciem jednego toru do SE Wyszków) – inwestycja w przygotowaniu przedinwestycyjnym (2022 r.).

W wyżej wymienionej liście podano w nawiasie przyjęty rok oddania linii do ruchu w KSE. Rok ten wynika z umowy między operatorem systemu przesyłowego (OSP), a wykonawcą inwestycji (inwestycje w realizacji) lub z planu rozwoju sieci przesyłowej, jeśli linia jest w przygotowaniu przedinwestycyjnym. Zakłada się, że dla linii, na które jest już podpisana umowa z wykonawcą dobiera się wyłącznie układ faz. Tym samym, nie dopuszcza się możliwości zastosowania przepłotu przewodów fazowych. W przypadku linii, które są planowane do budowy, rozważa się zarówno możliwość zastosowania przepłotów, jak również odpowiedniego doboru układu faz.

Niektóre z wymienionych linii 400 kV zawierają tory pracujące czasowo na napięciu 220 kV.

Na podstawie przedstawionej wyżej listy inwestycji liniowych wraz z rokiem ich uruchomienia rozważa się trój etapowy proces rozwoju KSP: etap 2018, etap 2020, etap 2022. Na rysunku 1 przedstawiono schemat układu analizowanej sieci przesyłowej w etapie 2022.



Rys. 1. Schemat układu analizowanej sieci przesyłowej – etap 2022

Podstawą analizy były modele rozptyłowe KSE odpowiadające poszczególnym etapom rozwoju w okresie zimowym podczas szczytu obciążenia i z minimalną generacją z farm wiatrowych. W rozpatrywanych modelach występują największe przepływy w rozważanych liniach przesyłowych, co determinuje najbardziej niekorzystne warunki asymetrii napięciowej i prądowej.

Ze względu na minimalizację czasu rozwiązania zadania rozptyłu mocy we współzależnych fazowych, zdecydowano o zredukowaniu modelu sieci KSP do ekwiwalentu zawierającego projektowane linie i ich otoczenie sieciowe.

Modele linii NN w układzie fazowym zostały opracowane w oparciu o dane nt. konstrukcji rozważanych linii (budowanych, planowanych do budowy oraz istniejących) oraz przewodów fazowych i odgromowych.

Linie NN będące elementami modelowanego otoczenia sieciowego, a posiadające niewielkie długości, zostały odwzorowane jako elementy symetryczne (modele dla składowej zgodnej zaczerpnięte z modeli rozptyłowych).

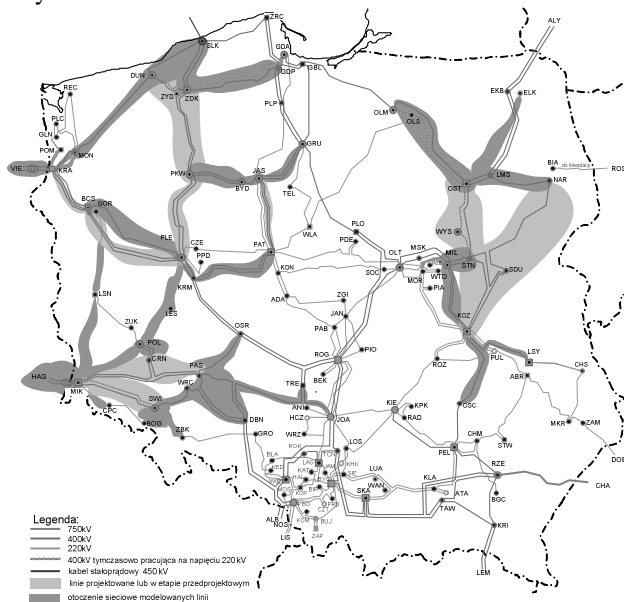
Dla nowobudowanych linii, dla których nie zostały dotąd określone parametry konstrukcyjne przyjęto następujące założenia:

- jednorodny odcinek na słupach serii E33 i ich pokrewnych;
- udział słupów przelotowych i mocnych – (50/50)%;
- przewody fazowe typu 408-AL1F/34-UHST
- przewody odgromowe typu OPGW-2S 2/24 (M121/R70-110), odpowiednik przewodu AFL-1,7 95;
- rezystywność gruntu równa 300  $\Omega$ m.

W raporcie [4] wykazano, że zmiana typu przewodu fazowego lub przewodu odgromowego nie wpływa istotnie na wartości współczynnika asymetrii napięciowej i prądowej. Brak istotnego wpływu wykazano również

w przypadku zmiany rezystywności gruntu oraz zmiany proporcji udziału słupów przelotowych i mocnych [4]. Z kolei udział w linii słupów nadleśnych jest umiarkowanie istotny, tj. wartość względna współczynnika asymetrii może się zmniejszyć lub zwiększyć do ok. 20% dla konstrukcji odpowiednio: nadleśnych i beczkowych [4]. Fakt ten został uwzględniony przy omawianiu wyników doboru układów fazowych rozważanych dwutorowych linii 400 kV.

Zakładając, że w KSP układy faz linii dochodzących do węzła kompensują warunki asymetrii napięciowej, odwzorowanie niesymetrii otoczenia sieciowego linii sprowadza się do uwzględnienia wszystkich elementów gałęziowych sieci mających wspólny węzeł z projektowaną linią. Jeśli nowe linie są zlokalizowane względnie blisko siebie (łączy je co najwyżej dwie szeregowo połączone gałęzie), to można określić wspólne otoczenie sieciowe wokół wszystkich projektowanych linii. Zakres obszaru otoczenia sieciowego dla etapu rozwoju 2020 przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat otoczenia sieciowego analizowanego układu przesyłowego – etap 2022

### 3. SFORMUŁOWANIE MODELU OPTYMALIZACYJNEGO

Problem doboru układu faz w układach sieci NN opisano w postaci zadania optymalizacyjnego, w którym wyróżniono:

- zmienne decyzyjne: brak lub przeplecenie przewodów fazowych na trasie linii w określonych cyklach oraz przyporządkowanie poszczególnych przewodów fazowych do określonych miejsc na głowicach krańcowych słupów linii napowietrznych;
- parametry zadania: geometria konstrukcji wsporczych linii, geometria przewodów fazowych (wiązki) i odgromowych, długość linii, napięcia fazowe symetryczne, prądy fazowe symetryczne, parametry otoczenia sieciowego oraz jego topologia i konfiguracja;
- zmienne stanu: napięcia i prądy fazowe niesymetryczne, prądy w przewodach odgromowych, rozkład pola elektromagnetycznego wokół rozpatrywanej linii NN.

Rozważa się przypadek z wieloma inwestycjami liniowymi, budowanymi w wielu etapach, a zatem układ faz jest optymalizowany jednocześnie dla wielu linii w wielu etapach rozwoju KSP.

Niech  $T$  jest rozważanym przedziałem czasu w procesie rozwoju sieci NN z interwałami dwuletnimi. Innymi słowy jest to zbiór lat, w których planuje się oddać linie do ruchu. W analizowanym przypadku zbiór ten przyjmuje postać  $T = \{2018, 2020, 2022\}$ . W nawiązaniu do zbioru  $T$ , określa się zbiór linii w postaci  $\mathcal{B} = \{\mathcal{B}_t\}$ , gdzie  $t \in T$ . A zatem:

- $\mathcal{B}_{2018} = \{\text{JAS-PAT}\}$ ;
- $\mathcal{B}_{2020} = \{\text{JAS-PAT, PKW-PLE, BCS-KRA, MIK-CRN-PAS, SDU-NAR-STN-KOZ}\}$ ;
- $\mathcal{B}_{2022} = \{\text{JAS-PAT, PKW-PLE, BCS-KRA, MIK-CRN-PAS, SDU-NAR-STN-KOZ, PKW-ZDK-DUN, BSC-PLE, MIK-SWI, STN-WYS-OST}\}$ .

Ze względu na większą złożoność struktur linii MIK-CRN-PAS, SDU-NAR-STN-KOZ, PKW-ZDK-DUN oraz STN-WYS-OST, linie te stanowią podzbiory ich fragmentów pozwalających na zamodelowanie ich geometrii.

Niech  $m_i = (m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_6)_i$  oznacza zbiór zmiennych decyzyjnych w zakresie miejsc wprowadzenia przewodów fazowych na słup krańcowy  $i$ -tej linii, gdzie  $i \in \mathcal{B}$ . Jednocześnie rozważa się rodzaj zastosowanego przeplotu (lub jego brak) w każdej z rozważanych linii, tj.  $\xi_i$ .

Rozważa się następujący zbiór celów:

- nakład inwestycyjny konieczny do wykonania przeplotu – nakład ten dla każdej linii jest ponoszony jednorazowo, zatem koszt sumaryczny sumuje się po liniach, tj.:  $f_K = \sum_{i \in \mathcal{B}} K_i$ , gdzie  $K_i = \{0, 1, 2, 3\}$ ;
- asymetria napięcia –  $f_{\alpha_U} = \sum_{i \in \mathcal{H}_U} \alpha_{U2\%,i}^2$ , gdzie  $\mathcal{H}_U$  jest zbiorem rozważanych węzłów SEE, w których wyznacza się wektory napięć we współrzędnych fazowych. Zbiór  $\mathcal{H}_U$  uwzględnia kategorię czasu, a zatem  $\mathcal{H}_U = \{\mathcal{H}_{U,t}\}$ , gdzie  $t \in T$ , a zatem niektóre węzły będą występować w funkcji celu współczynnika  $\alpha_U$  więcej niż jeden raz, jeśli istnieją w rozważanym procesie rozwoju NN dłużej niż przez jeden etap rozwoju.

Formalnie, model optymalizacyjny zadania można zapisać w następujący sposób:

$$\min_{\substack{\{m_i\} \in \mathcal{L}^{|\mathcal{B}|} \\ \{\xi_i\} \in \{0, 1, 2, 3\}^{|\mathcal{B}|}}} [f_K(\{\xi_i\}), f_{\alpha_U}(\Delta, \mathcal{E}, Y)]^T \quad (1)$$

zgodnie z porządkiem:

$$(\min f_K(\{\xi_i\}), \min f_{\alpha_U}(\Delta, \mathcal{E}, Y)) \quad (2)$$

przy ograniczeniach nierównościowych:

$$\alpha_{U2\%,i} \leq 1\%, \forall_{i \in \mathcal{H}_U} \text{ oraz układ normalny} \quad (3)$$

$$\alpha_{U2\%,i} \leq 2\%, \forall_{i \in \mathcal{H}_U} \text{ oraz układ inny niż normalny} \quad (4)$$

$$\alpha_{I2\%,i} \leq 10\%, \forall_{i \in \mathcal{H}_I} \quad (5)$$

$$\alpha_{I0\%,i} \leq 10\%, \forall_{i \in \mathcal{H}_I} \quad (6)$$

$$\max_{x \in \{-35, 35\}} E_i(x, y) \leq 1,0 \text{ V/m}, \forall_{i \in \mathcal{B}} \text{ oraz } y = 2 \text{ m} \quad (7)$$

$$\max_{x \in \{-35, 35\}} H_i(x, y) \leq 60 \text{ A/m}, \forall_{i \in \mathcal{B}} \text{ oraz } y = 2 \text{ m} \quad (8)$$

przy ograniczeniach równościowych:

$$E_i(x, y) = f_{E_i}(\Delta, \mathcal{E}, Y), \forall_{i \in \mathcal{B}} \quad (9)$$

$$H_i(x, y) = f_{H_i}(\Delta, \mathcal{E}, Y), \forall_{i \in \mathcal{B}} \quad (10)$$

oraz:

- układ równań napięciowo-mocowych w postaci admitancyjnej rozwiązywany zadaniem rozprężu mocy w analizowanej sieci;
- model obwodowy ziemnopowrotny linii elektroenergetycznej (relacje między geometrią linii a elementami macierzy admitancyjnej);
- współczynniki asymetrii napięć i prądów wyznaczone wg następujących zależności:

$$\alpha_{U2\%} = \frac{U_2}{U_1} 100\% \quad (11)$$

$$\alpha_{I2\%} = \frac{I_2}{I_1} 100\% \quad (12)$$

$$\alpha_{I0\%} = \frac{I_0}{I_1} 100\% \quad (13)$$

W zależnościach (1-10) posłużono się następującymi oznaczeniami:  $f_K$  – funkcja celu wyznaczająca nakład inwestycyjny na wykonanie przeplotu,  $f_{\alpha_U}$  – funkcja celu wyznaczająca miarę asymetrii napięcia,  $f_{E_i}$  – dwuwymiarowy rozkład składowej elektrycznej pola elektromagnetycznego,  $f_{H_i}$  – dwuwymiarowy rozkład składowej magnetycznej pola elektromagnetycznego,  $\mathcal{H}_I$  – zbiór rozważanych węzłów w KSP, w których wyznacza się wektory prądów we współrzędnych fazowych,  $\Delta$  – zbiór zmiennych decyzyjnych w zadaniu,  $\mathcal{E}$  – zbiór parametrów zadania,  $Y$  – zbiór zmiennych stanu w zadaniu.

Do rozwiązania przedstawionego wyżej modelu optymalizacyjnego wykorzystano algorytm ewolucyjny, którego zasadę działania przedstawiono w szeroko dostępnej literaturze, np. [5, 6].

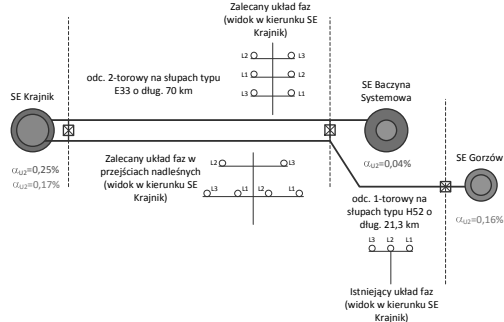
Zakładając optymalizację dwukryterialną i hierarchiczność celów, zastosowano podejście quasi-leksykograficzne, rozwiązując zadanie w etapach, których liczba jest równa liczbie kryteriów wg kolejności założonych priorytetów [7].

Uwzględniając wszystkie rozważane odcinki budowanych i planowanych do budowy linii dwutorowych, osobnik AE stanowi 22-elementowy wektor przyjmujący wartości całkowite w zakresie od 0 do 5. W procesie strojenia AE z uwzględnieniem akceptowalnego czasu jego działania uzyskano następujące wartości parametrów algorytmu: liczba pokoleń: 40, liczba osobników w jednym pokoleniu: 20, prawdopodobieństwo krzyżowania osobników: 0,3, prawdopodobieństwo mutacji osobników: 0,05, metoda skalowania: deterministyczna, metoda selekcji: liniowa.

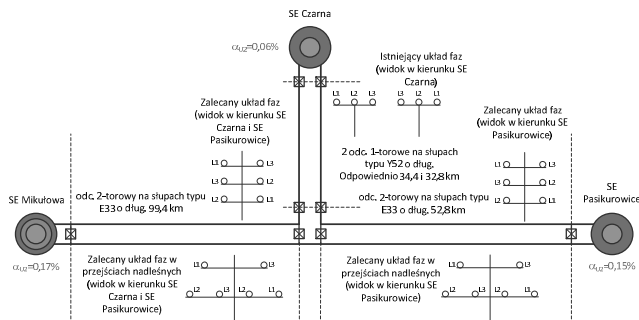
#### 4. WYNIKI I SPOSTRZEŻENIA

Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono wynikowe schematy poglądowe wybranych dwóch inwestycji liniowych. Na schematach zaznaczono otrzymane układy faz przyjmując określony kierunek patrzenia oraz odpowiadające im wartości współczynników asymetrii napięcia oraz etapu rozwoju KSP (2018, 2020, 2022). Kolory na rysunkach

odnoszą się do napięć znamionowych sieci: czerwony – 400 kV, zielony – 220 kV, niebieski – 110 kV.



Rys. 3. Schemat poglądowy linii dwutorowej 400 kV: Baczyzna Systemowa – Krajnik wraz z zalecanym układem faz.



Rys. 4. Schemat poglądowy linii dwutorowej 400 kV: Mikułowa – Pasikurówice (z wcięciem jednego toru do SE Czarna) wraz z zalecanym układem faz

Otrzymane układy faz, wyznaczone jako optymalne, pozwalają na uzyskanie wyników współczynnika asymetrii poniżej 0,3% (przy dopuszczalnej wartości równej 1%). Wartości tych współczynników zależą przede wszystkim od układów faz linii istniejących (komentarz w pkt. 3.3 wyżej). W SE Baczyzna Systemowa prawie wszystkie linie są przedmiotem optymalizacji, a zatem współczynnik asymetrii napięciowej wynosi w tym węźle (rozdzielnia 400 kV) ok. 0,04%. W dalszej kolejności można założyć wpływ mocy zwarciowej (bliskości elektrycznej elektrowni będących źródłem napięcia symetrycznego) na asymetrię napięcia, co można zaobserwować po niskich wartościach współczynnika asymetrii napięcia w stacjach przyelektrownianych: Krajnik, Mikułowa, Pątnów, Ostrołęka.

Należy zaznaczyć, że wartości wszystkich zmiennych decyzyjnych  $\xi_i$  wynoszą 0, co oznacza, że żadna linia nie wymaga stosowania przeplotu w analizowanych warunkach pracy (zarówno w stanie pracy N, jak i N-1).

## 5. WNIOSKI

Przeprowadzono obliczenia optymalizacyjne polegające na takim doborze układów faz w analizowanych liniach NN (w tym zastosowania ewentualnych przeplotów), aby zminimalizować umowny nakład inwestycyjny konieczny do wykonania przeplotu oraz wartości współczynników asymetrii napięciowej, przy spełnieniu założonych ograniczeń technicznych. Wyniki optymalizacji wskazują, że nie istnieje potrzeba stosowania przeplotów w żadnej z rozważanych linii.

Obliczenia w zakresie analizy asymetrii w liniach NN prowadzono w warunkach niepewności, co każe uwzględnić jej margines podczas podejmowania decyzji dotyczących narzucania określonych układów faz i stosowanie ewentualnych przeplotów. Istotnymi czynnikami mającymi wpływ na wartości współczynników asymetrii są parametry linii będących przedmiotem optymalizacji, jak również parametry linii planowanych do budowy, a stanowiących otoczenie sieciowe analizowanego układu.

## 6. BIBLIOGRAFIA

1. Standardowa Specyfikacja Funkcjonalna: Krajowy System Elektroenergetyczny. Numer Kodowy PSE-SF.KSE1/2015, PSE S.A. Warszawa, listopad 2015.
2. S. Robak, J. Wasilewski: Analiza asymetrii napięć i prądów w układzie sieci elektroenergetycznego połączenia Polska - Litwa, w: Energetyka, problemy energetyki i gospodarki paliwowo-energetycznej, Zeszyt tematyczny nr XXIII, 2012, ss. 61-65.
3. Plan rozwoju w zakresie zaspokojenia obecnego i przyszłego zapotrzebowania na energię elektryczną na lata 2016-2025, uzgodniony z Prezesem Urzędu Regulacji Energetyki, pismo DRE-4310-35(17)/2015/2016/ŁM z dnia 15 stycznia 2016.
4. J. Wasilewski, P. Kubek: Analiza asymetrii napięć i prądów w układach sieci NN. Etap I: Badania metodologiczne w zakresie analizy asymetrii projektowanych linii elektroenergetycznych, PSE Innowacje sp. z o.o., praca badawcza dla PSE S.A., Warszawa, kwiecień 2017 (praca niepublikowana).
5. D. B. Fogel, Evolutionary Computing: The Fossile Record, IEEE Press, Piscataway, NJ, 1998.
6. D. E. Goldberg, Algorytmy genetyczne i ich zastosowania, WNT 1995.
7. K. Deb, Multi-objective Optimization Using Evolutionary Algorithms, Wiley, 2001

## TWO-OBJECTIVE PHASING OPTIMISATION FOR SELECTED POWER LINES IN POLISH POWER SYSTEM

In transmission power networks, voltage and current unbalance results from different self and mutual impedances of phase conductors, i.e. a distribution of phase conductors along line tower geometry. The paper presents model and results of two-objective phasing optimisation for selected extra high voltage power lines in Polish power system. According to the standard of Polish power system operation, the voltage unbalance factor cannot exceed 1% for transmission power lines. Minimizing the voltage and current unbalance is considered in the stated optimisation problem. Different groups of functions and variables have been described, such as objective function, decision variables and constraints. Two criteria have been considered: cost of line transposing and voltage unbalance ratio defined as the ratio of the negative sequence component to the positive sequence component. In order to solve the stated optimisation problem, an evolutionary algorithm has been applied. In order to prioritize the considered objectives, a quasi-lexicographic approach has been used. The obtained optimisation results have been widely discussed including an impact of uncertain input data to obtained optimisation results.

**Keywords:** voltage unbalance, phasing optimisation, transmission power lines, evolutionary algorithms.