

Wzajemne oddziaływanie układów ziemnopowrotnych systemu trakcyjnego prądu stałego i systemu elektroenergetycznego prądu przemiennego

Włodzimierz KRUCZEK¹

Streszczenie

Artykuł dotyczy problemu występującego w zelektryfikowanym transporcie szynowym, polegającego na wzajemnym oddziaływaniu układów ziemnopowrotnych różnych systemów zasilania. Jeden z analizowanych układów, to układ ziemnopowrotny sieci wysokiego napięcia, drugi to sieć powrotna systemu zasilania trakcyjnego 3 kV DC. W celu określenia wzajemnego wpływu obu systemów przedstawiono dotychczasowe wyniki badań terenowych oraz zaprezentowano model matematyczny zbudowany w środowisku Matlab-Simulink.

Słowa kluczowe: uziemienia, podstacje trakcyjne, sieć powrotna

1. Wstęp

Obwody ziemnopowrotne są to wszystkie obwody energetyczne obejmujące w swojej strukturze ziemię. W takich obwodach występuje zjawisko przepływu prądu elektrycznego w ziemi. W elektrotechnice ziemia jest definiowana jako jednolita półprzestrzeń przewodząca, której potencjał elektryczny w każdym punkcie przyjęto umownie jako zero. Grunt na dostatecznej głębokości jest uznawany za ziemię odniesienia, czyli o potencjale w każdym punkcie równym zero. Takie założenie przyjmuje się w energetyce, ponieważ pomimo różnej rezystywności gruntów, przekrój takiego „przewodnika” jest nieskończony.

Każda linia elektroenergetyczna jest układem wieloelementowym, w której jednym z elementów jest ziemia. Prace autora, dotyczące analizy systemów zasilania trakcyjnego, pomiarów konduktywności sieci powrotnych i przypadków nieprawidłowej pracy podstacji trakcyjnych kolejowych i tramwajowych, skłaniają autora do przedstawienia następującego problemu badawczego: *Istnieją wzajemne oddziaływania przez obwody ziemnopowrotne systemu trakcyjnego prądu stałego z systemem elektroenergetycznym zasilającym prądu przemiennego. Oddziaływania te mogą być szkodliwe i mogą wpływać na bezawaryjność pracy obu systemów energetycznych.*

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie problemu badawczego, zapoznanie z dotychczasowymi wynikami badań w tym zakresie oraz zaprezentowanie modelu zbudowanego w środowisku Matlab-Simulink w celu symulacji wzajemnego oddziaływania dwóch systemów energetycznych.

2. Obwody ziemnopowrotne w sieciach przesyłowych

W energetyce zawodowej są wykorzystywane struktury sieci przesyłowych, których podział ze względu na skuteczność uziemienia punktów neutralnych transformatorów energetycznych jest następujący:

1. Sieci elektroenergetyczne pracujące ze skutecznie uziemionym punktem neutralnym transformatorów zasilających. Są to sieci wysokiego napięcia 400 kV, 220 kV, 110 kV. Ze skutecznie uziemionym punktem neutralnym pracują również sieci niskiego napięcia 400 V.
2. Sieci elektroenergetyczne pracujące z nieskutecznie uziemionym punktem neutralnym transformatorów zasilających. Są to sieci średniego napięcia 30 kV, 20 kV, 15 kV, 6 kV, które dzielą się na

¹ Mgr inż.: Instytut Kolejnictwa, Zakład Elektroenergetyki; e-mail: wkruczek@ikolej.pl.

sieci z izolowanym punktem neutralnym i sieci z kompensacją prądu zwarcia doziemnego przez rezystor ograniczający lub cewkę Petersena.

Obie struktury zawierają obwody ziemnopowrotne, których cechą charakterystyczną jest to, że przewody robocze tych sieci są izolowane od ziemi za wyjątkiem ich punktów końcowych. W stanach ustalonych, prądy w tych przewodach nie zmieniają się więc w funkcji odległości od punktu zasilania sieci [6]. Inną grupą obwodów ziemnopowrotnych są obwody, których przewody robocze stykają się z ziemią na całej długości przez warstwę niewystarczającej izolacji. Przykładem takiego obwodu ziemnopowrotnego jest sieć powrotna w systemie zasilania trakcyjnego prądu stałego. Prądy w tych przewodach (szynach jezdnych) zmieniają się w funkcji odległości od punktu zasilania sieci [4, 5].

3. Sieć powrotna rozpatrywana jako obwód ziemnopowrotny

System zasilania trakcyjnego prądu stałego podlega ciągłemu rozwojowi, aby sprostać wymaganiom wzmożonego ruchu i coraz większej mocy pojazdów trakcyjnych. Zasilanie podstacji trakcyjnych jest realizowane przez sieci przesyłowe wysokiego napięcia, a moce podstacji trakcyjnych są odpowiednio zwiększane. Wskutek tego prądy płynące w sieciach powrotnych osiągają duże wartości, co przy niewystarczającej izolacji od ziemi prowadzi do znacznych wpływów prądu trakcyjnego. Prąd płynący w sieci powrotnej zależy od:

- mocy pojazdów trakcyjnych eksploatowanych na danej trasie,
- następstwa pociągów,
- profilu trasy,
- odległości między podstacjami trakcyjnymi.

Przyjmując założenie, że wymienione parametry są stałe i pobór prądu przez pojazd trakcyjny na całej trasie jest również stały, to jednak prąd w sieci powrotnej nie ma wartości stałej, gdyż zależy również od lokalizacji punktu pomiaru od podstacji zasilającej i lokalizacji pojazdu trakcyjnego na szlaku. Można to wyrazić jako funkcję dwóch zmiennych:

$$I_{sp} = f(L, L_{PT}), I_{PT} = const$$

gdzie:

- I_{sp} – prąd w sieci powrotnej,
- L – odległość punktu pomiaru od zasilającej podstacji trakcyjnej,
- L_{PT} – lokalizacja pojazdu trakcyjnego na odcinku zasilania,
- I_{PT} – prąd pojazdu trakcyjnego.

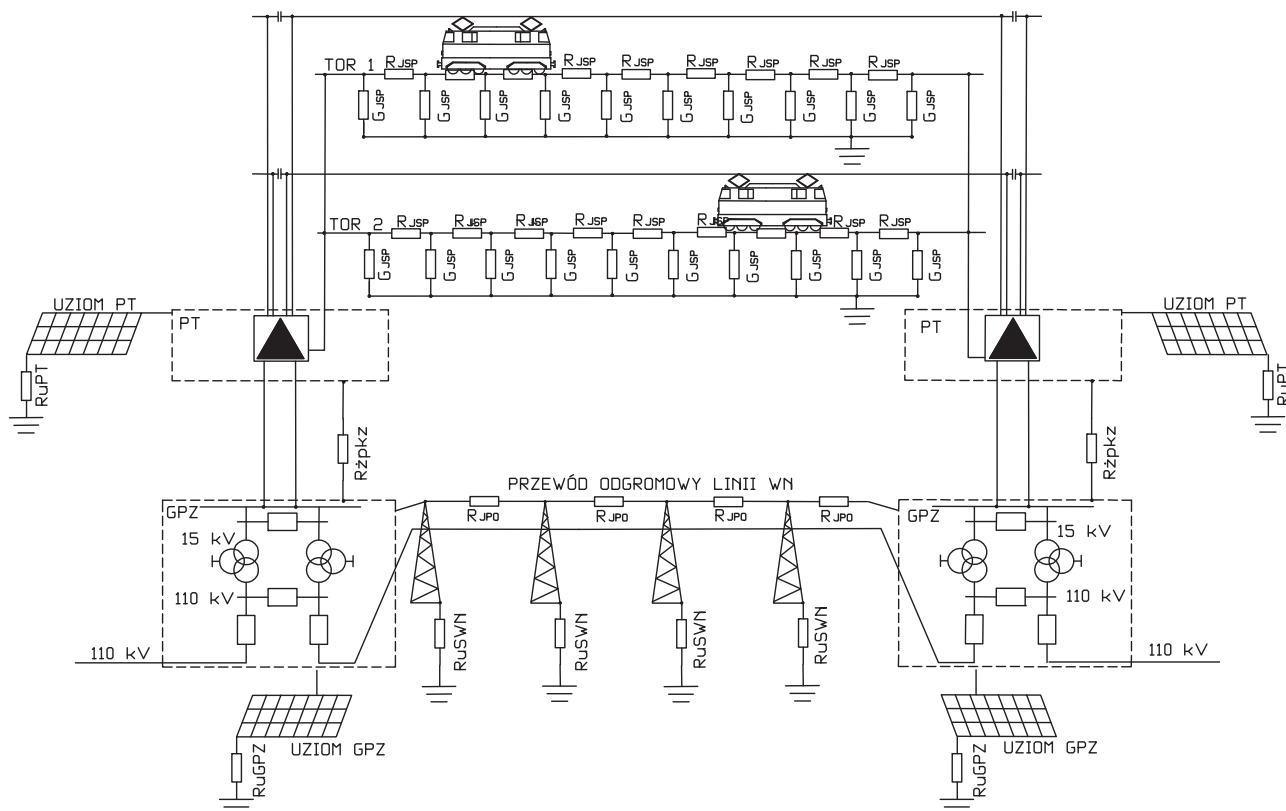
Parametrem podstawowym, decydującym o upływności prądu z sieci powrotnej w funkcji odległości od podstacji zasilającej, jest konduktancja jednostkowa sieci powrotnej wyrażona w [S/km]. Norma PN-EN 50122-2: 2011 [7] podaje dopuszczalne wartości konduktancji jednostkowej sieci powrotnej, przy rozróżnianiu przypadku torowisk o budowie otwartej (klasyczne podsypkowe oraz bezpodsypkowe, gdzie szyny są mocowane powyżej płyty torowiska) oraz o budowie zamkniętej (zabudowa płytami torowiska podsypkowego lub szyny wpuszczone w płytę torowiska). Dla torowisk o budowie otwartej, konduktancja jednostkowa nie powinna przekraczać 0,5 S/km i średni potencjał szyny powinien być mniejszy lub równy +5 V, natomiast dla torowisk o budowie zamkniętej nie powinna przekraczać 2,5 S/km i średni potencjał szyny powinien być mniejszy lub równy +1 V. Podczas analizy sieci powrotnych, w ocenie intensywności rozprywu prądów upływu, obliczeniach zwarć doziemnych i napięć rażeniowych nie można stosować uproszczeń polegających na pomijaniu konduktywności jednostkowej sieci powrotnej [3, 6].

4. Badania terenowe

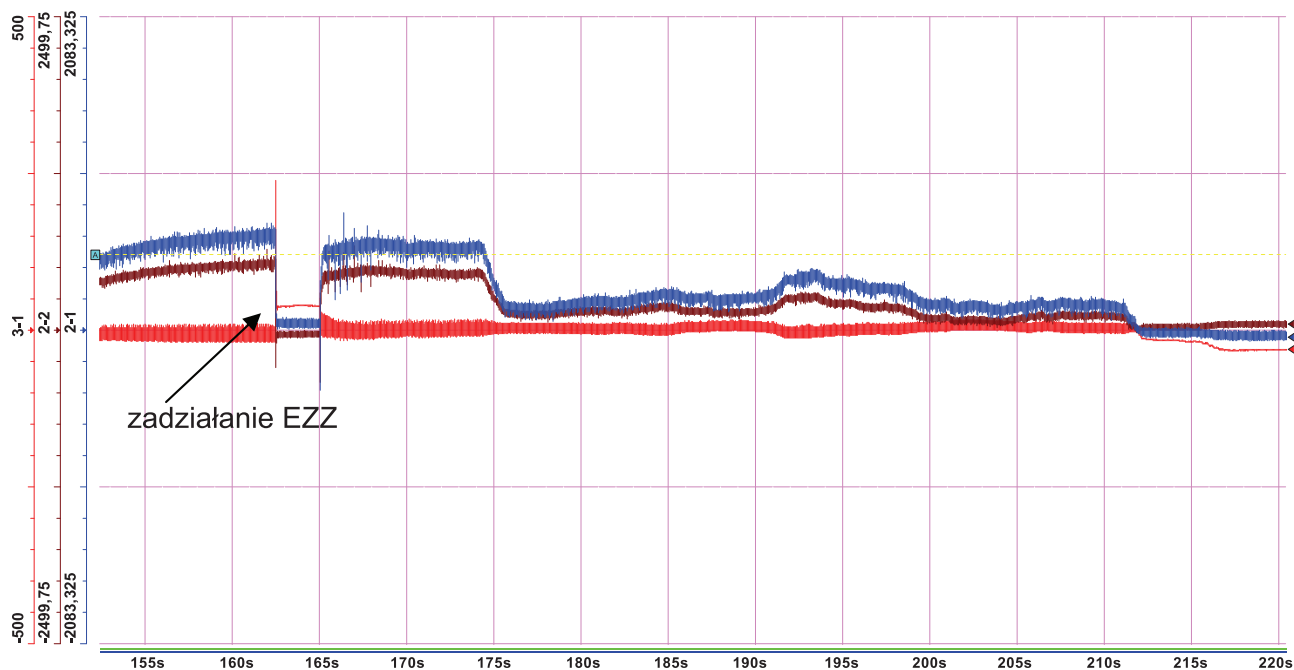
Przedmiotem opisanych badań były obwody ziemnopowrotne zlokalizowane w bliskiej odległości od siebie. Jeden z układów ziemnopowrotnych to sieć powrotna w systemie zasilania trakcyjnego 3 kV DC. Drugi z układów to uziemione elementy linii energetycznej 110 kV, zasilającej stację GPZ, zlokalizowaną przy podstacji trakcyjnej. Schemat badanych układów, wraz z elementami ich modelu mającymi wpływ na wartość wzajemnych oddziaływań, przedstawiono na rysunku 1.

Zakres badań obejmował między innymi rejestrację: napięcia pomiędzy szyną minusową (SM) a główną szyną uziemiającą podstacji trakcyjnej (GSU), prąd łącznika pomiędzy SM i GSU oraz prąd kabli powrotnych. Wyniki przykładowych sesji pomiarowych przedstawiono na rysunkach 2, 3, 4, natomiast zestawienie wyników przeprowadzonych sesji pomiarowych przedstawiono w tablicy 1.

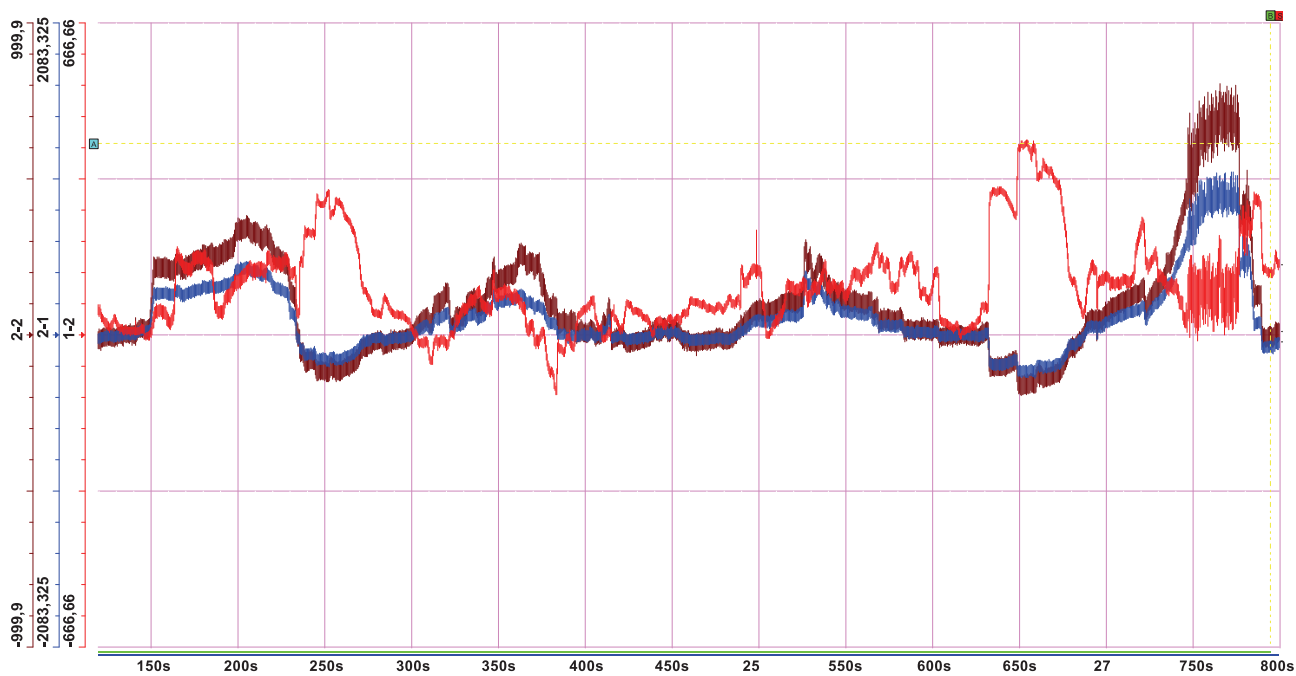
Analizując otrzymane wyniki należy stwierdzić, że w badanych przypadkach, przy uziemionej SM podstacji trakcyjnej, prądy błądzące wpływające do SM podstacji trakcyjnej przez łącznik z GSU podstacji, stanowią około 20% całkowitego prądu trakcyjnego. Problem jest szczególnie zauważalny w przypadku pracy PT w trybie pracy kabinowej, gdy przy stosunkowo małych prądach powrotnych wpływających do szyny minusowej podstacji, wynoszących około 400 A dla grupy kabli 1 i około 220 A dla grupy kabli 2, całkowity prąd trakcyjny wpływający do SM przez łącznik z GSU wynosi około 600 A.



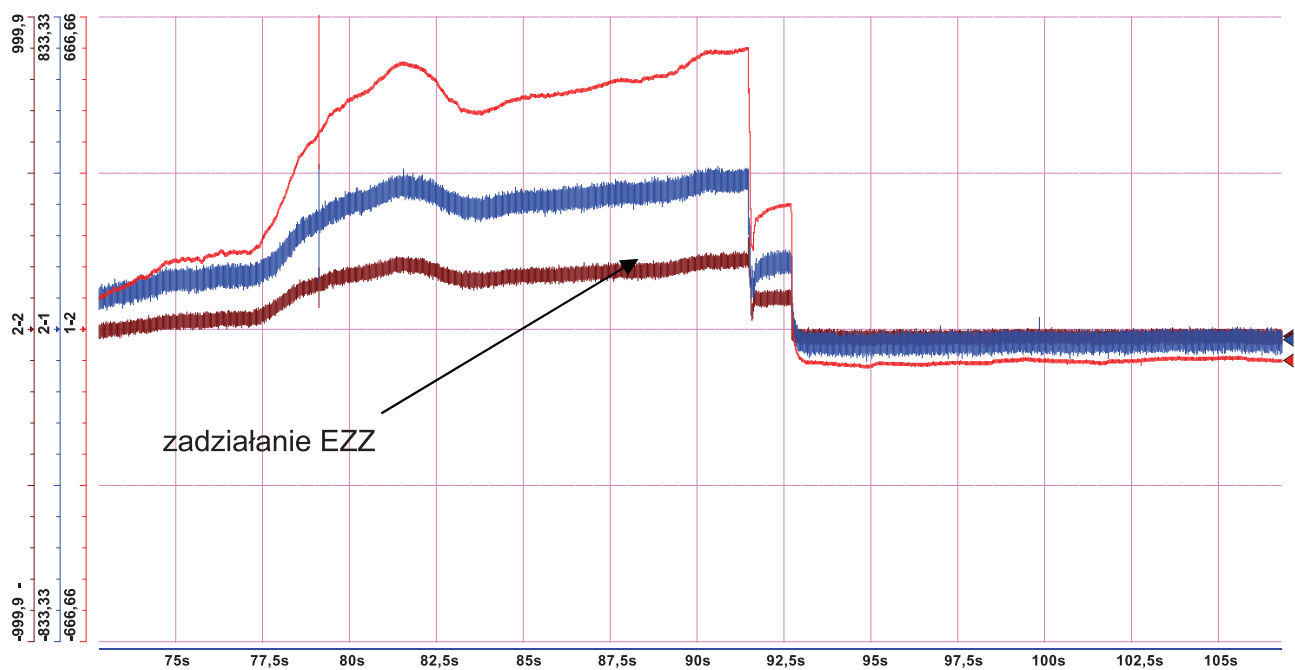
Rys. 1. Schemat badanych układów ziemnopowrotnych: PT – podstacja trakcyjna, RJSP – rezystancja jednostkowa sieci powrotnej, GJSP – konduktancja jednostkowa sieci powrotnej, RuPT – rezystancja uziemienia podstacji trakcyjnej, GPZ – główny punkt zasilający, Rżpkz – rezystancja żył powrotnych kabli zasilających, RuGPZ – rezystancja uziemienia GPZ, RJPO – rezystancja jednostkowa przewodu odgromowego, RuSWN – rezystancja uziemienia słupa WN [opracowanie własne]



Rys. 2. Oscylogram z sesji pomiarowej przy pracy podstacji trakcyjnej z nieuziemiałą SM: — CH2-1 prąd kabli powrotnych grupa 1, — CH2-2 prąd kabli powrotnych grupa 2, — CH3-1 napięcie na EZZ [opracowanie własne]



Rys. 3. Oscylogram z sesji pomiarowej przy pracy podstacji trakcyjnej z uziemioną SM: — CH2-1 prąd kabli powrotnych grupa 1, — CH2-2 prąd kabli powrotnych grupa 2, — CH1-2 prąd trakcyjny wpływający do SM łącznikiem z GSU podstacji [opracowanie własne]



Rys. 4. Oscylogram z sesji pomiarowej przy pracy kabinowej podstacji trakcyjnej z uziemioną SM: — CH2-1 prąd kabli powrotnych grupa 1, — CH2-2 prąd kabli powrotnych grupa 2, — CH1-2 prąd trakcyjny wpływający do SM łącznikiem z GSU podstacji [opracowanie własne]

Tablica 1

Zbiorcze zestawienie wyników przeprowadzonych sesji pomiarowych

Opis układu	Nr kanału rejestracji, opis mierzonej wielkości	Wartość max.
Wyniki pomiarów w trybie pracy podstacyjnej z nieuziemiałą szyną minusową podstacji, oscylogram na rysunku 2	CH 2-1 [A], prąd kabli powrotnych grupa 1	618
	CH 2-2 [A], prąd kabli powrotnych grupa 2	423
	CH 3-1 [V], napięcie pomiędzy nieuziemiałą SM i GSU podstacji	231
Wyniki pomiarów w trybie pracy podstacyjnej z uziemiałą szyną minusową podstacji, oscylogram na rysunku 3	CH 2-1 [A], prąd kabli powrotnych grupa 1	960
	CH 2-2 [A], prąd kabli powrotnych grupa 2	700
	CH 1-2 [A], prąd łącznika pomiędzy SM i GSU podstacji	401
Wyniki pomiarów w trybie pracy kabinowej z uziemiałą szyną minusową podstacji, oscylogram na rysunku 4	CH 2-1 [A], prąd kabli powrotnych grupa 1	400
	CH 2-2 [A], prąd kabli powrotnych grupa 2	224
	CH 1-2 [A], prąd łącznika pomiędzy SM i GSU podstacji	595

[Opracowanie własne].

5. Wyniki obliczeń

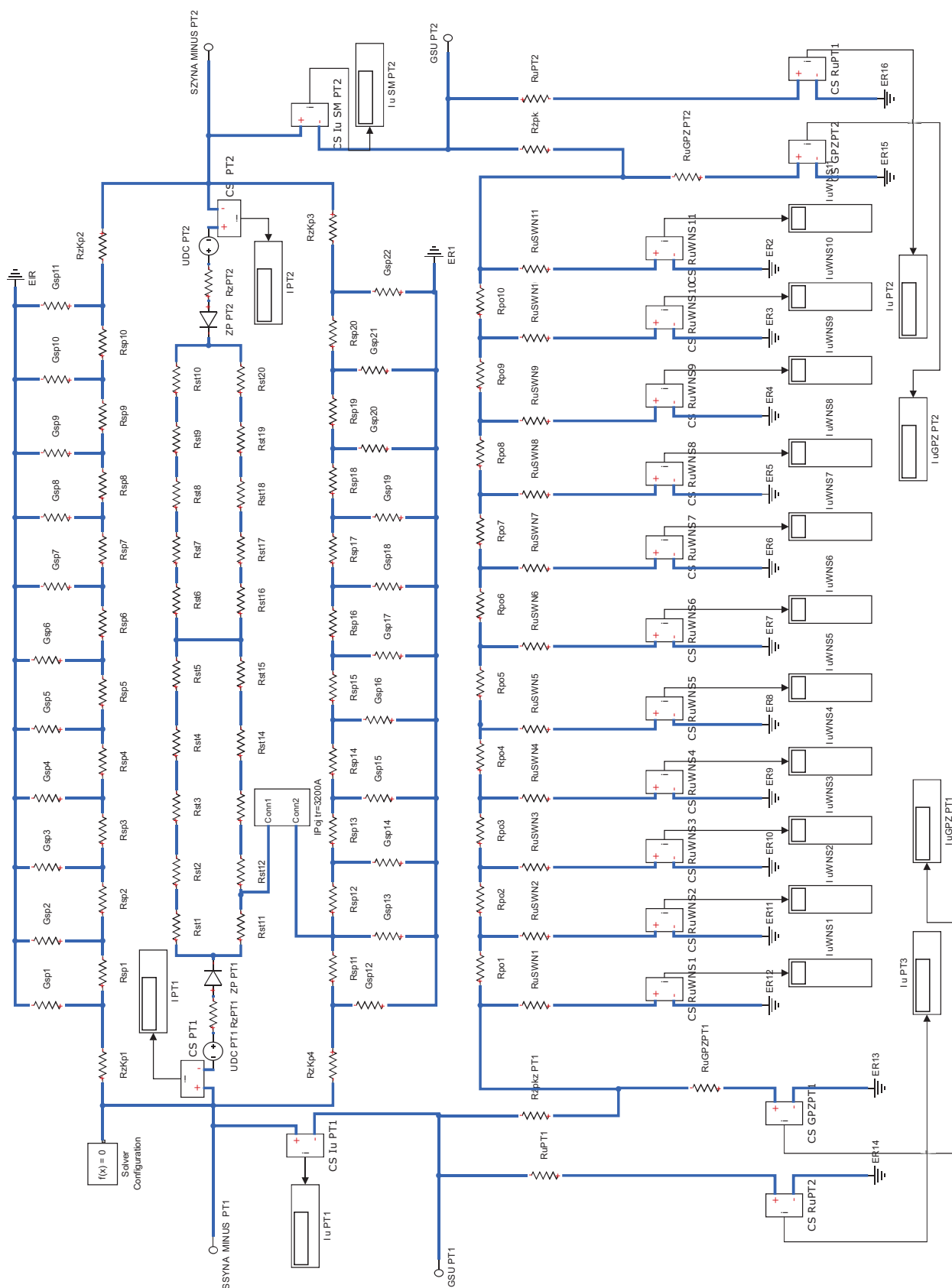
Układ odcinka zasilania prądu stałego schematycznie można przedstawić w postaci pewnej liczby elementów rezystancyjnych oraz konduktancyjnych [1, 2, 8]. W środowisku Matlab-Simulink wykonano model odcinka zasilania trakcyjnego wraz z modelem obwodu ziemnopowrotnego sieci wysokiego napięcia. W odróżnieniu od typowych schematów zastępczych, opisywanych w literaturze przedmiotu np. [2, 8], schemat zaimplementowany w modelu przedstawionym na rysunku 5, rozbudowano o elementy układu ziemnopowrotnego sieci wysokiego napięcia RuSWN, które reprezentują rezystancję uziemienia konstrukcji wsporczych linii wysokiego napięcia i elementy Rpo reprezentujące rezystancję jednostkową przewodu odgromowego linii wysokiego napięcia oraz o elementy rezystancyjne RuPT reprezentujące rezystancję uziemienia podstacji trakcyjnych. Ponieważ celem prezentowanej symulacji jest wyznaczenie oddziaływań galwanicznych, pochodzących od trakcyjnego prądu stałego w stanach ustalonych, do budowy modelu układu ziemnopowrotnego sieci wysokiego napięcia, zastosowano uproszczenie polegające na wprowadzeniu tylko elementów rezystancyjnych. Brak elementów pojemnościowych oraz indukcyjnych w zastosowanym modelu, nie wpływa na dokładność obliczeń w stanach ustalonych pracy sieci. Do obliczeń w stanach nieustalonych, np. przy przepływie prądów zwarciovych, w momentach załączania lub wyłączania prądu trakcyjnego, do modelu należy zaimplementować elementy indukcyjne i pojemnościowe. Symulacja dla tego typu pracy sieci wykracza poza zakres niniejszego artykułu.

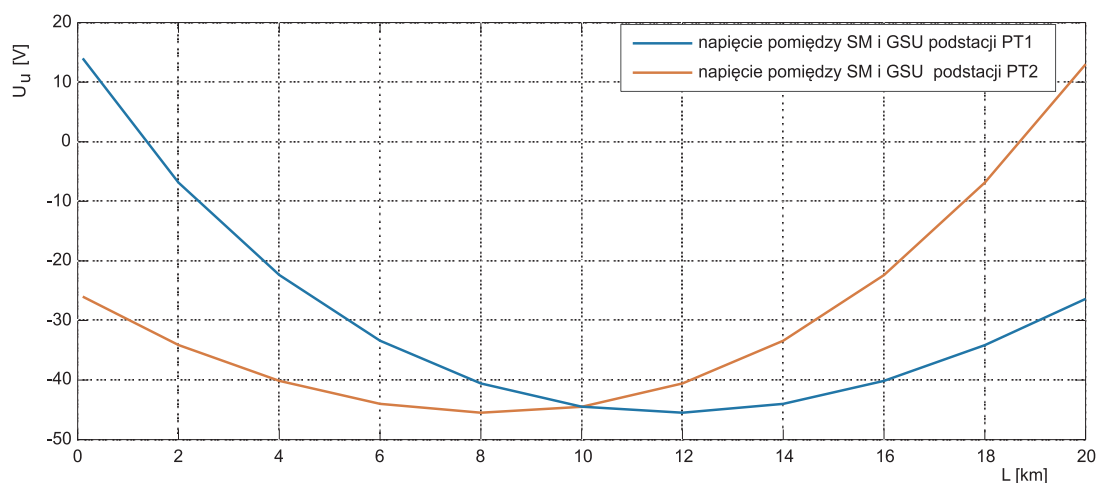
Wyniki pomiarów wykonanych podczas badań terenowych, które są porównywalne z wynikami obliczeń dla prawidłowo zadanych wartości wejściowych,

potwierdzają adekwatność zaimplementowanego modelu odcinka sieci trakcyjnej. Do prezentowanej analizy przyjęto następujące dane wejściowe:

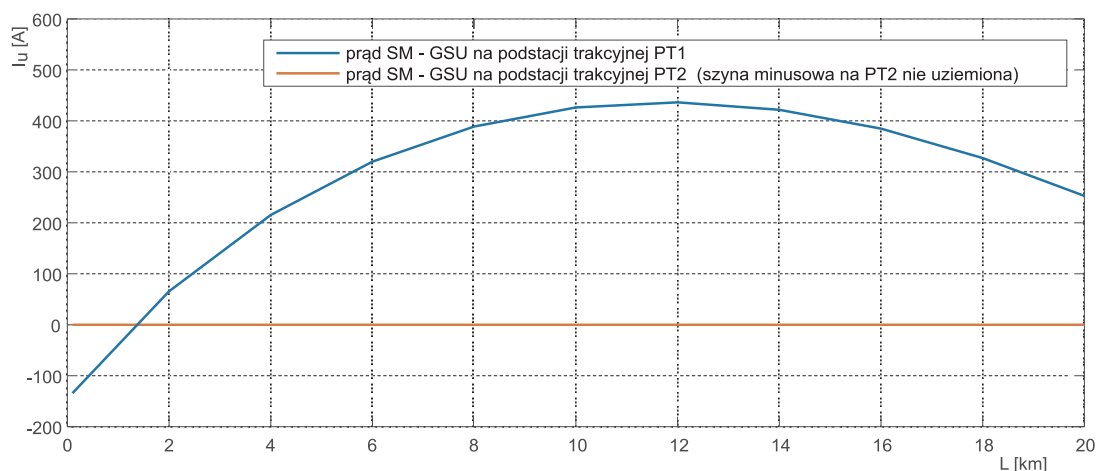
- odległość między podstacjami zasilającymi: 20 km;
- rezystancja jednostkowa sieci trakcyjnej:
 $R_{st} = 0,04098 \Omega/\text{km}$;
- konduktancja jednostkowa sieci powrotnej:
 $G_{sp} = 0,75 \text{ S/km}$;
- rezystancja jednostkowa sieci powrotnej:
 $R_{sp} = 11,70 \text{ m}\Omega/\text{km}$;
- rezystancja zastępcza podstacji trakcyjnych:
 $R_{zPT} = 0,13 \Omega$;
- rezystancja kabli powrotnych jednej grupy:
 $R_{zKP} = 0,0075 \Omega$;
- prąd pojazdu trakcyjnego, stały na całej trasie:
 $I_{Poj tr} = 3200 \text{ A}$;
- napięcie nie obciążonej podstacji trakcyjnej:
 $U_{DC PT} = 3600 \text{ V}$;
- rezystancja uziemienia głównego punktu zasilania:
 $R_{uGPZ} = 0,1 \Omega$;
- rezystancja uziemienia podstacji trakcyjnej:
 $R_{uPT} = 0,1 \Omega$;
- rezystancja uziemienia zespołu słupów WN na odcinku 2 km: $R_{uSWN} = 0,8 \Omega$;
- rezystancja jednostkowa przewodu odgromowego linii przesyłowej WN: $R_{po} = 0,2388 \Omega/\text{km}$ (przewód AFL6 120).

Symulację wykonano dla stanu pracy podstacyjnej podstacji PT1 i PT2. Wyznaczono napięcie pomiędzy szyną minusową (SM) i główną szyną uziemiającą (GSU) w podstacji PT1 i PT2, prąd łącznika pomiędzy SM i GSU obu podstacji, przy uziemionej SM w PT1 i nieuziemiającej SM w podstacji PT2. Obliczenia wykonano w funkcji odległości pojazdu trakcyjnego od podstacji trakcyjnych. Wyniki uzyskane podczas symulacji przedstawiono na rysunkach 6, 7.





Rys. 6. Przebieg napięcia pomiędzy SM i GSU na podstacjach PT1 i PT2 w funkcji przemieszczającego się pojazdu trakcyjnego pobierającego stały prąd 3200 A na całej trasie [opracowanie własne]



Rys. 7. Przebieg prądu łącznika pomiędzy SM i GSU na podstacjach PT1 i PT2 w funkcji przemieszczającego się pojazdu trakcyjnego pobierającego stały prąd 3200 A na całej trasie SM zwartej z GSU na PT1 i rozwartej na PT2 [opracowanie własne]

6. Podsumowanie

Sieć powrotna jest elementem składowym systemu zasilania trakcyjnego. Od jej stanu w znacznym stopniu zależy skuteczność ochrony przeciwporażeniowej, niezawodność pracy urządzeń srk i całego systemu zasilania trakcyjnego. W warunkach idealnych, całość prądu trakcyjnego powinna płynąć siecią powrotną, jest to jednak niemożliwe w realizacji, gdyż sieć powrotna ze względu na swoją strukturę jest obwodem ziemnowrotnym, w którym przewody robocze, czyli nieizolowane szyny jezdne stykają się z ziemią na całej długości przez warstwę niewystarczającej izolacji.

W bliskiej odległości od zelektryfikowanych torów często jest budowana inna infrastruktura techniczna, np. linie elektroenergetyczne lub urządzenia techniczne służące do prowadzenia ruchu pociągów. Urządzenia te zawierają swoje układy ziemnowrotne, które mogą oddziaływać wzajemnie z siecią po-

wrotną. W zależności od stanu pracy i rodzaju zasilania lub rodzaju przesyłanej energii, te oddziaływania mogą być galwaniczne, indukcyjne lub pojemnościowe. W zaprezentowanych wynikach pomiarów i wykonanych obliczeniach, wzajemne oddziaływania miały charakter galwaniczny. Jak wykazano w wynikach pomiarów i obliczeniach dla przykładowego odcinka zasilania, wzdłuż którego prowadzona jest linia WN, przy uziemionej szynie minusowej prąd trakcyjny wpływający do SM łącznikiem z GSU osiąga znaczne wartości. Również napięcie pomiędzy tymi elementami podstacji trakcyjnej może spowodować zadziałanie zabezpieczenia ziemnozwarciowego podstacji trakcyjnej.

Literatura

1. Benjamin R.W., Stell B.: *A Review of Current Standards and Codes for Maximum Permissible Rail*

- Voltage Rise on Direct Current Traction Power Systems*, 2011 Joint Rail Conference.
2. Chrabąszcz I., Jacek L., Prusak J.: *Tory kolejowe linii zelektryfikowanych napięciem stałym, jako źródło ewentualnych zagrożeń porażeniem elektrycznym*, TTS Technika Transportu Szynowego, 2011, nr 7–8.
 3. Chrabąszcz I., Kaniewski A., Prusak J.: *Rozpływ prądów trakcyjnych w tramwajowej sieci powrotnej – ocena w aspekcie zagrożeń prądami błędzącymi*, TTS Technika Transportu Szynowego, 2010, 11–12.
 4. Kinh D. et.al.: *Analysis of stray current, track-to-earth potentials & substation negative grounding in DC traction electrification system* (Conference: Railroad Conference, 2001. Proceedings of the 2001 IEEE/ASME Joint)
 5. Krakowski M.: *Obwody ziemnopowrotne*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne PWN, Warszawa, 1979.
 6. Mierzejewski L., Szela A.: *Sieci powrotne zelektryfikowanego szynowego transportu miejskiego*, Technika Transportu Szynowego, 2005, nr 7–8.
 7. PN-EN 50122-2: 2011: *Zastosowania kolejowe – Urządzenia stacjonarne – Bezpieczeństwo elektryczne, uziemianie i sieć powrotna – Część 2: Środki ochrony przed skutkami prądów błędzących powodowanych przez systemy trakcji prądu stałego*.
 8. Szela A., Maciołek T., Dążek Z.: *Wpływ stosowania taboru z hamowaniem odzyskowym na sieć powrotną zelektryfikowanego transportu miejskiego*, Logistyka, 2015, nr 3.