



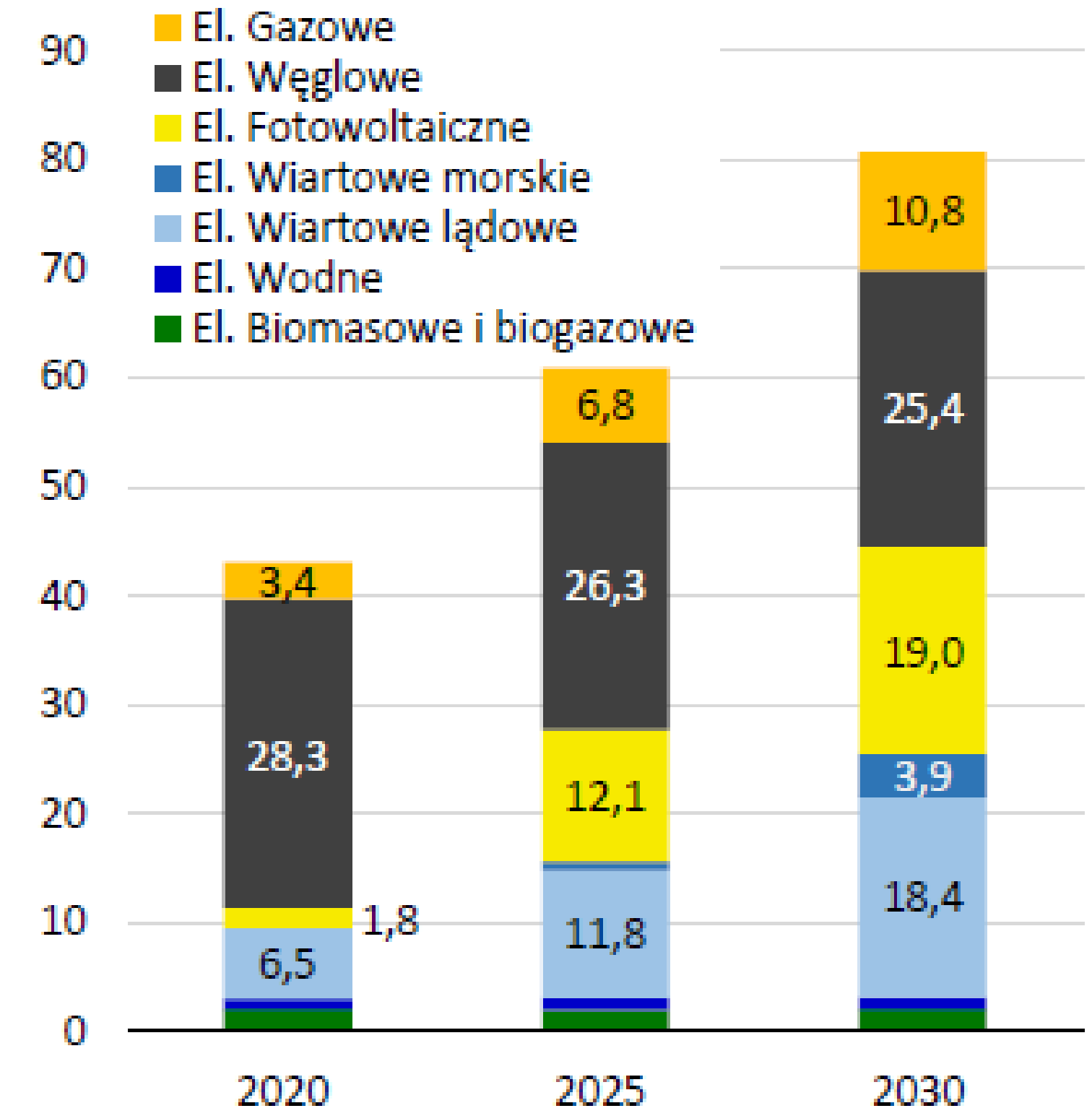
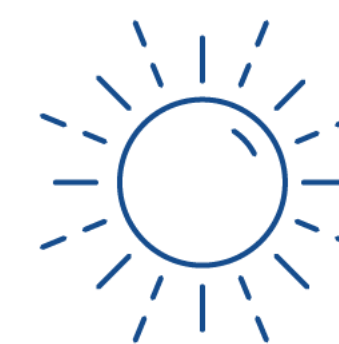
Politechnika
Śląska

Wielotorowe, wielonapięciowe elektroenergetyczne linie napowietrzne - nowy element w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym

dr hab. inż. Henryk Kocot, prof. PŚ

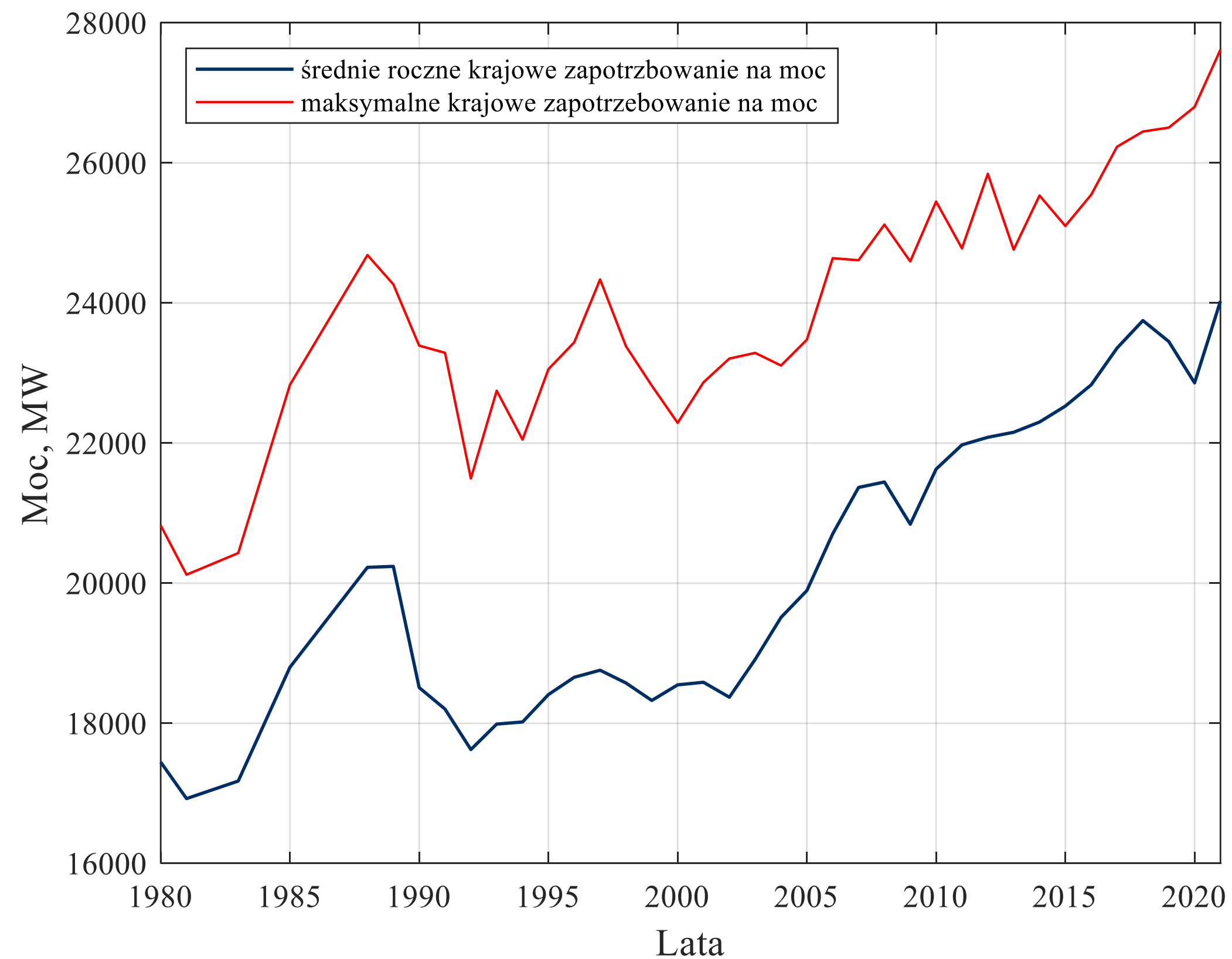
dr inż. Agnieszka Dziendziel

Znaczne zmiany w strukturach systemu wytwórczego



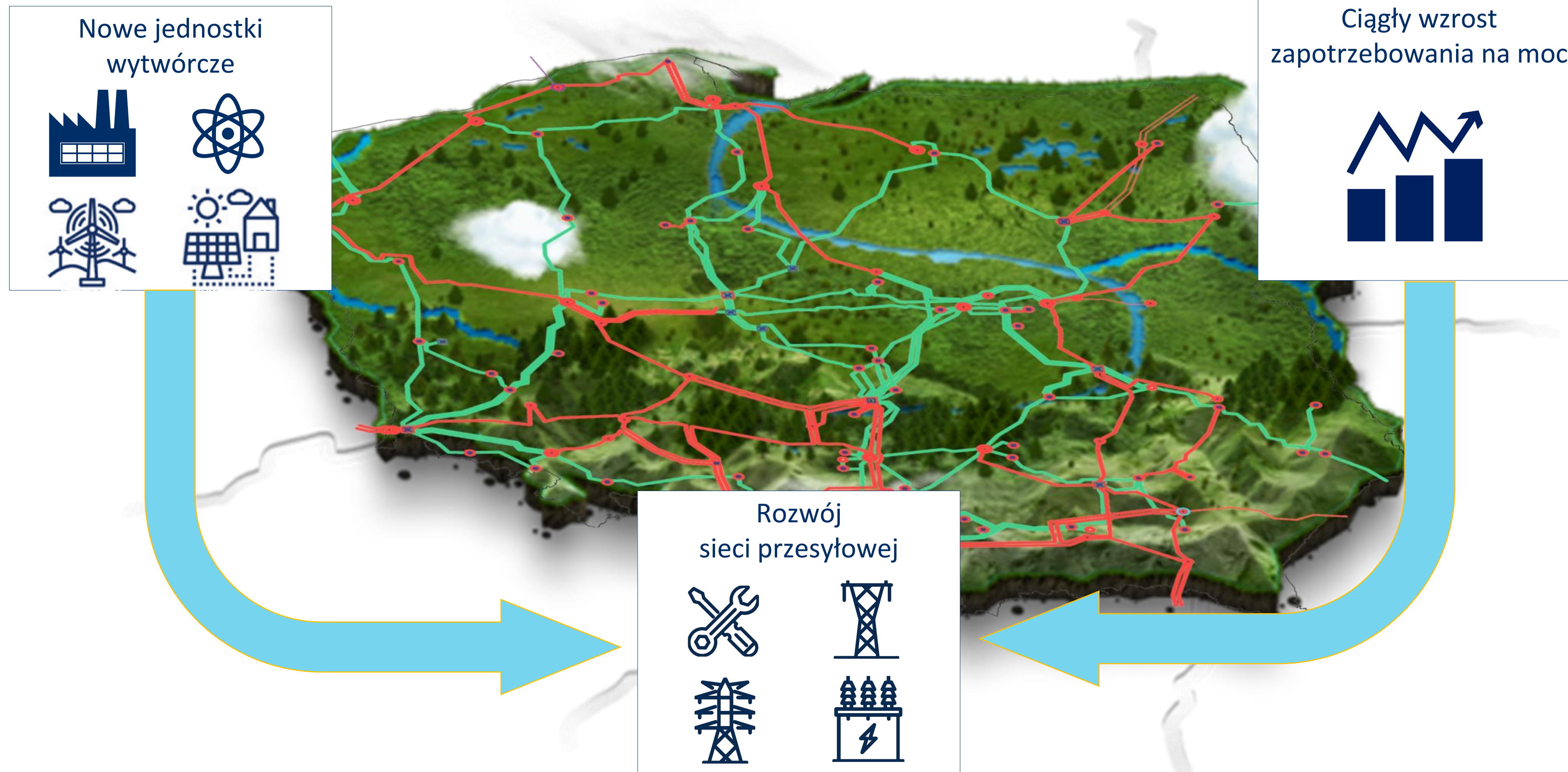
Moc zainstalowana netto w GW_e w podziale na technologie wytwarzania na przestrzeni lat 2020-2030

Rosnące zapotrzebowanie na moc i energię elektryczną

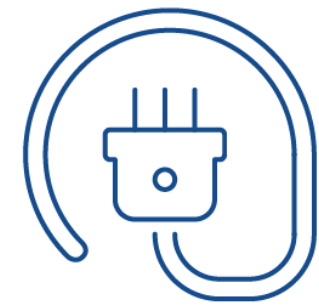


Średnie roczne krajowe zapotrzebowanie na moc oraz zapotrzebowanie maksymalne w dobowych szczytach obciążenia dni roboczych w latach 1980 ÷ 2021

Konieczność zapewnienia bezpieczeństwa dostaw energii elektrycznej



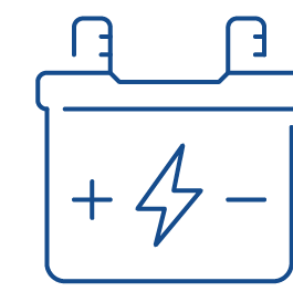
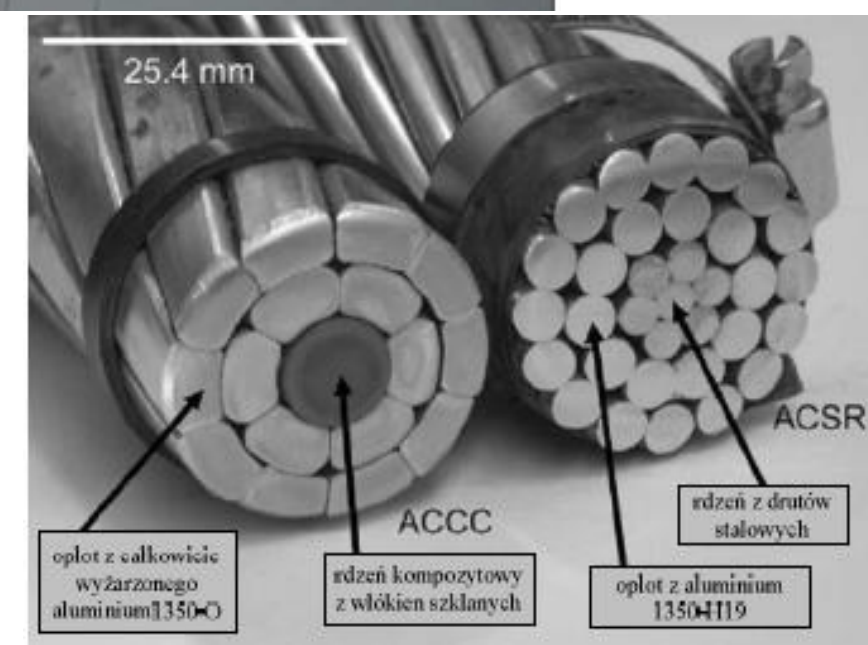
Obecne działania prowadzące do zwiększenia zdolności przesyłowej sieci elektroenergetycznej



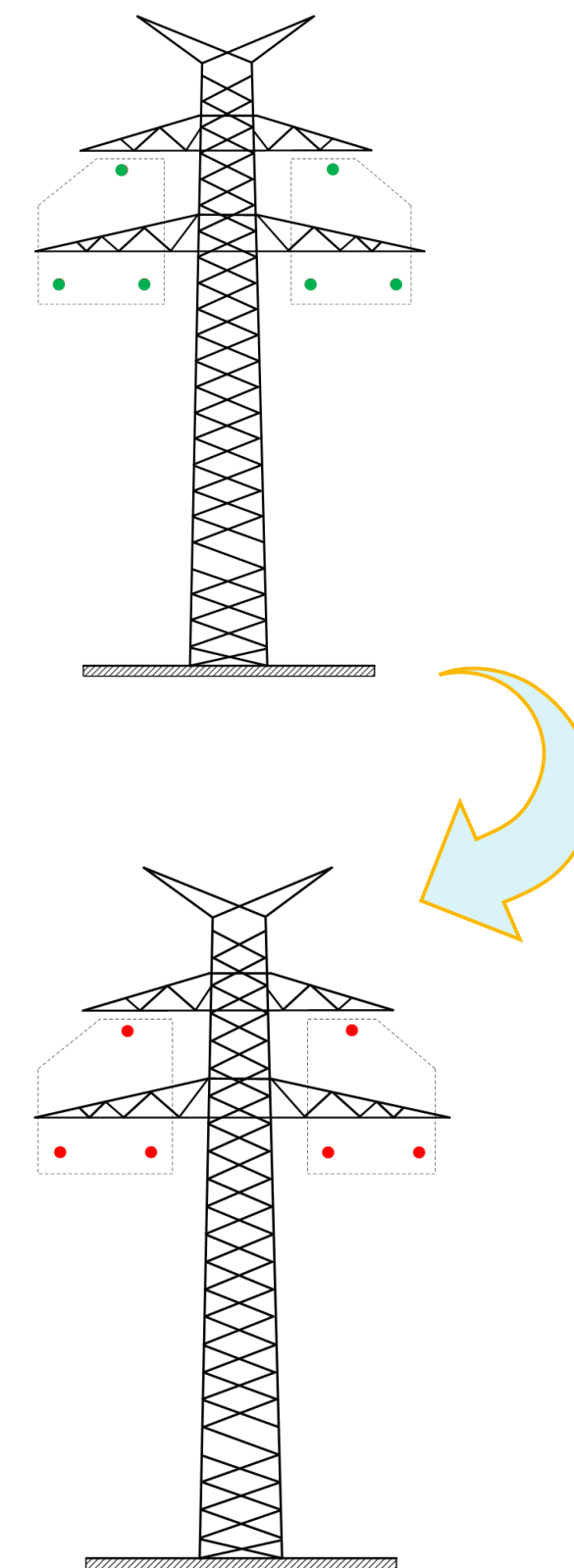
Wymiana przewodów roboczych



Przewody ACCC są produkowane jedynie w wersji z żyłami trapezoidalnymi, co poprawia obciążalność prądową przewodu



Podwyższanie napięć znamionowych



LINIA DWUTOROWA
 2×220 kV

$$P_L = 2 \cdot (\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 1200) \approx 900 \text{ MW}$$

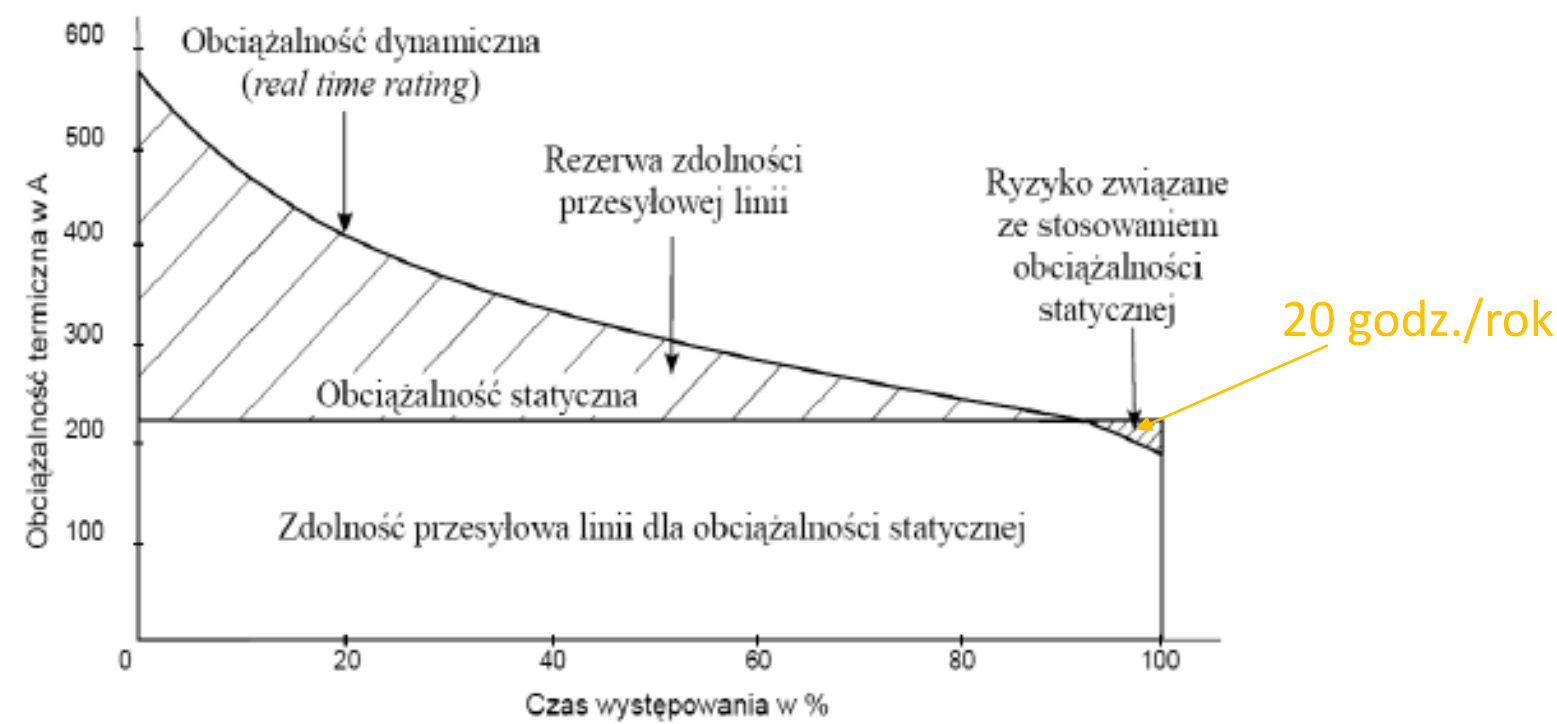
LINIA DWUTOROWA
 2×400 kV

$$P_L = 2 \cdot (\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 2400) \approx 3300 \text{ MW}$$

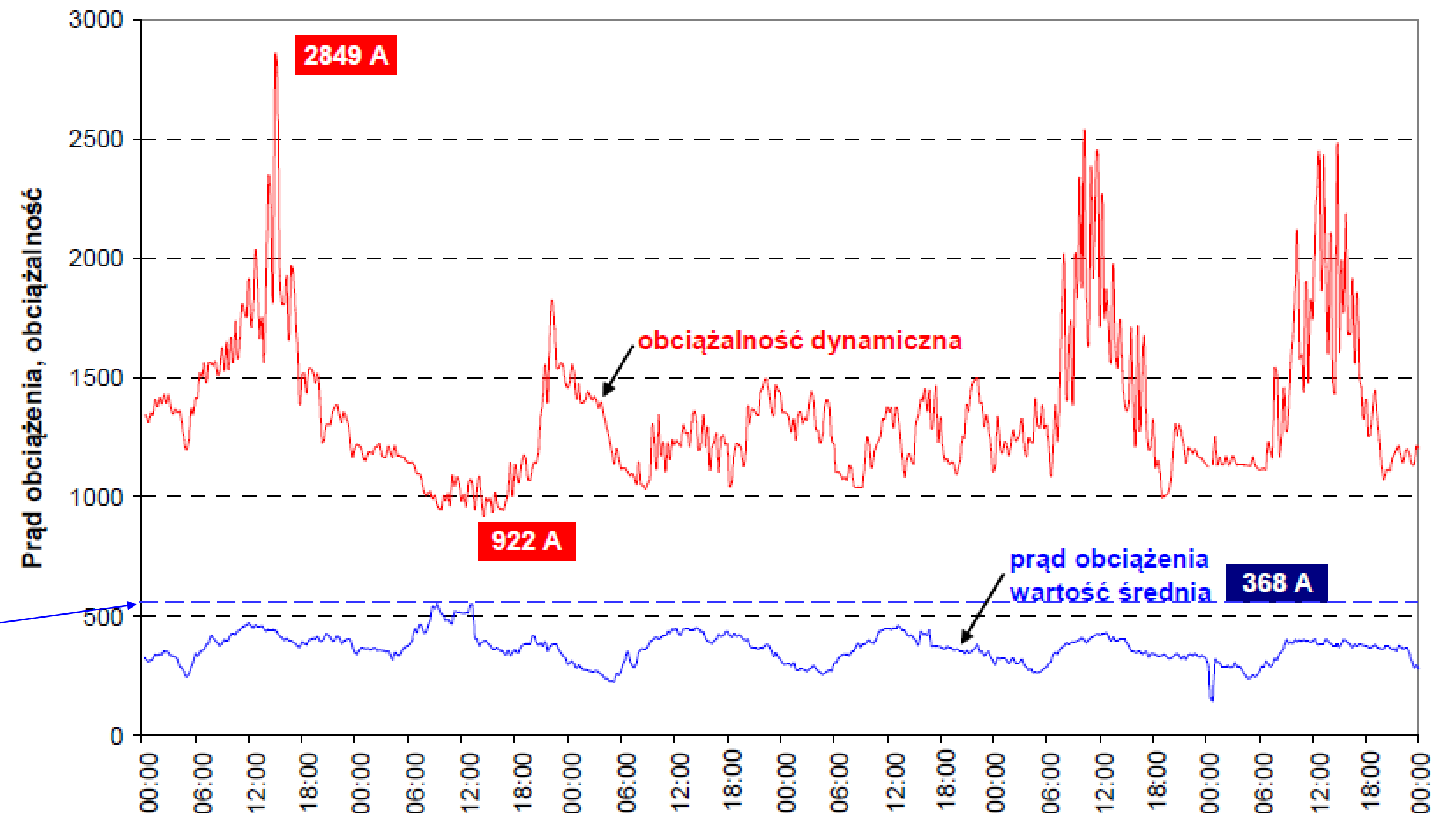
Obecne działania prowadzące do zwiększenia zdolności przesyłowej sieci elektroenergetycznej



Zastosowanie obciążalności dynamicznej



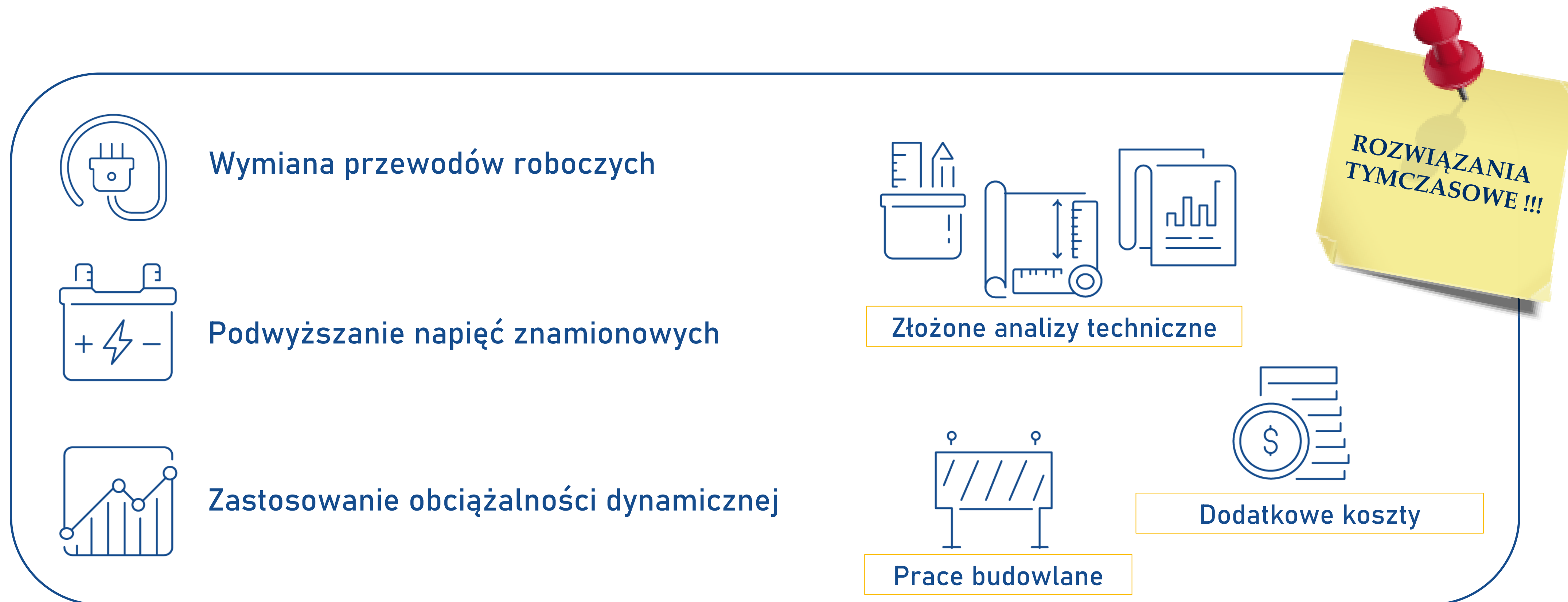
Dynamiczna obciążalność linii 220 kV z przewodami roboczymi AFL-8 525 mm²



Typ przewodu	Obciążalność przewodów wg Zarządzenia nr 29 MGİE		Dopuszczalna obciążalność linii			
	A	%	zaprojektowanych na temperaturę przewodów +40°C		zaprojektowanych na temperaturę przewodów +60°C	
„Letnia” obciążalność prądowa (IV – X)						
AFL-6 240	645	100	325	50	550	85
AFL-8 525	1030		515		875	
„Zimowa” obciążalność prądowa (XI-III)						
AFL-6 240	735	100	625	85	735	100
AFL-8 525	1220		1040		1220	

Temperatura otoczenia: od 12,4 do 32,4 °C Prędkość wiatru: od 0 do 7,6 m/s

Obecne działania prowadzące do zwiększenia zdolności przesyłowej sieci elektroenergetycznej

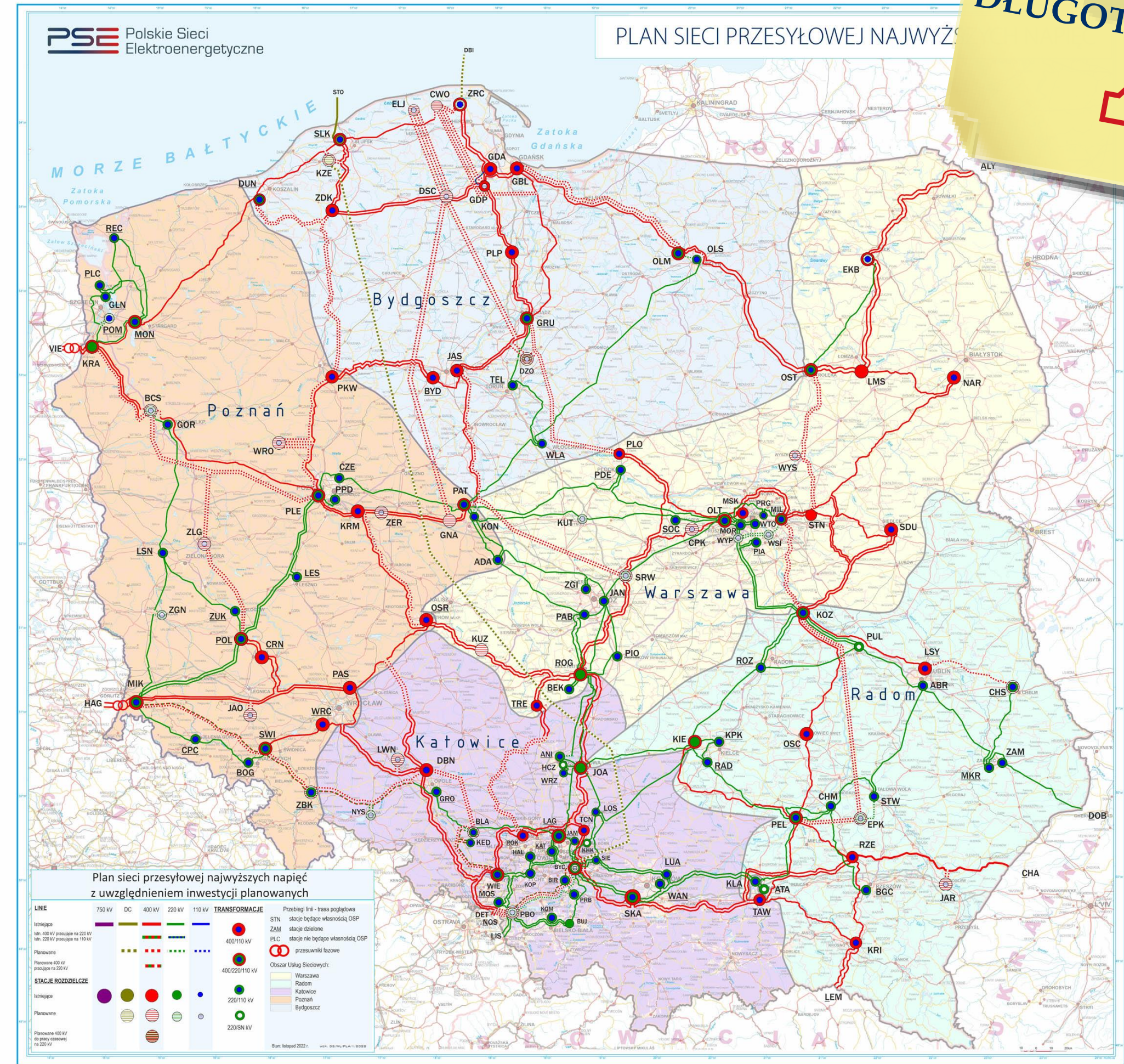


Rozbudowa sieci przesyłowej

Stan aktualny



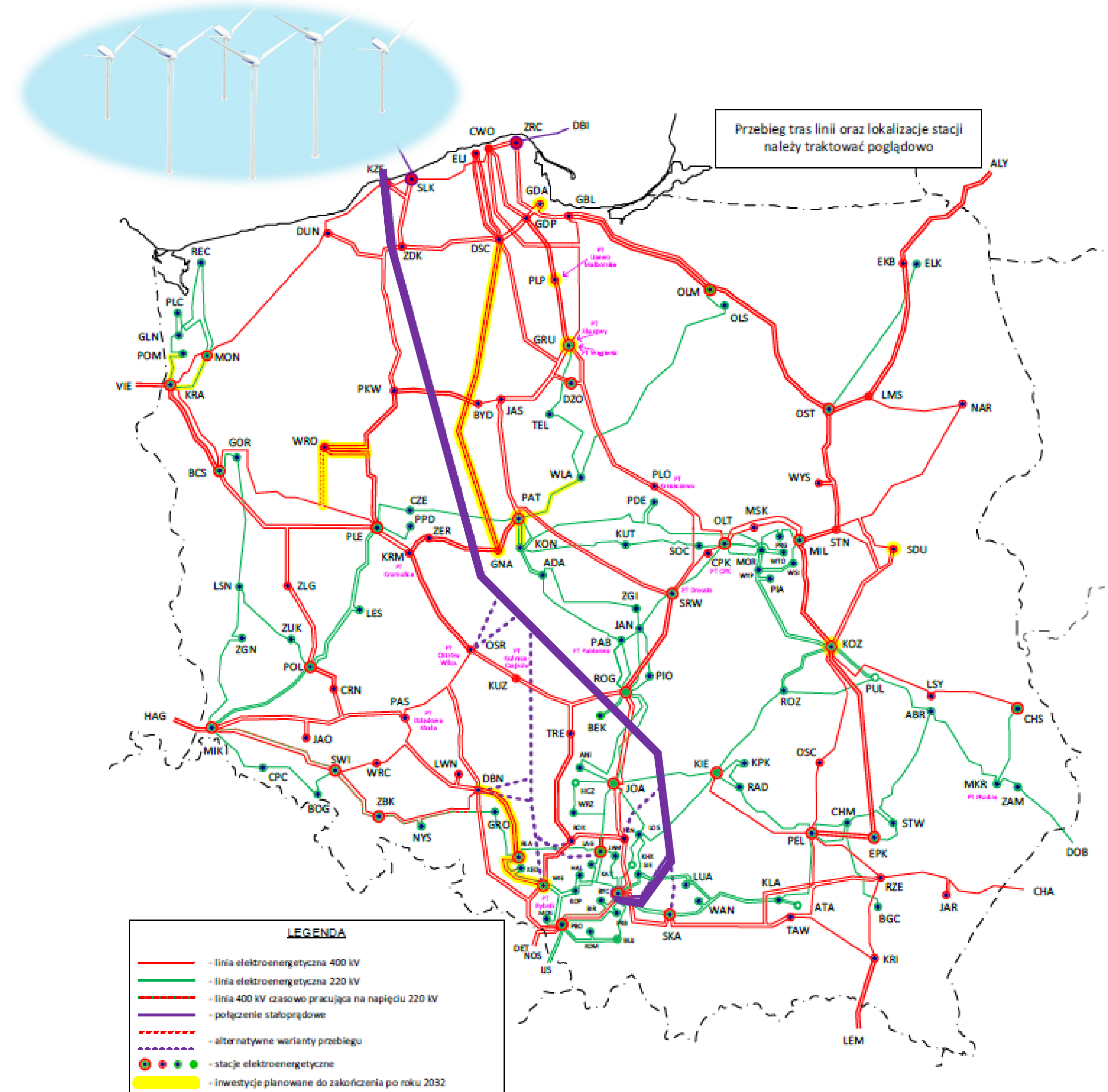
Plan do 2032 roku



Przyszłość Krajowego Systemu Elektroenergetycznego?

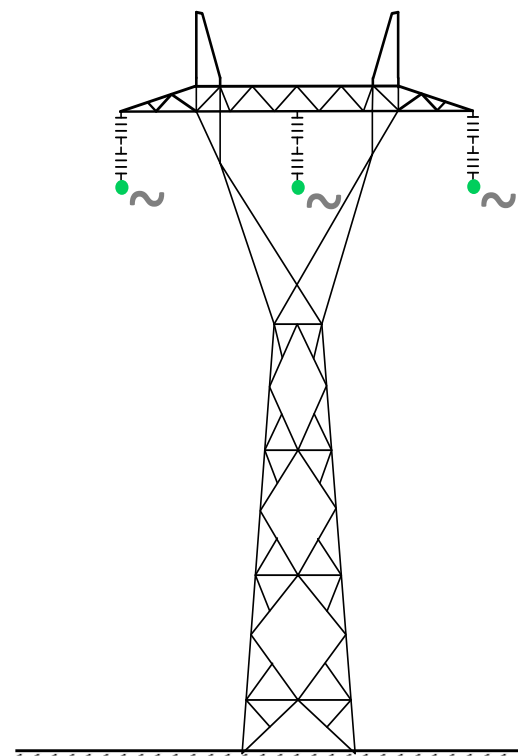
Zestawienie efektów zadań inwestycyjnych na lata 2023-2032, po roku 2032 oraz w latach 2023-2036

Rodzaj efektu	2023-2032	Po roku 2032	2023-2036
Przyrost długości torów linii HVDC [km] z czego:	775	0	775
połączenie kablowe HVDC Polska-Litwa	175	0	175
połączenie napowietrzne HVDC, północ-południe	600	0	600
Konwertery	3	0	3
Przyrost długości torów linii 400 kV [km] z czego:	4 339	886	5 225
nowe linie	4 875	886	5 761
linie wyłączane z eksploatacji	536	0	536
Przyrost długości torów linii 220 kV [km] z czego:	-259	0	-259
nowe linie	233	0	233
linie wyłączane z eksploatacji	492	0	492
Długość torów modernizowanych linii 400 kV [km]	1 820	0	1 820
Długość torów modernizowanych linii 220 kV [km]	1 334	150	1 484
Przyrost zdolności transformacji 400/220 kV [MVA] z czego:	4 500	1 000	5 500
nowe transformatory	4 500	1 000	5 500
transformatory wyłączane z eksploatacji	0	0	0
Przyrost zdolności transformacji 400/110 kV [MVA] z czego:	20 220	1 770	21 990
nowe transformatory	23 220	1 770	24 990
transformatory wyłączane z eksploatacji	3 000	0	3 000
Przyrost zdolności transformacji 220/110 kV [MVA] z czego:	3 758	-205	3 580
nowe transformatory	11 155	275	11 430
transformatory wyłączane z eksploatacji	7 370	480	7 850
Przyrost zdolności transformacji 110/SN kV [MVA]:	80	0	80
Przyrost zdolności kompensacji mocy biernej [MVar] z czego:	2 100	0	2 100
nowe dławiki [MVar]	1 050	0	1 050
nowe kompensatory synchroniczne [MVar]	1 050	0	1 050

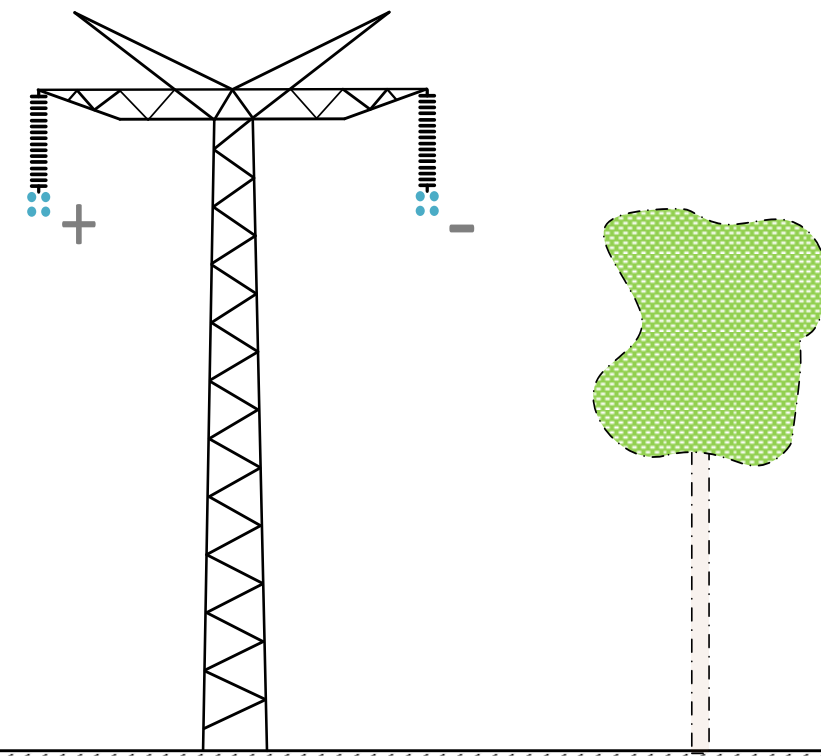


Rozbudowa sieci przesyłowej – warianty

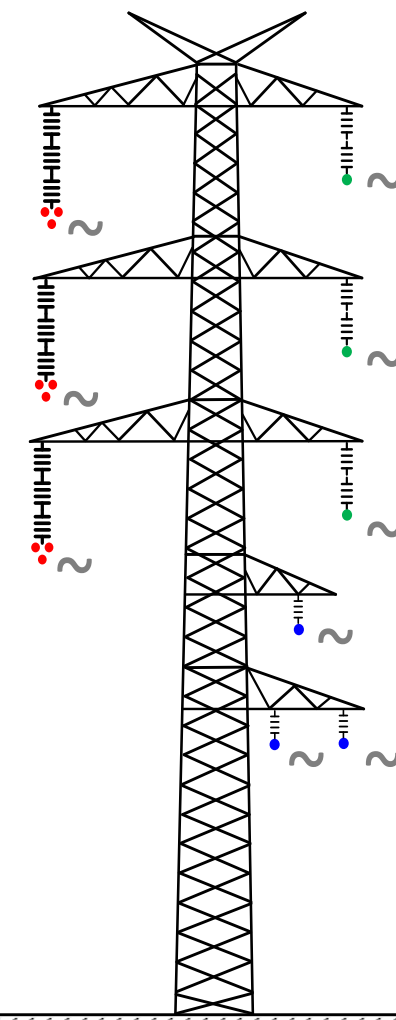
Klasyczne linie prądu przemiennego HVAC



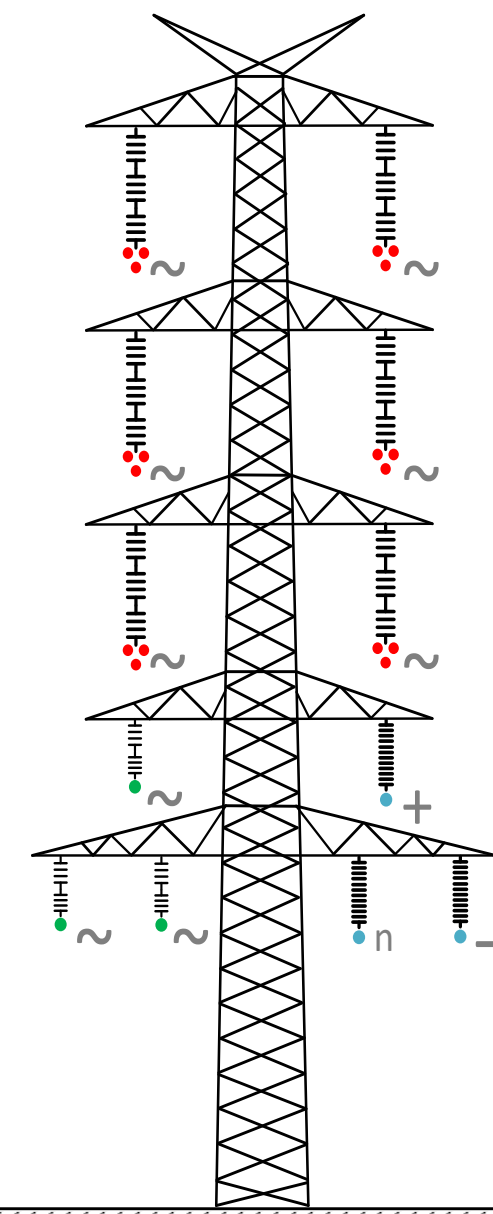
Linie prądu stałego HVDC



Wielotorowe, w tym wielonapięciowe, linie prądu przemiennego (WWLN)



Linie hybrydowe HVAC/HVDC





Charakterystyka

- Linie jednotorowe lub dwutorowe jednonapięciowe
- Każdy tor prądowy tworzą trzy przewody fazowe stanowiące wspólny układ trójfazowy
- Rozpływ mocy w sieci HVAC kształtowany przez moce wytwarzane w poszczególnych węzłach
- Praca synchroniczna
- $f = 50 \text{ Hz}$ lub 60 Hz
- Występowanie: powszechne

Zalety

- ✓ Bogate doświadczenia eksploatacyjne
- ✓ Synchroniczna praca całego systemu
- ✓ Szeroko rozpoznane modele elementów

Wyzwania

- ✗ Ograniczona możliwość sterowania przepływami mocy
- ✗ Ograniczona długość odcinków linii
- ✗ Rosnący opór społeczny przed budową nowych odcinków

Wielotorowe, wielonapięciowe linie napowietrzne (WWLN)

Charakterystyka

- Linie wielotorowe, w których co najmniej dwa tory prądowe prowadzone na wspólnej konstrukcji wsporczej mają różne napięcia znamionowe
- $f = 50 \text{ Hz}$ lub 60 Hz
- Występowanie: Austria, Czechy, Holandia, Niemcy, Polska, USA

Zalety

- ✓ Ułatwienie prowadzenia ciągów liniowych na terenach trudnych do zagospodarowania (tereny silnie zurbanizowane z dużą gęstością zabudowy, leśne, górzyste)
- ✓ Usprawnienie rozbudowy sieci elektroenergetycznej
- ✓ Zmniejszenie oddziaływania elementów sieci przesyłowej na środowisko i krajobraz

Wyzwania

- ✗ Zagrożenie wystąpienia zakłóceń międzysystemowych
- ✗ Utrudniona eksploatacja, w tym realizacja prac pod napięciem
- ✗ Niesymetria geometryczna rzutująca na pracę linii napowietrznej i jej otoczenia sieciowego



Źródło: <https://www.hoogspanningsnet.com/mastsoortenclassificatie/mastbenutting/>



Źródło grafiki: <https://alchetron.com/Pacific-DC-Intertie>



Źródło grafiki: Texas Instruments

Charakterystyka

- Niezależność biegunów
- Wymagane co najmniej dwa przekształtniki energoelektroniczne
- Obecnie występuje najczęściej w konfiguracji punkt – punkt, łącząc dwa węzły w SEE
- W zależności od zastosowanej technologii energoelektronicznej: LCC oraz VSC
- $f = 0$ Hz
- Występowanie: Argentyna, Brazylia, Chiny, Dania, Indie, Szwecja, USA

Zalety

- ✓ Brak ograniczeń odległości przesyłu ze względu na brak zjawisk falowych i strat mocy biernej, nie wymaga pracy synchronicznej
- ✓ Nie występują problemy związane ze stabilnością napięciową
- ✓ Łatwość regulacji kierunku przepływu mocy
- ✓ Zwiększone zdolności przesyłowe:

$$\frac{P_{\text{HVDC}}}{P_{\text{HVAC}}} = \frac{2I_{\text{HVDC}}U_{\text{HVDC}}}{3I_{\text{HVAC}}\frac{U_{\text{HVAC}}}{\sqrt{3}}} \approx 1,15 \frac{U_{\text{HVDC}}}{U_{\text{HVAC}}}$$

Wyzwania

- ✗ Zróżnicowane rodzaje technologii, warianty przesyłu, typy sprzętu; zarządzanie stanowi wyzwanie z uwagi na brak doświadczeń krajowych
- ✗ Technologia uznawana za kosztowną w porównaniu z systemami HVAC (opłacalna powyżej 500 km)
- ✗ Brak przepisów krajowych m.in. dotyczących dopuszczalnych PEM

Linie hybrydowe HVAC/HVDC

Charakterystyka

- Na wspólnej konstrukcji wsporczej: tor HVAC oraz HVDC
- Łączą zalety i wady linii HVAC i HVDC we wspólnej infrastrukturze wieżowej, przy niezauważalnej zmianie efektu wizualnego
- $f = 50/60 \text{ Hz}$ oraz 0 Hz
- Występowanie: Chiny, Szwajcaria

Zalety

- ✓ Tor HVDC zapewnia lepszą kontrolę przepływu mocy oraz poprawę warunków napięciowych, a system HVAC zapewnia prostą transformację poziomów napięcia dostosowanych do potrzeb odbiorców
- ✓ Z punktu widzenia operatorów systemów przesyłowych bardzo korzystne rozwiązanie pod względem zapewnienia elastyczności sterowania oraz zwiększenia zdolności przesyłowych zrealizowane poprzez budowę (lub konwersję) pojedynczej linii hybrydowej

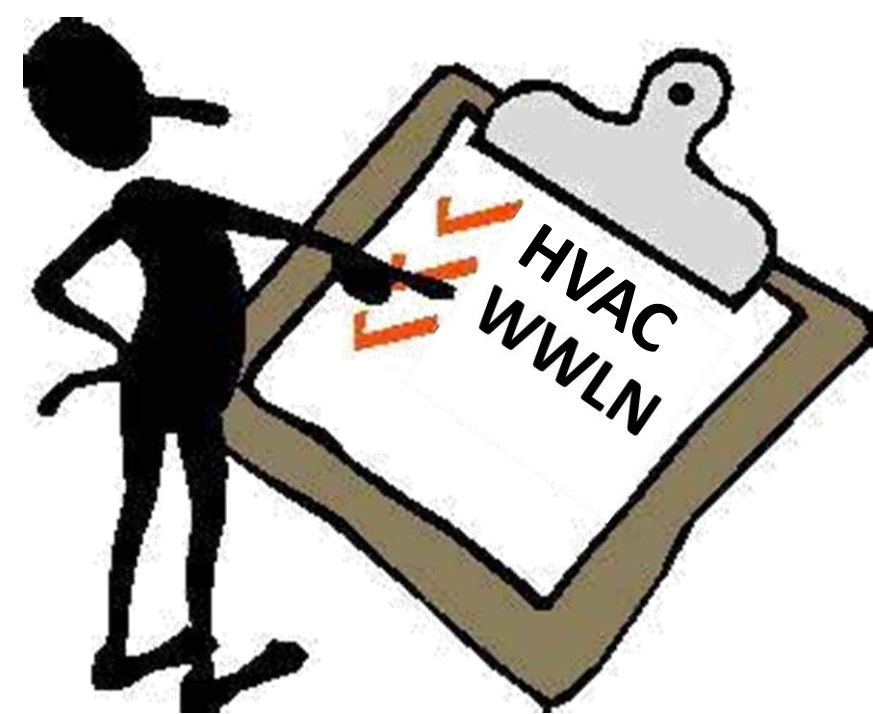
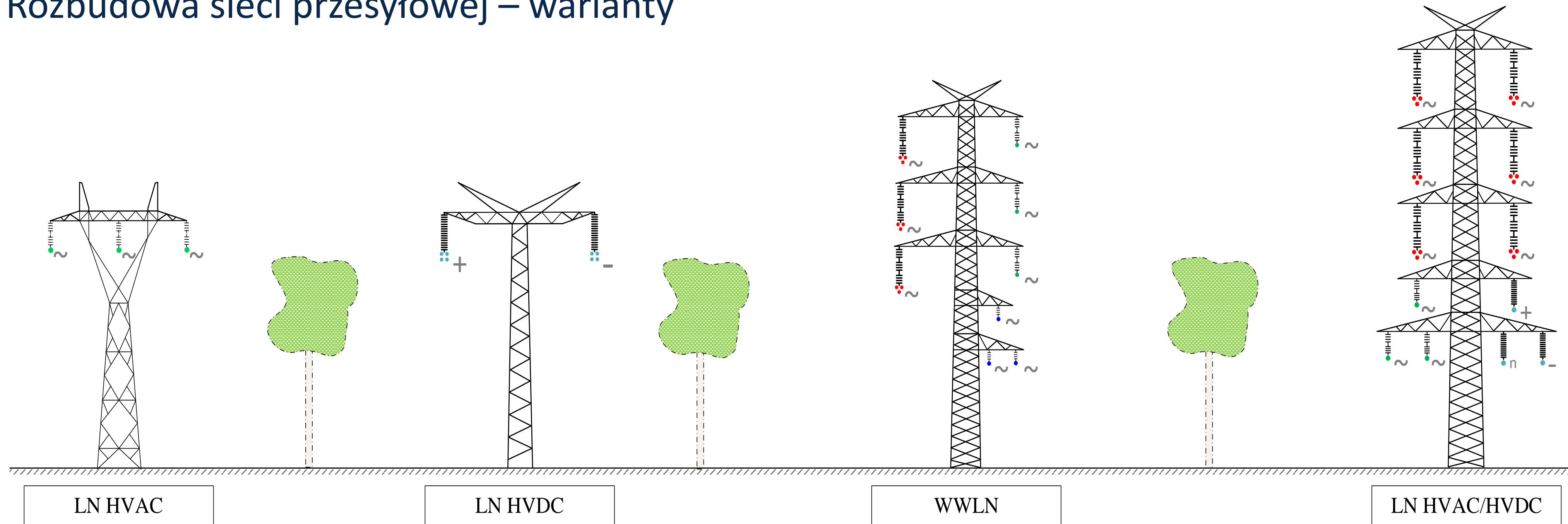
Wyzwania

- ✗ Wzajemny wpływ torów HVAC i HVDC skutkujący m.in. skomplikowaniem modeli matematycznych oraz komplikacją EAZ, indukowaniem się napięć przemiennych w sieci HVDC na skutek bliskiej pracy toru HVAC
- ✗ Wzmożenie efektów koronowych dla każdego z torów HVAC i HVDC, w efekcie zwiększenie hałasu
- ✗ „Hybrydowy” charakter pola elektromagnetycznego wokół linii potęgający obawy społeczne



Źródło grafiki: https://glosbe.com/fb_img/1440x1440/9M332831_Langes_Feld_10c5.JPG

Rozbudowa sieci przesyłowej – warianty



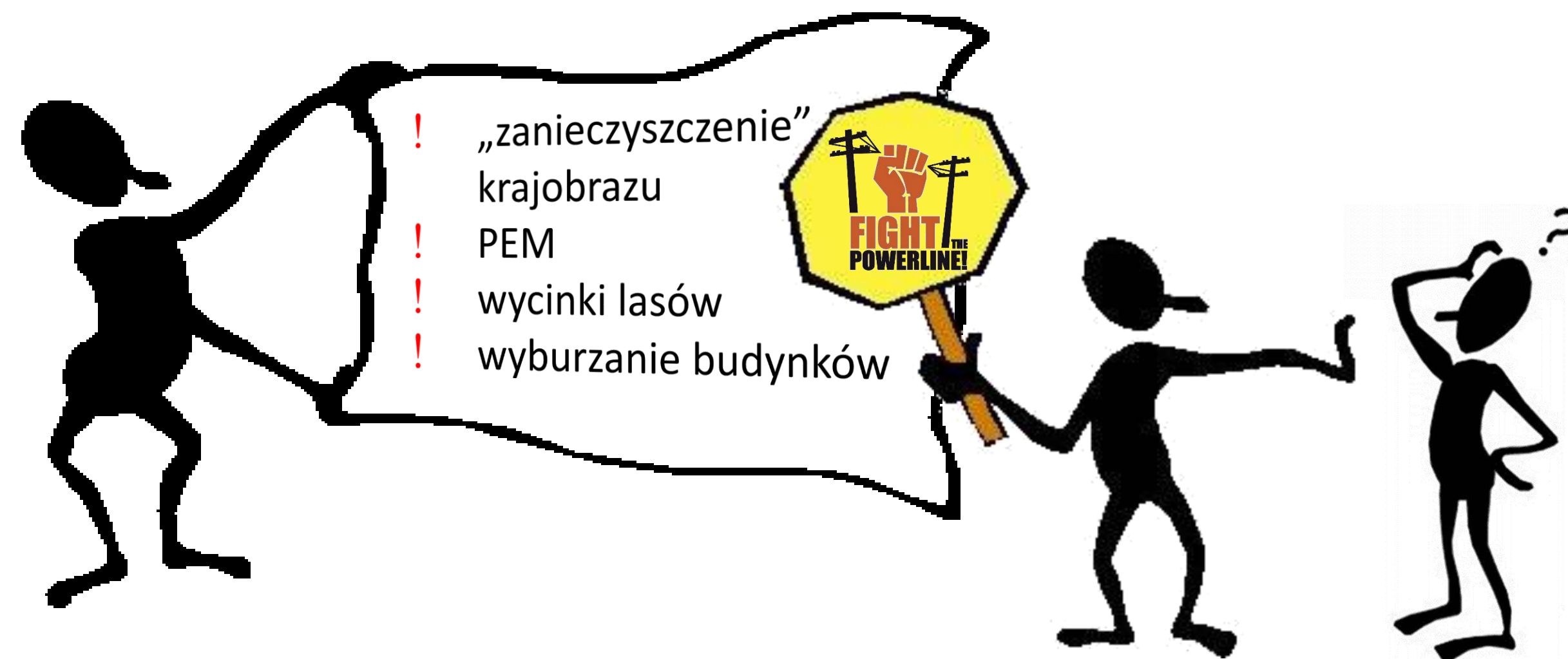
WNIOSEK

Sieć HVAC jest podstawą obecnych SEE i należy ją rozwijać...

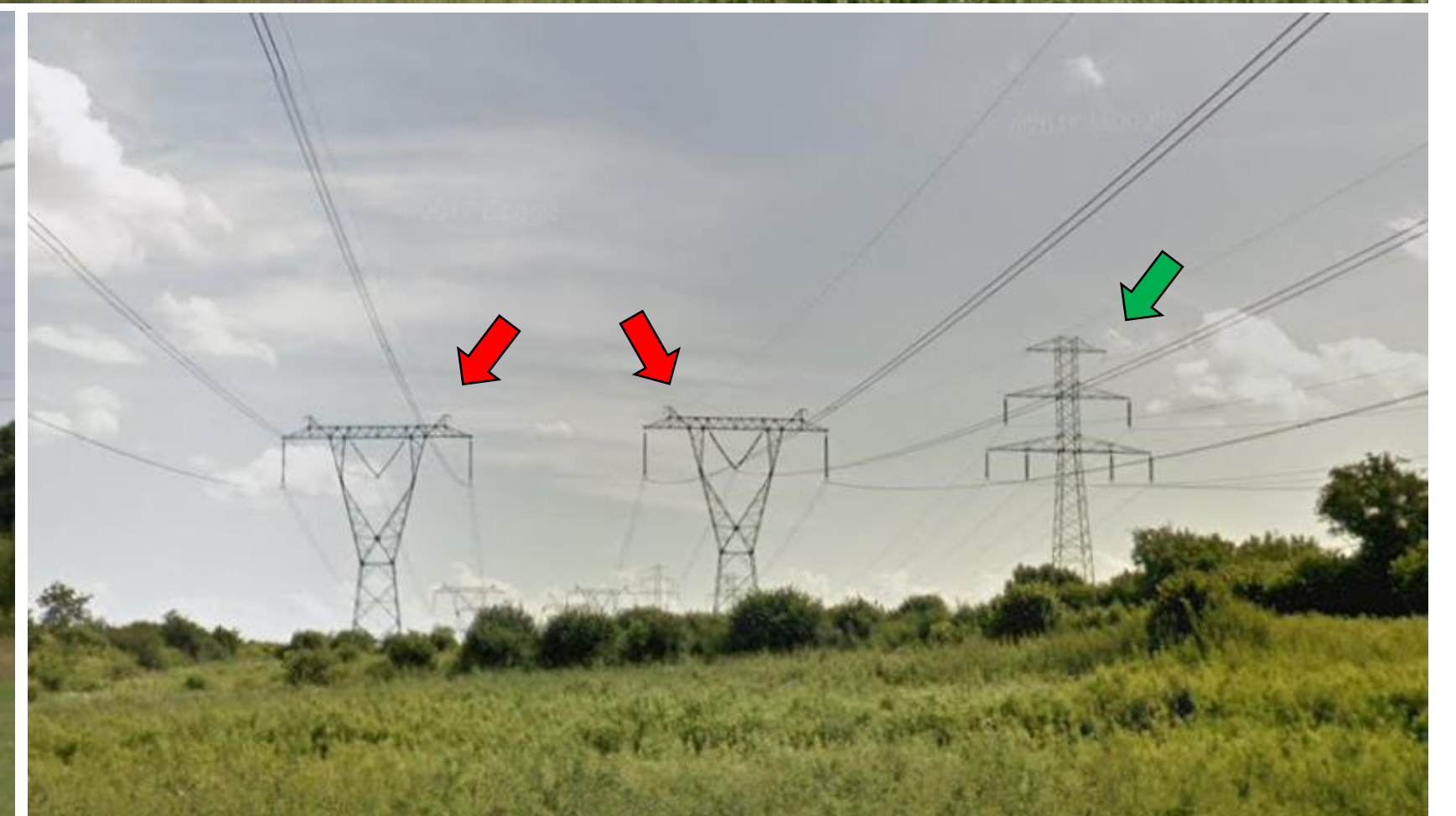
...przyszłościowo należy poznawać nowe rozwiązania



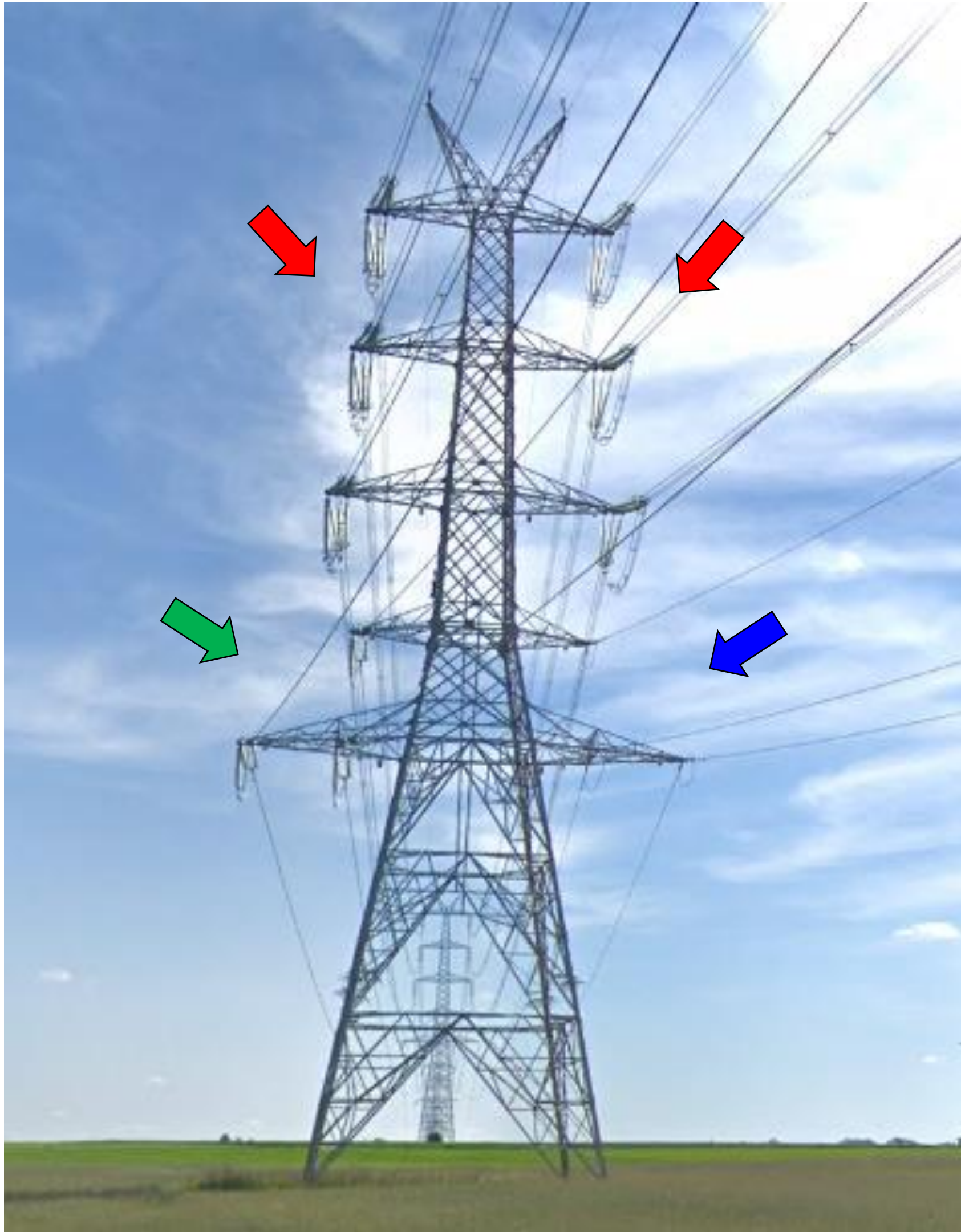
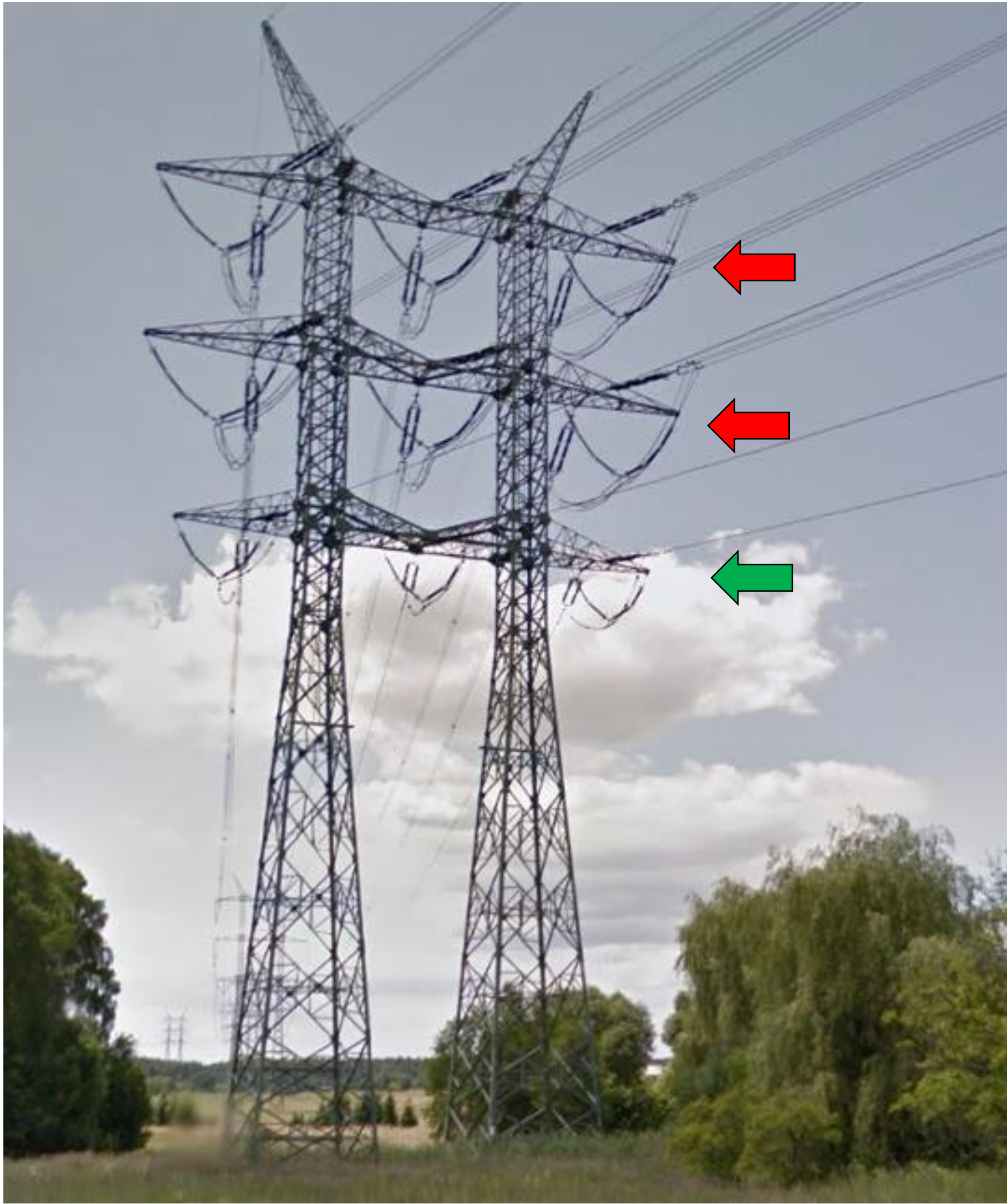
Sprzeciw społeczny dla budowy linii napowietrznych WN i NN



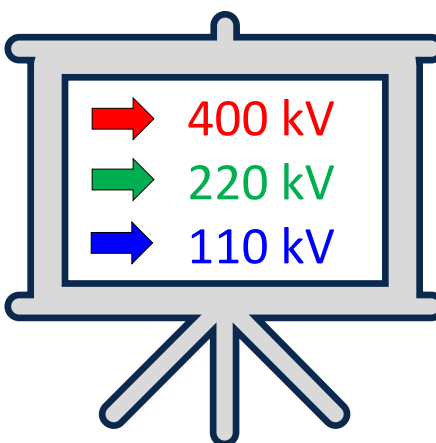
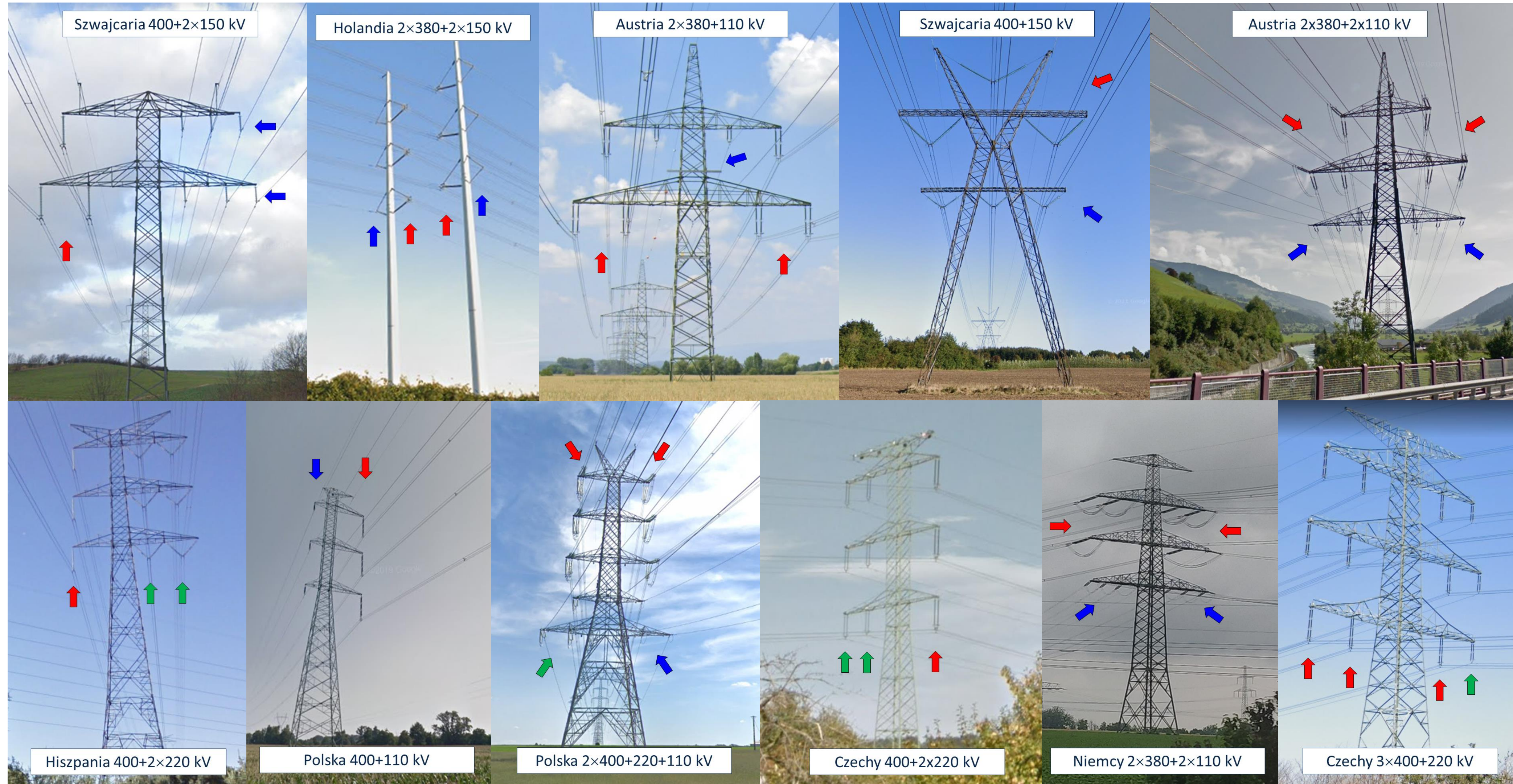
Intensyfikacja wykorzystania terenu przeznaczanego pod budowę linii napowietrznych



Intensyfikacja wykorzystania terenu przeznaczzonego pod budowę linii napowietrznych

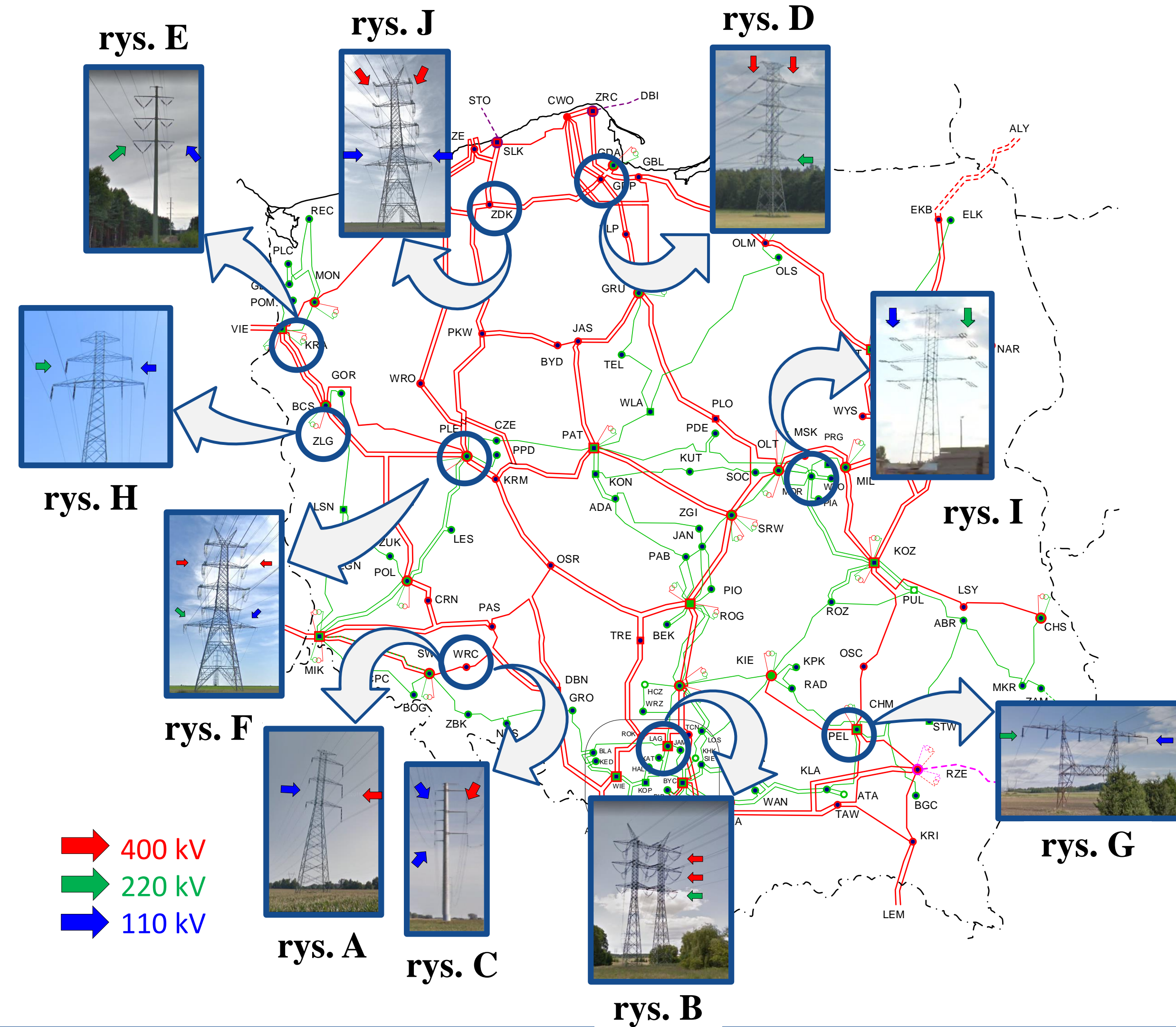


Znaczne różnicowanie układów prowadzenia torów prądowych na wspólnej konstrukcji wsporczej

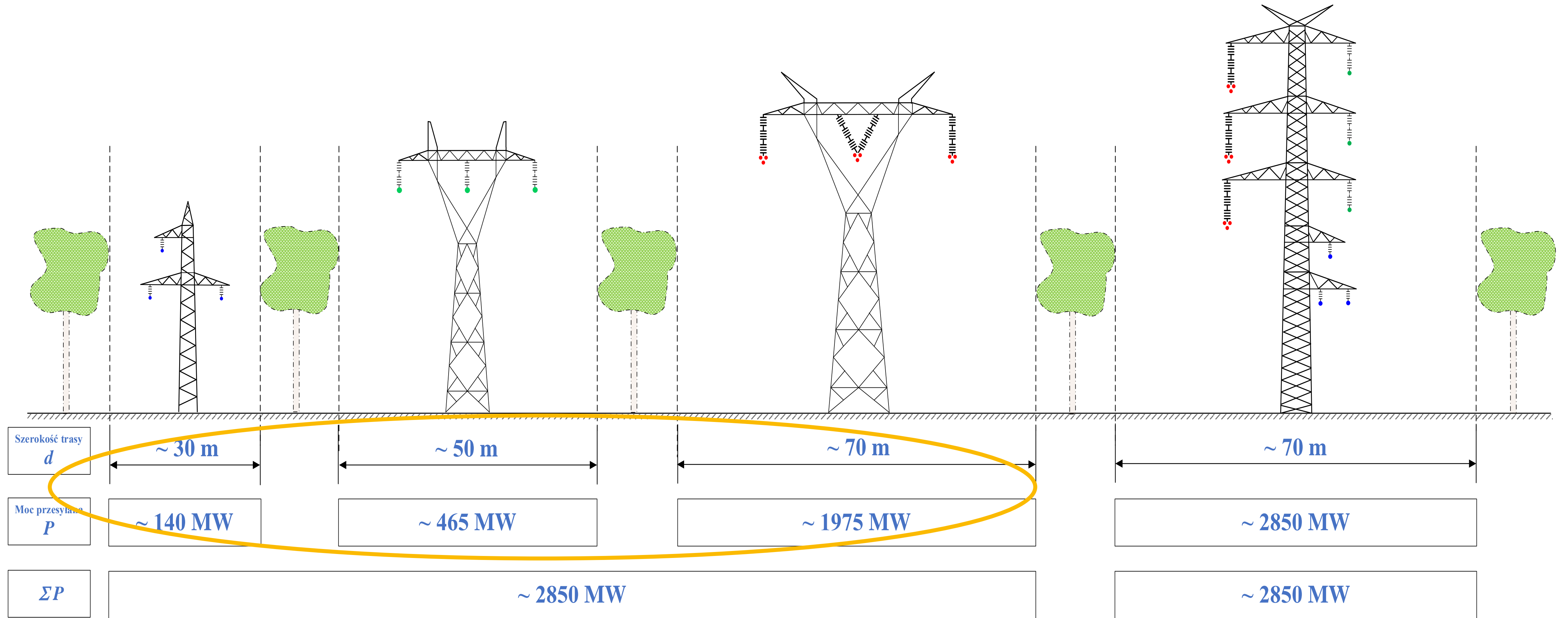


WWLN w Polsce

Numer rysunku	Lokalizacja	Relacja	Długość odcinka wielonapięciowego
A	PSE Południe	Świebodzice-Wrocław (400 + 110 kV)	14 km
B	PSE Południe	Łągisza – Rokitnica (400 kV)	4,8 km
		Łągisza – Tuczna (400 kV)	
C	PSE Południe	Łągisza – Joachimów (220 kV)	6,5 km
		Dobrzeń – Wrocław (400 kV)	
		Żórawina – Wrocław (110 kV)	
D	PSE Północ	Bielany – Wrocław (110 kV)	5,3 km
		Żarnowiec-Gdańsk Przyjaźń (400 kV)	
E	PSE Zachód	Gdańsk Przyjaźń-Gdańsk Błonia (400 kV)	≈ 10 km
		Gdańsk Przyjaźń- Gdańsk 1 (220 kV)	
F	PSE Zachód	Leśniów – Zielona Góra (220 kV)	31,2 km
		Leśniów-Łużycka i Krośnieńska-Energetyków (110 kV)	
G	PSE Zachód	Plewiska-Kromolice (400, 110 kV)	≈ 45 km
		Plewiska-Konin (400 kV)	
		Plewiska-Poznań Płd. (220 kV)	
H	PSE Wschód	Klikowa-Niziny (220 kV – nieczynny)	9 km
		110 kV: m.in. Połaniec II-Grzybów, Połaniec II- Cegielnia Oleśnica, Szczucin-Cegielnia Oleśnica, Oleśnicka-Szczucin, Niedomice-Oleśnicka	
I	PSE Zachód	Krajnik-Glinki (220 kV)	7,5 km
		Redlica-Glinki (110 kV – w gabarytach 220 kV)	
J	PSE Centrum	Mory-Towarowa (220 kV, 110 kV – w gabarytach 220 kV)	≈ 2,5 km
PLANOWANA	PSE Północ	Żydowo - Żydowo-Kierzkowo (2×400 kV, 2×110 kV)	≈ 2,5 km
	PSE Południe	Byczyna-Podborze (2×400 + 220 kV)	60-75 km



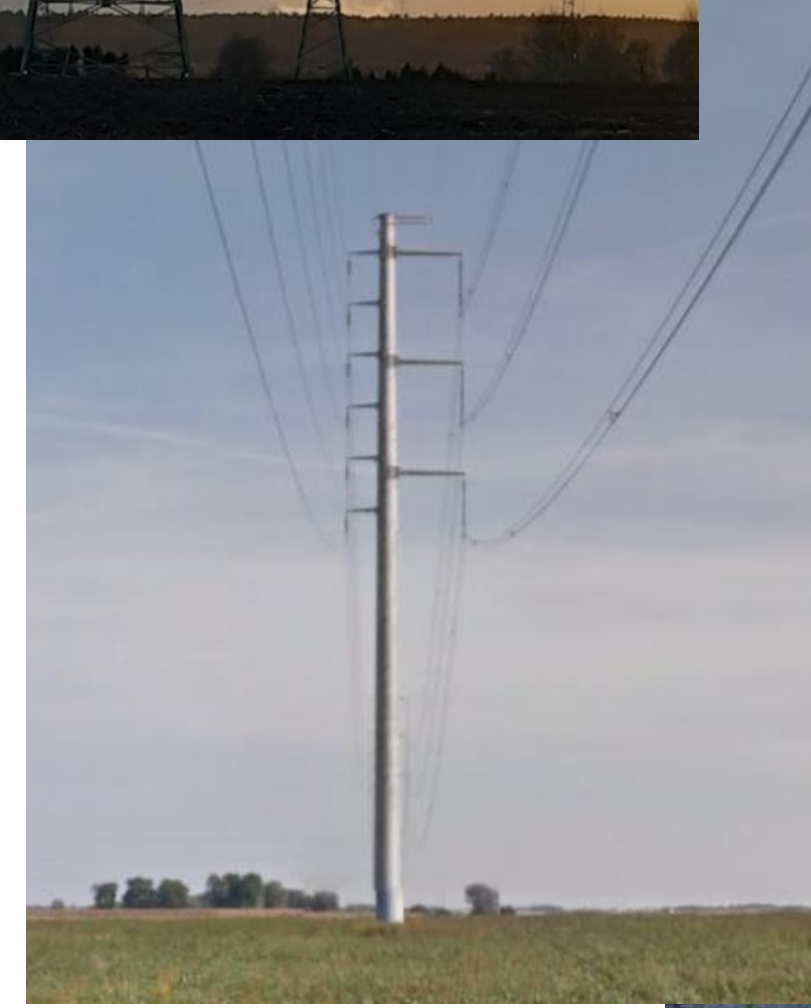
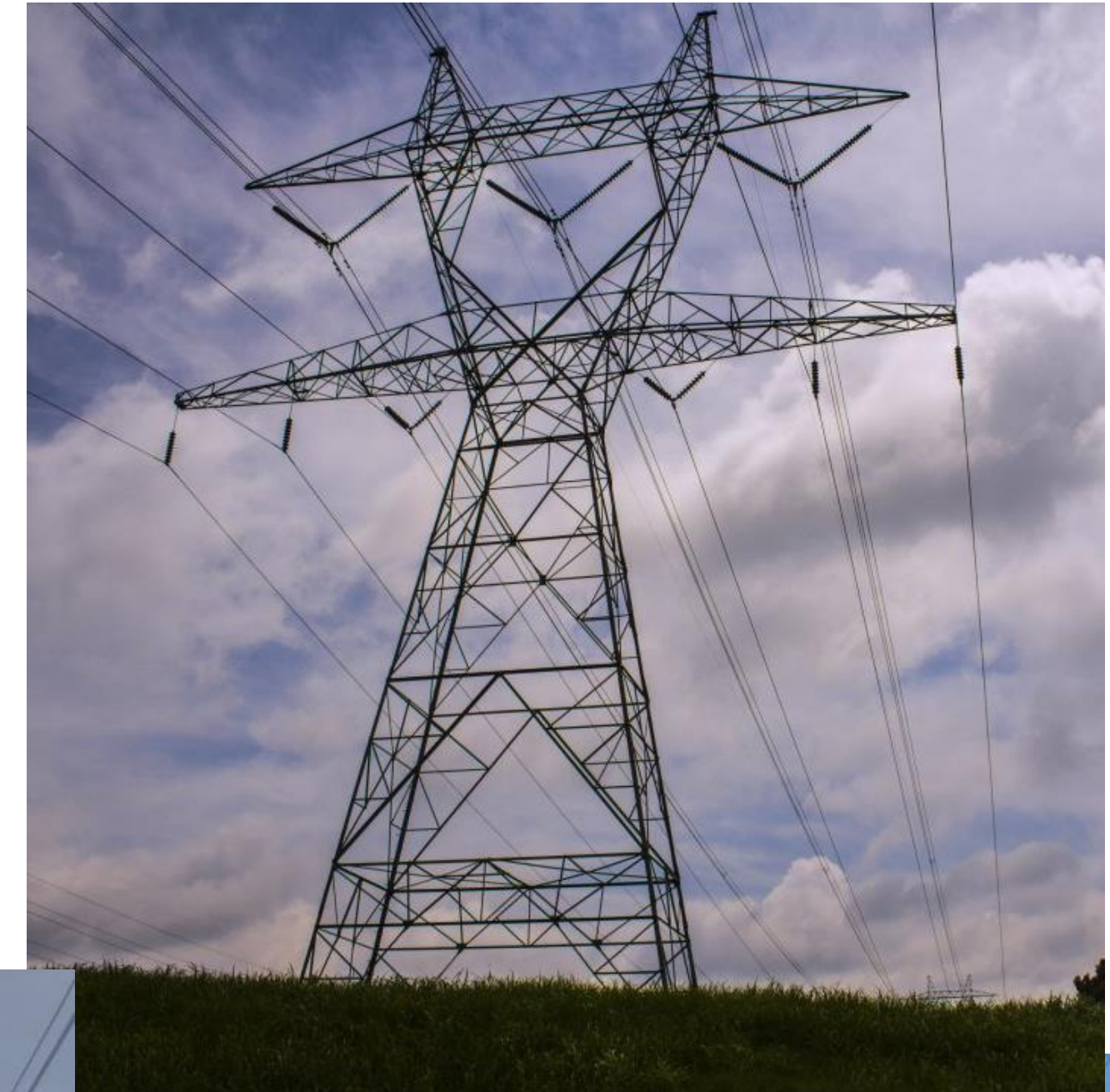
Intensyfikacja wykorzystania terenu przeznaczzonego pod budowę linii napowietrznych



$$\Sigma P / \Sigma d = 2850 / 150 = 19,0 \text{ MW/m} \rightarrow 100\%$$

$$P/d = 2850 / 70 = 40,7 \text{ MW/m} \rightarrow 214\%$$

WWLN krokiem ku rozbudowie sieci przesyłowej a obawy społeczne



Zródło grafiki: TransGrid, Energy.com

Obowiązujące przepisy i normy

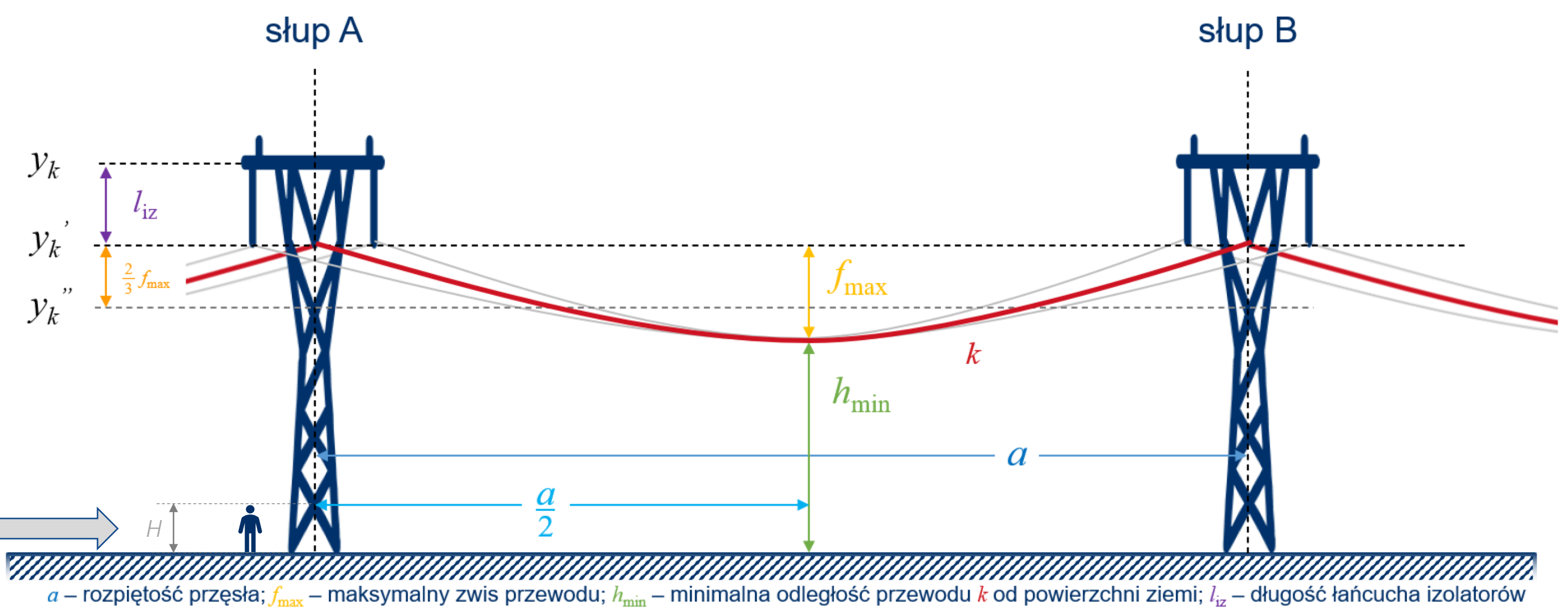
Zagadnienia związane z oddziaływaniem na środowisko pól elektromagnetycznych wytwarzanych przez linie wysokiego napięcia regulują przepisy:

- **w zakresie ochrony przed oddziaływaniem pola elektromagnetycznego:** rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 17 grudnia 2019 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pola elektromagnetycznego w środowisku oraz sposobów sprawdzania dotrzymania tych poziomów (Dz. U. 2019, poz. 1883);
- **w zakresie projektowania i budowy linii elektroenergetycznych:** norma PN-EN 50341-1:2005 Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 45 kV. Część 1: Wymagania ogólne. Specyfikacje wspólne.

Zgodnie z obowiązującymi przepisami dopuszczalne poziomy pola elektrycznego i magnetycznego o częstotliwości 50 Hz dla miejsc dostępnych dla ludzi wynoszą:

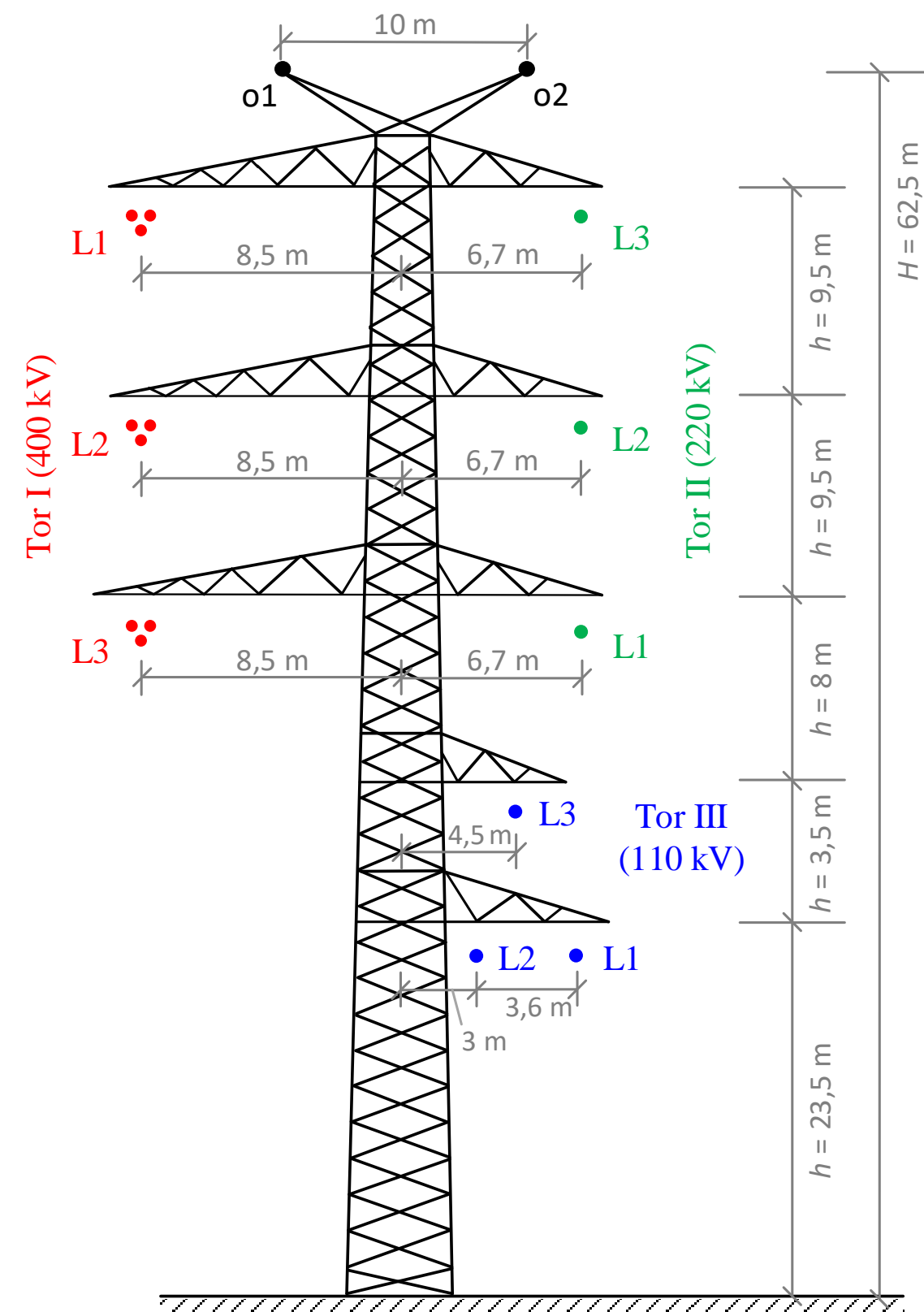
- Składowa **elektryczna**:
 - w miejscach dostępnych dla ludzi: **10 kV/m**;
 - dla terenów pod zabudowę mieszkalną: **1 kV/m**;
- Składowa **magnetyczna**: **60 A/m**.

Wartość natężenia pola elektromagnetycznego określa się nad powierzchnią ziemi lub innymi powierzchniami, na których mogą przebywać ludzie - na wysokości **2 m**.

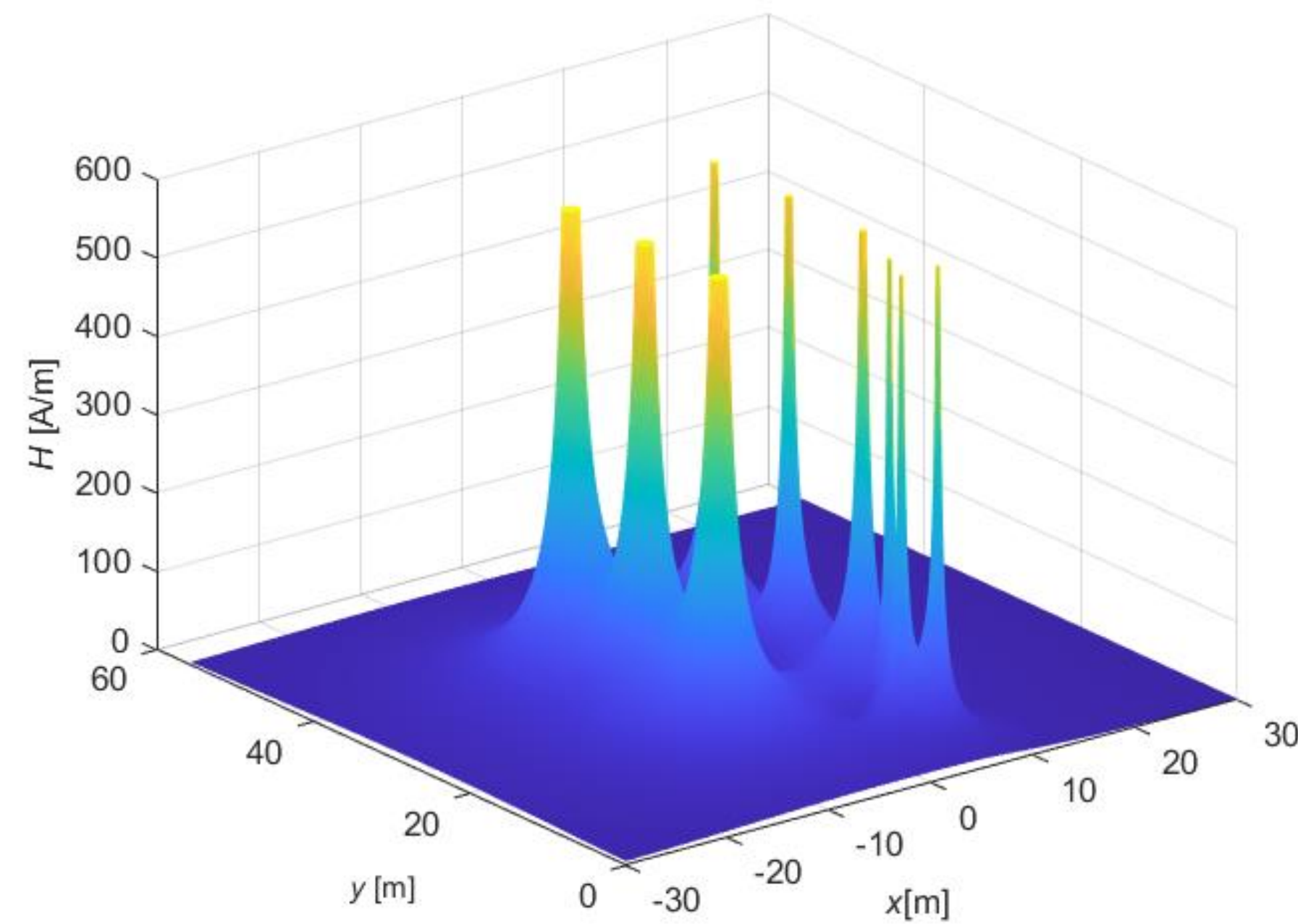


Rozkład pola elektromagnetycznego w otoczeniu WWLN

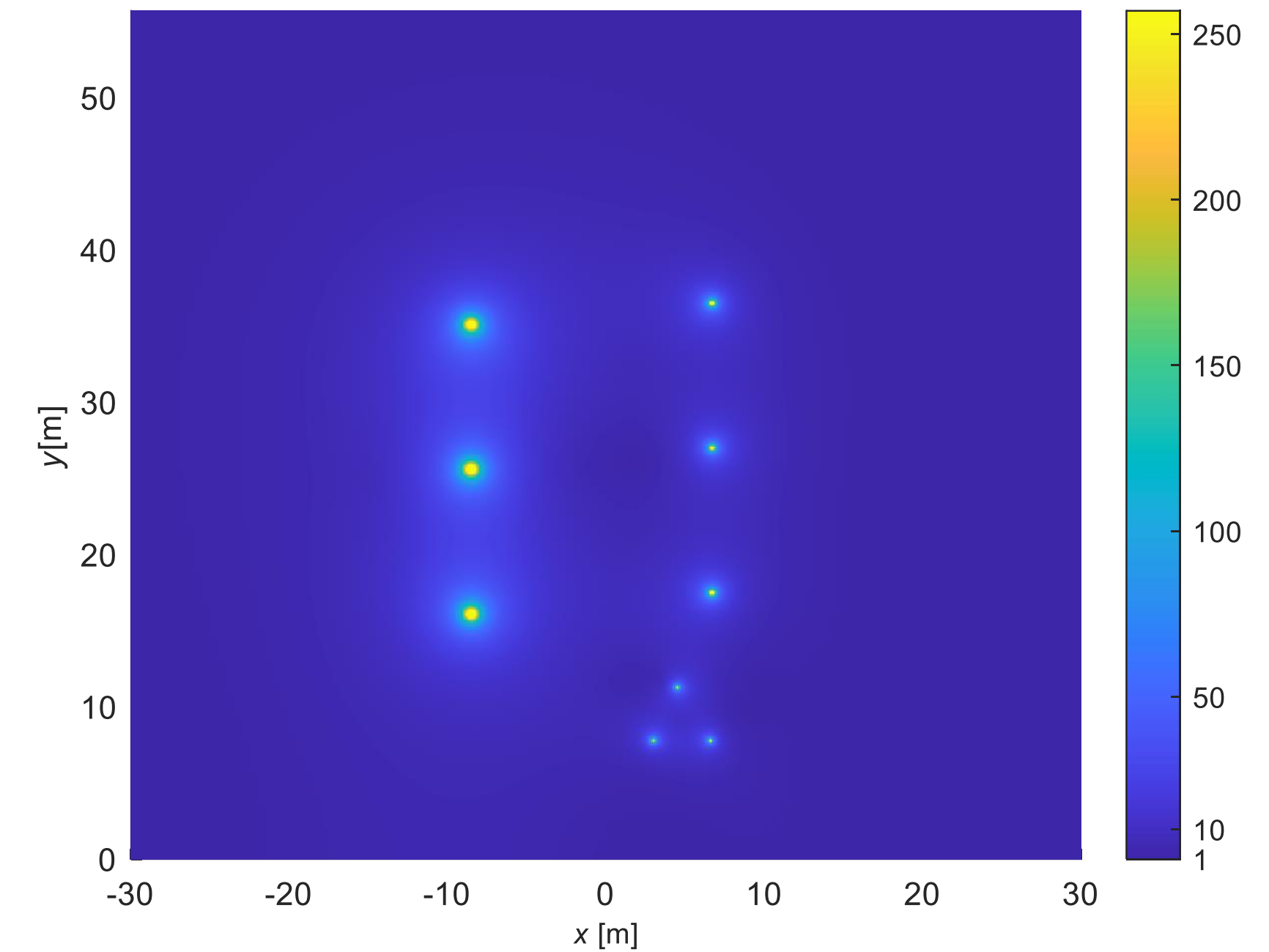
Analizowana WWLN



Rozkład natężenia pola magnetycznego



Rozkład natężenia pola elektrycznego

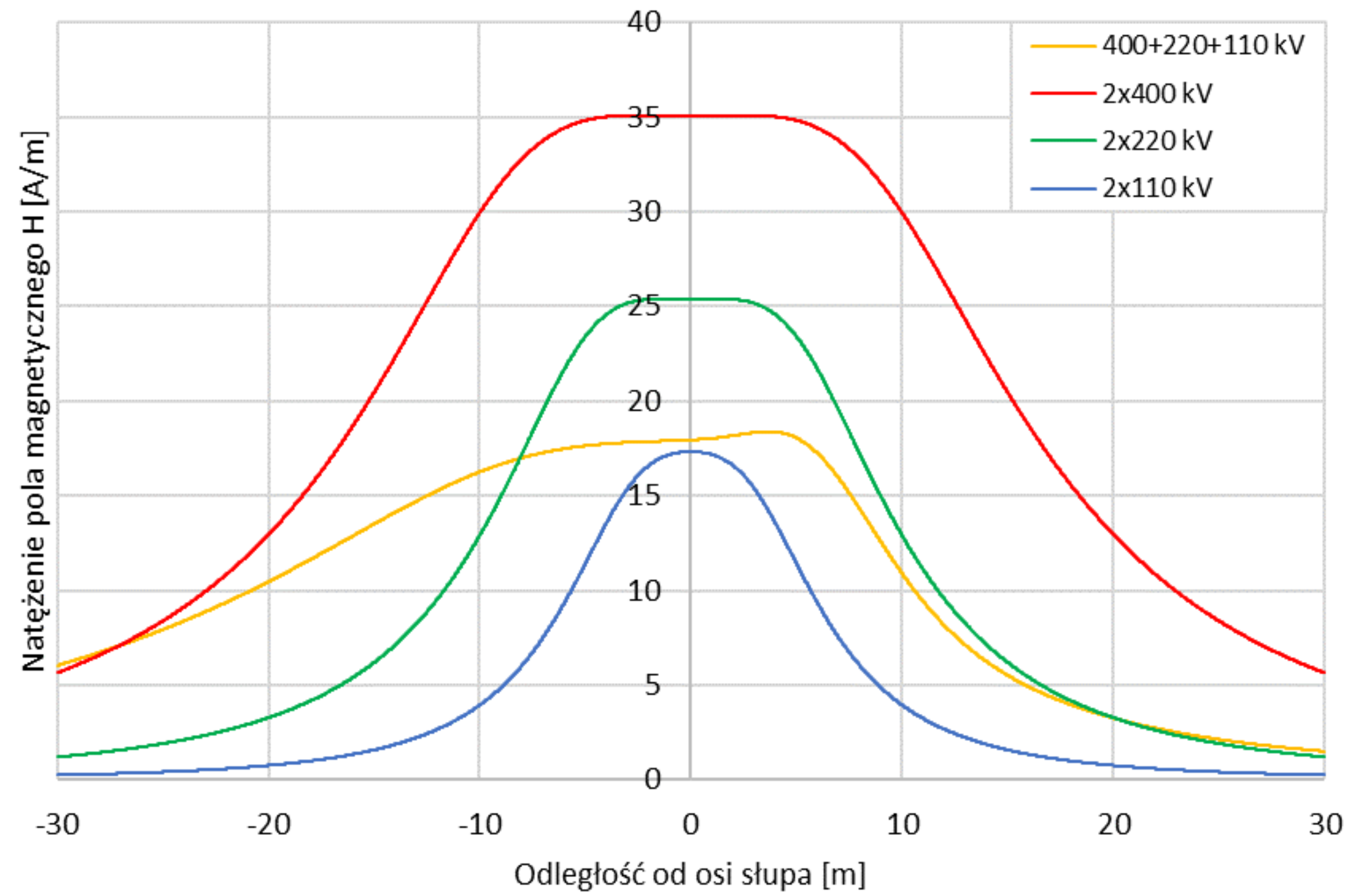
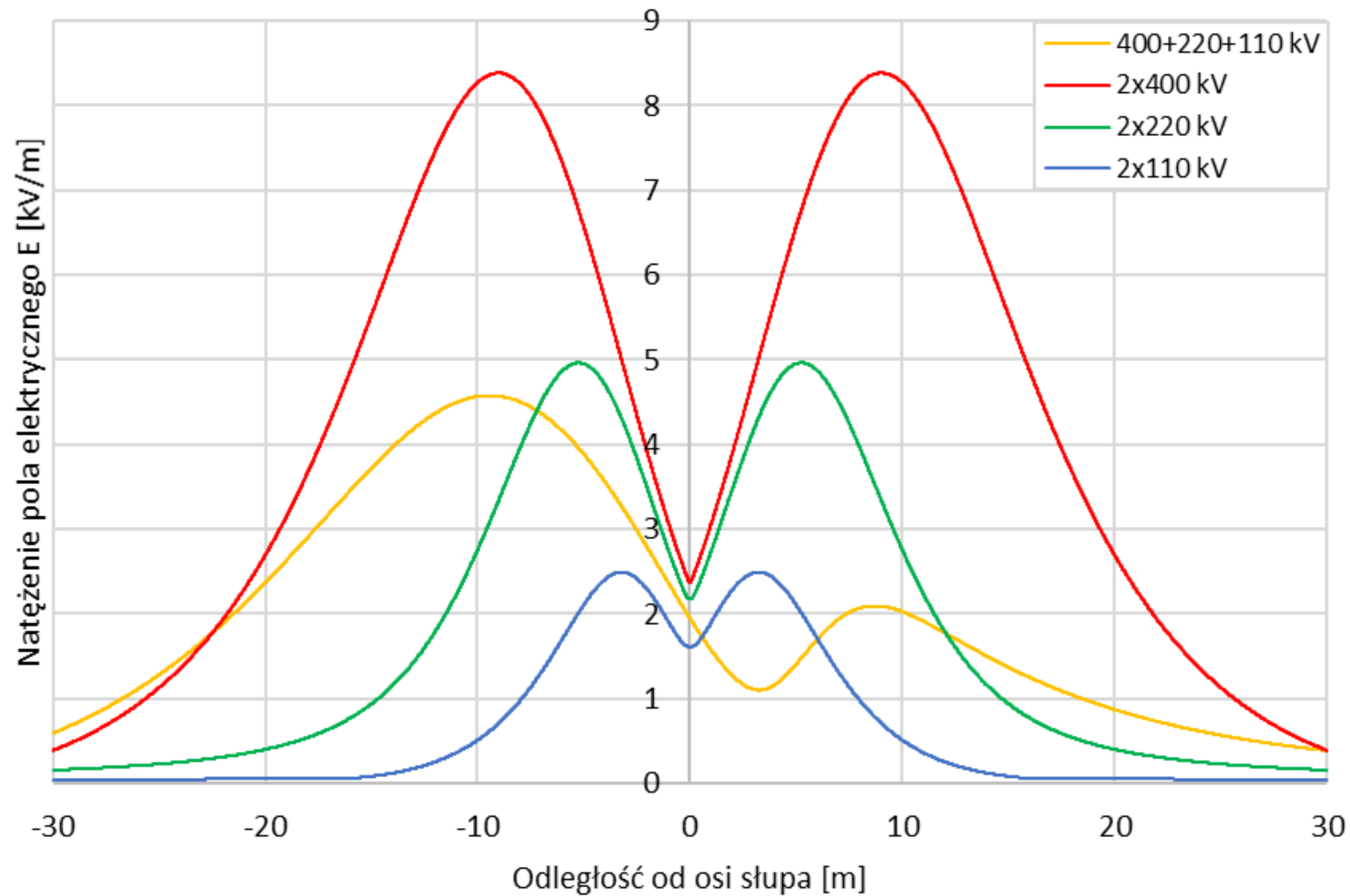


WNIOSEK

Brak przekroczeń dozwolonych wartości natężenia PEM



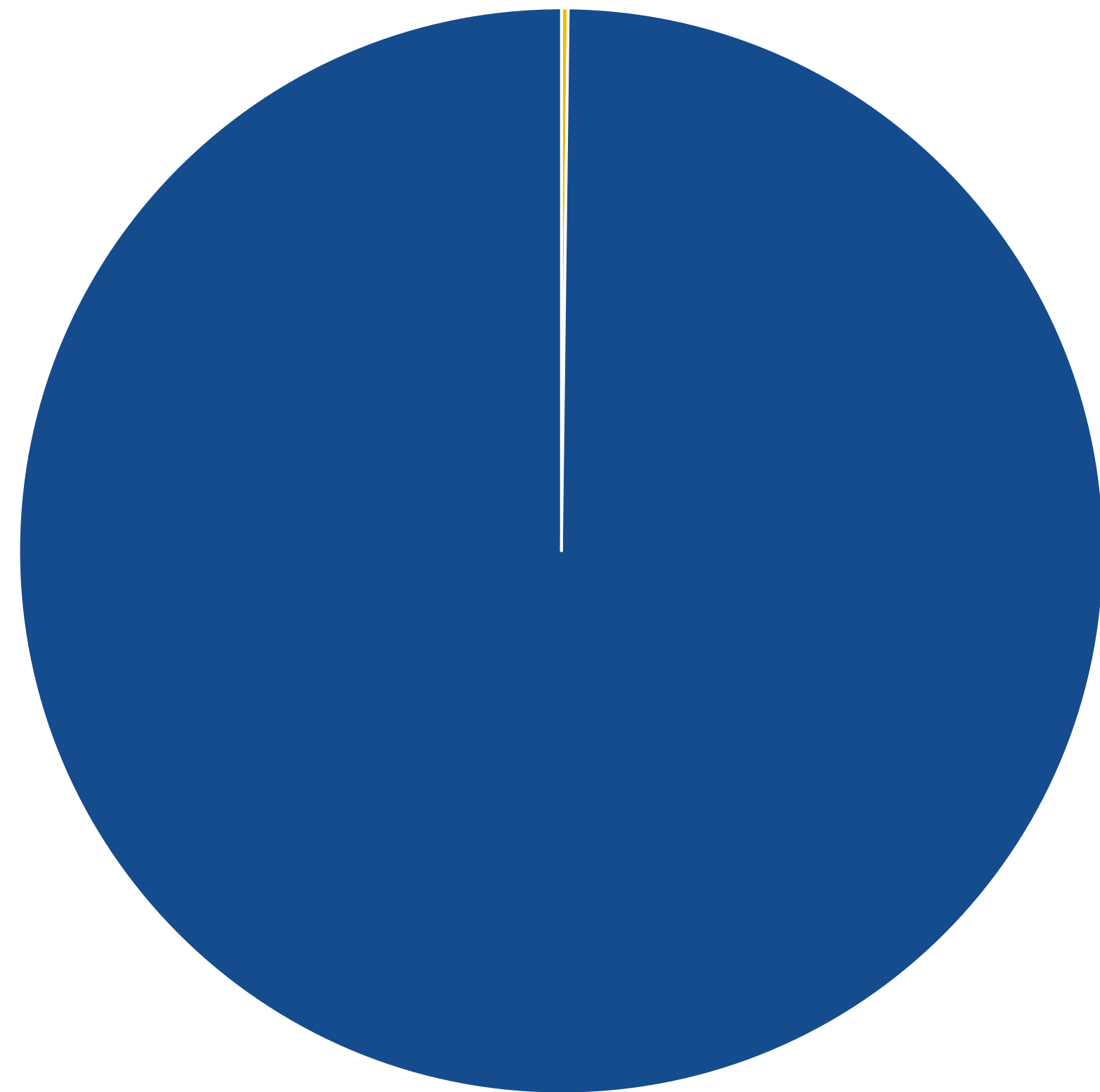
Porównanie rozkładów PEM pochodzących od WWLN z rozkładami linii klasycznych



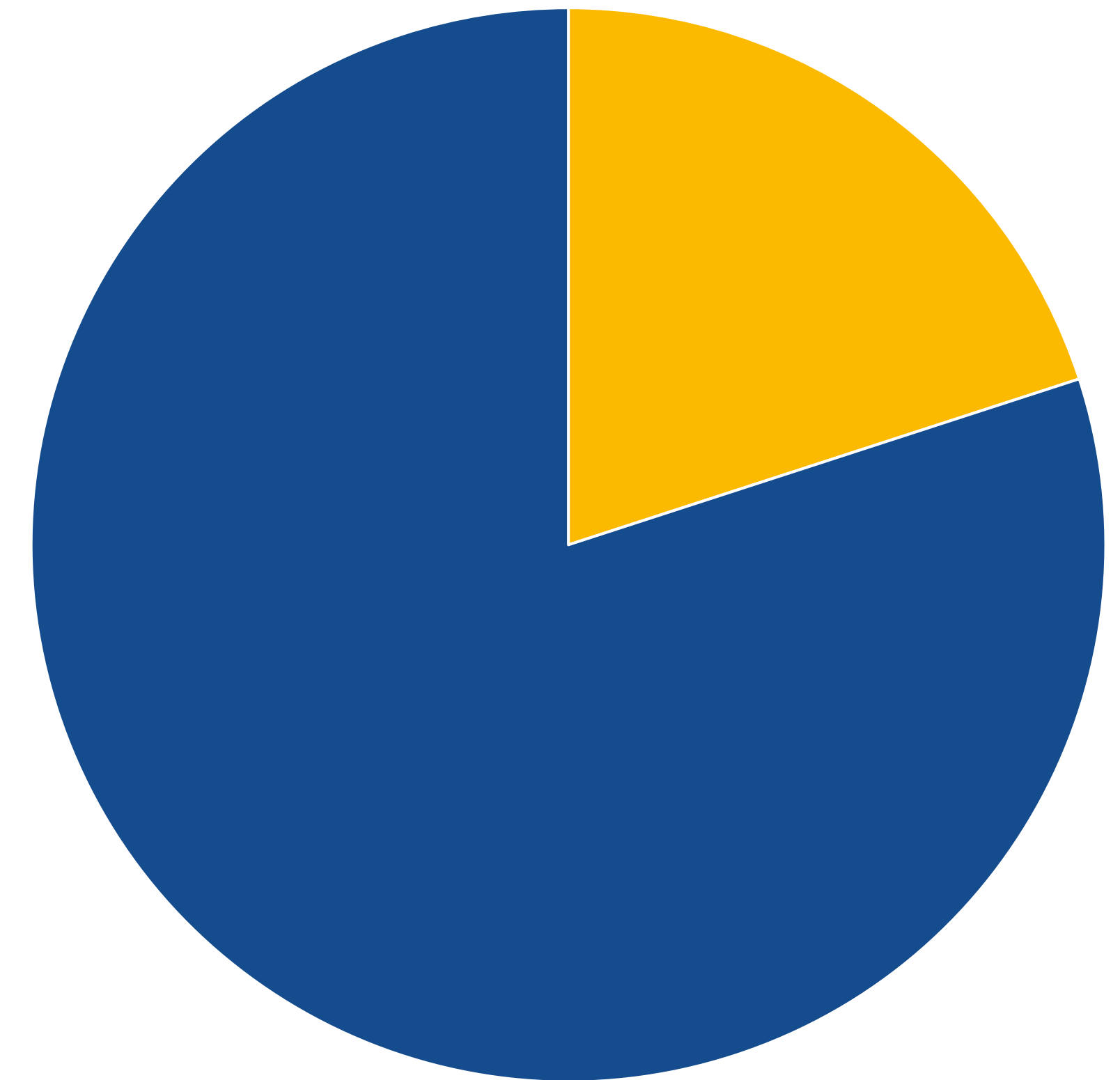
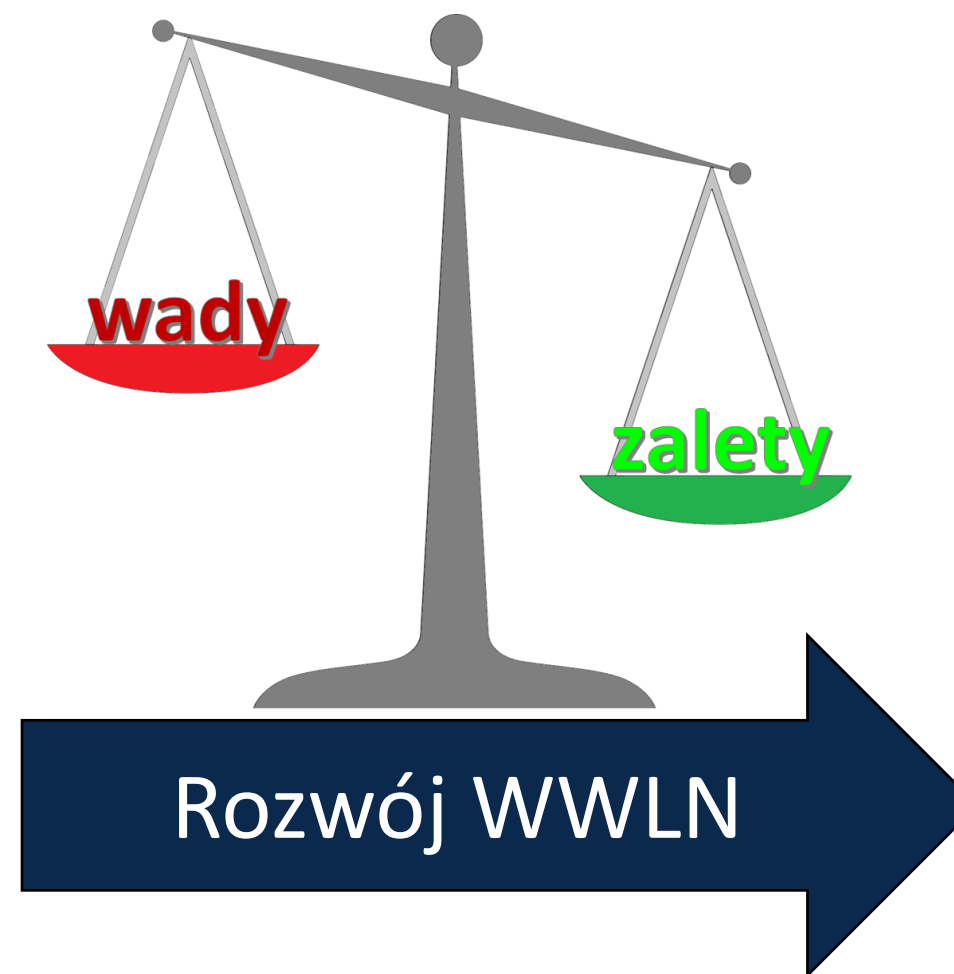
WNIOSEK

Zastosowanie WWLN **nie wpływa** na pogorszenie się warunków oddziaływania PEM pochodzącego od linii napowietrznych na środowisko naturalne, ponadto możliwe jest uzyskanie mniejszych wartości natężenia PEM!



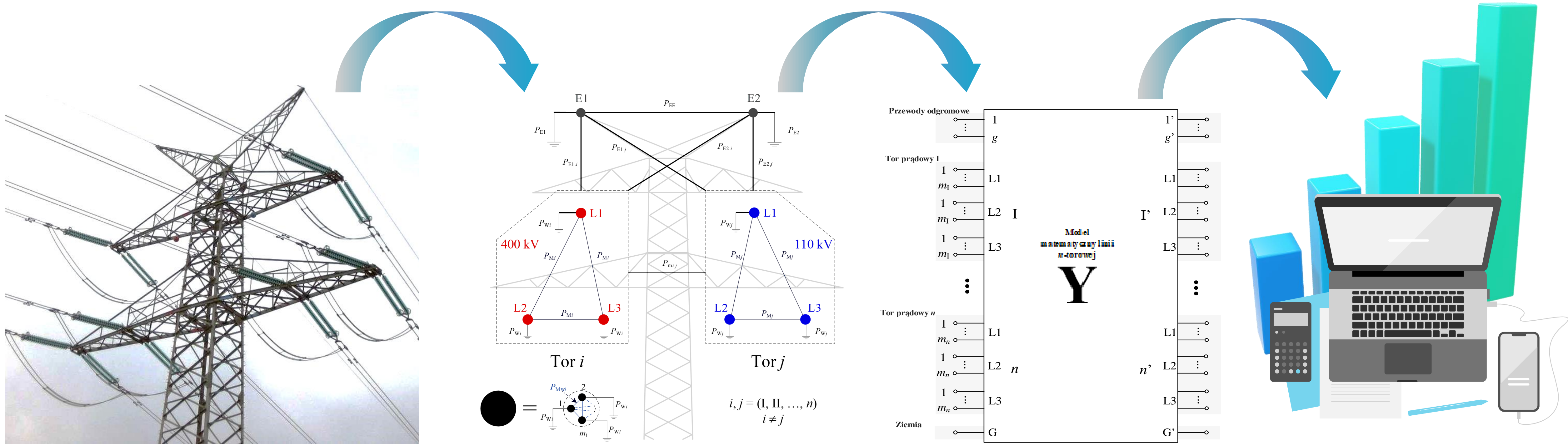


■ WWLN ■ Klasyczne



■ WWLN ■ Klasyczne

Plan działania



Model WWLN i jego parametry

ZAKRES

Stworzenie **uniwersalnego** modelu matematycznego WWLN w postaci **macierzy admitancyjnych** parametrów wzdłużnych i poprzecznych dla wielkości fazowych oraz składowych symetrycznych.

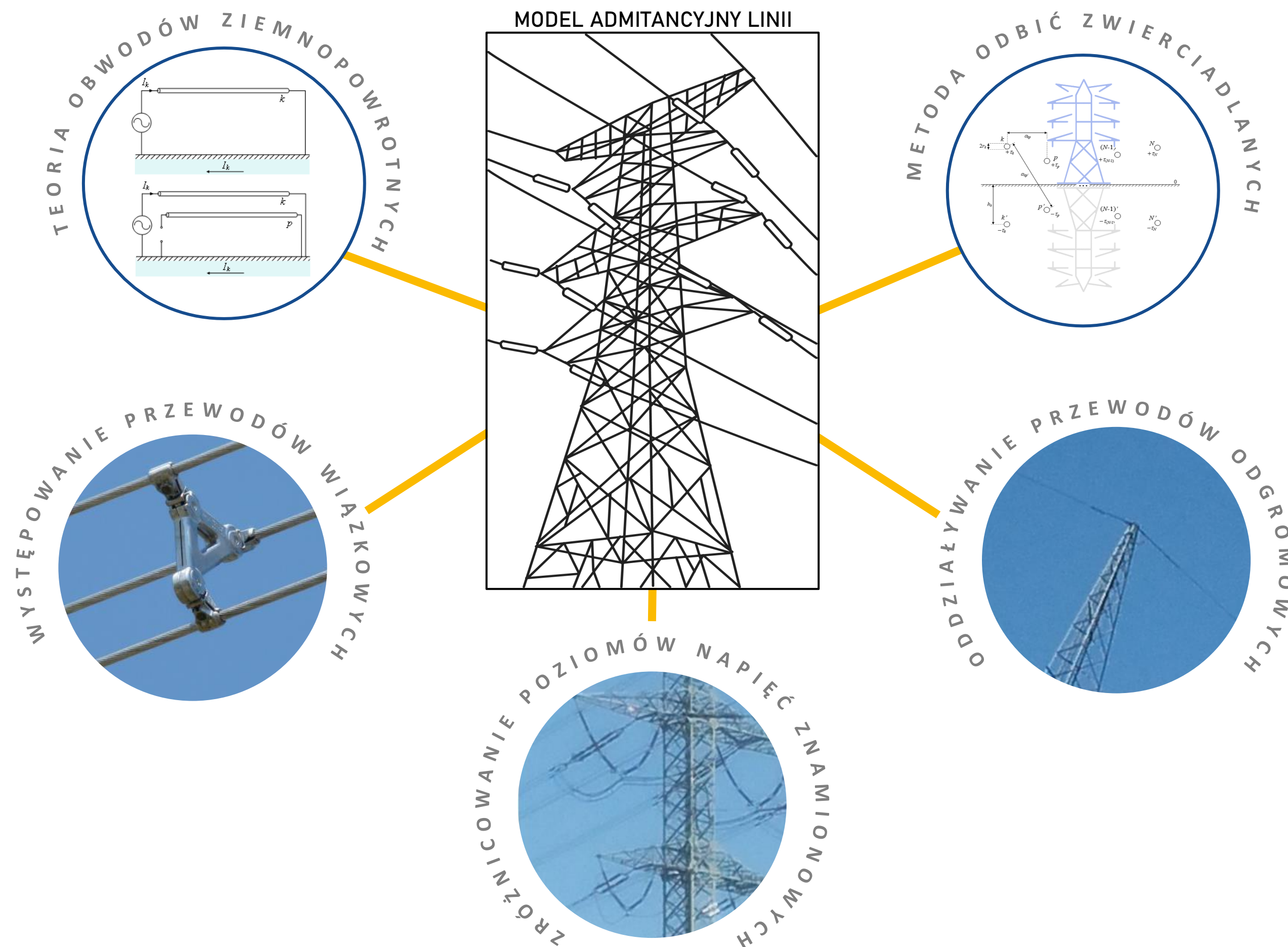
CEL

Model pozwalający na odwzorowanie WWLN w stanach pracy normalnej stosowany do obliczeń rozptywowych (stany ustalone) oraz stanach zakłóceń do wyznaczenia początkowych prądów zwarcia (stany quasi-ustalone).

REALIZACJA

Wprowadzenie do zagadnień teorii obwodów ziemnopowrotnych oraz metody odbić zwierciadlanych pozwalających na zdefiniowanie **parametrów modelu**. Uwzględnienie w modelu elementów i zjawisk obejmujących: oddziaływanie przewodów odgromowych, występowanie przewodów wiązkowych oraz zróżnicowanie poziomów napięć znamionowych torów prądowych WWLN.

Przedstawienie algorytmu **uproszczenia** modelu matematycznego WWLN, czego efektem jest **model symetryczny** WWLN.



Parametry modelu matematycznego WWLN

PARAMETRY WZDŁUŻNE

IMPEDANCJE OBWODÓW ZIEMNOPOWROTNYCH

IMPEDANCJA WŁASNA

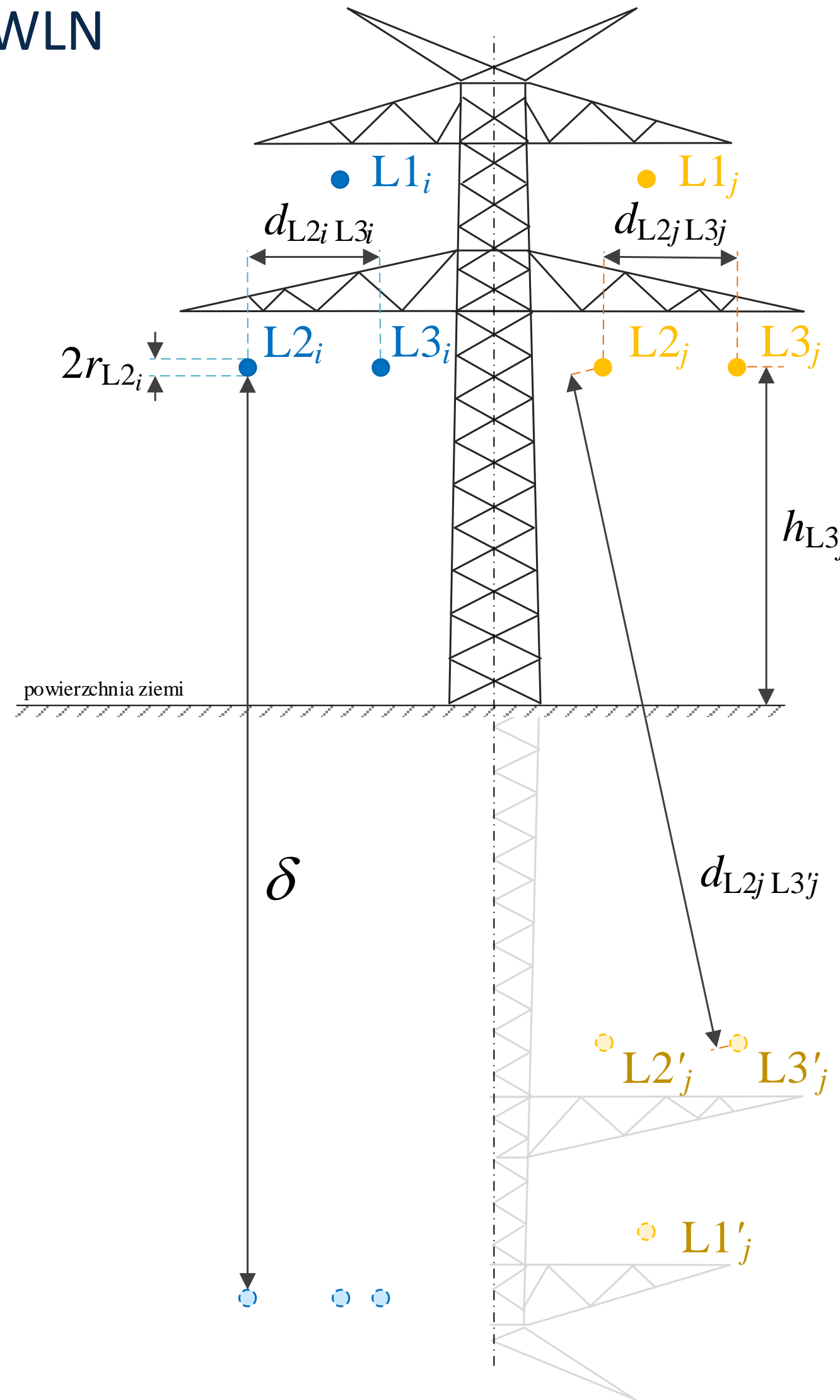
$$\underline{Z}_{kk} \approx l \cdot \left(R'_k + 0,049 + j0,0628 \ln \frac{\delta}{r_{0k}} \right)$$

IMPEDANCJA WZAJEMNA

$$\underline{Z}_{kp} \approx l \cdot \left(0,049 + j0,0628 \ln \frac{\delta}{d_{kp}} \right)$$

MACIERZ ADMITANCYJNA

$$\mathbf{Y} = \mathbf{Z}^{-1} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{11} & \underline{Z}_{12} & \cdots & \underline{Z}_{1N} \\ \underline{Z}_{21} & \underline{Z}_{22} & \cdots & \underline{Z}_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{Z}_{N1} & \underline{Z}_{N2} & \cdots & \underline{Z}_{NN} \end{bmatrix}^{-1}$$



N – liczba przewodów linii napowietrznej, $k, p \in N$; l – długość linii napowietrznej
 $r_{0k} = 0,816r_k$ dla linii stalowo-aluminiowych, $r_{0k} = 0,78r_k$ dla przewodów jednodrutowych

PARAMETRY POPRZECZNE

POTENCJAŁOWE WSPÓŁCZYNNIKI MAXWELLA

PWM WŁASNY

$$P_{kk} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0 l} \ln \frac{2h_k}{r_k}$$

PWM WZAJEMNY

$$P_{kp} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0 l} \ln \frac{d_{kp'}}{d_{kp}}$$

MACIERZ POJEMNOŚCI

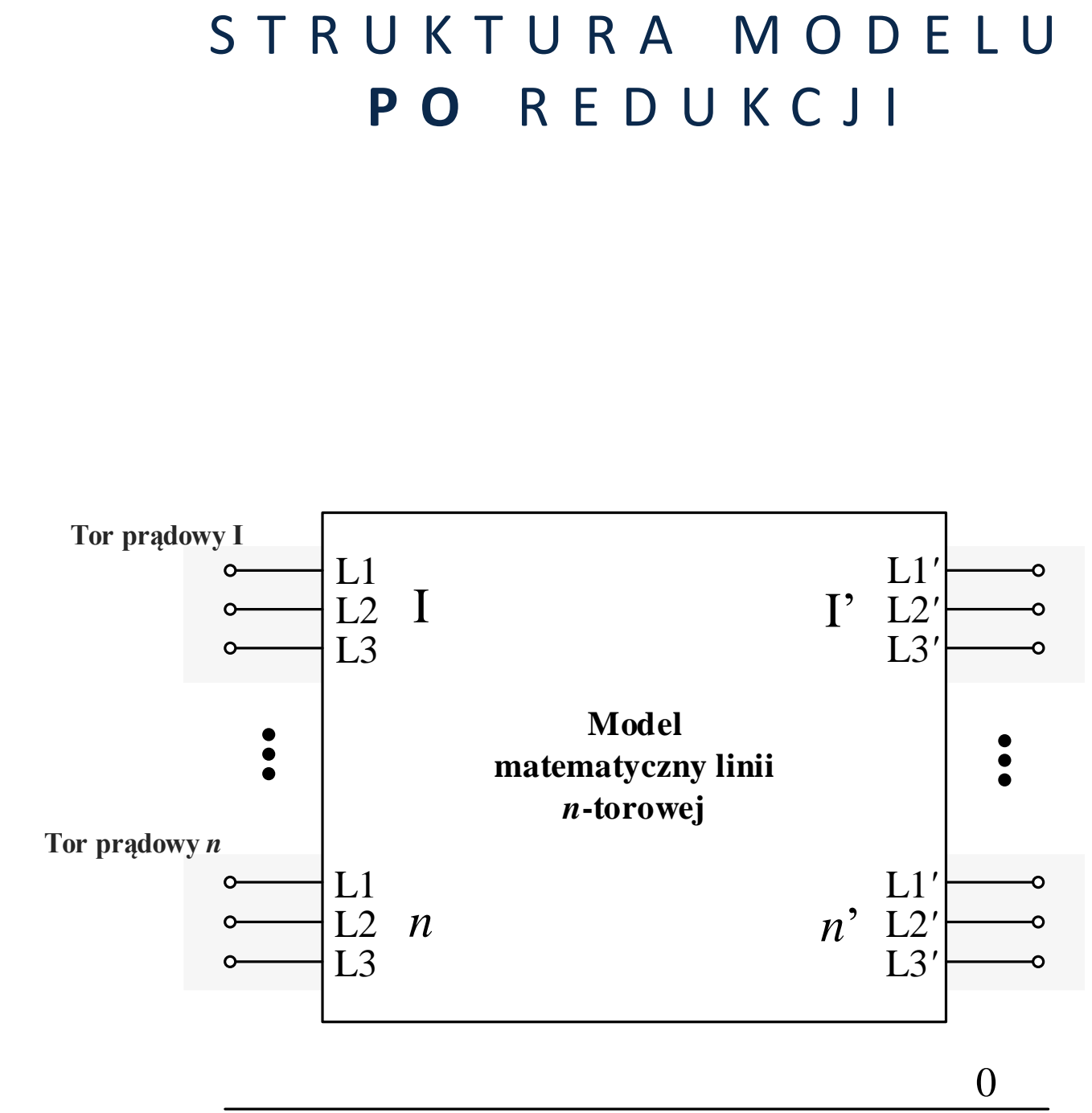
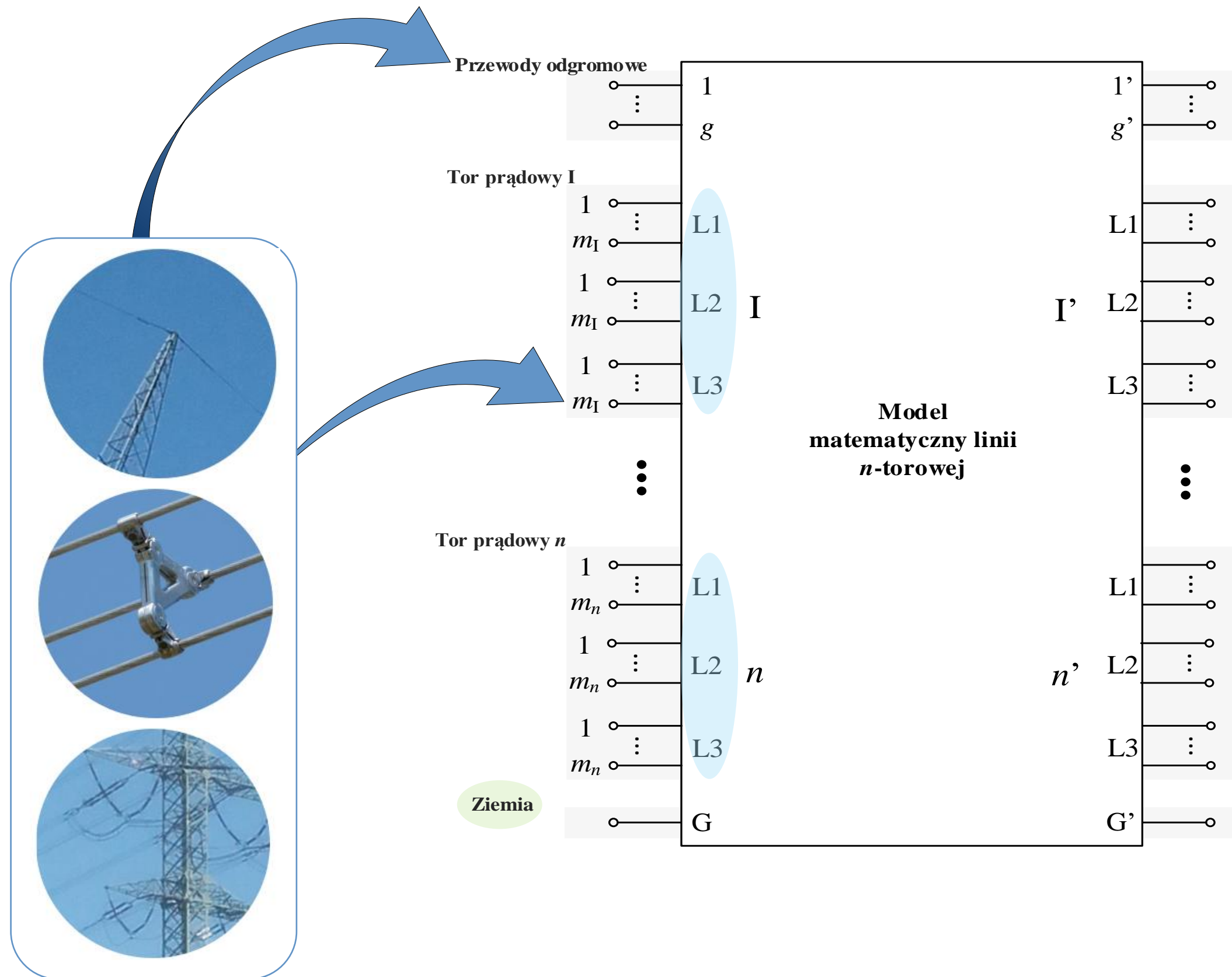
$$\mathbf{C} = \mathbf{P}^{-1} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1N} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{N1} & P_{N2} & \cdots & P_{NN} \end{bmatrix}^{-1}$$

Elementy uwzględniane w modelu matematycznym

ODDZIAŁYWANIE PRZEWODÓW ODGROMOWYCH

WYSTĘPOWANIE PRZEWODÓW WIĄZKOWYCH

ZRÓŻNICOWANIE POZIOMÓW NAPIĘĆ ZNAMIONOWYCH



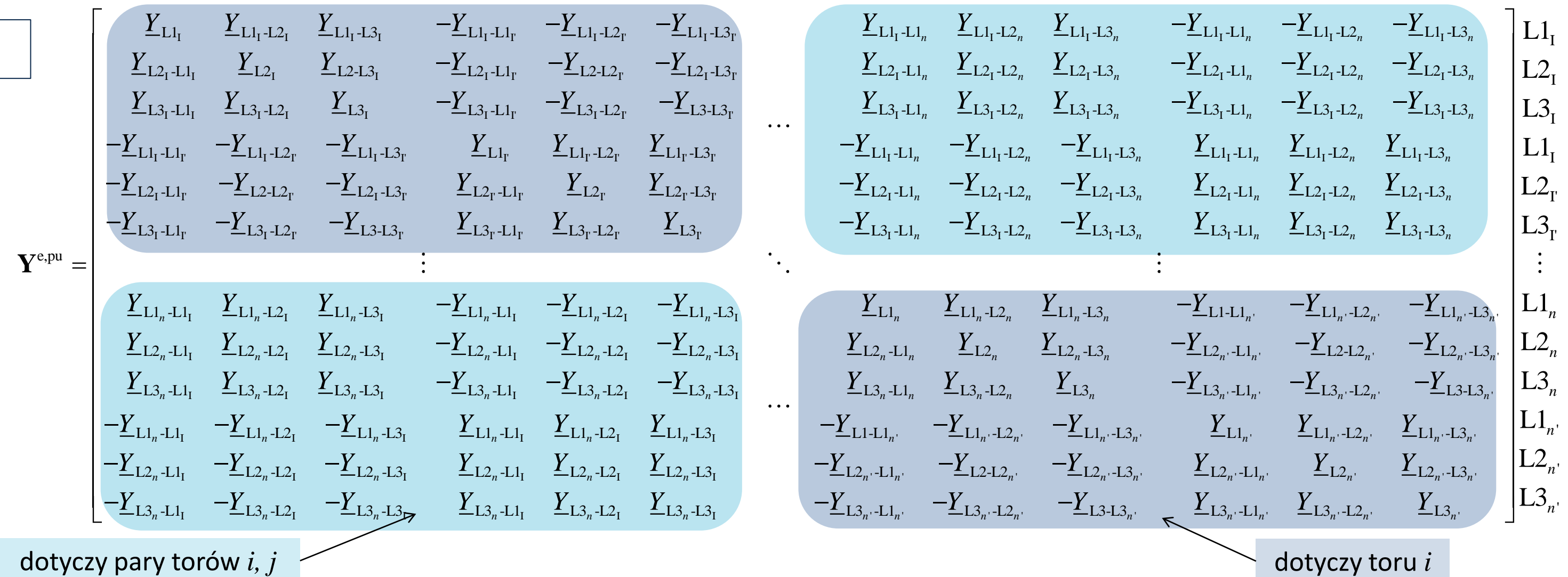
Postacie modelu admitancyjnego

MODEL WWLN DLA WIELKOŚCI FAZOWYCH

$$\underline{Y}_{L_{i,j}} = \underline{Y}_{L_{i,j}}^{e,pu} + j \frac{1}{2} \omega C_{L_{i,j}}^{e,pu}$$

$$\underline{Y}_{L_{i,j}'} = \underline{Y}_{L_{i,j}'}^{e,pu}$$

L_i – przewód fazowy toru prądowego i , $L_i = \{L1, L2, L3\}$



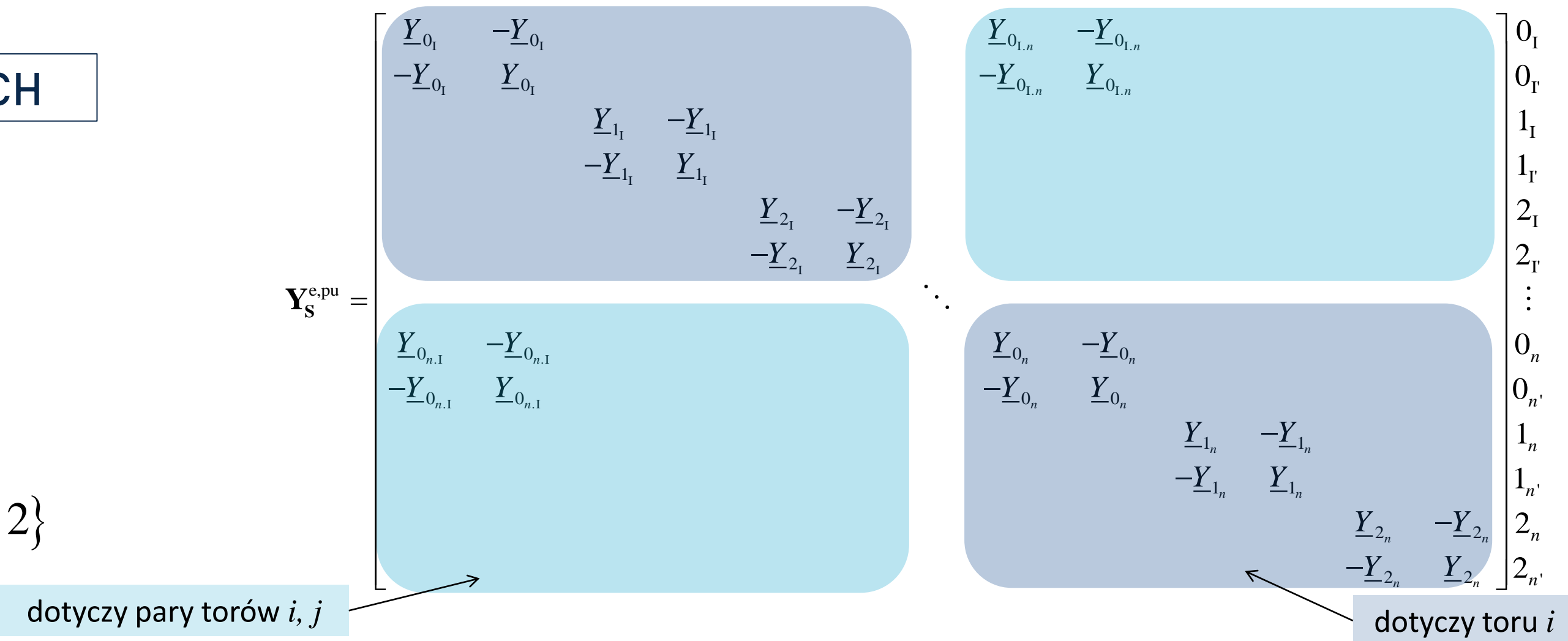
MODEL WWLN DLA SKŁADOWYCH SYMETRYCZNYCH

* przedstawiana postać prawdziwa dla symetrycznej WWLN

$$\underline{Y}_{S_{i,j}} = \underline{Y}_{S_{i,j}}^{e,pu} + j \frac{1}{2} \omega C_{S_{i,j}}^{e,pu}$$

$$\underline{Y}_{S_{i,j}'} = \underline{Y}_{S_{i,j}'}^{e,pu}$$

S_i – składowa symetryczna dla toru prądowego i , $S = \{0, 1, 2\}$



Schematy zastępcze WWLN

* przedstawiana postać prawdziwa dla symetrycznej WWLN

$n = 2$

Model admitancyjny dla parametrów wzdłużnych

Model admitancyjny dla parametrów wzdłużnych	Model admitancyjny dla parametrów wzdłużnych
zgodny (przeciwny)	zerowy

$$\mathbf{Y}_1^{e,pu} = \mathbf{Y}_2^{e,pu} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{-1I} & -\underline{Y}_{-1I} & & & & \\ -\underline{Y}_{-1I} & \underline{Y}_{-1I} & & & & \\ & & \underline{Y}_{-1II} & -\underline{Y}_{-1II} & & \\ & & -\underline{Y}_{-1II} & \underline{Y}_{-1II} & & \\ & & & & \underline{Y}_{0I} & -\underline{Y}_{0I,II} \\ & & & & -\underline{Y}_{0I,II} & \underline{Y}_{0I,II} \\ & & & & \underline{Y}_{0II,II} & -\underline{Y}_{0II,II} \\ -\underline{Y}_{0II,II} & \underline{Y}_{0II,II} & -\underline{Y}_{0II,II} & \underline{Y}_{0II,II} & & \end{bmatrix}$$

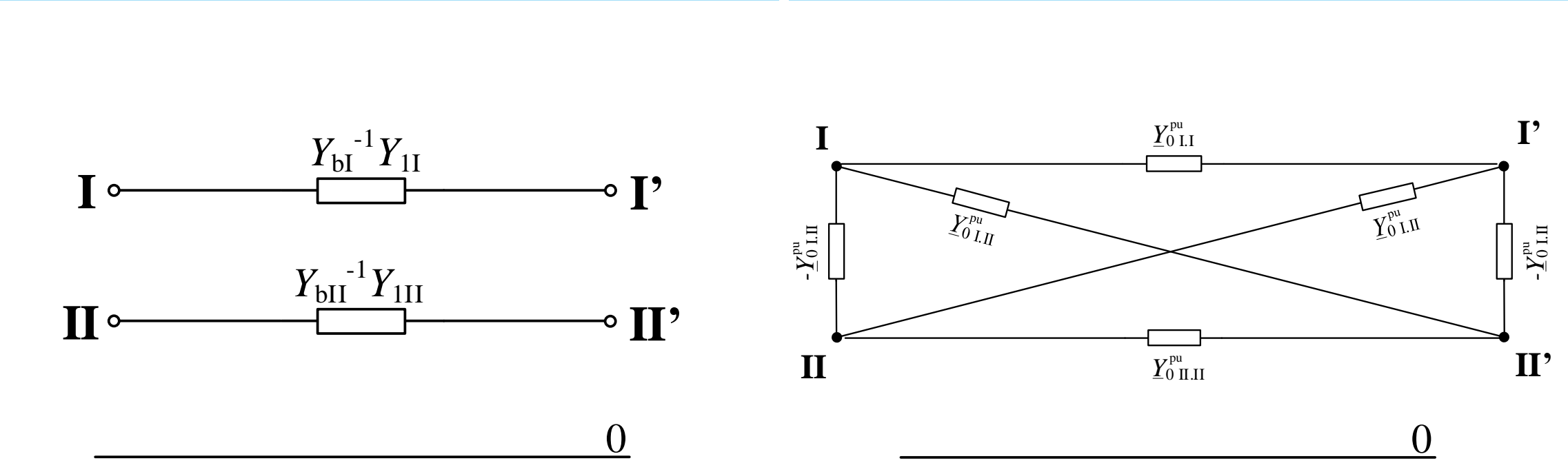
Model admitancyjny dla parametrów poprzecznych

Model admitancyjny dla parametrów poprzecznych	Model admitancyjny dla parametrów poprzecznych
zgodny (przeciwny)	zerowy

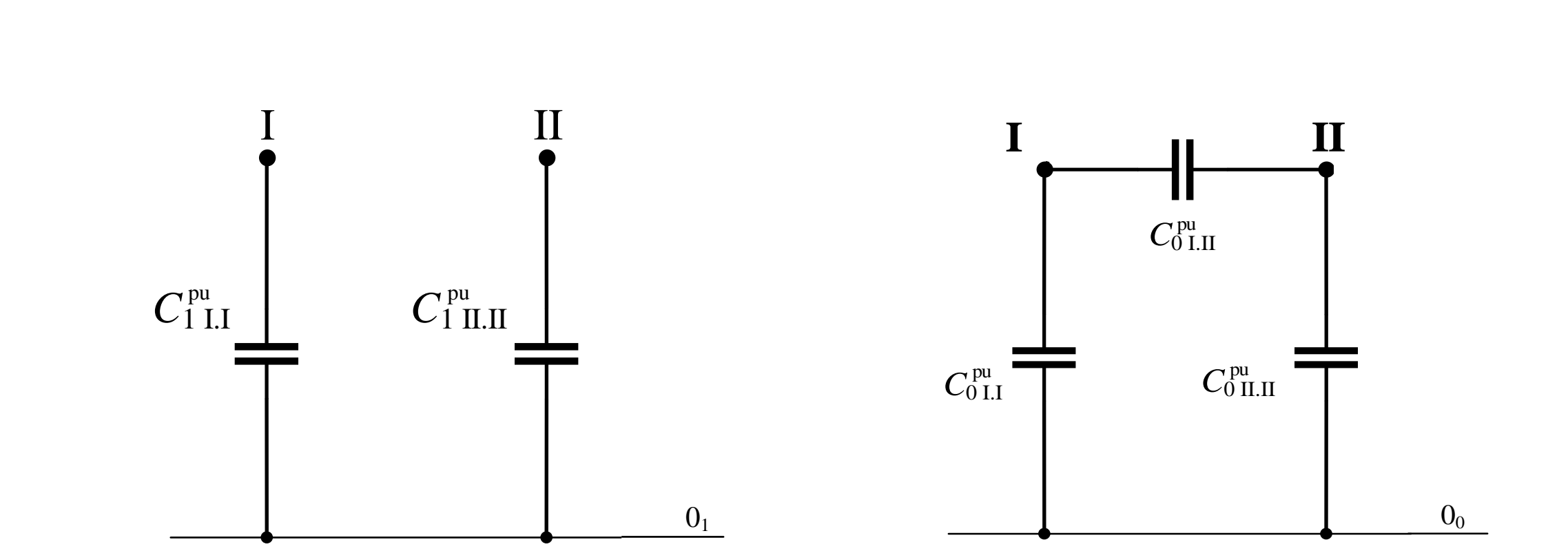
$$\mathbf{C}_1^{e,pu} = \mathbf{C}_2^{e,pu} = \begin{bmatrix} C_{1I} & \\ & C_{1II} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_0^{e,pu} = \begin{bmatrix} C_{0I} & C_{0I,II} \\ C_{0II,I} & C_{0II} \end{bmatrix}$$

Schemat zastępczy dla parametrów wzdłużnych



Schemat zastępczy dla parametrów poprzecznych



Schematy zastępcze WWLN

* przedstawiana postać prawdziwa dla symetrycznej WWLN

$n = 3$

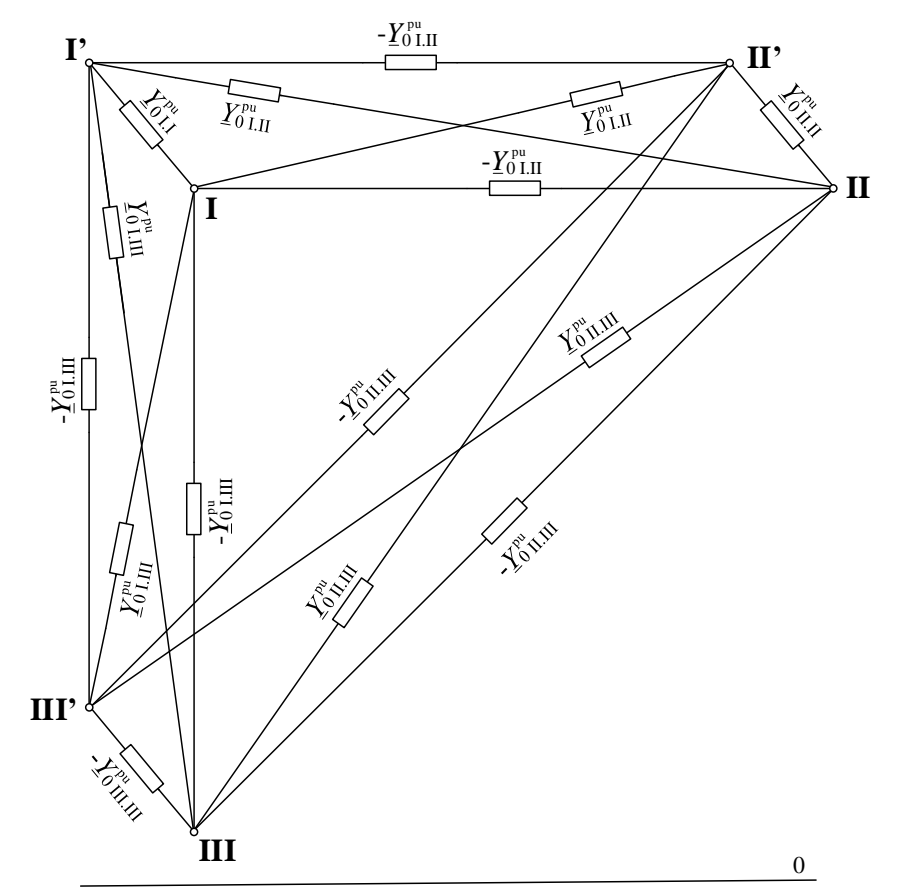
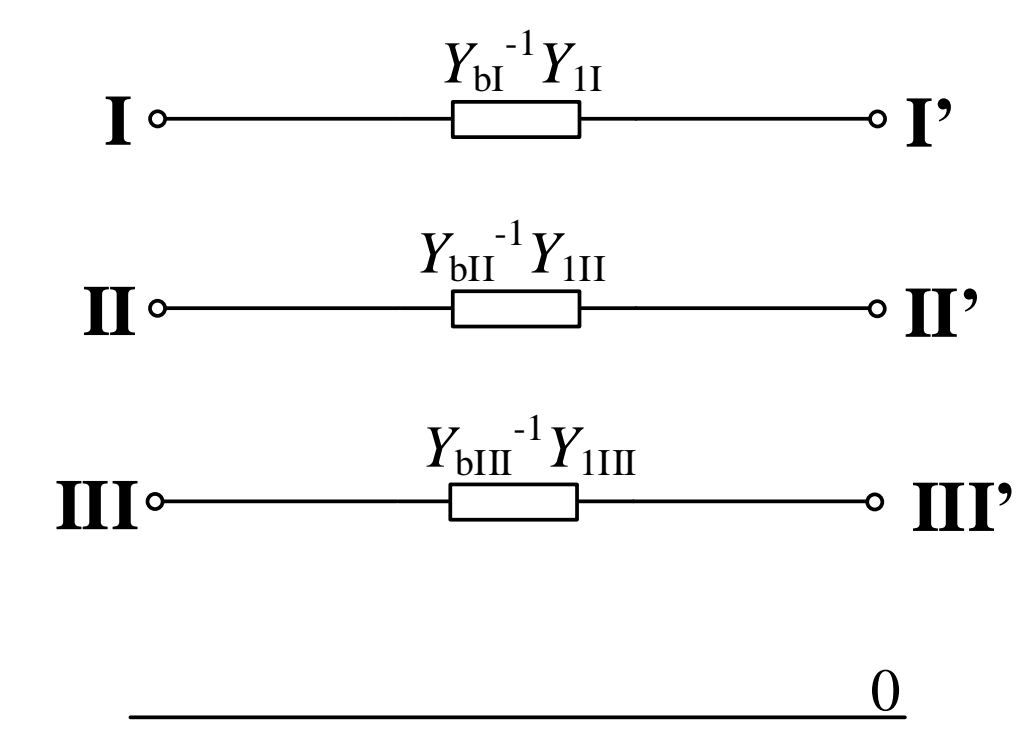
Model admitancyjny dla parametrów wzdłużnych

zgodny (przeciwny)	zerowy
$\mathbf{Y}_1^{e,pu} = \mathbf{Y}_2^{e,pu} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{1I} & -\underline{Y}_{1I} & & & & \\ -\underline{Y}_{1I} & \underline{Y}_{1I} & & & & \\ & & \underline{Y}_{1II} & -\underline{Y}_{1II} & & \\ & & -\underline{Y}_{1II} & \underline{Y}_{1II} & & \\ & & & & \underline{Y}_{1III} & -\underline{Y}_{1III} \\ & & & & -\underline{Y}_{1III} & \underline{Y}_{1III} \end{bmatrix}$	$\mathbf{Y}_0^{e,pu} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{0I} & -\underline{Y}_{0I} & \underline{Y}_{0I,II} & -\underline{Y}_{0I,II} & \underline{Y}_{0I,III} & -\underline{Y}_{0I,III} \\ -\underline{Y}_{0I} & \underline{Y}_{0I} & -\underline{Y}_{0I,II} & \underline{Y}_{0I,II} & -\underline{Y}_{0I,III} & \underline{Y}_{0I,III} \\ \underline{Y}_{0I,II} & -\underline{Y}_{0I,II} & \underline{Y}_{0II} & -\underline{Y}_{0II} & \underline{Y}_{0II,III} & -\underline{Y}_{0II,III} \\ -\underline{Y}_{0I,II} & \underline{Y}_{0I,II} & -\underline{Y}_{0II} & \underline{Y}_{0II} & -\underline{Y}_{0II,III} & \underline{Y}_{0II,III} \\ \underline{Y}_{0I,III} & -\underline{Y}_{0I,III} & \underline{Y}_{0II,III} & -\underline{Y}_{0II,III} & \underline{Y}_{0III} & -\underline{Y}_{0III} \\ -\underline{Y}_{0I,III} & \underline{Y}_{0I,III} & -\underline{Y}_{0II,III} & \underline{Y}_{0II,III} & -\underline{Y}_{0III} & \underline{Y}_{0III} \end{bmatrix}$

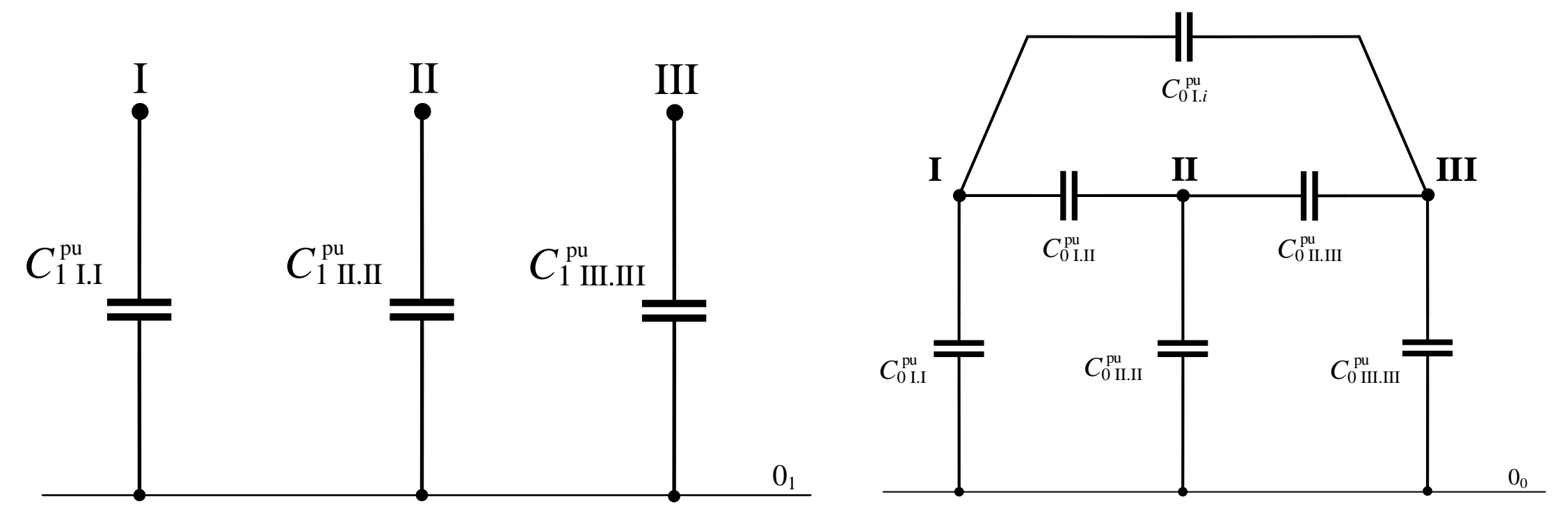
Model admitancyjny dla parametrów poprzecznych

zgodny (przeciwny)	zerowy
$\mathbf{C}_1^{e,pu} = \mathbf{C}_2^{e,pu} = \begin{bmatrix} C_{1I} & & & \\ & C_{1II} & & \\ & & C_{1III} & \\ & & & \end{bmatrix}$	$\mathbf{C}_0^{e,pu} = \begin{bmatrix} C_{0I} & C_{0I,II} & C_{0I,III} \\ C_{0II,I} & C_{0II} & C_{0II,III} \\ C_{0III,I} & C_{0III,II} & C_{0III} \end{bmatrix}$

Schemat zastępczy dla parametrów wzdłużnych



Schemat zastępczy dla parametrów poprzecznych



Schematy zastępcze WWLN

* przedstawiana postać prawdziwa dla symetrycznej WWLN

n

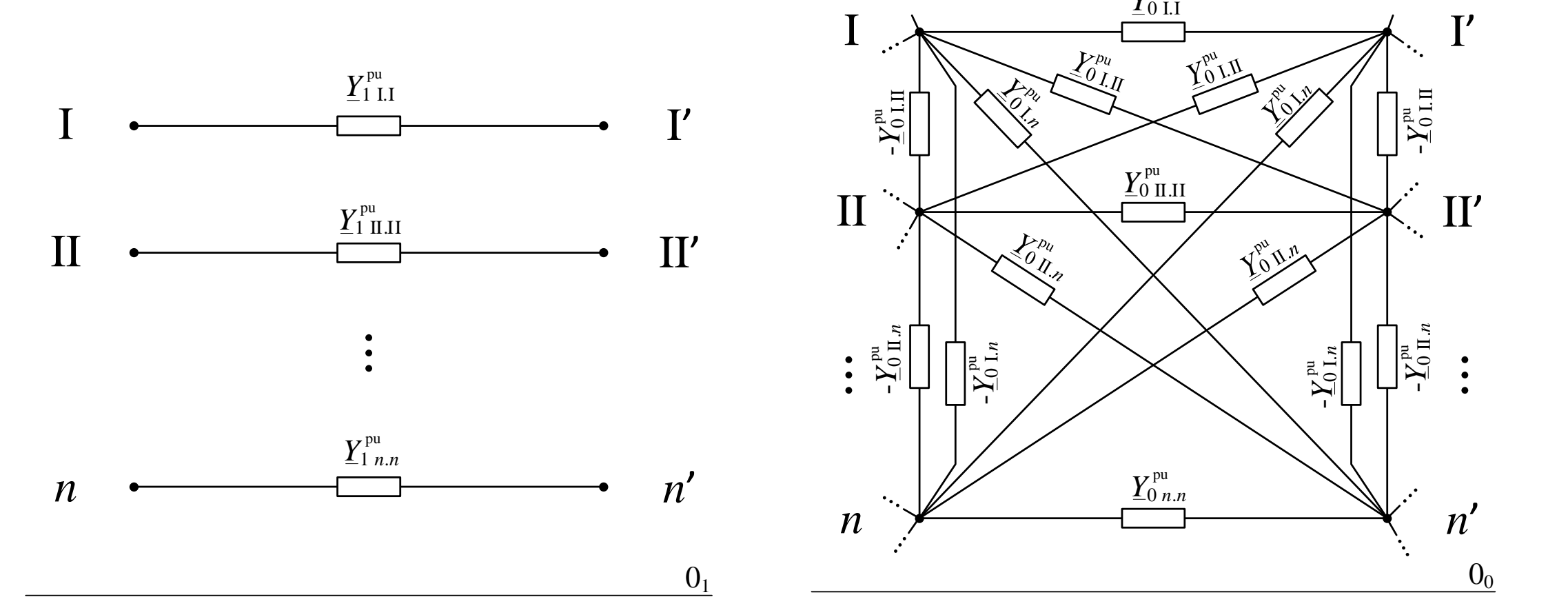
Model admitancyjny dla parametrów wzdłużnych

zgodny (przeciwny)	zerowy
$\mathbf{Y}_1^{e,pu} = \mathbf{Y}_2^{e,pu} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{-1_1} & -\underline{Y}_{-1_1} & & & & \\ -\underline{Y}_{-1_1} & \underline{Y}_{-1_1} & & & & \\ & & \ddots & & & \\ & & & \underline{Y}_{-1_n} & -\underline{Y}_{-1_n} & \\ & & & -\underline{Y}_{-1_n} & \underline{Y}_{-1_n} & \end{bmatrix}$	$\mathbf{Y}_0^{e,pu} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{0_1} & -\underline{Y}_{0_1} & \cdots & \underline{Y}_{0_{1,n}} & -\underline{Y}_{0_{1,n}} \\ -\underline{Y}_{0_1} & \underline{Y}_{0_1} & & -\underline{Y}_{0_{1,n}} & \underline{Y}_{0_{1,n}} \\ & \vdots & \ddots & \vdots & \\ \underline{Y}_{0_{n,1}} & -\underline{Y}_{0_{n,1}} & \cdots & \underline{Y}_{0_n} & -\underline{Y}_{0_n} \\ -\underline{Y}_{0_{n,1}} & \underline{Y}_{0_{n,1}} & & -\underline{Y}_{0_n} & \underline{Y}_{0_n} \end{bmatrix}$

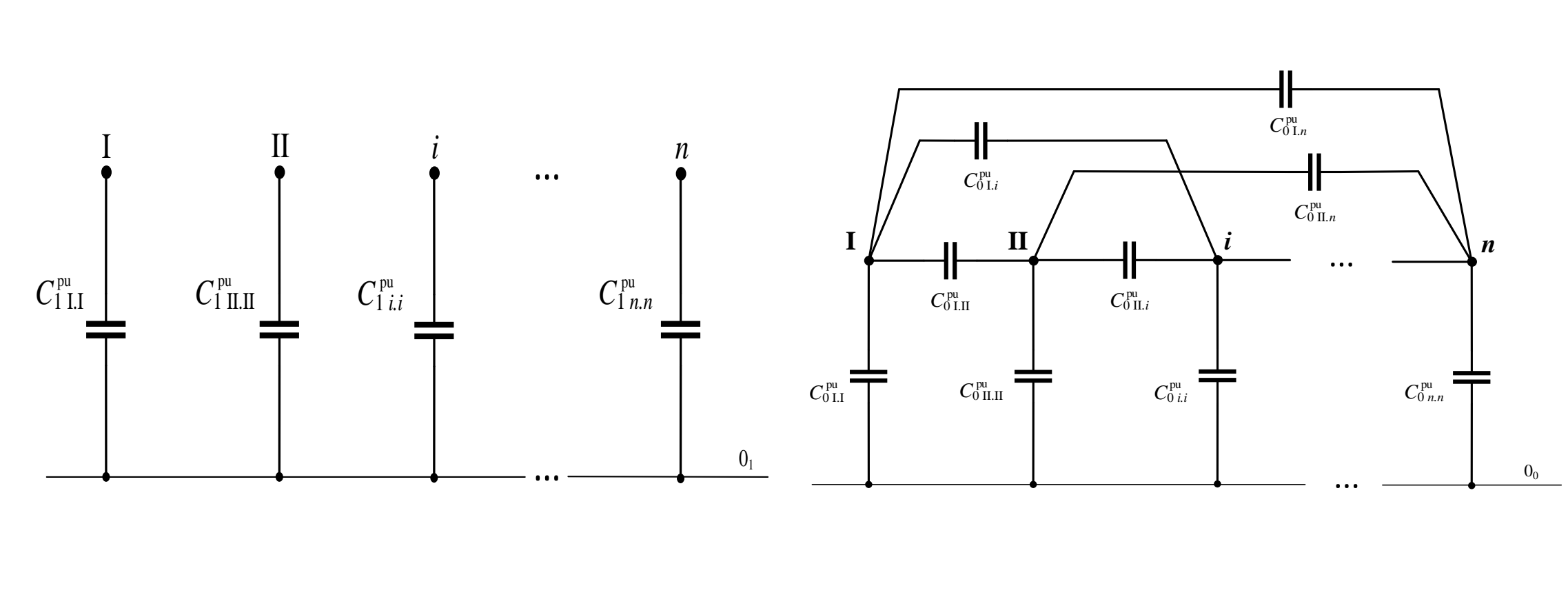
Model admitancyjny dla parametrów poprzecznych

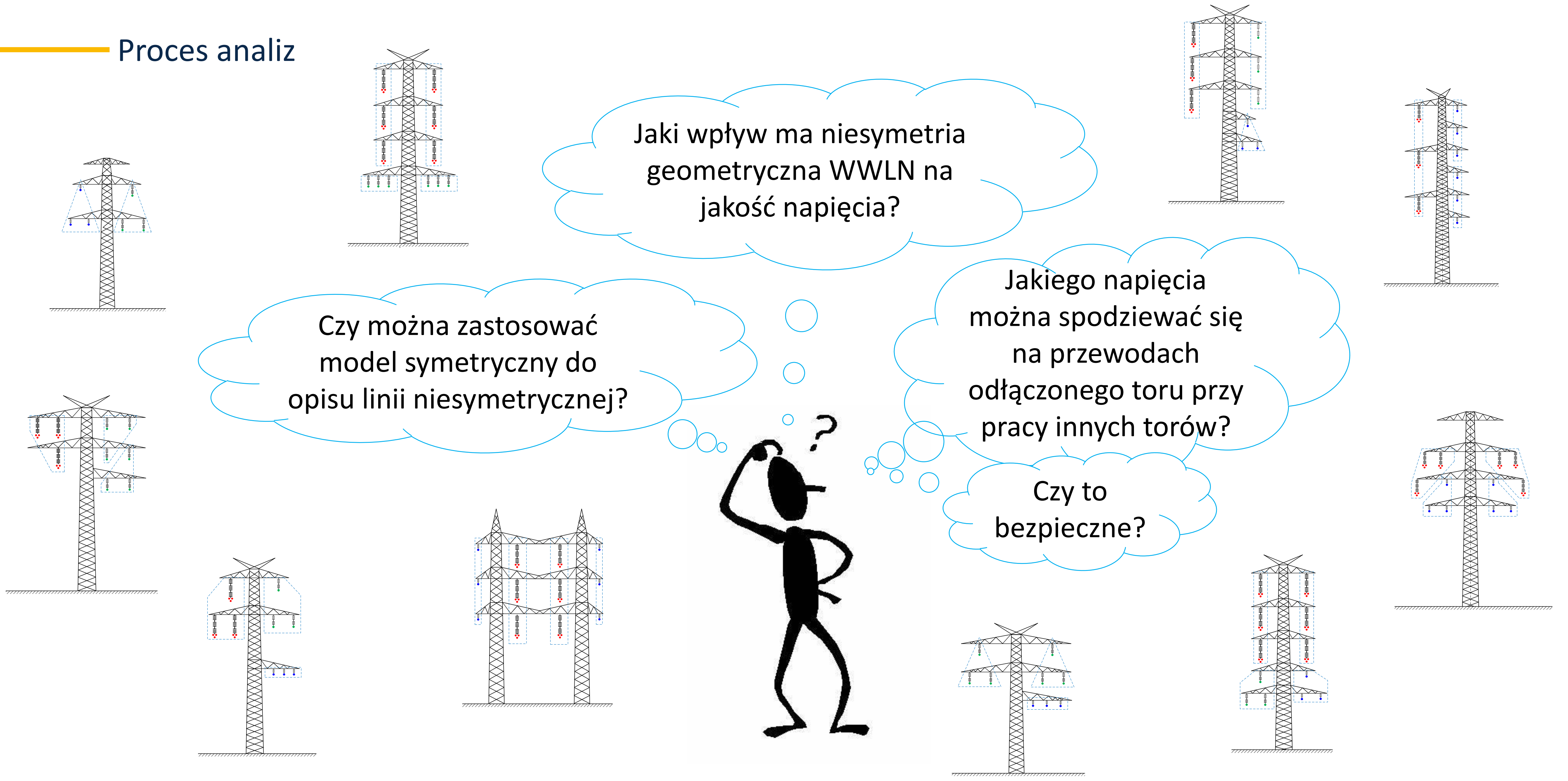
zgodny (przeciwny)	zerowy
$\mathbf{C}_1^{e,pu} = \mathbf{C}_2^{e,pu} = \begin{bmatrix} C_{1_1} & & & \\ & \ddots & & \\ & & C_{1_n} & \end{bmatrix}$	$\mathbf{C}_0^{e,pu} = \begin{bmatrix} C_{0_1} & \cdots & C_{0_{1,n}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{0_{n,1}} & \cdots & C_{0_n} \end{bmatrix}$

Schemat zastępczy dla parametrów wzdłużnych



Schemat zastępczy dla parametrów poprzecznych



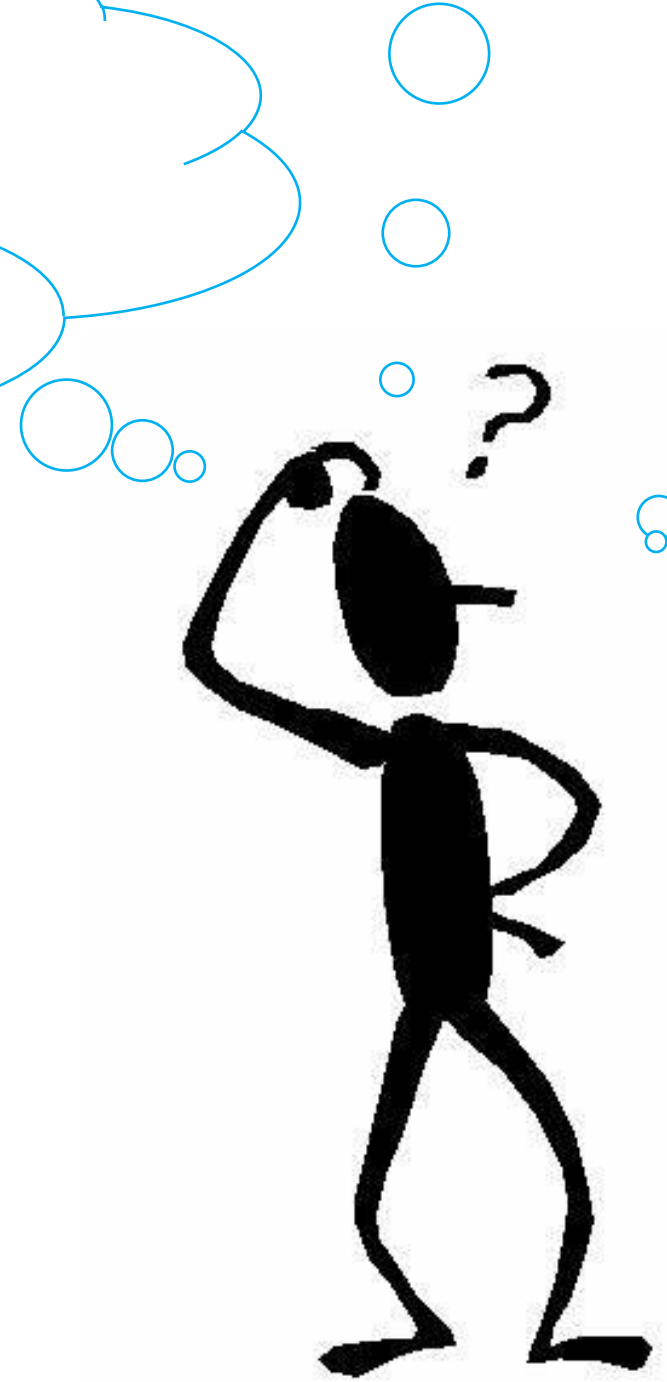


Jaki wpływ ma niesymetria geometryczna WWLN na jakość napięcia?

Czy można zastosować model symetryczny do opisu linii niesymetrycznej?

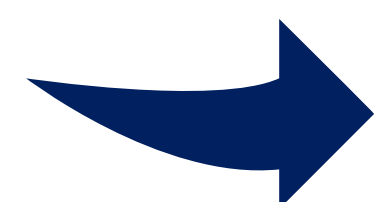
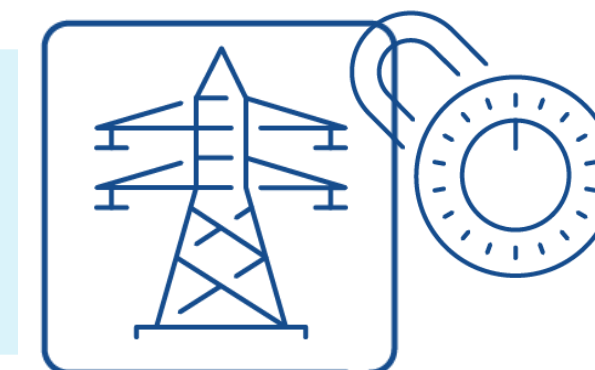
Jakiego napięcia można spodziewać się na przewodach odłączonego toru przy pracy innych torów?

Czy to bezpieczne?







Ocena wpływu zastosowania uroszczonego (symetrycznego) modelu matematycznego do opisu WWLN przy wyznaczaniu prądów zwarcia





SYMETRYCZNA

-  Ten sam prąd zwarcia jednofazowego bez względu na zwartą fazę
-  Prądy płynące w poszczególnych fazach przy zwarcu trójfazowym są takie same



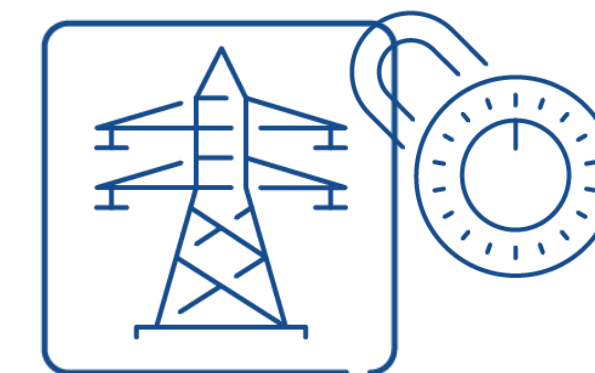
NIESYMETRYCZNA

-  Różne prądy zwarcia w zależności od zwartej fazy
-  Prądy płynące w poszczególnych fazach przy zwarcu trójfazowym **NIE** są takie same

SCENARIUSZE ANALIZ

Wyznaczanie procentowych błędów względnych prądów zwarcia $\delta I_{zw\%}$ oraz procentowych błędów względnych prądów gałęziowych (udziałów prądów zwarcia) od strony badanego toru prądowego $\delta I_{gał\%}$ przy zwarciu jednofazowym i trójfazowym na końcu tego toru:

- w funkcji **długości WWLN**, przy ustalonym układzie przewodów fazowych,
- w funkcji **układu przewodów fazowych** w torach prądowych WWLN, przy ustalonej długości linii wynoszącej 75 km.



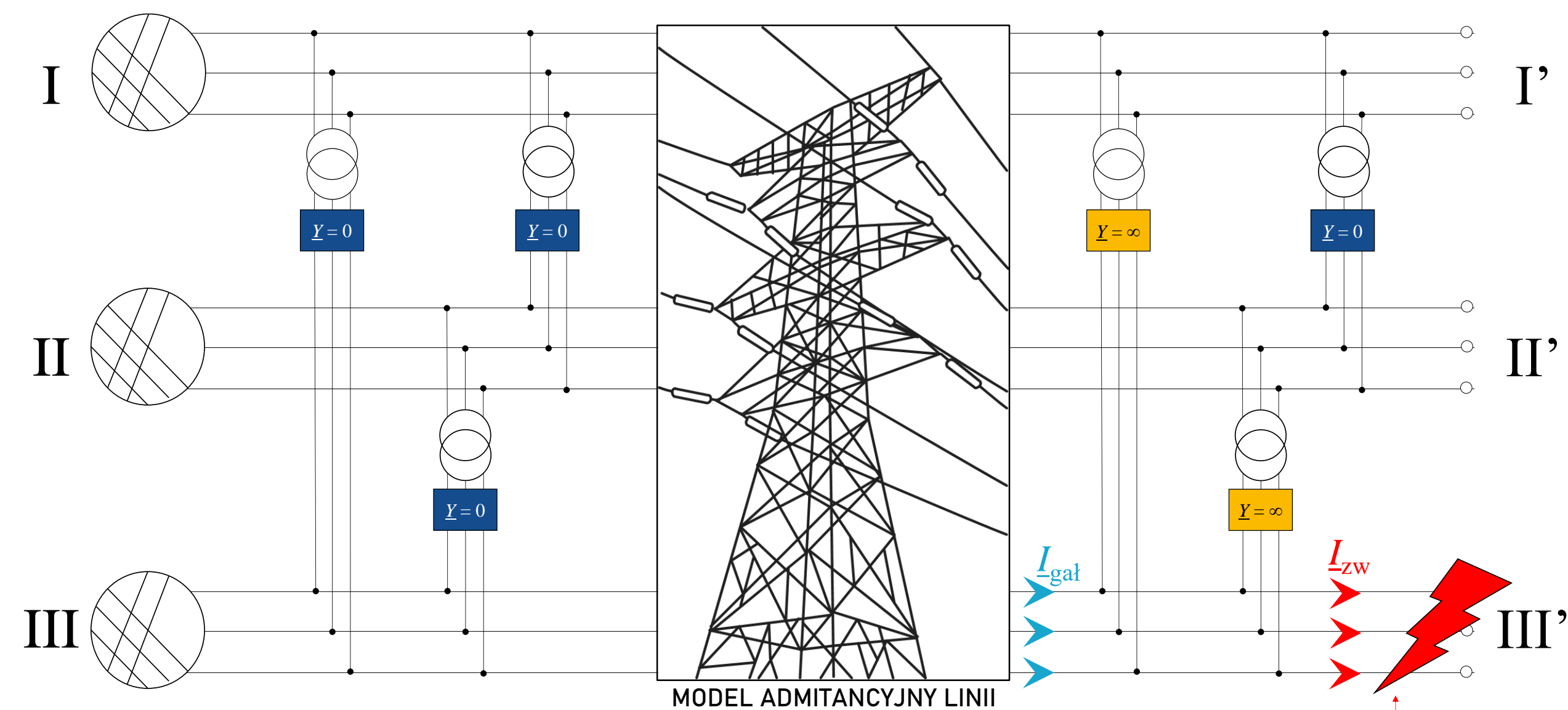
Dopuszcza się **±5%** poziomu błędu względnego przy wyznaczaniu prądów w wyniku zastosowania modelu uproszczonego (symetrycznego) podczas modelowania zwarć.

PROCENTOWY BŁĄD
WZGLĘDNY PRĄDU
ZWARCIA

$$\delta I_{zw\%} = \frac{|I_{zw\ pu}^{sym}| - |I_{zw\ pu}^{niesym}|}{|I_{zw\ pu}^{niesym}|} \cdot 100\%$$

PROCENTOWY BŁĄD
WZGLĘDNY UDZIAŁU
PRĄDU ZWARCIOWEGO

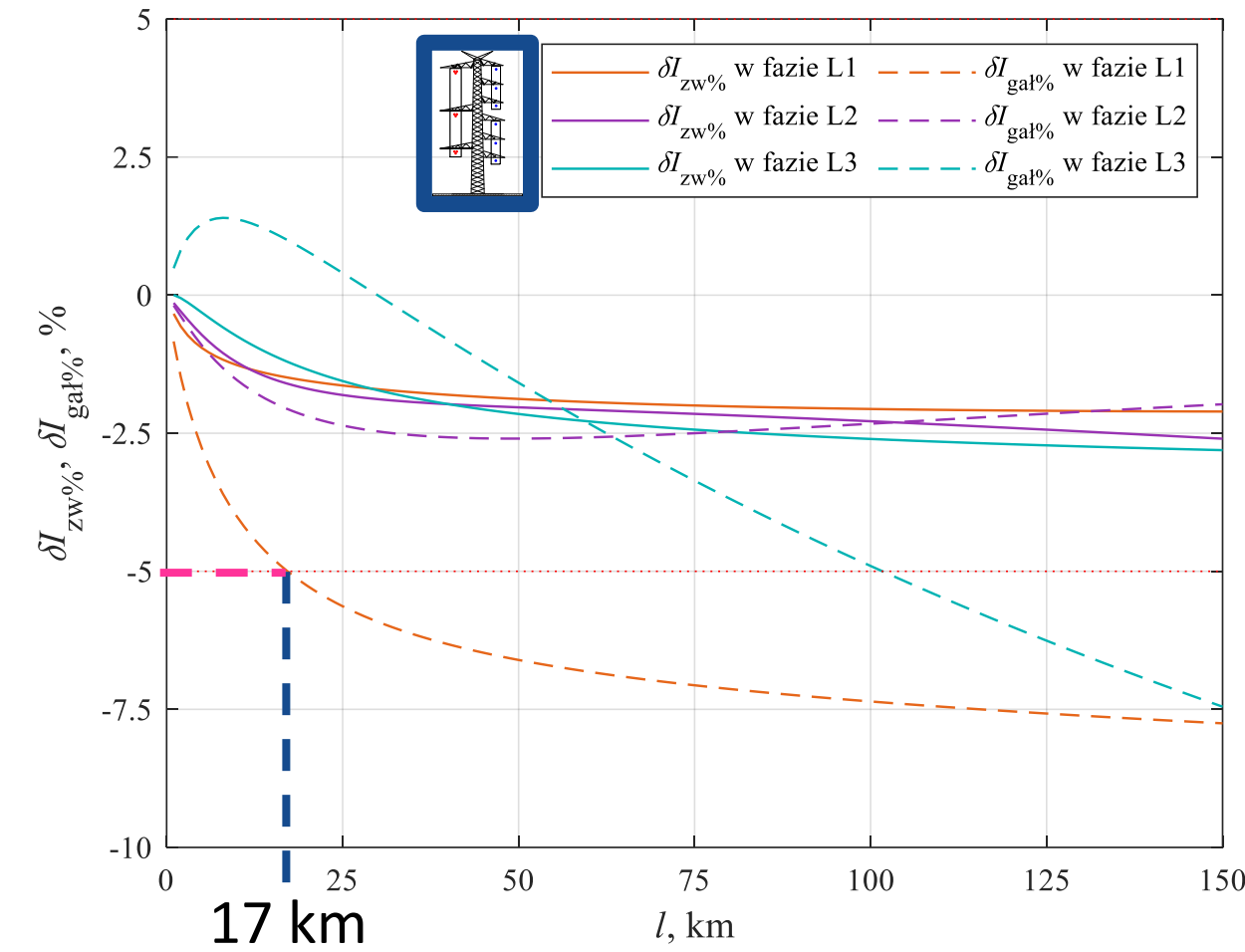
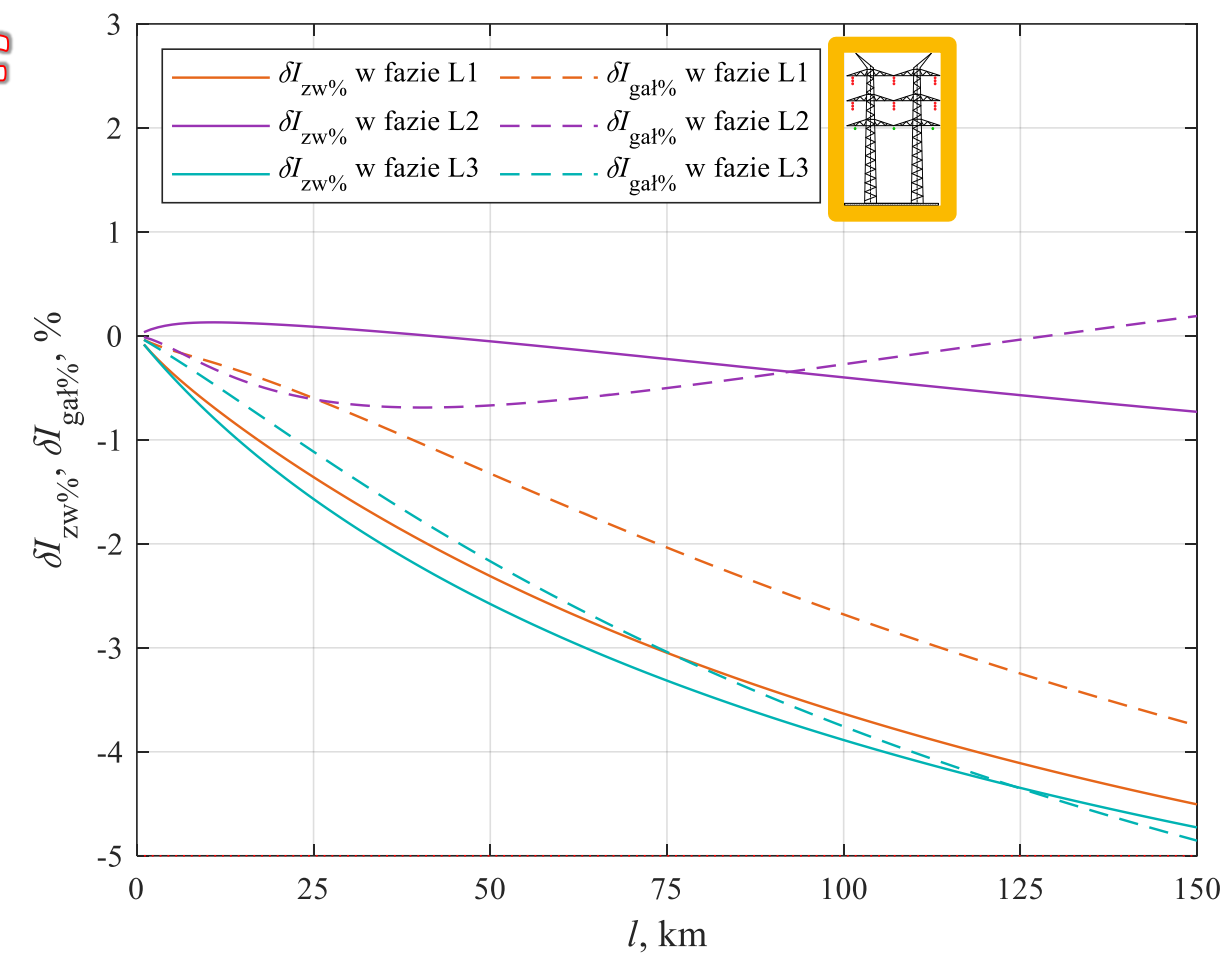
$$\delta I_{gał\%} = \frac{|I_{gał\ pu}^{sym}| - |I_{gał\ pu}^{niesym}|}{|I_{gał\ pu}^{niesym}|} \cdot 100\%$$



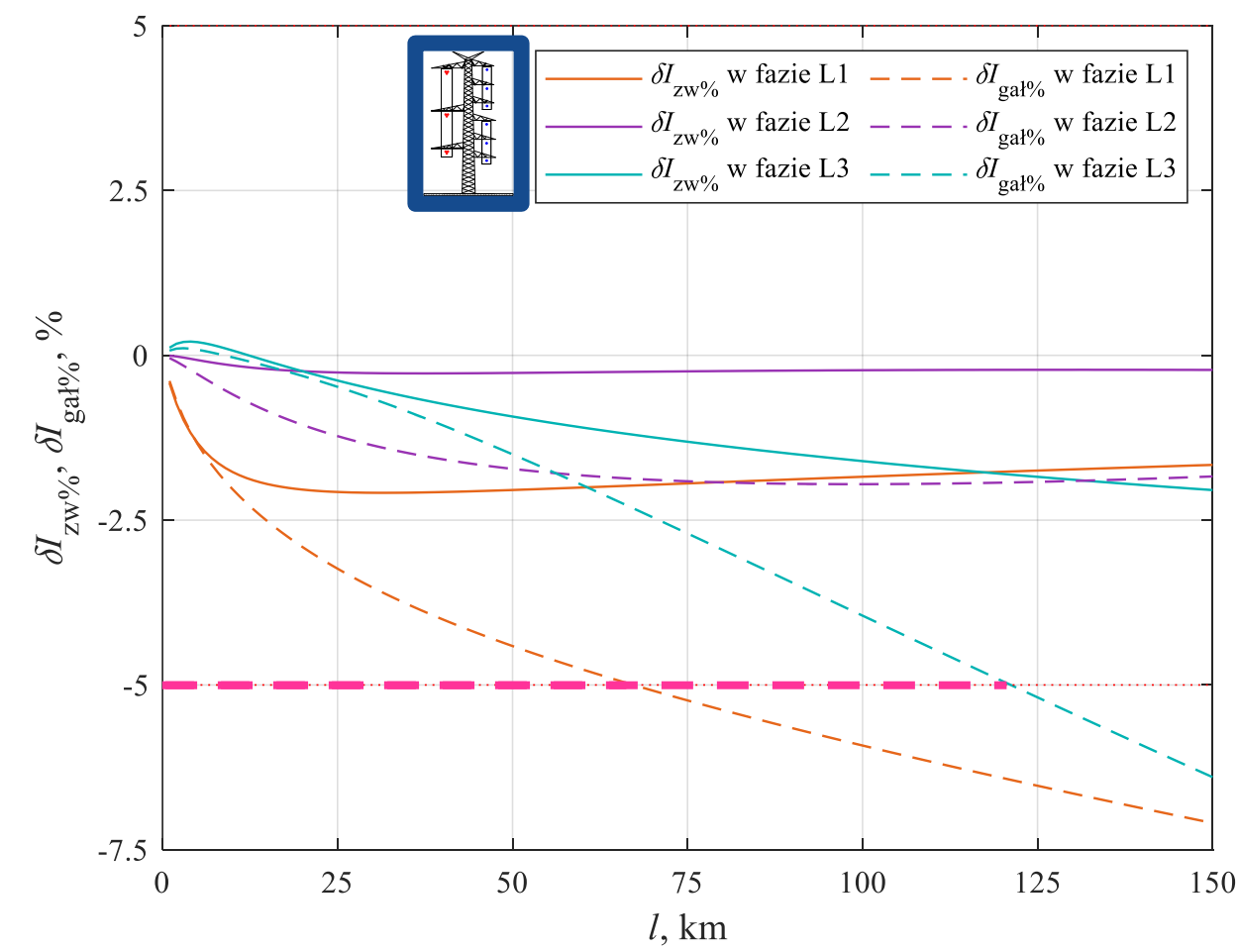
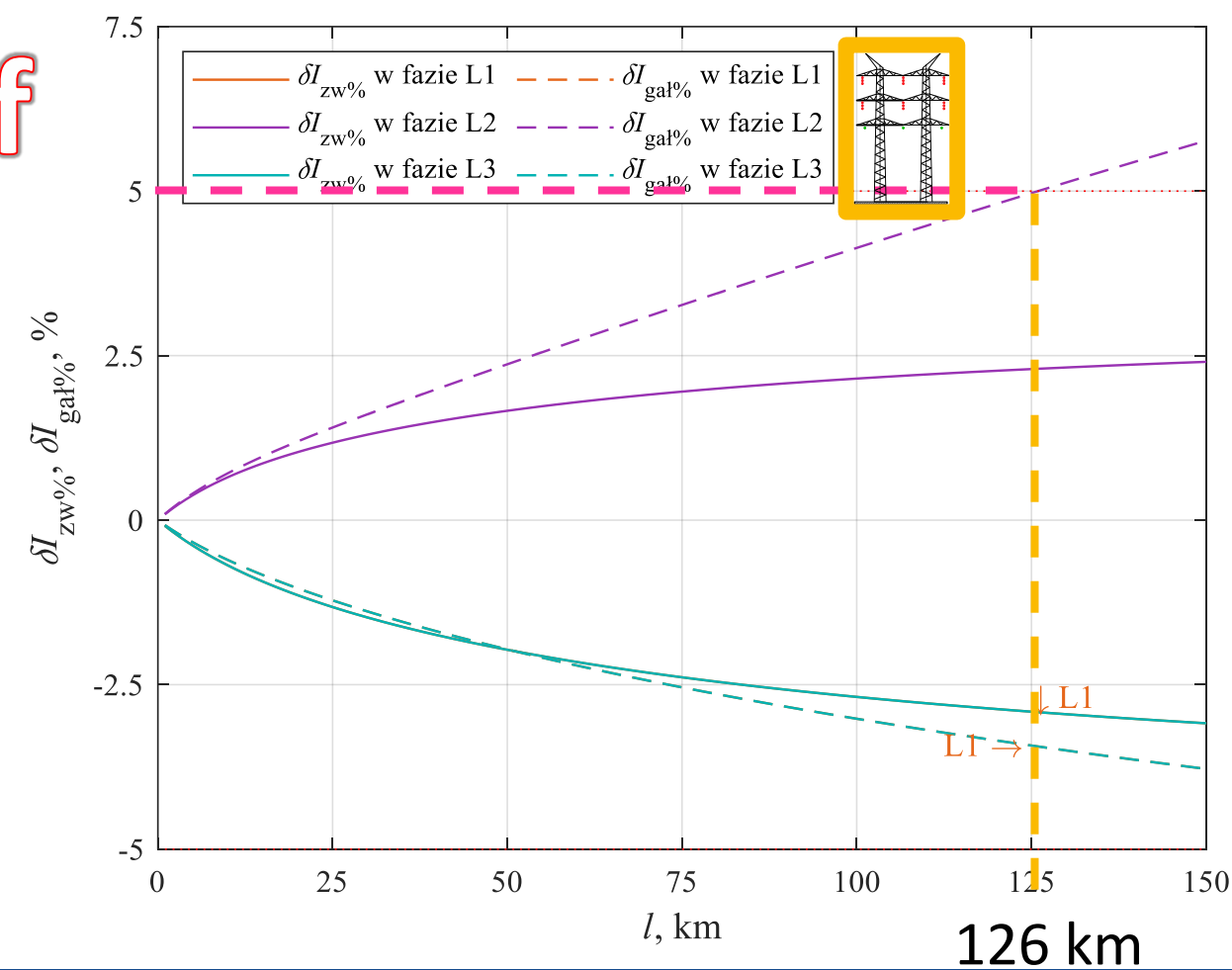
Model sieci zewnętrznej z WWLN do analizy zwarciowej

Procentowe błędy względne prądów zwarcia $\delta I_{zw\%}$ i prądów udziału $\delta I_{gal\%}$ w funkcji długości WWLN przy zwarciu trójfazowym i jednofazowym w torze III

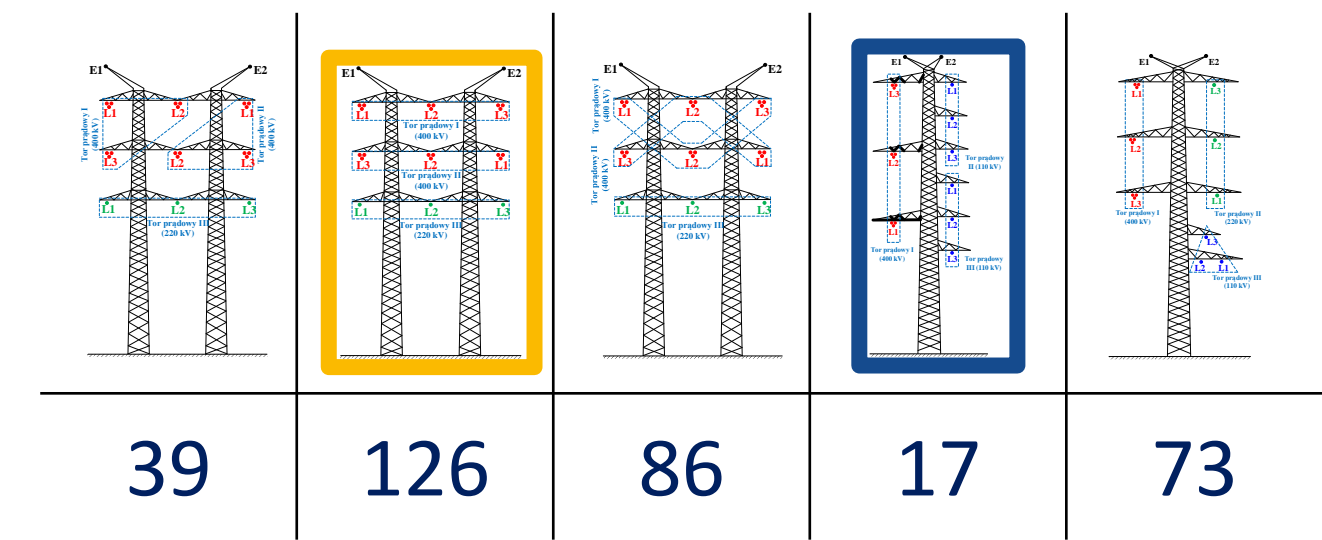
3f



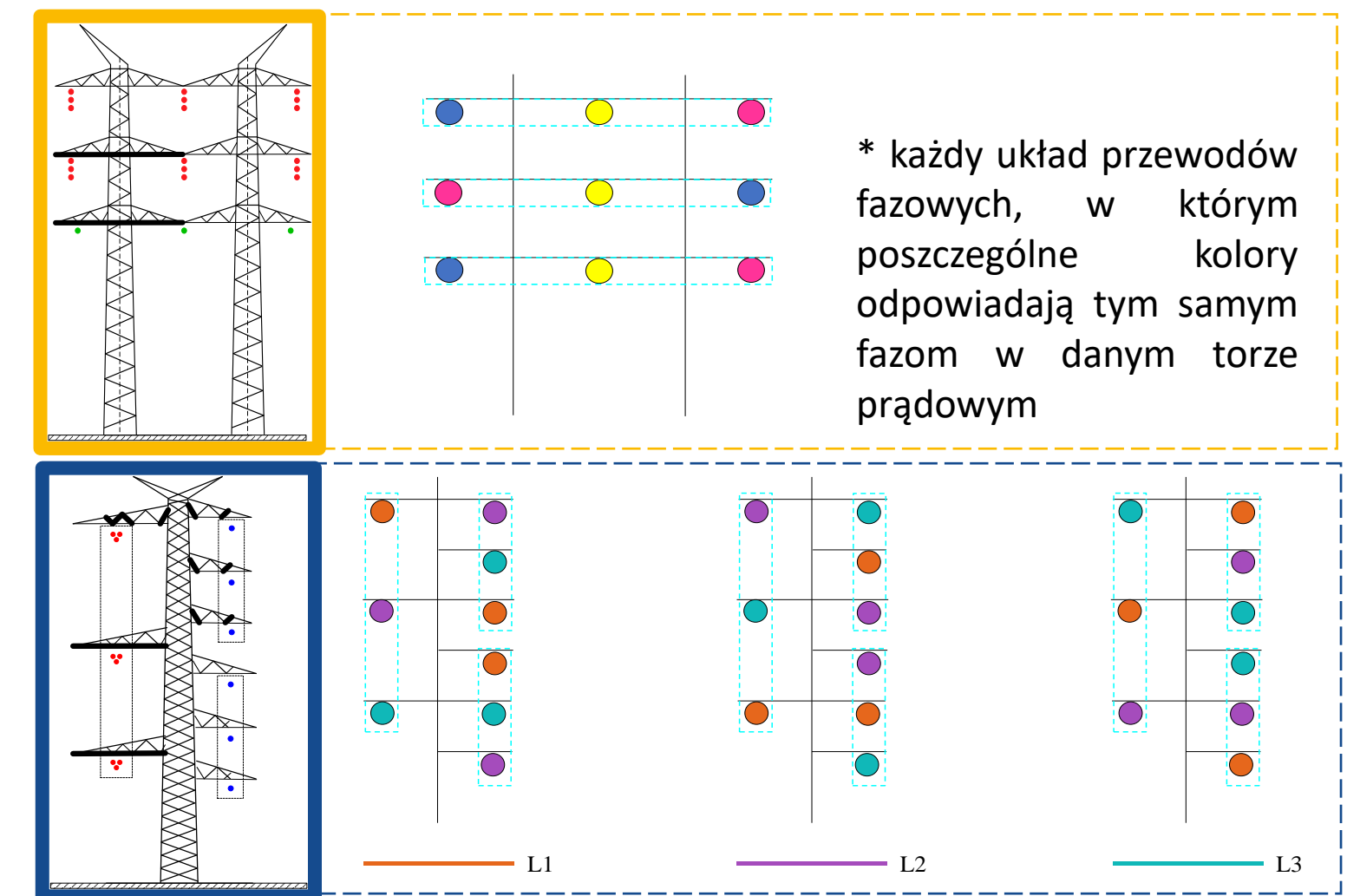
1f

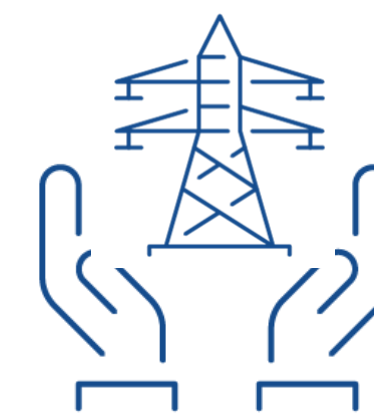


Maksymalne długości badanych WWLN w km, przy których nie przekracza się dopuszczalnego poziomu błędu przy modelowaniu zwarć



Układy przewodów fazowych WWLN, dla których osiąga się najmniejsze błędy przy modelowaniu zwarć ($l_{WWLN} = 75$ km)



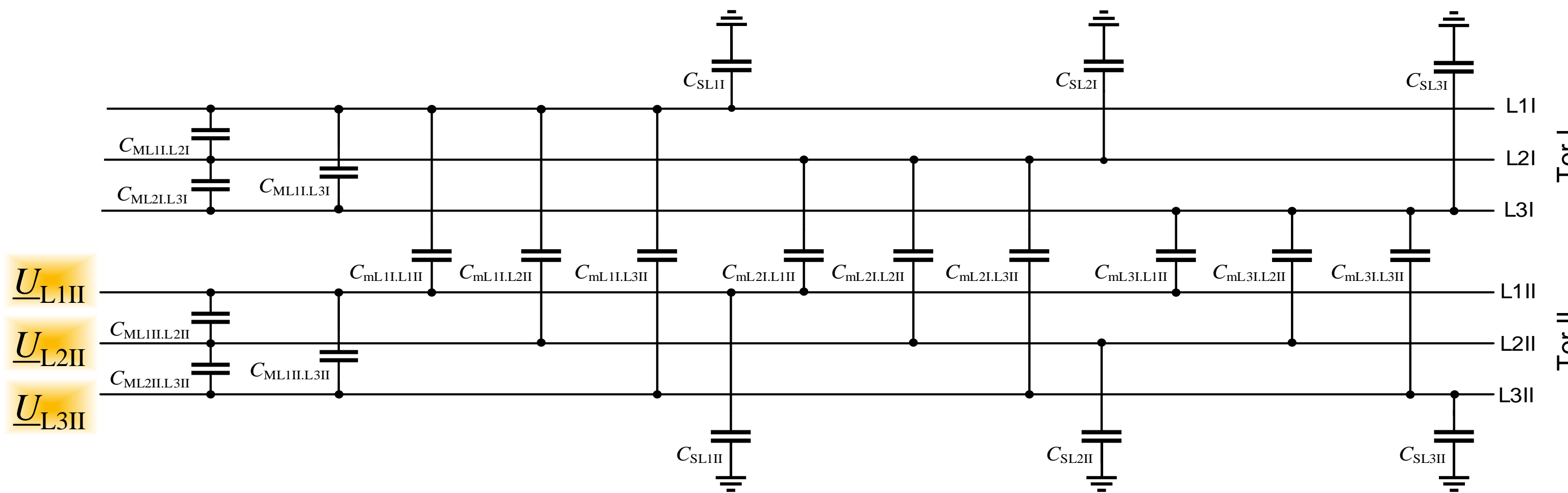


Jakiego napięcia można spodziewać się na przewodach odłączonego toru przy pracy innych torów?

Czy to bezpieczne?



Wyznaczenie napięcia U_0 w odłączonym torze prądowym WWLN



Pojemności cząstkowe w linii dwutorowej

$$U_0 = \frac{1}{3} |U_{L1II} + U_{L2II} + U_{L3II}|$$

Napięcie U_0 w odłączonym torze prądowym

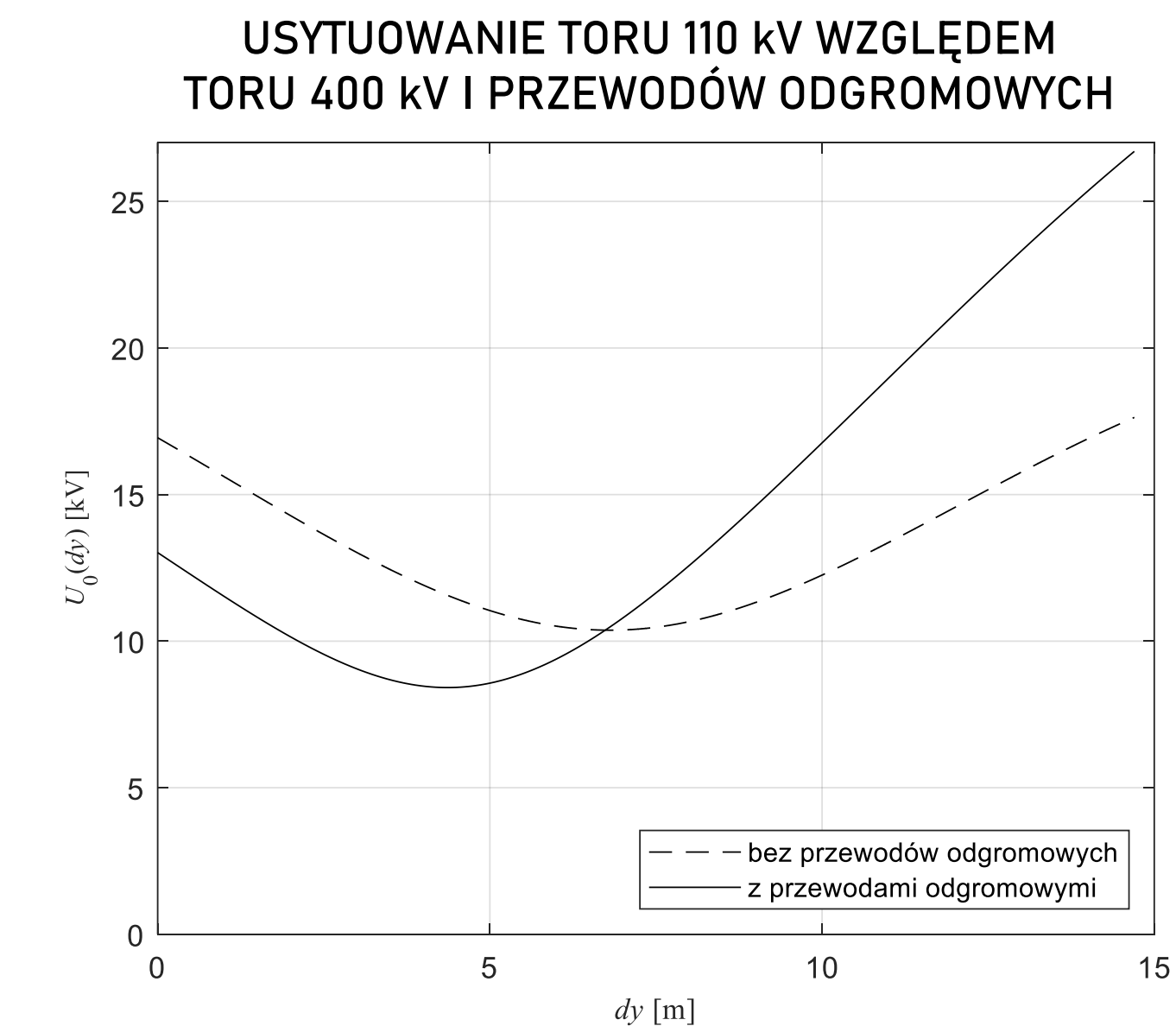
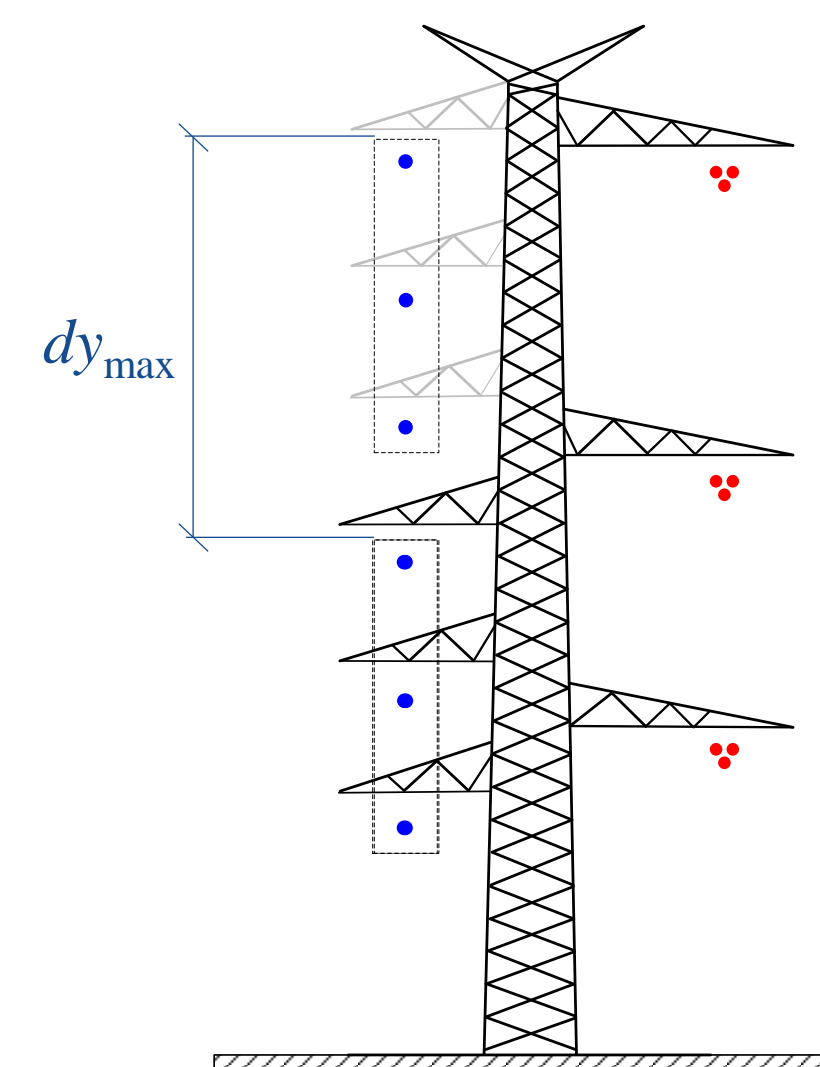
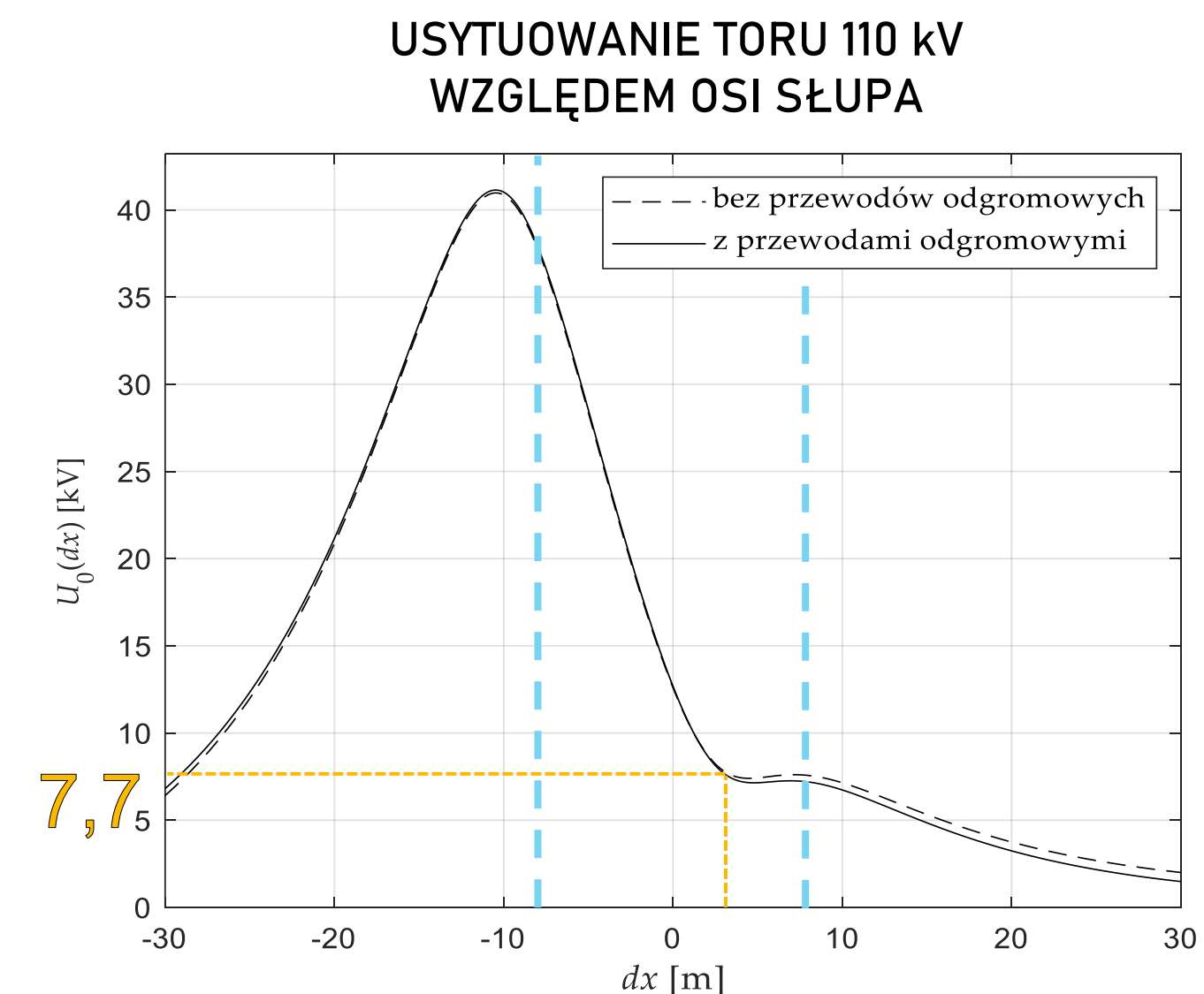
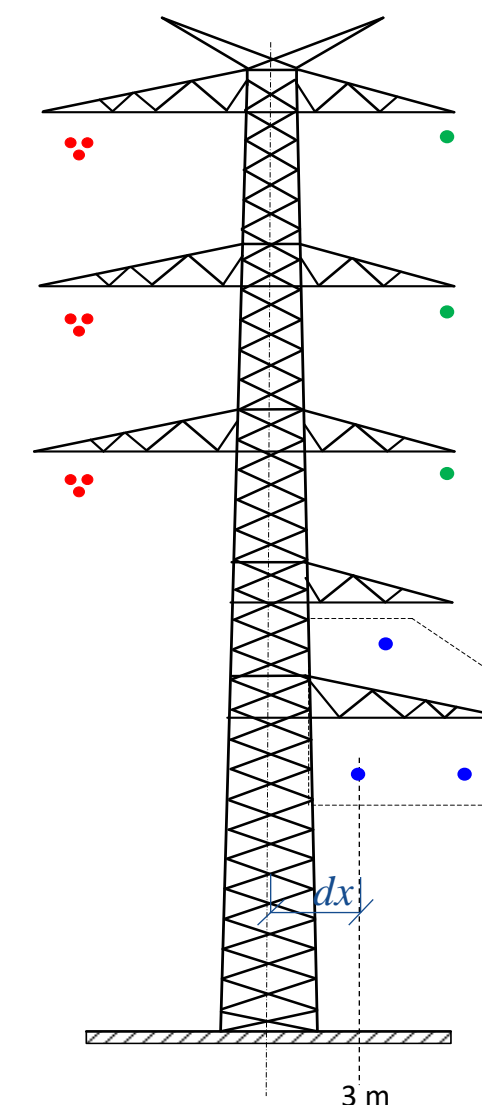
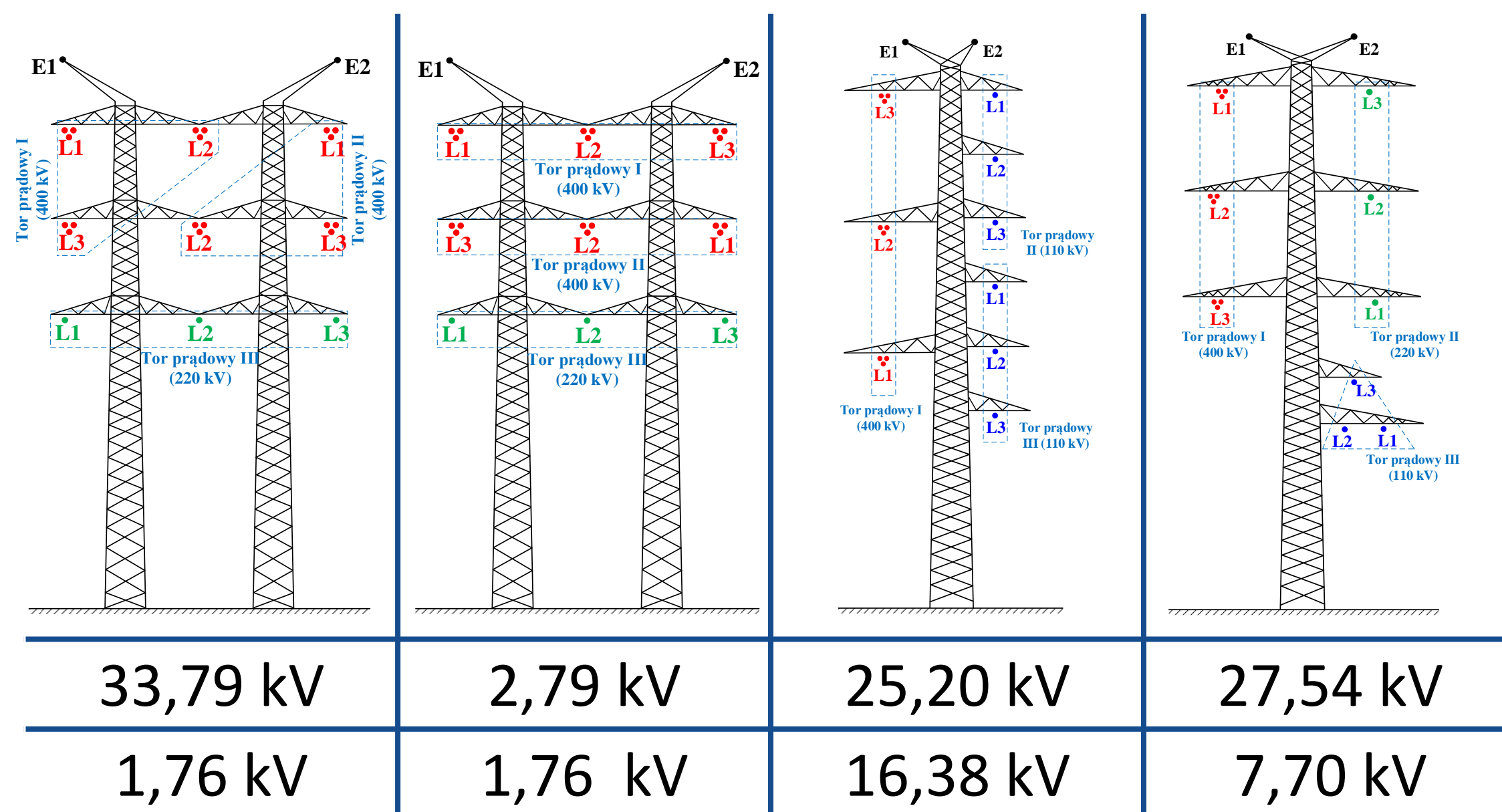


Skutki

Wywołane niedopuszczalnie wysokie napięcie U_0 jest poważnym problemem w ujęciu pracy zabezpieczeń ziemnozwarciowych oraz pojawienia się prądów składowej zerowej o znacznych wartościach w normalnych stanach pracy sieci przesyłowej.

Przykładowe wartości

Największe i najmniejsze wartości napięcia U_0 wyznaczone w torze prądowym III wyznaczone w funkcji układu przewodów fazowych





Jaki wpływ ma niesymetria geometryczna WWLN na jakość napięcia?

Badanie wybranych wskaźników jakości napięcia



SCENARIUSZE ANALIZ

- wyznaczenie wskaźników α_0 i α_2 w funkcji **długości WWLN** w zakresie od 1 km do 150 km przy obciążeniu torów prądowych prądami dopuszczalnymi długotrwale,
- wyznaczenie wskaźników α_0 i α_2 w funkcji zastosowanego **układu przewodów fazowych WWLN** dla długości linii wynoszącej 75 km oraz przy obciążeniu wszystkich torów prądowych połową prądów dopuszczalnych długotrwale.

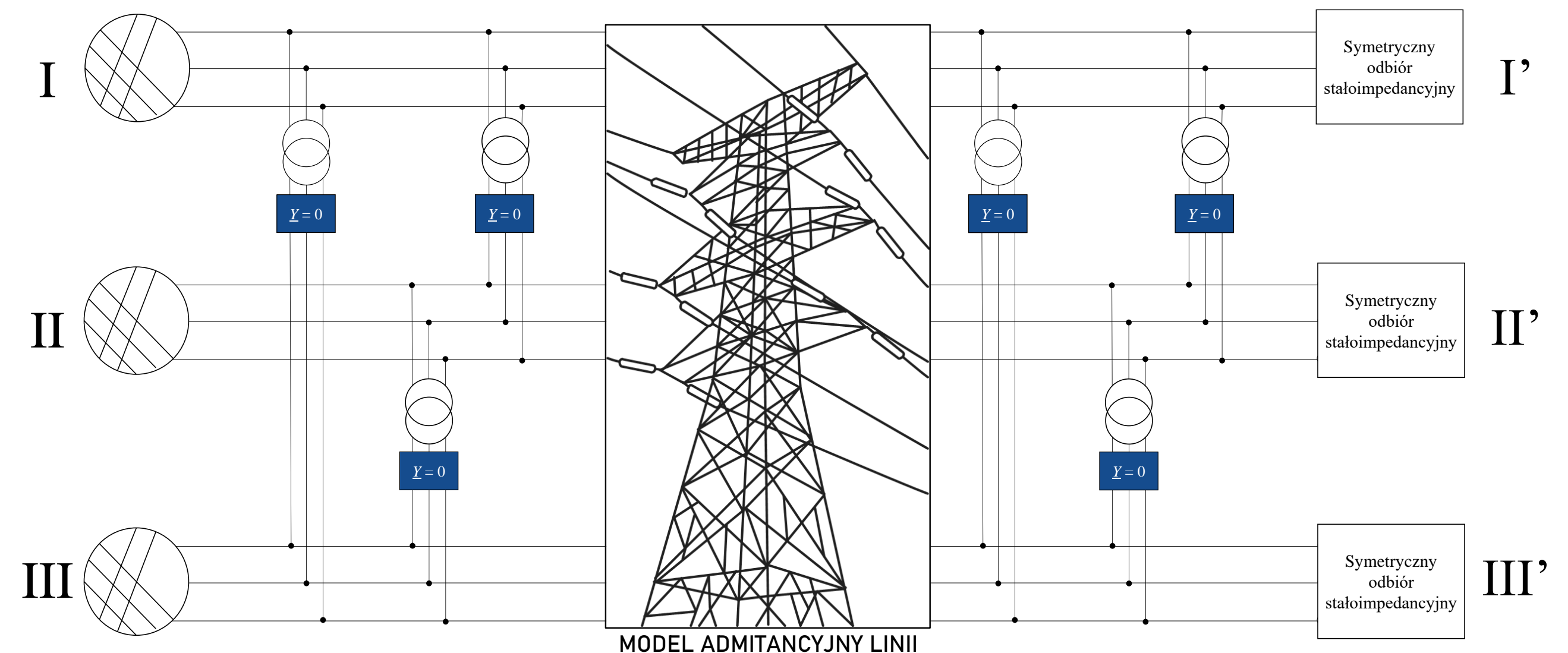
Przepisy krajowe podają wyłącznie graniczne wartości dla wskaźnika niesymetrii α_2 , który nie powinien przekraczać **1%**. Przyjęto tą samą graniczną wartość dla wskaźnika niezrównoważenia α_0 . Wskaźniki α_0 i α_2 traktuje się równoważnie.

WSKAŹNIK
NIEZRÓWNOWAŻENIA

$$\alpha_0 = \frac{|U_0|}{|U_1|} \cdot 100\%$$

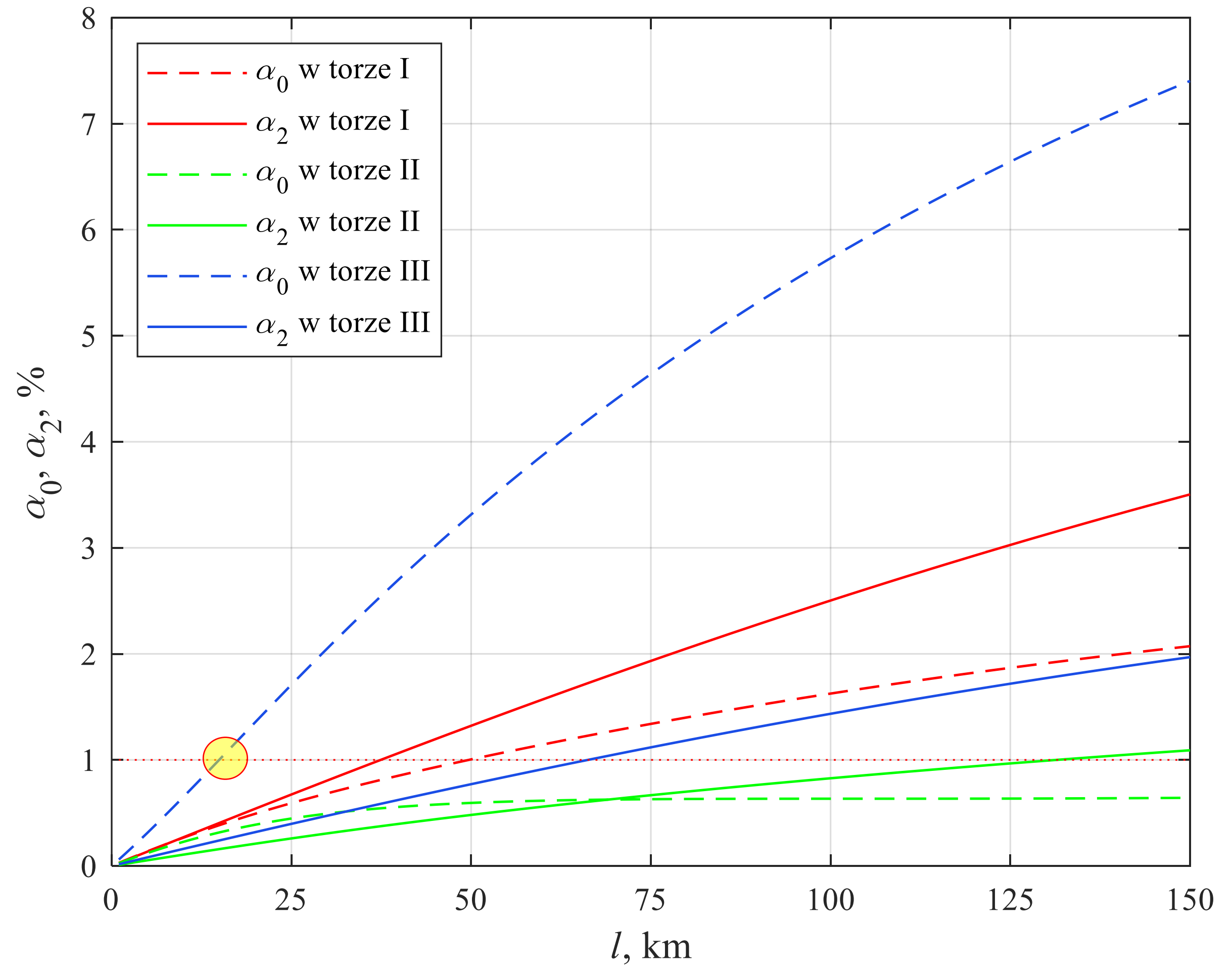
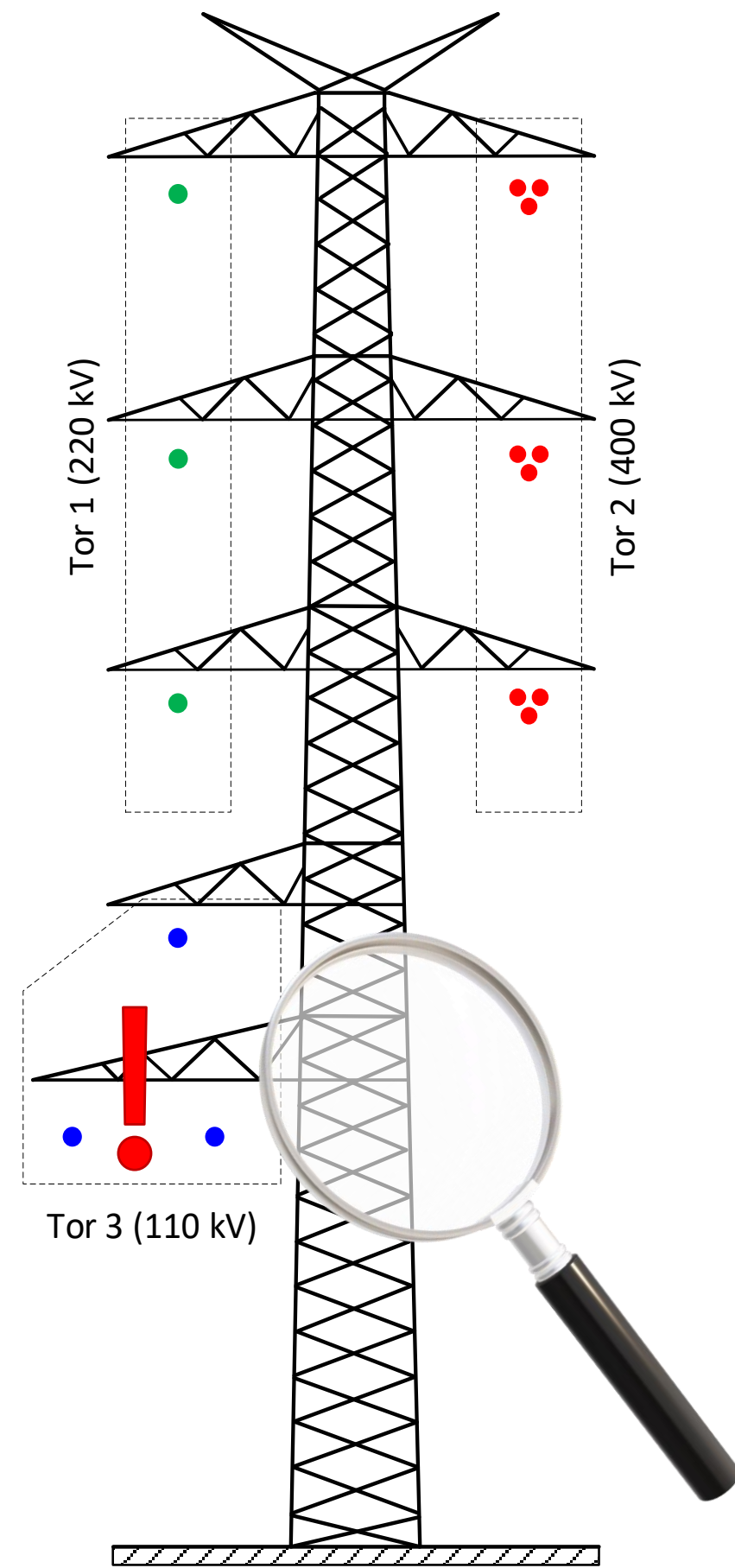
WSKAŹNIK
NIESYMETRII

$$\alpha_2 = \frac{|U_2|}{|U_1|} \cdot 100\%$$

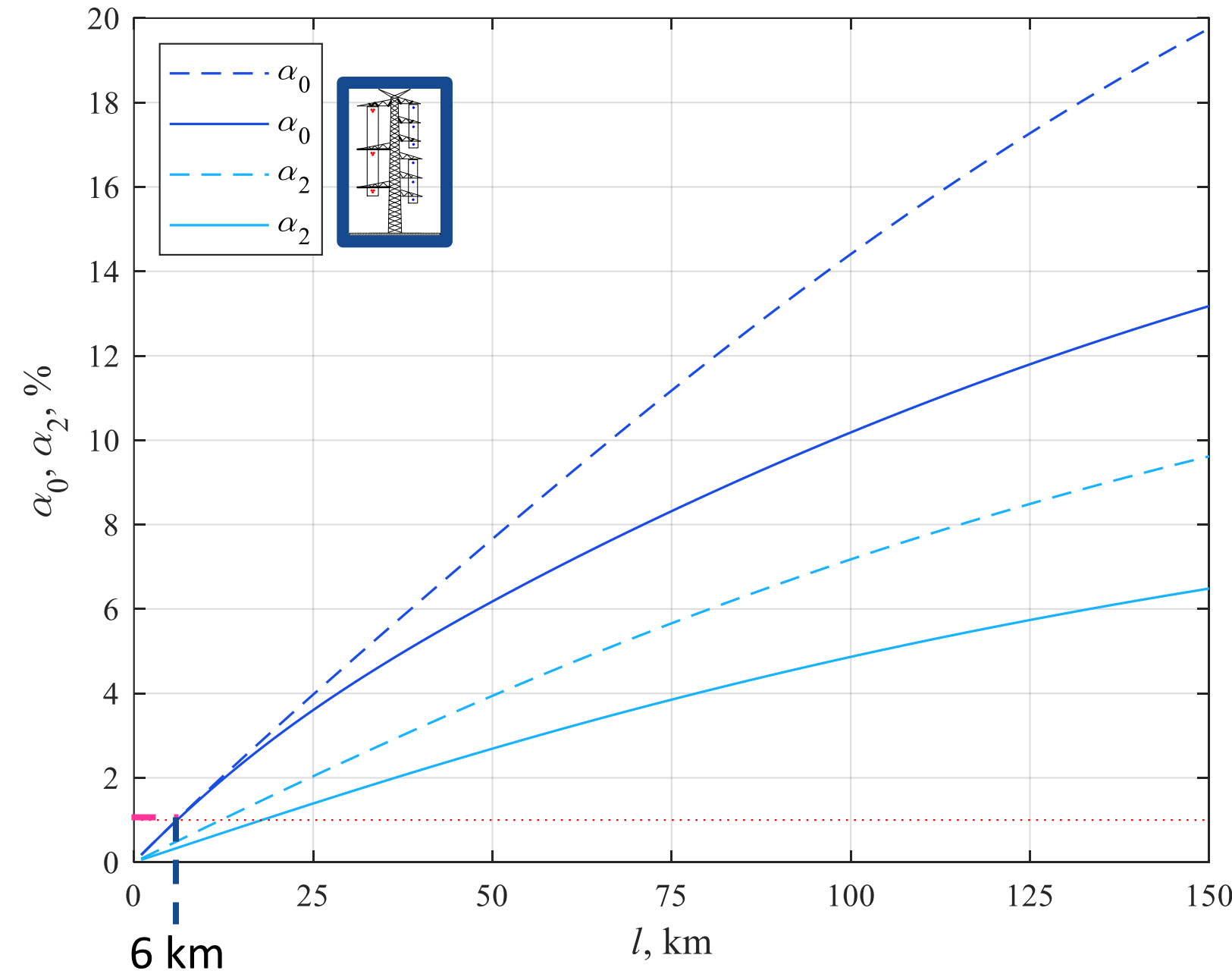
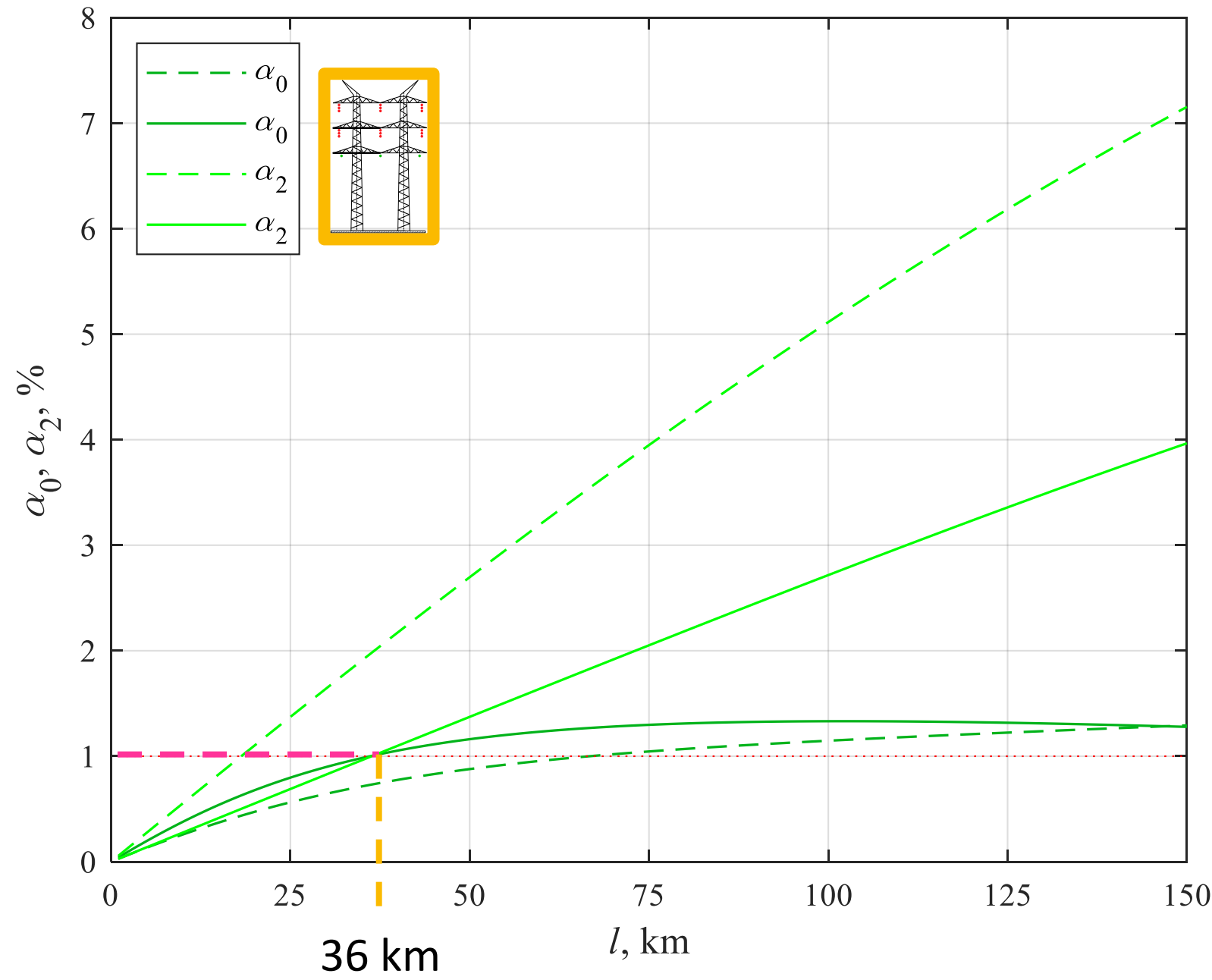


Model sieci zewnętrznej z WWLN do analiz niesymetrii impedancyjnej

WWLN



Wskaźniki niezrównoważenia α_0 i niesymetrii α_2 w funkcji długości WWLN

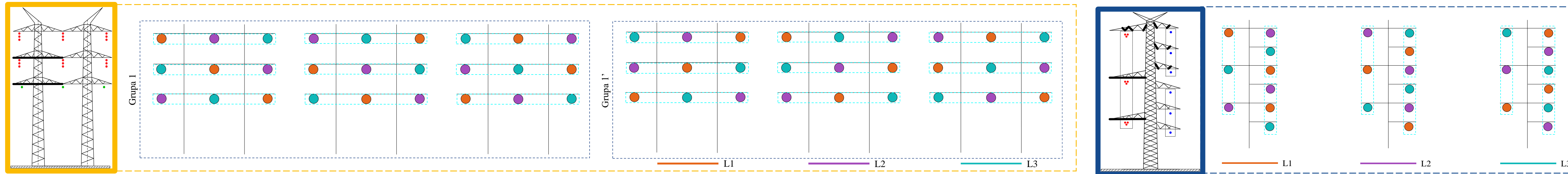


Maksymalne długości badanych WWLN w km, przy których nie przekracza się dopuszczalnej wartości wskaźników asymetrii

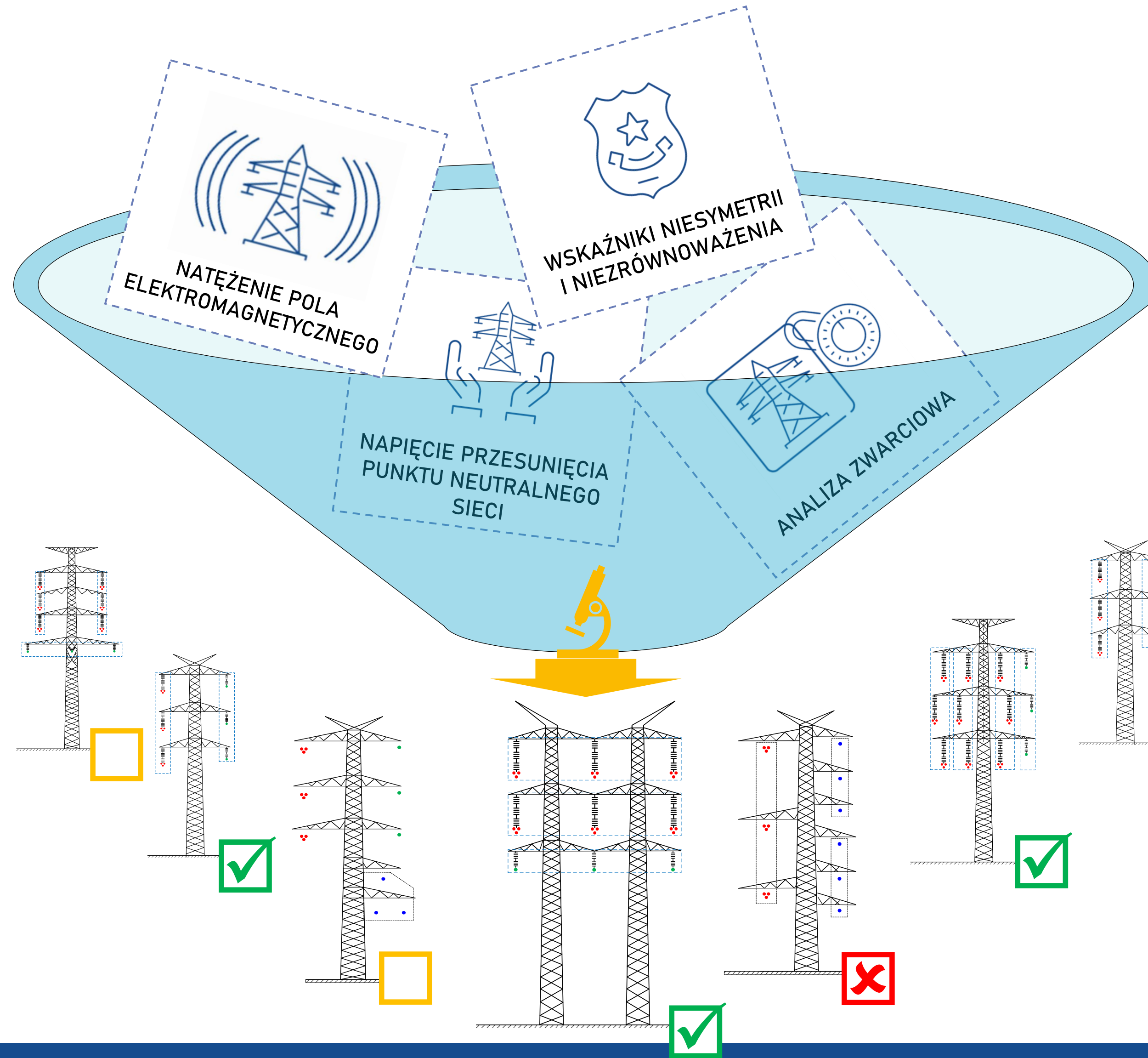
Poziom prądu obciążenia WWLN					
I_{dd}	6	36	36	6	15
$0,5I_{dd}$	12	72	72	12	30

-- praca jałowa toru III; – tor III obciążony I_{dd}

Układy przewodów fazowych WWLN, dla których osiągnęte wskaźniki asymetrii są najmniejsze ($l_{WWLN} = 75$ km)



Obserwacje z przeprowadzonych analiz

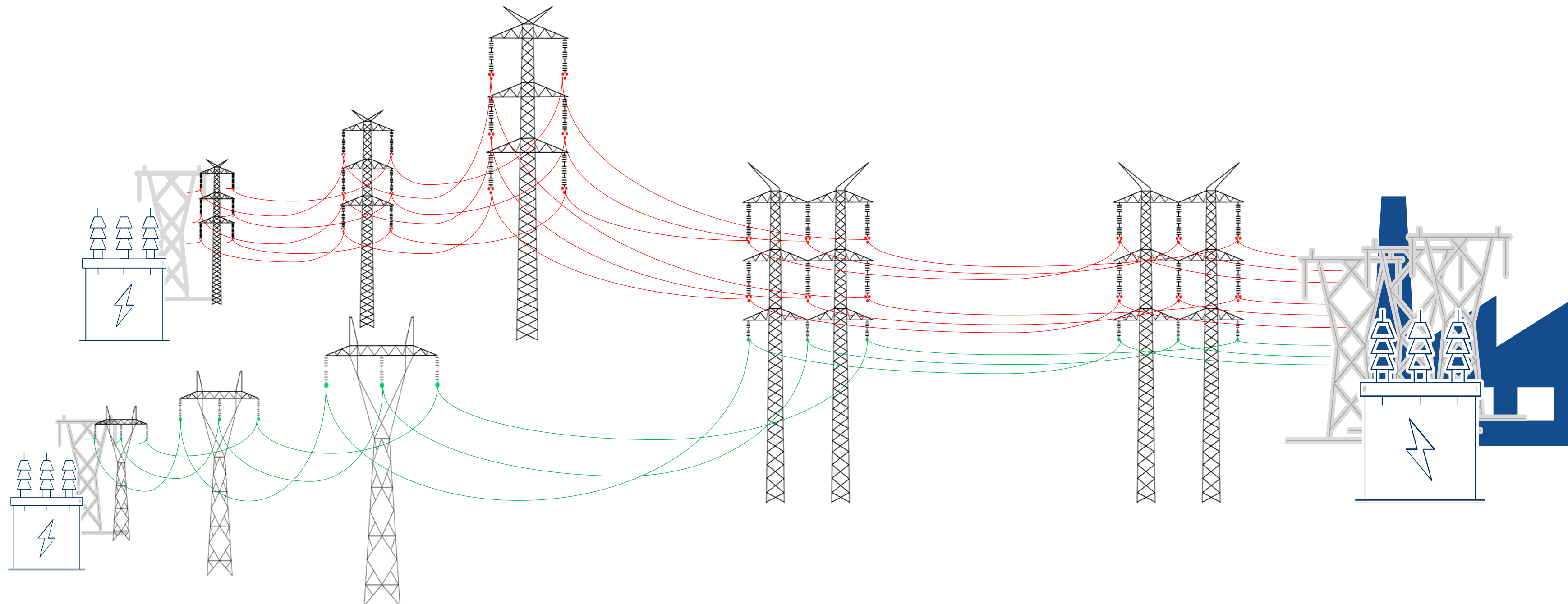


Najbardziej narażony na skutki niesymetrii geometrycznej WWLN jest tor o najniższym U_n !!!

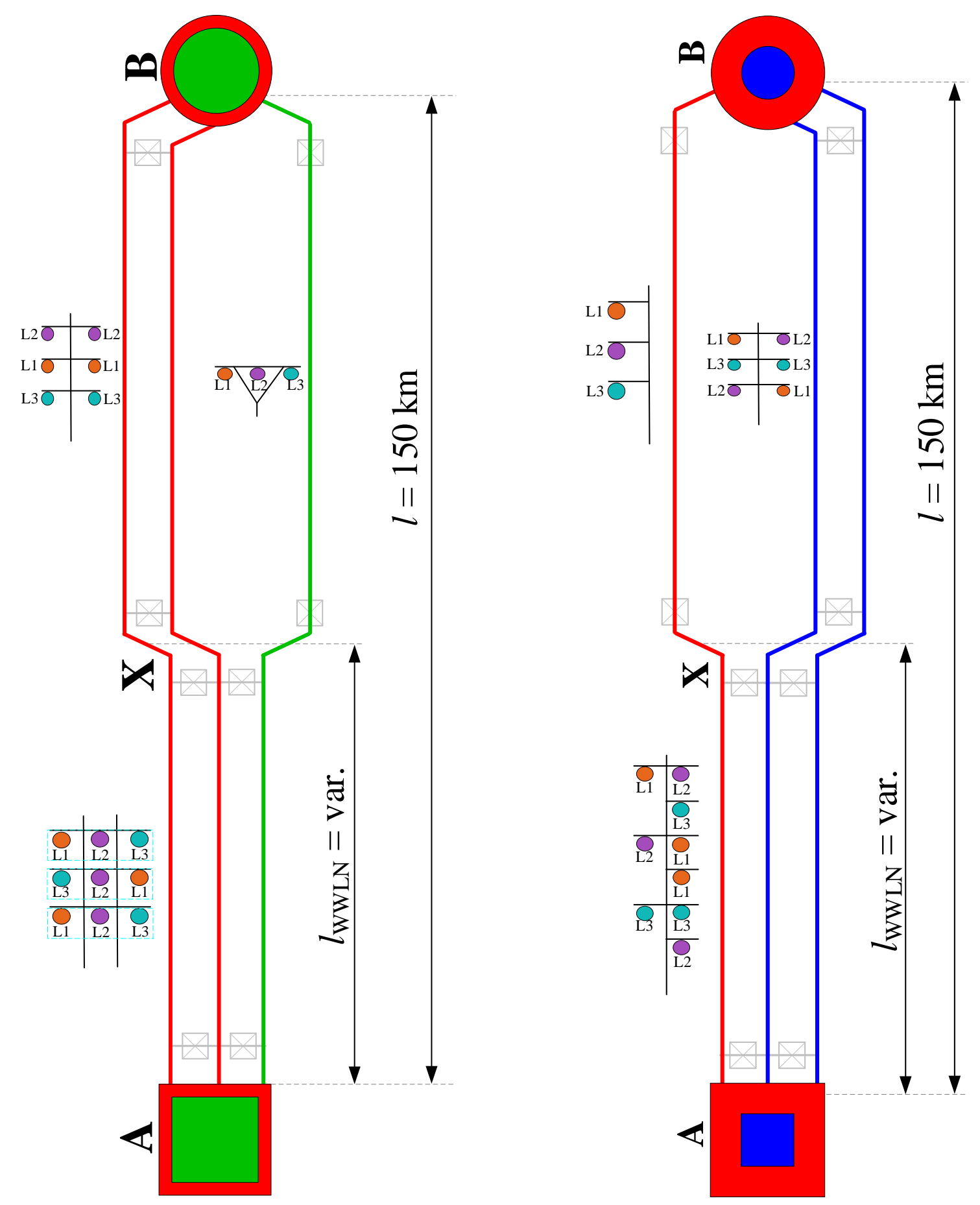


Obserwacje z przeprowadzonych analiz

- W procesie projektowania nowego połączenia liniowego zawierającego WWLN powinno się wybierać konstrukcje, które charakteryzują się małym stopniem niesymetrii geometrycznej.
- Szczególną uwagę należy zwrócić na warunki pracy toru prądowego o najniższym poziomie napięcia znamionowego spośród torów WWLN.



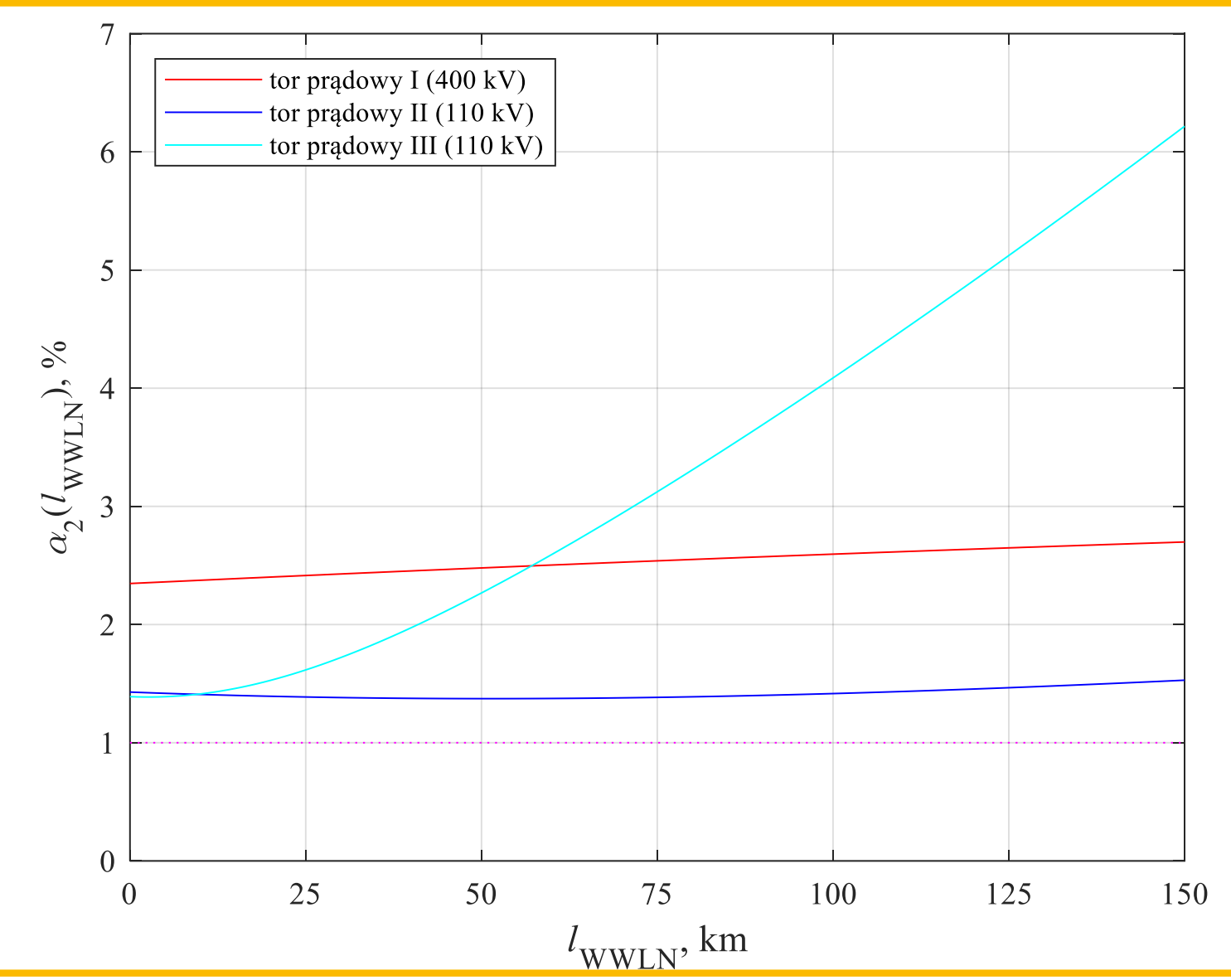
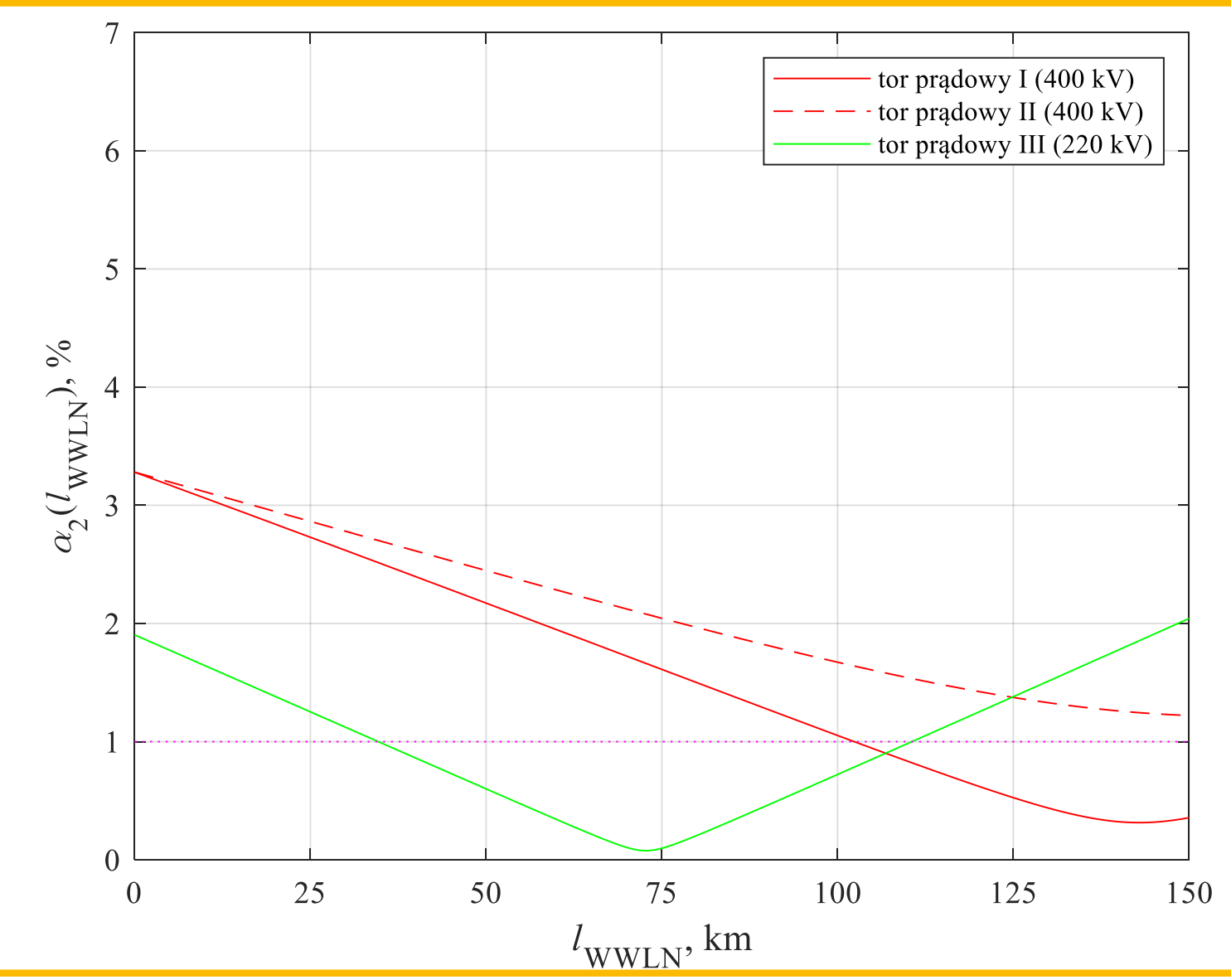
Wybór konstrukcji WWLN a wskaźniki asymetrii



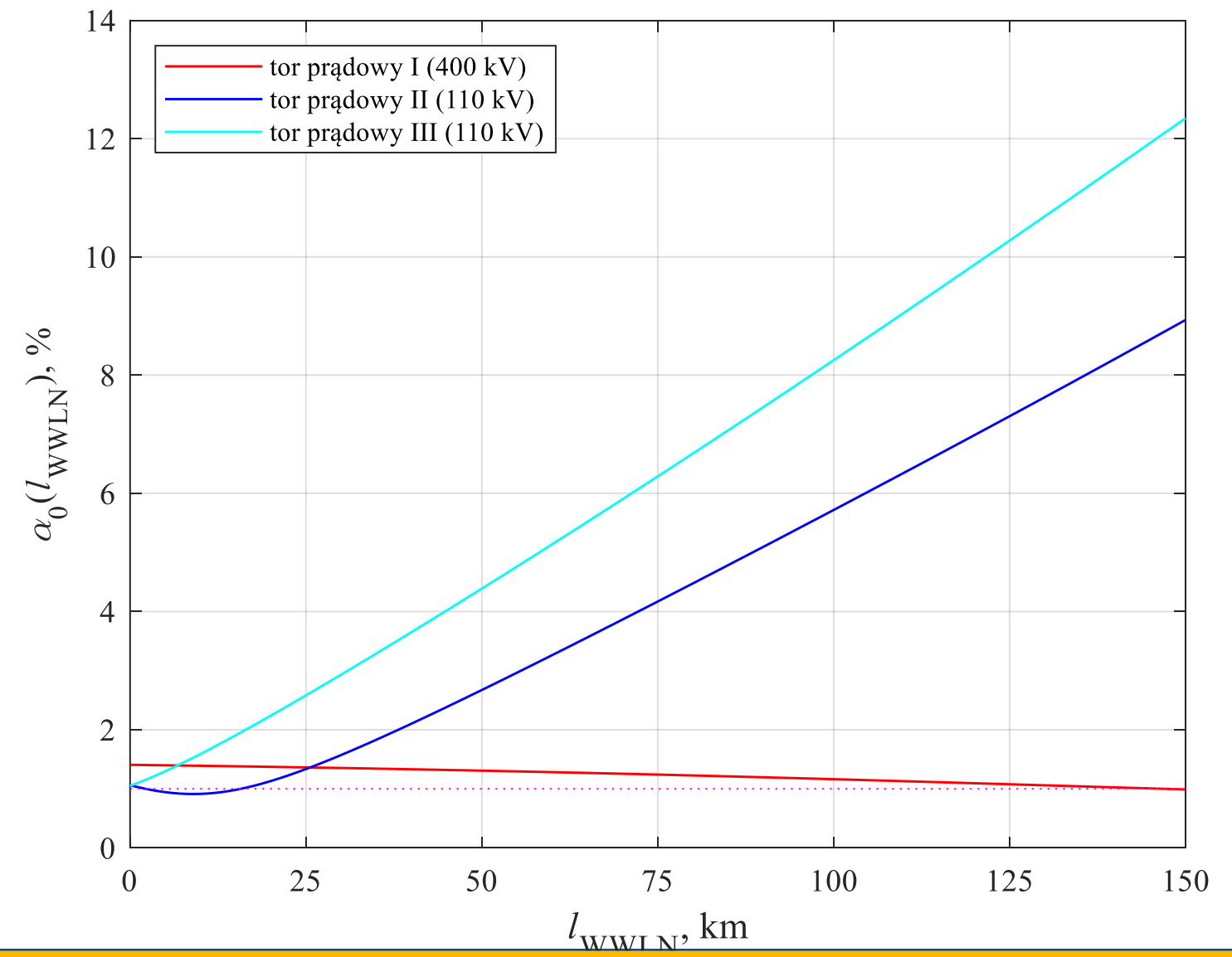
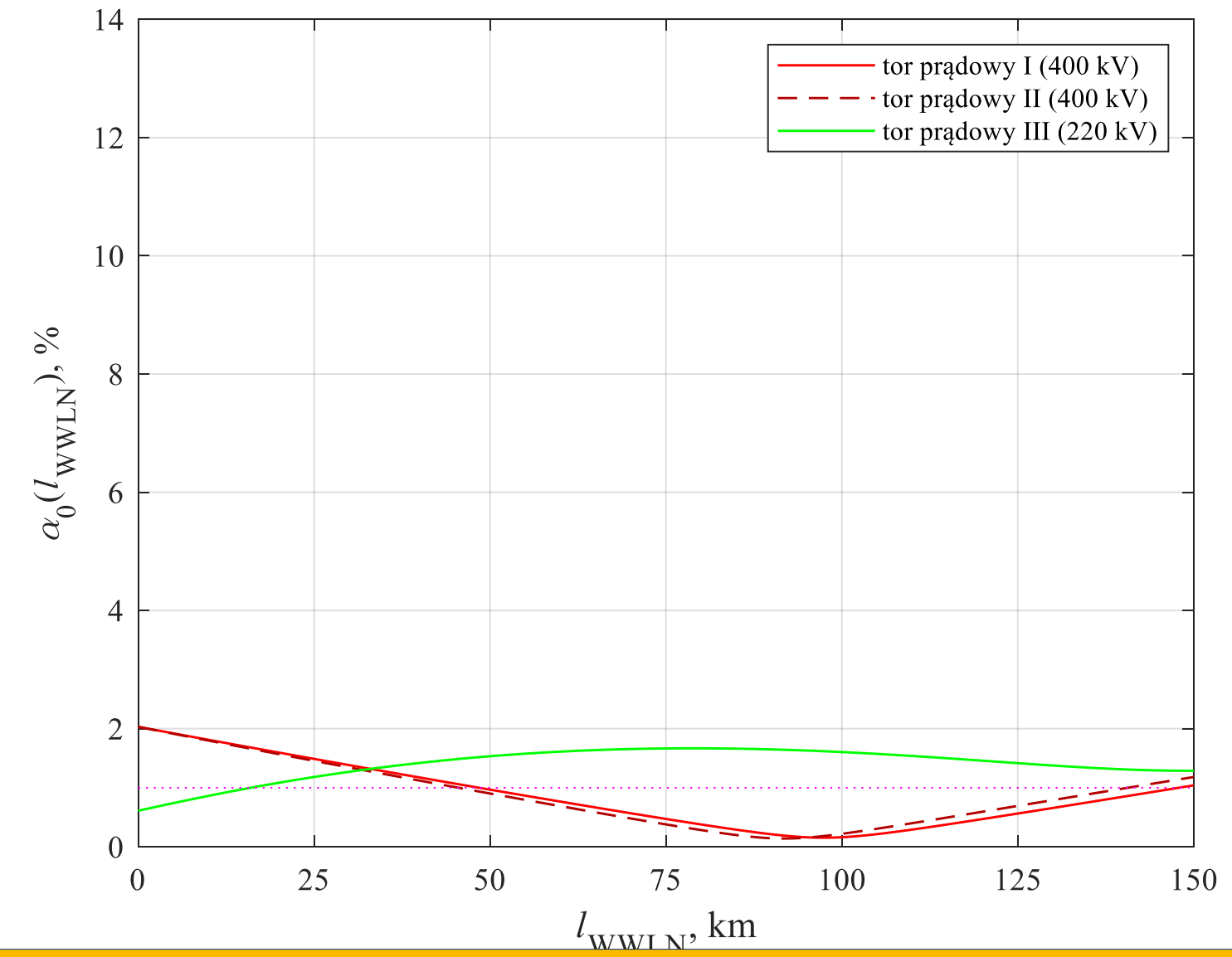
WWLN O MAŁYM STOPNIU NIESYMETRII GEOM.

WWLN O DUŻYM STOPNIU NIESYMETRII GEOM.

WSKAŹNIK NIESYMETRII



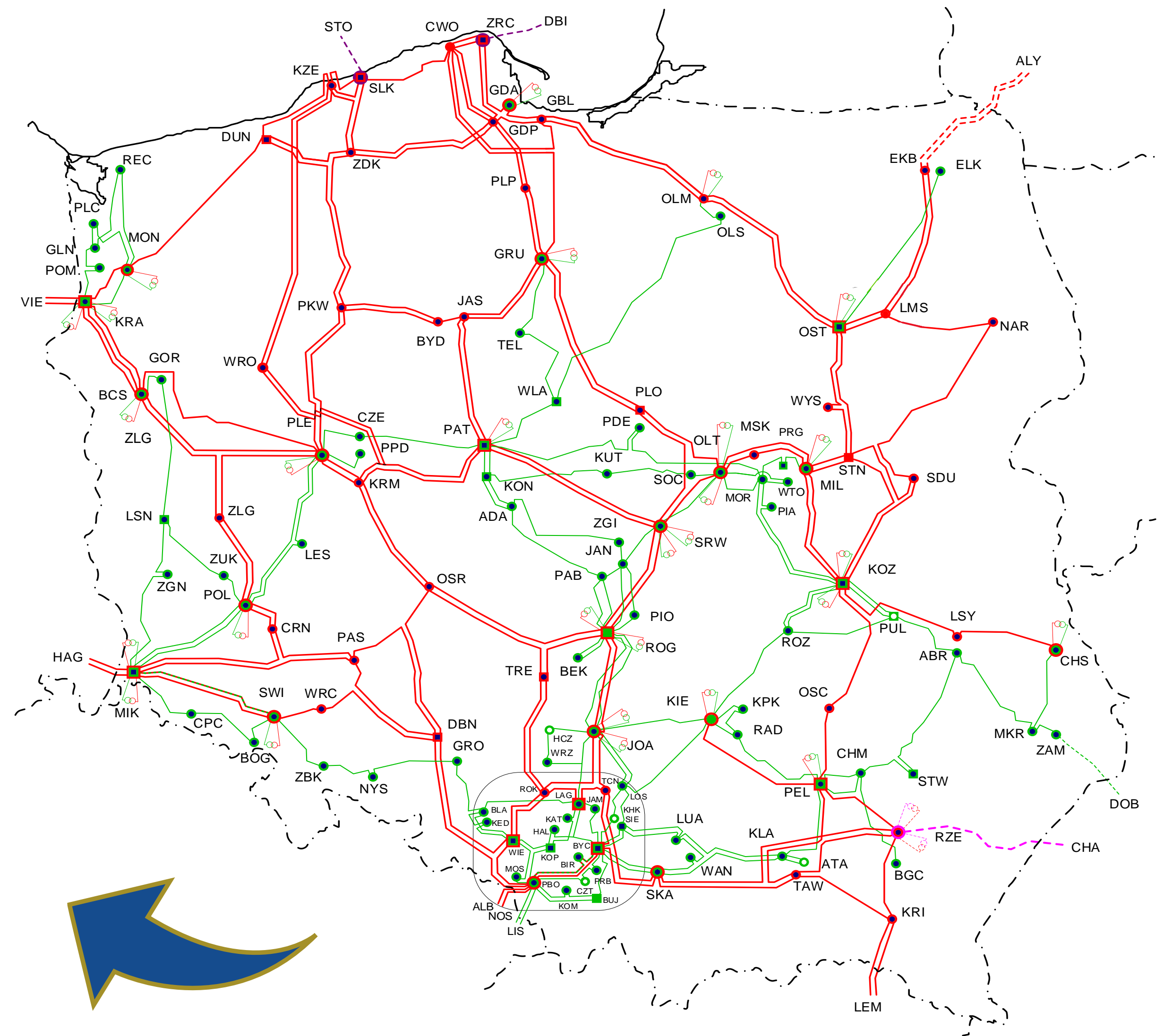
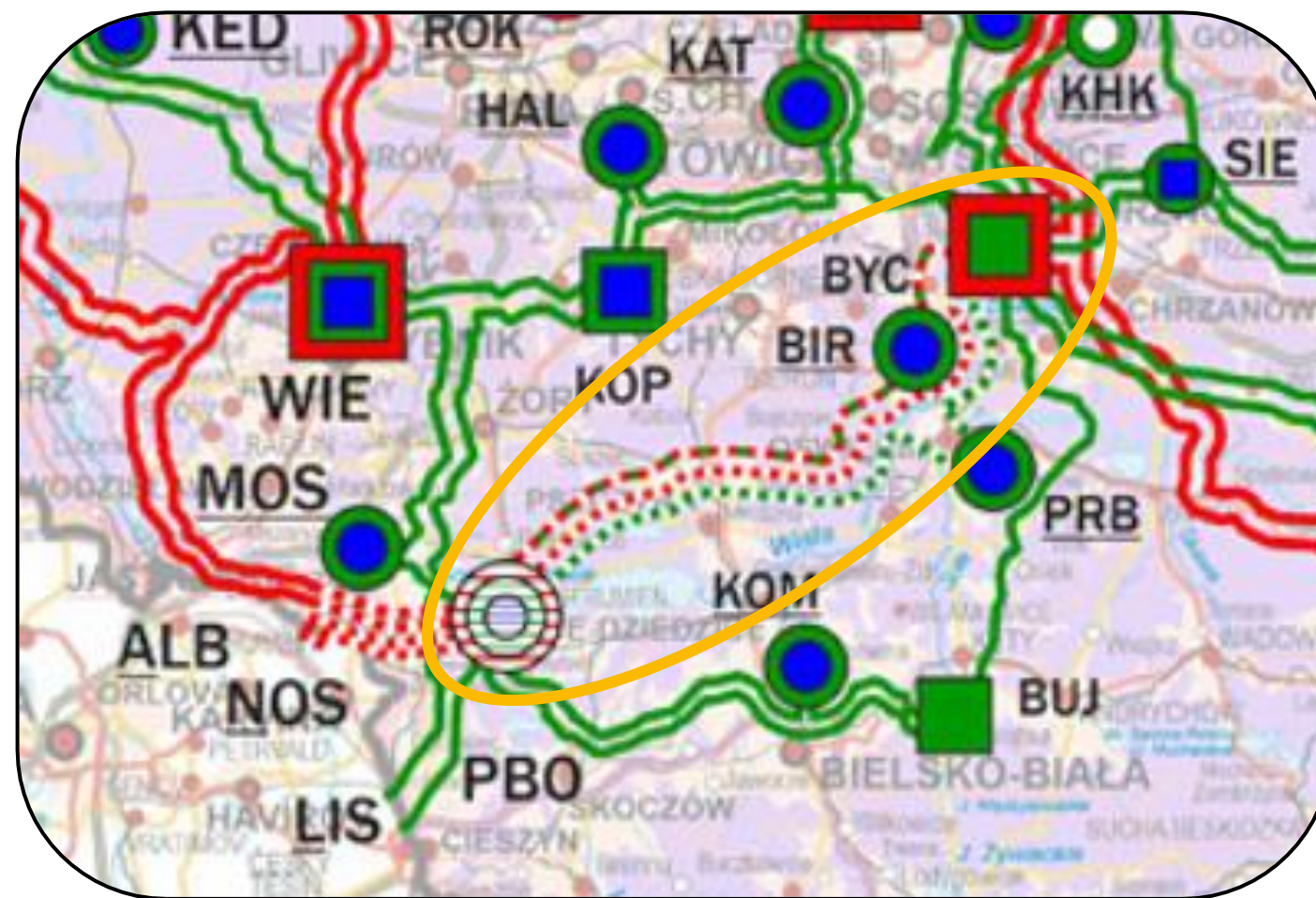
WSKAŹNIK NIEZRÓWNOWAŻENIA



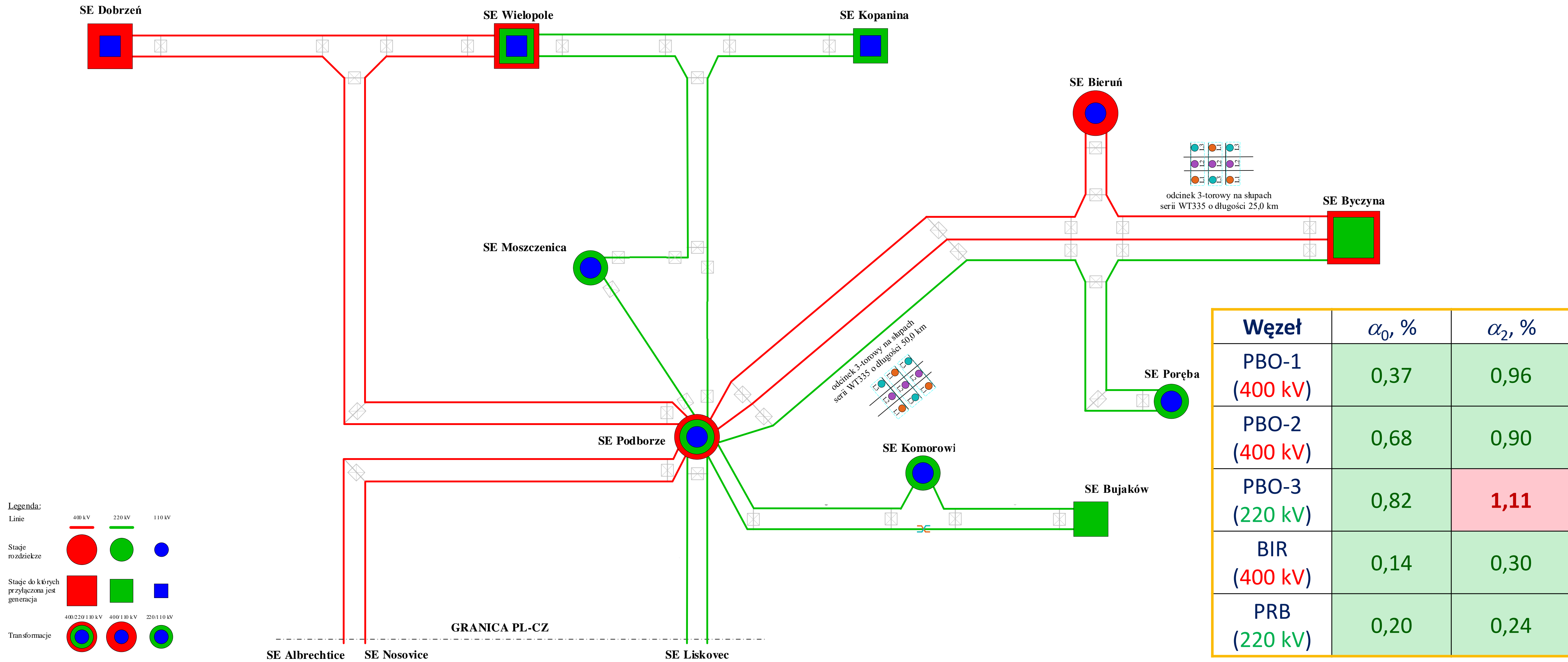
WWLN w rzeczywistym, niesymetrycznym otoczeniu sieciowym

Plan rozwoju systemu przesyłowego na lata 2027-2030 przewiduje budowę **trójtorowej, dwunapięciowej** linii napowietrznej 400+2×220 kV (docelowo 2×400+220 kV) w obszarze PSE-Południe o długości około 60-75 km relacji Byczyna-Podborze (BYC-PBO).

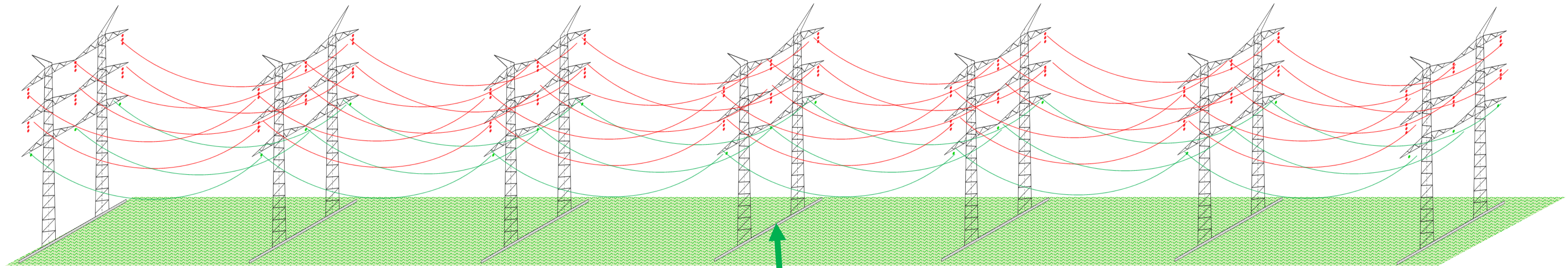
Dodatkowo w ciągu liniowym planuje się realizację dwóch odejść do stacji odbiorczych 220 kV Poręba (PRB) oraz Bieruń (BIR) – docelowo 400 kV.



Badane otoczenie sieciowe trójtorowej, dwunapięciowej linii napowietrznej



Likwidacja przekroczenia wartości wskaźnika niesymetrii w węźle PBO-3 (220 kV)

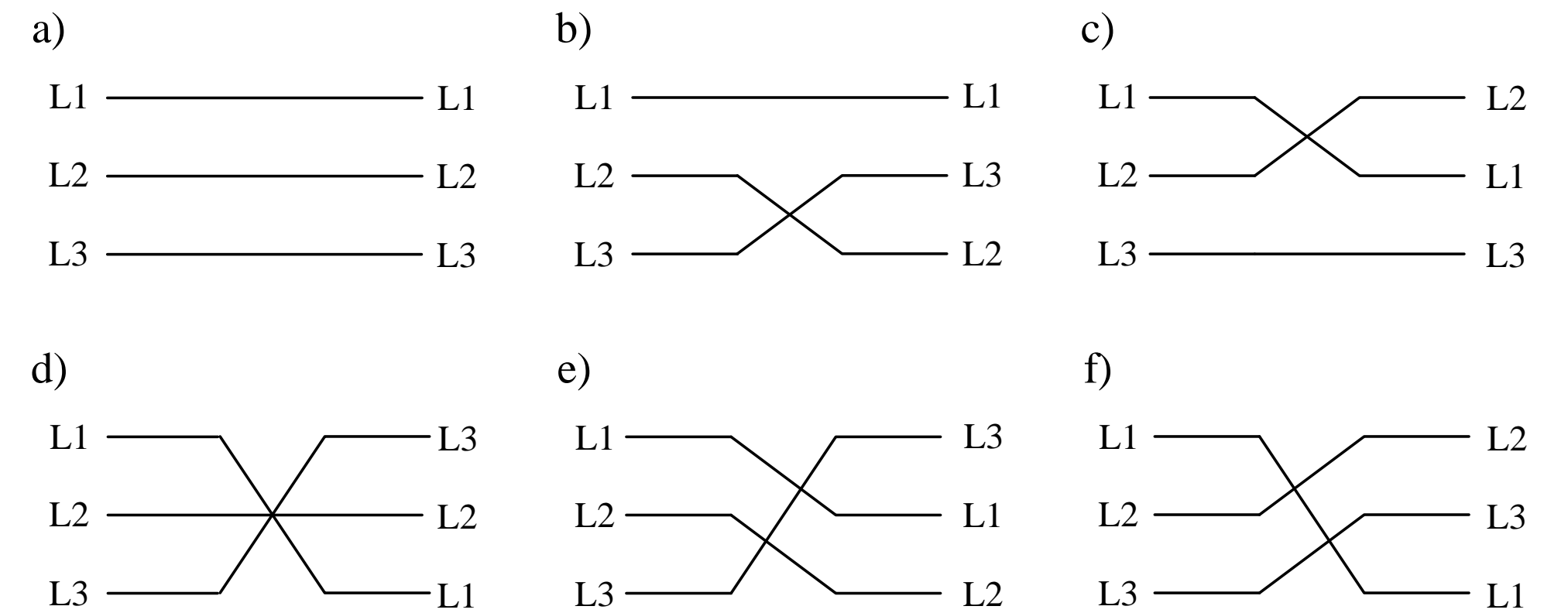


PRZEPLÓT W POŁOWIE DŁUGOŚCI LINII ↓ W TORZE 220 kV (węzeł PBO-3)

PRZEPLÓT PARY PRZEWODÓW



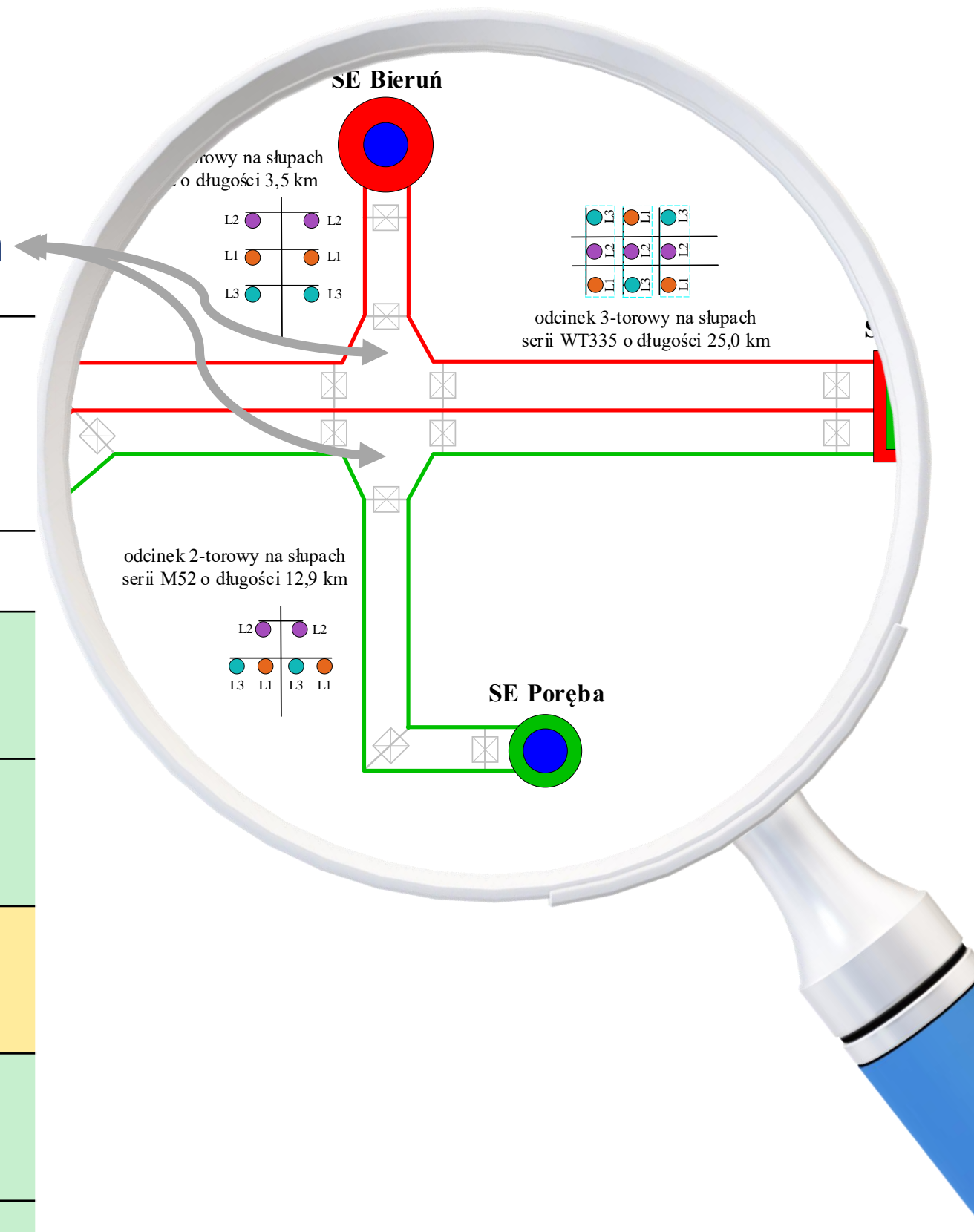
PRZEPLÓT WSZYSTKICH PRZEWODÓW



Możliwe konfiguracje wykonania przeplótów w torze prądowym i
 a) brak przeplótu, b)-d) przeplót pary przewodów, e)-f) przeplót wszystkich przewodów fazowych toru linii

Porównanie wskaźników niesymetrii i niezrównoważenia po wykonaniu przeplotów zrealizowany we fragmencie dłuższego odcinka WWLN

Układ podstawowy	Przeplot pojedynczy w $\frac{1}{2}$ długości odcinka WWLN		Przeplot podwójny w $\frac{1}{3}$ i $\frac{2}{3}$ długości odcinka WWLN		Zmiana układu faz w miejscu rozgałęzienia			
	$\alpha_0, \%$	$\alpha_2, \%$	$\alpha_0, \%$	$\alpha_2, \%$	$\alpha_0, \%$	$\alpha_2, \%$		
PBO-1 (400 kV)	0,37	0,96	0,37	1,00	0,37	0,99	0,36	0,49
PBO-2 (400 kV)	0,68	0,90	0,68	0,67	0,69	0,66	0,55	0,18
PBO-3 (220 kV)	0,82	1,11	0,82	0,87	0,85	0,83	0,86	1,00
BIR (400 kV)	0,14	0,30	0,13	0,28	0,13	0,28	0,36	0,64
PRB (220 kV)	0,20	0,24	0,21	0,67	0,14	0,82	0,27	0,56





Podsumowanie

WWLN są rozwiązaniem bardzo korzystnym.

Działania prowadzące do minimalizacji skutków niesymetrii geometrycznej WWLN można podzielić na dwa etapy:

1. wybór sylwetki charakteryzującej się małym stopniem niesymetrii geometrycznej,
2. (jeśli konieczna) częściowa symetryzacja WWLN.



Dziękujemy za uwagę



Sekcja IEEE DEIS Chapter Poland
15 lutego 2023 r.



Dr hab. inż. **Henryk Kocot**, prof. PŚ
Profesor uczelni



Dr inż. **Agnieszka Dziendziel**
Asystent



E-mail
Henryk.Kocot@polsl.pl
Agnieszka.Dziendziel@polsl.pl



Numer ORCID
0000 – 0003 – 4271 – 3036
0000 – 0002 – 0609 – 4736