



**SYMULACJA OGRANICZANIA**  
**ODDZIAŁYWAŃ ELEKTROENERGETYCZNYCH LINII WN**  
**NA RUROCIĄGI STALOWE**

**SIMULATION OF AC POWERLINES INTERFERENCE**  
**MITIGATION ON STEEL PIPELINES**

mgr inż. Maciej Malicki

Atagor Sp. z o.o.

Słowa kluczowe: korozja, oddziaływanie linii WN na rurociągi, symulacja  
Keywords: corrosion, AC powerlines interference, simulation

**Streszczenie**

Niniejszy artykuł opisuje symulację ograniczania zagrożenia korozyjnego powodowanego oddziaływaniem linii WN na rurociągi stalowe ułożone w ziemi. Ograniczono się do oddziaływań o charakterze indukcyjnym występujących podczas normalnej pracy linii. Zbudowano model elektryczny rurociągu o długości 100 km z równoległym zbliżeniem linii WN na odcinku 10 km. Zaprezentowano rozkład napięcia przemiennego i prądu płynącego w rurociągu. Przedstawiono wpływ rezystancji uziemienia i rozmieszczenia na trasie rurociągu urządzeń ograniczających napięcie przemiennie na efektywność ich działania. Na podstawie przeprowadzonych symulacji opracowano ogólne wytyczne do projektowania systemów ograniczania napięcia przemiennego na rurociągach.

**Summary**

The paper describes simulation of AC corrosion risk mitigation on buried steel pipelines. The scope is limited to inductive coupling during normal operation of power line. Electrical model of 100 km pipeline with a 10 km parallel HVAC power line closeup has been built. AC voltage and current distribution along the pipeline was presented. The effectiveness of installing SSD decouplers was considered according to grounding resistance and their location along the pipeline. On the basis of simulation outcomes, general guidelines concerning AC mitigation systems design have been formulated.

## 1. Wprowadzenie

W związku z rozwojem infrastruktury energetycznej na ograniczonej przestrzeni coraz częściej mamy do czynienia z przypadkami bliskiego sąsiedztwa linii przesyłowych wysokiego napięcia i rurociągów stalowych. W konsekwencji coraz większego znaczenia nabiera problem wzajemnego oddziaływania elementów sieci. Napięcia przemienne indukowane w rurociągach znajdujących się w obrębie pola magnetycznego przewodów sieci średniego i wysokiego napięcia mogą stanowić nie tylko realne zagrożenie korozyjne, ale także prowadzić do uszkodzeń zamontowanych urządzeń (ochrony katodowej, układów automatyki, monitoringu) oraz wpływać niekorzystnie na bezpieczeństwo osób wykonujących prace, które wymagają kontaktu z rurociągiem.

## 2. Rodzaje oddziaływań

Wyróżnia się trzy typy oddziaływań linii WN na rurociągi [1]. Oddziaływania o charakterze pojemnościowym występują jedynie podczas układania rurociągów, gdy te składowane są w sposób zapewniający dobrą izolację od ziemi. W tym przypadku zwykle uziemienie jednego końca rurociągu przy pomocy pręta stalowego jest wystarczające do odprowadzenia zgromadzonych ładunków.

Oddziaływania o charakterze omowym typowo mają miejsce podczas stanów awaryjnych linii WN. Prądy zwarciove płynące przez uziemienie słupa wytwarzają stożki napięciowe, które mogą obejmować swoim zasięgiem część rurociągu. W takim przypadku jego powłoka izolacyjna może ulec uszkodzeniu z uwagi na znaczną różnicę potencjałów. Ponadto wysoki potencjał uziomów elektroenergetycznych może być „rozwlekany” przez rurociąg na znaczne odległości w zależności od stanu powłoki izolacyjnej.

Oddziaływania o charakterze indukcyjnym występują zarówno podczas stanów awaryjnych, jak i podczas normalnej pracy linii WN. Źródłem oddziaływań jest pole magnetyczne wytwarzane przez prąd płynący w przewodach, które z kolei powoduje indukowanie siły elektromotorycznej w rurociągu objętym działaniem pola. Najistotniejsze czynniki wpływające na skalę oddziaływania to usytuowanie rurociągu względem linii, rezystywność jego powłoki izolacyjnej i natężenie prądu w linii.

## 3. Metody ograniczania oddziaływań

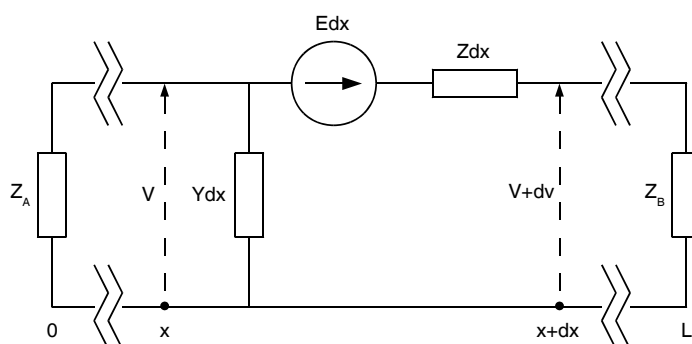
Zgodnie z przewodnikami CIGRE [2,3] środki zabezpieczające przed niepożądanym oddziaływaniem linii WN, w zakresie obejmującym instalację rurociągu, obejmują:

- instalację przewodów ekranujących – przewody bez izolacji umieszczone w niewielkiej odległości równoległe do rurociągu redukują indukowane napięcie zarówno w warunkach normalnej pracy linii jak i podczas stanów awaryjnych. Efektywność takiego rozwiązania zależy od odległości pomiędzy przewodem a rurociągiem, rezystancji przewodu i rezystywności gruntu;
- stosowanie połączeń izolujących – galwaniczny podział rurociągu na krótsze sekcje może być efektywny w przypadku powłok izolacyjnych o wysokiej rezystancji jednostkowej. W praktyce rozwiązanie to nie jest wykorzystywane z uwagi na wysokie koszty szczególnie w przypadku istniejących rurociągów;
- uziemianie rurociągu – ta najczęściej stosowana metoda polega na montażu uziemień typowo na końcach obszaru oddziaływania linii lub w innych miejscach

w zależności od potrzeb. W celu zachowania skuteczności ochrony katodowej w obwód uziemiający włącza się szeregowo tzw. ogranicznik prądu stałego – urządzenie o niewielkiej impedancji przy częstotliwości 50Hz, jednocześnie uniemożliwiające przepływ prądu stałego do pewnego napięcia progowego. Dzięki nieliniowej charakterystyce, oprócz odprowadzania prądów przemiennych w warunkach normalnej pracy, urządzenie może także pełnić funkcję ochronnika w przypadku zaistnienia stanów awaryjnych lub przepięć.

#### 4. Model rurociągu pod wpływem oddziaływania indukcyjnego

Stalowy rurociąg pokryty izolacją w zewnętrznym polu magnetycznym stanowi szczególny przypadek obwodu ziemnopowrotnego [4]. Do celów symulacji oddziaływania indukcyjnego rurociągu może być przedstawiony w postaci obwodu elektrycznego przedstawionego na rys.1 [2]. Elementarny odcinek składa się z jednostkowej impedancji wzdłużnej rurociągu  $Zdx$ , jednostkowej admittancji poprzecznej  $Ydx$  oraz jednostkowej siły elektromotorycznej  $Edx$  indukowanej w rurociągu. Impedancje  $Z_A$  i  $Z_B$  reprezentują impedancje rurociągu poza obszarem zbliżenia widziane od strony punktów  $0$  i  $L$ .



Rys. 1. Obwód zastępczy rurociągu pod wpływem oddziaływania indukcyjnego

#### 5. Obliczenie parametrów rurociągu

W celu przeprowadzenia symulacji obliczono parametry elektryczne rurociągu, tzn. wyznaczono wartość jednostkowej impedancji wzdłużnej i jednostkowej admittancji poprzecznej. Założenia i dane wejściowe do obliczeń przedstawiono w tab.1. Obliczenia wykonano zgodnie z [2], na podstawie wzorów (1) i (2).

$$Zdx = \frac{1}{\pi D} \sqrt{\pi f \rho_p \mu_0 \mu_p} + \frac{\pi f \mu_0}{4} + j \left[ \mu_0 f \ln \left( \frac{3,7}{D} \sqrt{\frac{\rho}{\mu_0 2\pi f}} \right) \right] \quad (1)$$

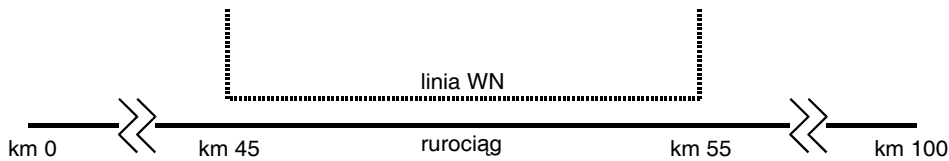
$$Ydx = \frac{\pi D}{r_c} + j \left[ 2\pi f \frac{\epsilon_0 \epsilon_c \pi D}{\delta_c} \right] \quad (2)$$

Tab. 1. Założenia i dane wejściowe do obliczeń

Symbol	Opis i jednostka	Wartość
$D$	Średnica rurociągu [m]	0,5
$f$	Częstotliwość [Hz]	50
$\rho$	Rezystywność gruntu [ $\Omega\text{m}$ ]	100
$\rho_p$	Rezystywność stali [ $\Omega\text{m}$ ]	$1,67 \cdot 10^{-7}$
$\mu_0$	Przenikalność magnetyczna próżni [H/m]	$4\pi \cdot 10^{-7}$
$\mu_p$	Względna przenikalność magnetyczna stali	200
$r_c$	Rezystancja jednostkowa powłoki izolacyjnej [ $\Omega\text{m}^2$ ]	$10^5$
$\delta_c$	Grubość powłoki izolacyjnej [m]	$2,5 \cdot 10^{-3}$
$\epsilon_c$	Względna przenikalność elektryczna materiału izolacji	2,25
$\epsilon_0$	Przenikalność elektryczna próżni [F/m]	$8,85 \cdot 10^{-12}$

## 6. Warunki symulacji

Symulację przeprowadzono dla modelu rurociągu o średnicy 500 mm i długości 100 km, w izolacji polietylenowej o grubości 2,5 mm i jednostkowej rezystancji przejścia  $10^5 \Omega\text{m}^2$ . Przyjęto stałą rezystywność gruntu na całej trasie wynoszącą 100  $\Omega\text{m}$ . Usytuowanie linii WN względem rurociągu przedstawiono na rysunku 2. Dla uproszczenia założono, że w obszarze oddziaływania w rurociągu indukowana jest siła elektromotoryczna o wartości skutecznej 1 V/km.



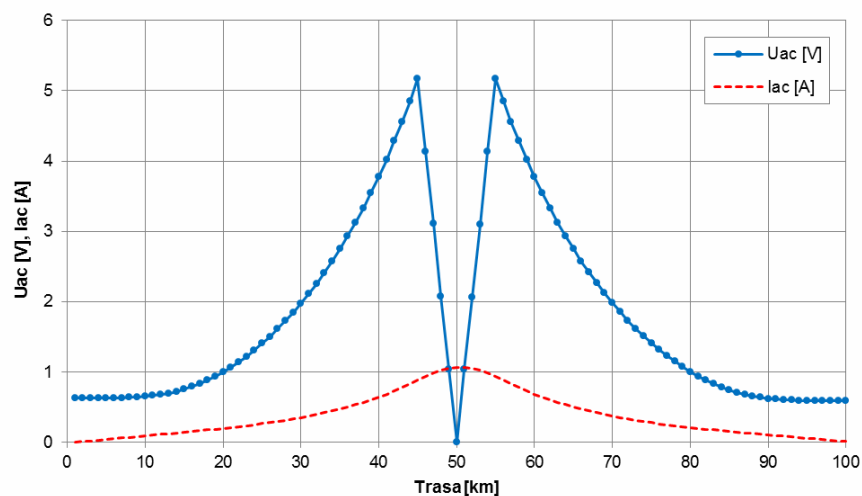
Rys. 2. Usytuowanie linii WN względem rurociągu

Zgodnie z powyższymi założeniami zbudowano obwód zastępczy w oprogramowaniu do symulacji obwodów elektrycznych. Obwód składa się ze 100 sekcji, gdzie 1 sekcja reprezentuje 1 km rurociągu. Parametry skupione sekcji wyznaczono na podstawie jednostkowej impedancji wzdłużnej i jednostkowej admitancji poprzecznej.

## 7. Wyniki symulacji

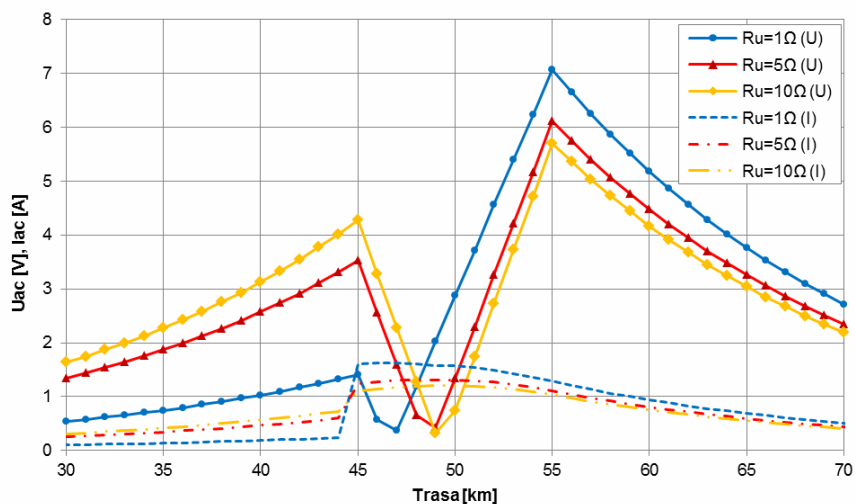
Na rysunku 3 przedstawiono rozkład wartości skutecznej napięcia oraz prądu płynącego w rurociągu. Kształt wykresu napięcia jest zgodny z wynikami przedstawionymi w [5]. Naj-

wyższe wartości napięcia występują na krańcach obszaru równoległego przebiegu, natomiast w jego środku są zbliżone do zera.



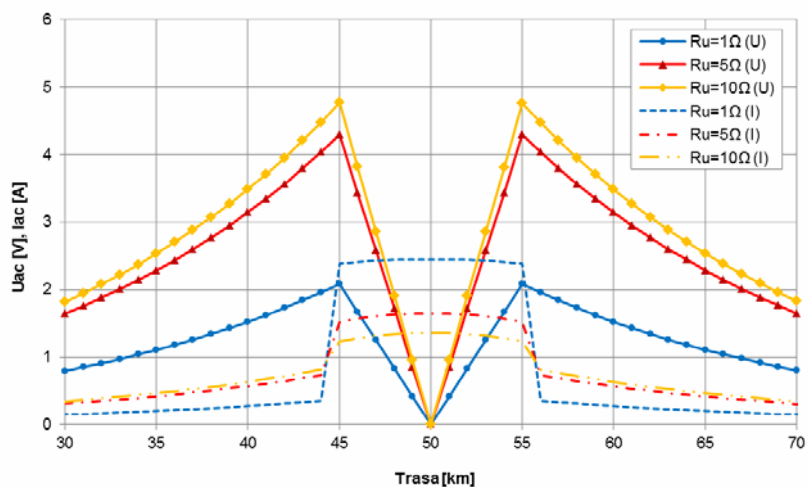
Rys. 3. Rozkład wartości skutecznej napięcia i prądu

Rysunek 4 przedstawia efekt instalacji na 45 km uziemienia o rezystancji 1, 5 i 10  $\Omega$ . Uziemienie o wartości 10  $\Omega$  obniża napięcie z ok. 5 V do ok. 4 V, czyli o niespełna 20%. Uziemienie o wartości 1  $\Omega$  najskuteczniej obniża napięcie w miejscu instalacji, lecz jednocześnie znacznie je podwyższa w okolicy drugiego końca zbliżenia linii.



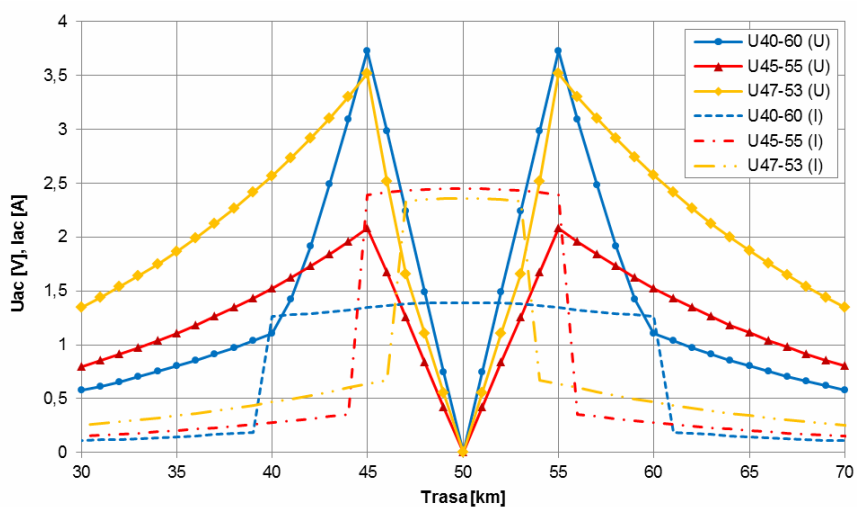
Rys. 4. Uziemienie na 45 km (różne rezystancje)

Na rysunku 5 przedstawiono efekt instalacji uziemień na 45 i 55 km. W przypadku uziemień o rezystancji 5 i 10  $\Omega$  stopień redukcji napięcia jest niewielki. Zadawalający rezultat zapewniają uziemia o rezystancji 1  $\Omega$ .



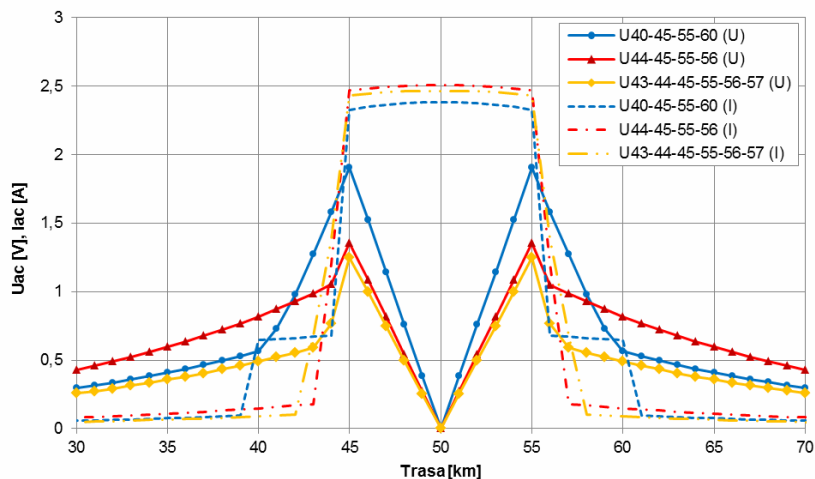
Rys. 5. Uziemia na 45 i 55 km (różne rezystancje)

Rysunek 6 przedstawia efekt instalacji 2 uziemień o rezystancji 1  $\Omega$  w 3 różnych lokalizacjach symetrycznie względem zbliżenia linii WN. Lokalizacja uziemień w obrębie zbliżenia daje znacznie gorsze efekty w porównaniu z umiejscowieniem poza nim. Zdecydowanie najlepsze rezultaty zapewnia lokalizacja uziemień dokładnie na krańcach obszaru równoległego przebiegu.



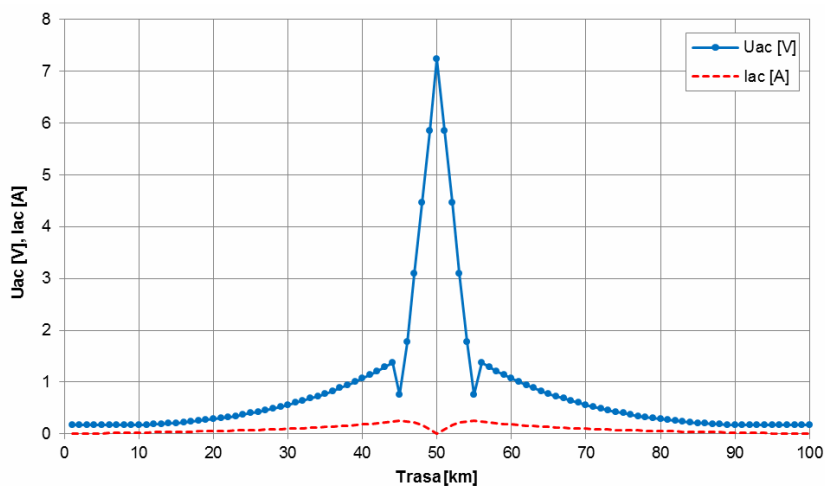
Rys. 6. Uziemia na 40 i 60 km, 45 i 55 km, 47 i 53 km (rezystancja 1  $\Omega$ )

W przypadku montażu dodatkowych uzemień najlepsze efekty daje umieszczenie ich na zewnątrz obszaru zbliżenia i jednocześnie możliwie blisko jego krańców. Na rysunku 7 przedstawione są trzy warianty instalacji uzemień o rezystancji  $1 \Omega$ : 4 uzemiaenia na 40, 45, 55 i 60 km; 4 uzemiaenia na 44, 45, 55 i 56 km; 6 uzemień na 43, 44, 45, 55, 56 i 57 km. Rozkład napięcia dla wariantu z 6 uzemieńmi pokazuje, że powyżej pewnej ilości dodatkowe uzemiaenia już tylko nieznacznie obniżają wartości maksymalne.



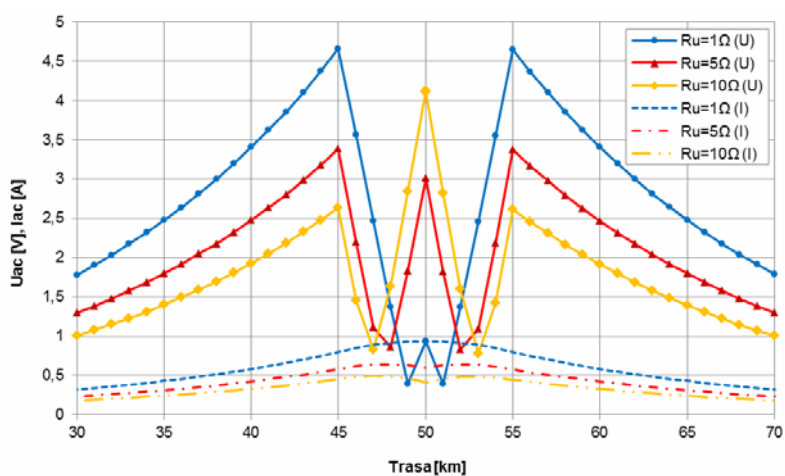
Rys. 7. Uzemiaenia na 40, 45, 55 i 60 km, 44, 45, 55 i 56 km, 43, 44, 45, 55, 56 i 57 km (rezystancja  $1 \Omega$ )

W przypadku nieciągłości galwanicznej rurociągu w obrębie zbliżenia, maksymalne wartości indukowanego napięcia pojawiają się tuż przy złączu izolującym, a nie na krańcach zbliżenia, co widać na rysunku 8.



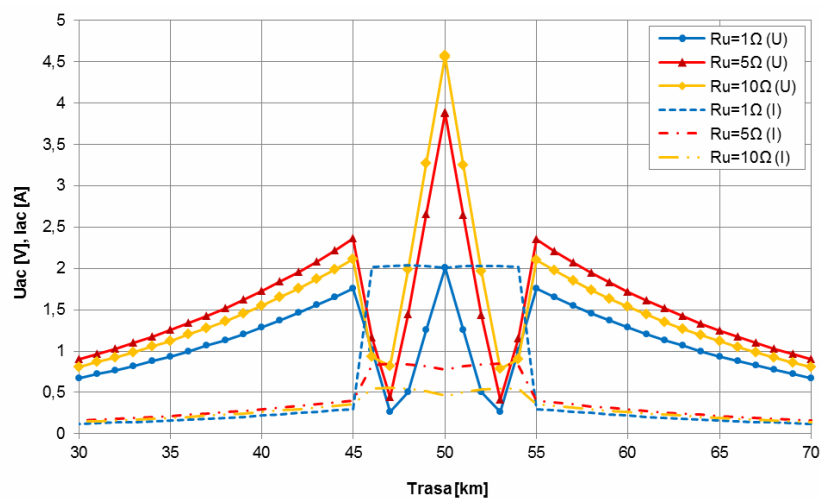
Rys. 8. Rozkład wartości skutecznej napięcia i prądu (nieciągłość na 50 km)

Po montażu uziemień obu sekcji rurociągu tuż przy złączu izolującym, rozkład napięcia indukowanego staje się podobny do rozkładu na rurociągu nie podzielonym na sekcje (rys. 9). Najwyższe napięcie na krańcach zbliżenia występuje w przypadku uziemień o najniższej wartości, czyli  $1 \Omega$ .



Rys. 9. Uziemienia obu sekcji na 50 km (różne rezystancje)

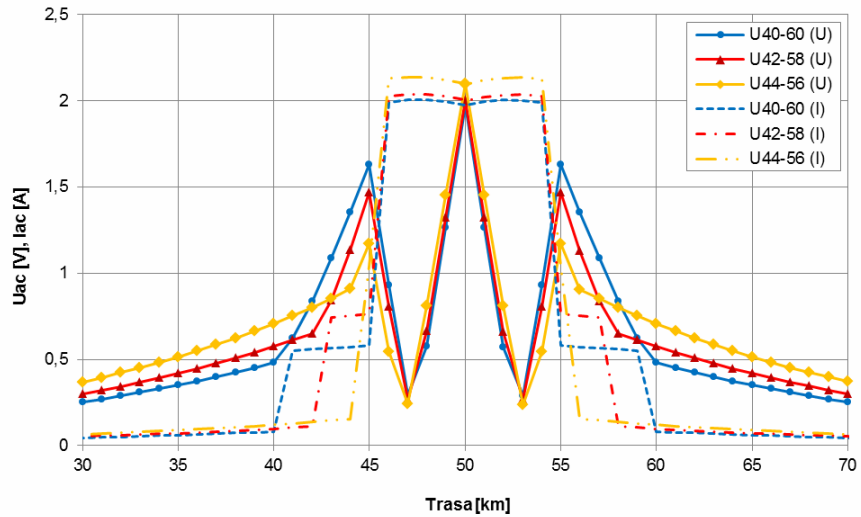
Zamontowanie dodatkowych uziemień o wartości  $1 \Omega$  na krańcach zbliżenia, czyli na 45 i 55 km skutkuje obniżeniem napięcia indukowanego w obu sekcjach. W porównaniu z przypadkiem rurociągu niepodzielonego na sekcje (rys. 10) sytuacja ta jest mniej korzystna z uwagi na konieczność instalacji dodatkowych uziemień przy złączu izolującym w celu uzyskania zbliżonych poziomów napięcia.



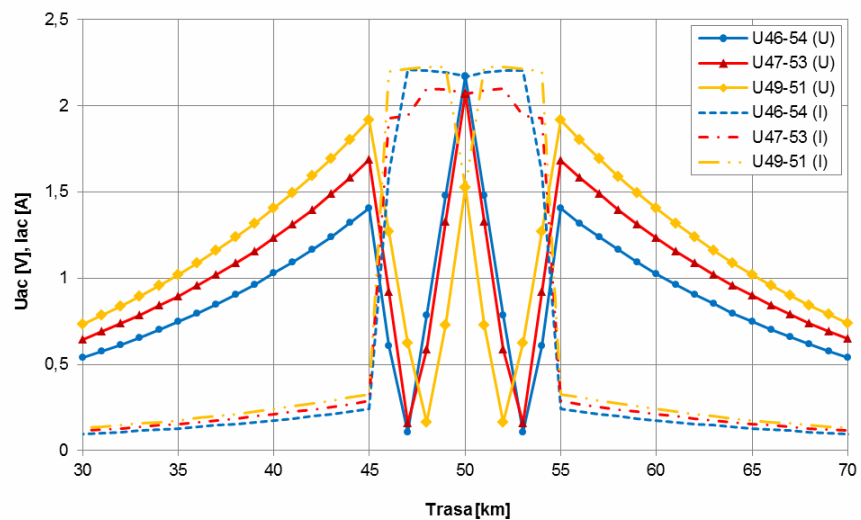
Rys. 10. Uziemienia obu sekcji na 45, 50 i 55 km (różne rezystancje)



Rysunki 11 i 12 przedstawiają efekty montażu dodatkowych uzemień na rurociągu ze złączem izolującym na 50 km. Podobnie jak w poprzednim przypadku (rys. 7) najlepsze efekty dają uzimienia zlokalizowane na zewnątrz obszaru zbliżenia i jednocześnie możliwie blisko jego krańców. Skuteczność uzemień zlokalizowanych w obrębie równoległego przebiegu maleje wraz z ich zbliżaniem do złącza izolującego.



Rys. 11. Uzimienia obu sekcji na 40, 45, 50, 55 i 60 km, 42, 45, 50, 55 i 58 km, 44, 45, 50, 55 i 56 km



Rys. 12. Uzimienia obu sekcji na 45, 46, 50, 54 i 55 km, 45, 47, 50, 53 i 55 km, 49, 49, 50, 51 i 55 km

## 8. Wnioski i dalsze prace

Zgodnie z normą PN-EN 15280:2013 [6] pierwszym krokiem w celu minimalizacji zagrożenia korozyjnego związanego z przepływem prądu przemiennego jest obniżenie napięcia indukowanego w rurociągu poniżej 15 V wartości skutecznej. Przedstawiona metoda symulacji może być wykorzystana zarówno do wstępnej oceny zagrożenia korozyjnego na etapie planowania i projektu budowy nowej infrastruktury, a także jako narzędzie wspomagające przy projektowaniu systemów ograniczania indukowanego napięcia przemiennego na istniejących obiektach.

Z przeprowadzonych symulacji można wyciągnąć następujące wnioski ogólne:

- Przy założonych parametrach symulacji (patrz tab. 1) skuteczność działania uzemień o rezystancji 5 i 10  $\Omega$  jest stosunkowo niewielka. Zadawalające rezultaty zapewniają jedynie uzamienienia o wartości 1  $\Omega$ .
- Lokalizacja uzemień w pobliżu krańców zbliżenia linii WN do rurociągu daje najlepsze efekty. Dodatkowe uzamienienia lepiej lokalizować na zewnątrz obszaru równoległego zbliżenia niż wewnątrz niego.
- Montaż dodatkowych uzemień powyżej pewnej wartości krytycznej nie powoduje dalszego istotnego obniżania napięcia, w związku z tym jest nieuzasadniony ekonomicznie.
- Sekcjonowanie rurociągu może doprowadzić do mniej korzystnych warunków, a tym samym do konieczności zastosowania dodatkowych uzemień na poszczególnych sekcjach.

W ramach kontynuacji przedstawionych prac przewidziana jest weryfikacja modelu na podstawie danych pomiarowych zebranych z rzeczywistych systemów oraz rozbudowa modelu w celu umożliwienia m.in. automatycznego obliczania indukowanej siły elektromotorycznej dla różnych przypadków.

### Literatura

- [1] Baeckmann W.V., Schwenk W., *Katodowa ochrona metali*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1976.
- [2] *Guide on the Influence of High Voltage AC Power Systems on Metallic Pipelines*, CIGRE 1995.
- [3] *AC Corrosion on Metallic Pipelines Due to Interference From AC Power Lines. Phenomenon, modelling and countermeasures*, CIGRE 2006.
- [4] Krakowski M., *Obwody ziemnopowrotne*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1979.
- [5] Budnik K., Machczyński W., *Modelowanie oddziaływań elektromagnetycznych na rurociągi podziemne z uwzględnieniem korozji prądu przemiennoprądowej*, „Ochrona przed Korozją” 2012, nr 8.
- [6] PN-EN 15280, Ocena prawdopodobieństwa wystąpienia na zakopanych rurociągach korozji wywołanej prądem przemiennym stosowana do rurociągów chronionych katodowo, PKN, Warszawa 2013.