

Seminarium IK

Wzajemne sprzężenia systemów elektroenergetycznych zasilania trakcyjnego prądu przemiennego i prądu stałego

Włodzimierz Kruczek

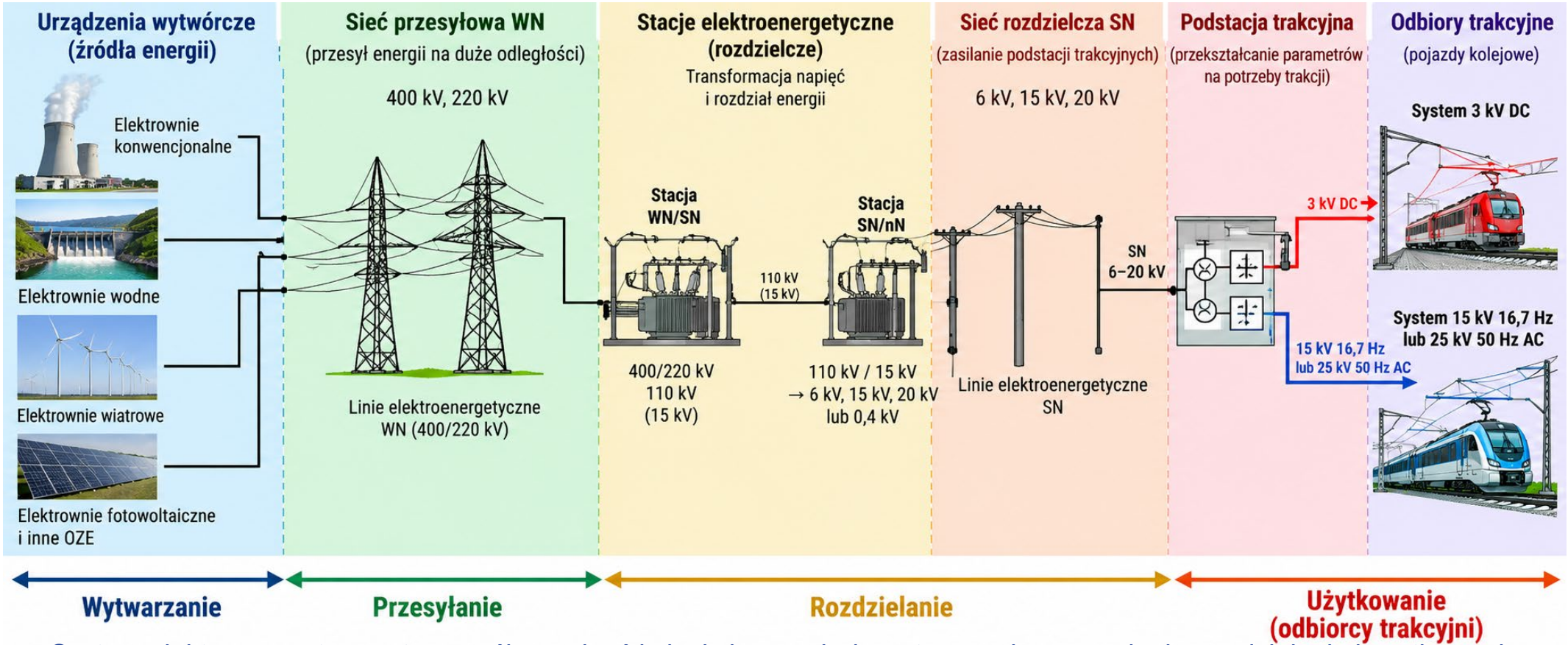
INSTYTUT KOLEJNICTWA
ZAKŁAD ELEKTROEENERGETYKI

Warszawa, 06.10. 2026

Plan prezentacji

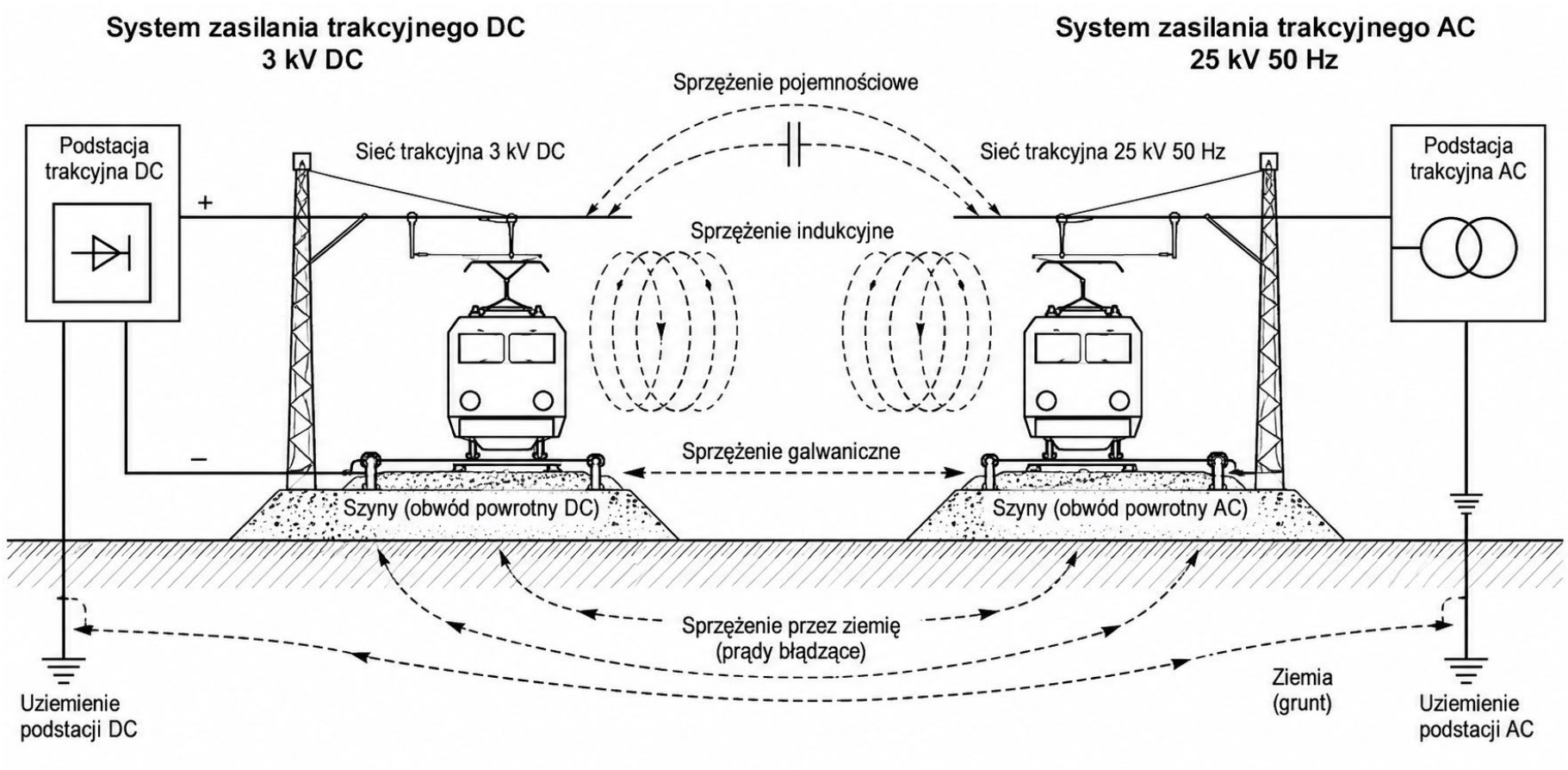
1. Trochę teorii nt. systemów elektroenergetycznych
2. Terminy i definicje związane z zagadnieniem interakcji trakcyjnych układów zasilania
3. Narzędzie matematyczne stosowane do analizy sprzężeń
4. Obwody ziemno-powrotne
5. Narzędzie matematyczne stosowane do analizy sprzężeń
6. Przykłady obliczeniowe
7. Specjalistyczne narzędzia obliczeniowe
8. Oddziaływanie wzajemne systemów trakcyjnych prądu stałego i przemiennego w odniesieniu do wybranych wymagań normy PN-EN 50122-3
9. Oddziaływanie wzajemne systemów trakcyjnych prądu stałego i przemiennego – badanie terenowe
10. Wnioski

System elektroenergetyczny



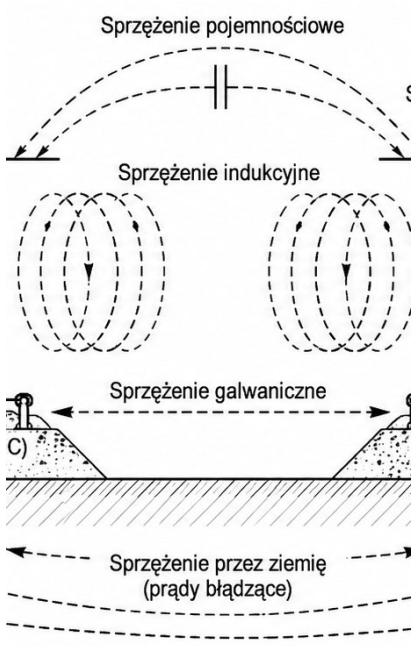
System elektroenergetyczny to zespół urządzeń i sieci służących do wytwarzania, przesyłania, rozdzielania i użytkowania energii elektrycznej. Obejmuje przede wszystkim źródła energii, sieci przesyłowe stacje elektroenergetyczne, urządzenia zabezpieczające oraz instalacje odbiorców energii.

System elektroenergetyczny zasilania trakcyjnego



Terminy i definicje związane z zagadnieniem interakcji trakcyjnych układów zasilania

Terminy i definicje związane z systemami zasilania trakcyjnego zgodne z PN-EN 50122-1: 2023-06. Organizacje ISO i IEC prowadzą bazy danych terminologicznych przeznaczonych do stosowania w normalizacji, dostępne pod następującymi adresami: https://www.iso.org/obp, https://www.electropedia.org/



Strefa wzajemnego oddziaływania

Obszar w której należy przewidzieć wzajemne zakłócenia pomiędzy linią kolejową zelektryfikowaną w systemie zasilania trakcyjnego AC a linią kolejową zelektryfikowaną w systemie zasilania trakcyjnego DC

Wzajemne oddziaływanie (sprzężenie)

Jest to zjawisko fizyczne polegające na niekontrolowanym przekazywaniu energii z jednej instalacji na drugą

Sprzężenia galwaniczne

Sprzężenia galwaniczne występują przy bezpośrednim styku lub przez małą impedancję i niskich częstotliwościach dwóch systemów ziemnopowrotnych.

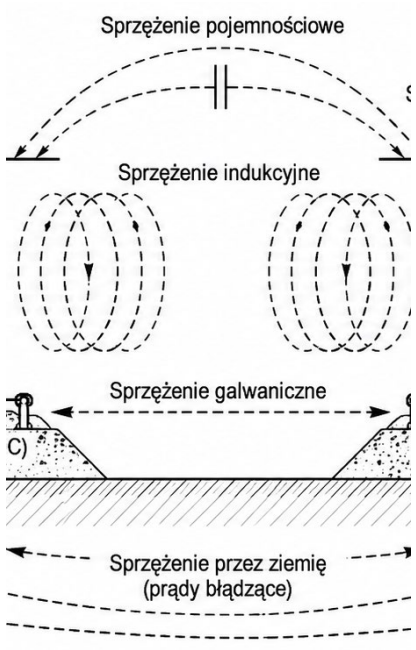
- Poprzez sieci powrotne;
- Poprzez metaliczne połączenie uziemień;
- Poprzez elementy przewodzące infrastruktury takie jak np. mosty, wiadukty, kable, rurociągi itp..

Do skutków sprzężeń galwanicznych zalicza się powstawanie napięć i przewodzenie prądów w zakłócanym systemie

Sprzężenie przez układ ziemnopowrotny (przez ziemię)

Sprzężenie występuje poprzez rezystywność ziemi, Przepływ prądów błądzących od sieci powrotnych powoduje szkodliwy wpływ na uziemiania podstacji i urządzeń przytorowych. Może powodować wzmożoną korozję. Prądy błądzące mogą wpływać do obwodów zasilania urządzeń elektrycznych np. srk i je zakłócać

Terminy i definicje związane z zagadnieniem interakcji trakcyjnych układów zasilania



Sprzężenie indukcyjne

Źródłem sprzężeń indukcyjnych jest pole magnetyczne. Występuje w układach z których przynajmniej jeden transmituje duże prądy przy zadanej częstotliwości i obwody te znajdują się w strefie oddziaływania.
W szczególności sprzężenie indukcyjne związane jest z indukowaniem się napięć i prądów w elementach zakłócanego systemu. Szczególnie w długich obiektach liniowych służących prowadzeniu ruchu kolejowego. Są to takie obiekty jak szyny kolejowe lub przewody ułożone na powierzchni ziemi lub na niewielkiej głębokości w ziemi służące prowadzeniu ruchu kolejowego. W takich obiektach pojawiające się nawet niewielkie napięcia indukowane od pobliskiej linii WN może spowodować zagrożenie porażeniowe lub inne szkodliwe działania na zakłócanej instalacji.

Sprzężenia pojemnościowe

Źródłem sprzężeń pojemnościowych jest pole elektryczne. Związane jest z występowaniem pojemności w sieciach elektroenergetycznych, przy czym do generowania zakłócenie nie jest konieczny przepływ prądów przez zakłócany system. Do skutków sprzężeń pojemnościowych zalicza się wprowadzanie napięć do galwanicznie odseparowanych zakłócanych instalacji. Wprowadzane napięcia zależą między innymi od napięcia systemu zakłócającego, odległości i częstotliwości.

Bezpieczeństwo elektryczne

Jest to stan wolny od nieakceptowalnego poziomu ryzyka pochodzącego od instalacji, urządzeń elektrycznych

Narzędzie matematyczne stosowane do analizy sprzężeń

1. **Równania obwodów elektrycznych – prawa Kirchhoffa**
   Stanowią podstawę modeli systemów trakcyjnych. Pozwalają wyznaczać prądy i napięcia w sieci trakcyjnej, szynach, ziemi, uziemieniach oraz sąsiednich obwodach. Może być wykorzystywany zwłaszcza przy sprzężeniach galwanicznych

$$\Sigma I_k = 0 \text{ oraz } \Sigma U_k = 0$$

Na tej podstawie można budować modele wielowęzłowe obu systemów i analizować przepływ prądów między nimi.

1. **Postać macierzowa równań układu wieloprzewodowego**

Aparat matematyczny, który może być wykorzystywany do analizy wzajemnych sprzężeń systemów trakcyjnych AC i DC. Pozwala jednocześnie uwzględnić wiele przewodników: przewody jezdne, liny nośne, szyny obu torów, przewody powrotne, uziemiające oraz ziemię jako drogę powrotną. **(Jest to układ ziemno-powrotny)**

Obwody ziemnopowrotne

Obwody ziemnopowrotne



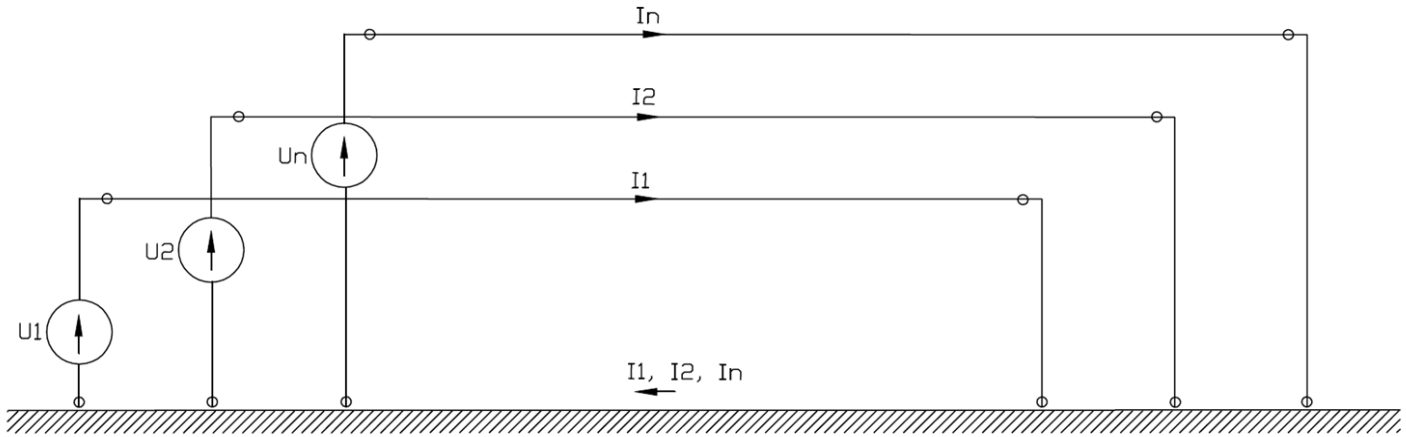
$I_{ust} = f(L)$



$I_{ust} = f(L)$

Obwody ziemnopowrotne

Z teorii elektrotechniki wiadomym jest że dowolny układ wieloprzewodowy zawierający n przewodów napowietrznych i podziemnych można traktować jako zbiór n pętli ziemnopowrotnych, utworzonych przez poszczególne przewody i ziemię. Dlatego pętle ziemnopowrotne znajdują zastosowanie w analizie układów wieloprzewodowych. Schematycznie zbiór n pętli ziemnopowrotnych można przedstawić jak na rysunku



W analizie matematycznej obwody ziemnopowrotne zawierają przewody napowietrzne lub kable ziemne (o skutecznej izolacji od ziemi), występują więc impedancję własne i wzajemne tych obwodów.

Narzędzie matematyczne stosowane do analizy sprzężeń

***Równania układu wieloprzewodowego* MTL (Multi-Conductor Transmission Line)**

Dla n liczby pętli ziemnopowrotnych 1,2,..n, w których płyną prądy I_1, I_2,..I_n, równania przyjmują postać macierzową

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix}$$

Równania MTL (Multi-Conductor Transmission Line) służą do opisu przepływu prądów i rozkładu napięć w układzie wielu wzajemnie sprzężonych przewodników. Pozwalają uwzględnić jednocześnie parametry własne przewodników oraz sprzężenia wzajemne – rezystancyjne, indukcyjne, pojemnościowe i konduktancyjne.

Układ n przewodów interpretuje się jako zbiór n pętli ziemnopowrotnych z których każda zawiera przewód powrotny i ziemię, (w pętli zawierającej przewód k, płynie prąd I_k, jest to więc układ wielozaciskowy który ma n zacisków (początki pętli oraz wspólny zacisk 0 odpowiadającym ziemi, tzw. węzeł odniesienia. Zależność między prądami I_k, a potencjałami V_k podają równania węzłowe.

W zapisie ogólnym: $\boldsymbol{I = YV}$

$$\boldsymbol{I} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix}$$

I jest macierzą prądów węzłowych,

$$\boldsymbol{V} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix}$$

V macierzą potencjałów węzłowych,

$$\boldsymbol{Y} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix}$$

Y jest macierzą admitancji węzłowych.

$$\boldsymbol{wyznaczając\ V\ z\ równania\ \ I = YV}$$

$$\boldsymbol{Z = Y^{-1}} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix}$$

Czyli macierz impedancji z równania ogólnego równa jest odwrotności macierzy admitancyjnej węzłowej i nosi nazwę **macierzy impedanycjnej węzłowej** elementami tej macierzy są impedancje **własne i wzajemne pętli ziemnopowrotnych.**

Prawidłowe wyznaczenie impedancji własnych i wzajemnych pętli ziemnopowrotnych jest podstawą do dalszej analizy obwodów ziemnopwrotnych

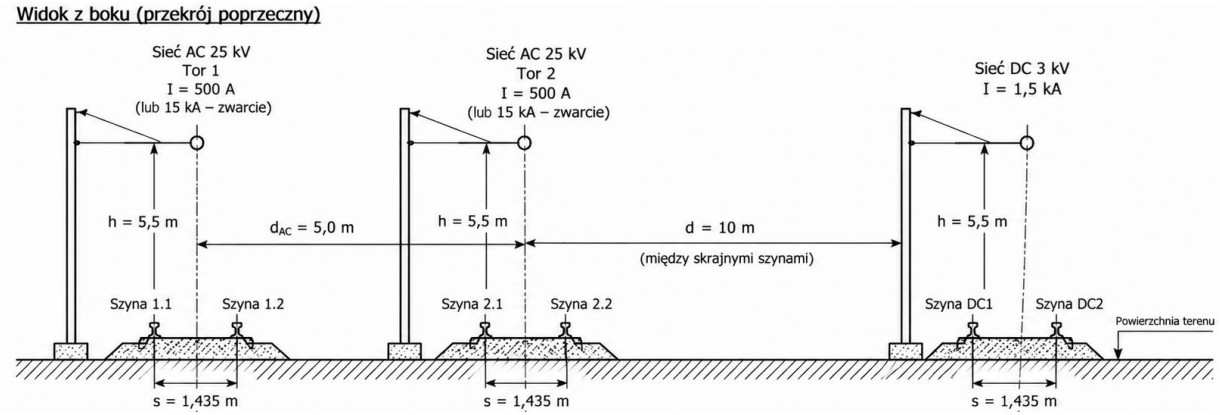
Przykład obliczeniowy

Model obliczeniowy 1:

Sprzężenia indukcyjnego między dwutorową linią 2 x 25 kV 50 Hz AC a równolegle biegnącą linią 3 kV DC..

Założenia do obliczeń

- linia AC jest **dwutorowa**, po 500 A na każdy tor,
- prąd powrotny każdego toru AC dzieli się po 250 A na każdą z dwóch szyn,
- rozstaw szyn 1,435 m,
- odległość osi torów AC 5 m,
- wysokość przewodu jezdnego 5,5 m,
- odległość między skrajną szyną drugiego toru AC a najbliższą szyną DC: 10 m,
- odcinek równoległy L=1 km,
- konduktywność linii DC G_{DC} = 0,5 s/km
- Rezystywność gruntu $\delta = 300\ \Omega m$
- dla obliczenia rozkładu napięcia przyjmuję orientacyjnie impedancję jednej szyny Z-0,08+j0,63 Ω/km



Przykład obliczeniowy

wyniki:

Wektor prądów AC

$$\mathbf{I}_{AC} = \begin{bmatrix} 500 \\ -250 \\ -250 \\ 500 \\ -250 \\ -250 \end{bmatrix} A$$

Postać macierzowa całego układu (układ 8-przewodowy):

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_{CJ1} \\ I_{RA11} \\ I_{RA12} \\ I_{CJ2} \\ I_{RA21} \\ I_{RA22} \\ I_{RD1} \\ I_{RD2} \end{bmatrix} \quad \mathbf{U} = \begin{bmatrix} U_{CJ1} \\ U_{RA11} \\ U_{RA12} \\ U_{CJ2} \\ U_{RA21} \\ U_{RA22} \\ U_{RD1} \\ U_{RD2} \end{bmatrix}.$$

Model wieloprzewodowej linii transmisyjnej:

$$\frac{d\mathbf{U}}{dx} = -\mathbf{ZI}$$

$$\frac{d\mathbf{I}}{dx} = -\mathbf{YU}$$

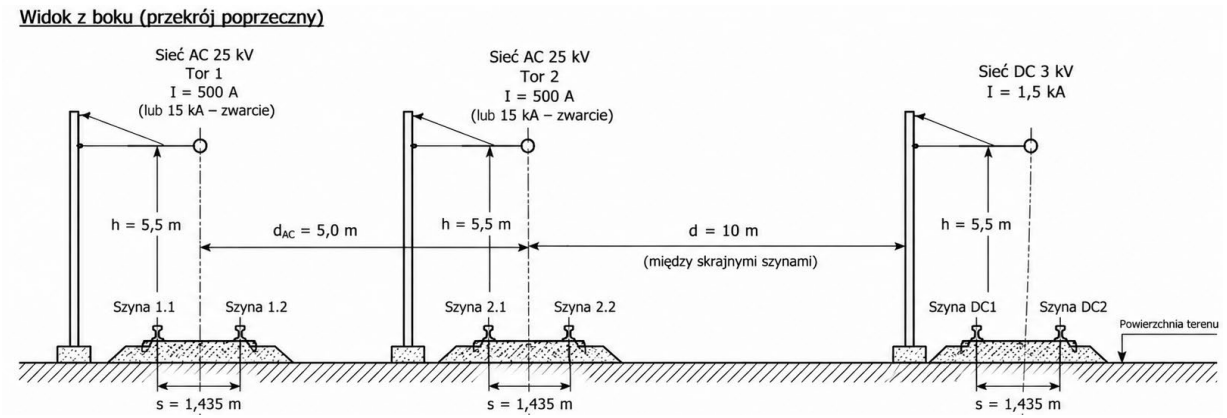
Macierz impedancji jednostkowych

$$\mathbf{Z} = \mathbf{R} + j\omega\mathbf{L}$$

Macierz admitancji poprzecznych

$$\mathbf{Y} = \mathbf{G} + j\omega\mathbf{C}.$$

$$\mathbf{E}'_{DC} \approx j \begin{bmatrix} 5{,}59 \\ 4{,}55 \end{bmatrix} V/km$$

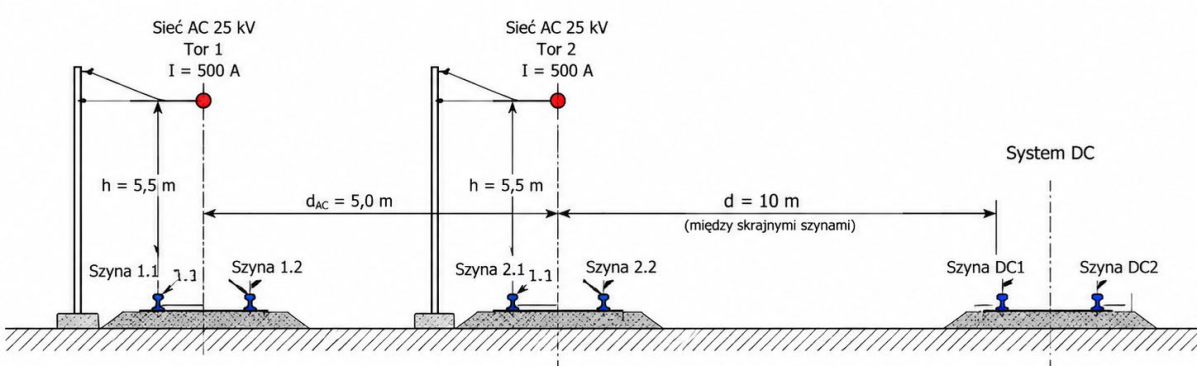


Wielkość	szyna DC1	szyna DC2
EMF jednostkowa	5,59 V/km	4,55 V/km
EMF na 1 km	5,59 V	4,55 V
Z uwzg G= 0,5 S/km	**≈2,78 V**	**≈2,26 V**

Przykład obliczeniowy

Model obliczeniowy 2:
Sprzężenia indukcyjnego między dwutorową linią 2 x 25 kV 50 Hz AC a równolegle biegnącą linią 3 kV DC..

Założenia do obliczeń
- linia AC jest **dwutorowa**, zwarcie w jednym torze linii AC, Izw=15 kA;
- prąd powrotny każdego toru AC dzieli się po 7,5 k A
- rozstaw szyn 1,435 m,
- odległość osi torów AC 5 m,
- wysokość przewodu jezdnego 5,5 m,
- odległość między skrajną szyną drugiego toru AC a najbliższą szyną DC: 10 m,
- odcinek równoległy L=1 km,
- konduktywność linii DC G_{DC} = 0,5 s/km
- Rezystywność gruntu $\delta = 300\ \Omega m$
- dla obliczenia rozkładu napięcia przyjmuję orientacyjnie impedancję jednej szyny Z-0,08+j0,63 Ω/km



Przykład obliczeniowy

Wyniki dla modelu obliczeniowego 2, dla odcinka równoległego 1 km:

Wielkość	Szyna DC1 – bliższa	Szyna DC2 – dalsza
Prąd zwarciowy AC	15 kA	15 kA
Prąd powrotny w każdej szynie AC	7,5 kA	7,5 kA
Długość równoległego odcinka	1 km	1 km
Rezystywność gruntu	300 Ωm	300 Ωm
Konduktancja szyna–ziemia	0,5 S/km	0,5 S/km
SEM indukowana jednostkowa	112,3 V/km	89,5 V/km
SEM indukowana na 1 km	112,3 V	89,5 V
Po uwzględnieniu konduktancji 0,5 s/km	≈ 55,9 V RMS	≈ 44,5 V RMS

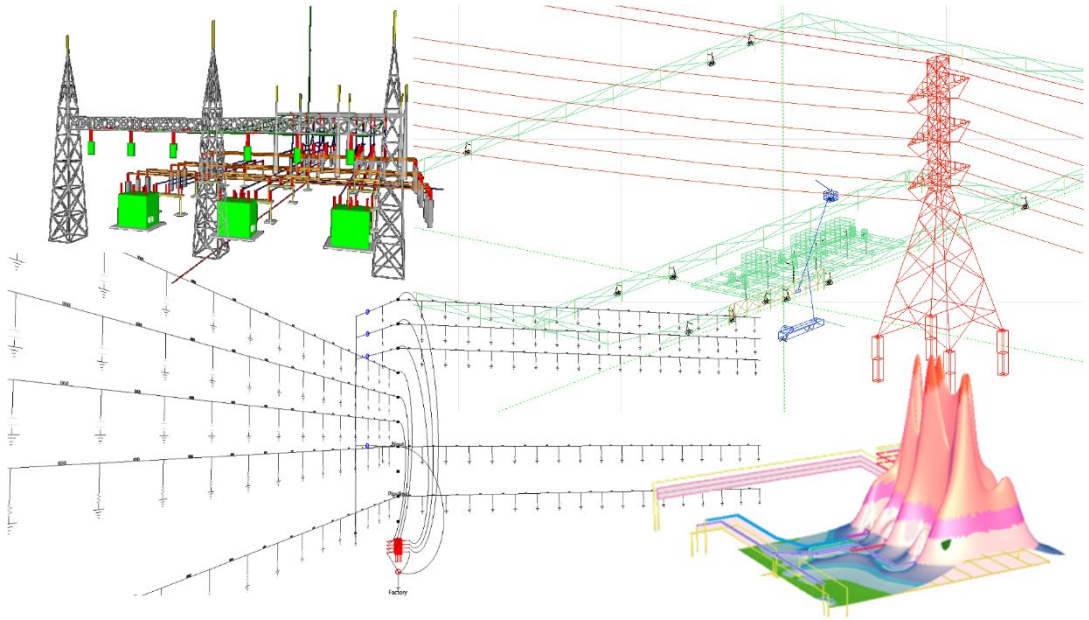
Przykład obliczeniowy

Wyniki dla modelu obliczeniowego 2, dla odcinka równoległego 5 km:

Wielkość	Szyna DC1 – bliższa	Szyna DC2 – dalsza
Prąd zwarciowy AC	15 kA	15 kA
Prąd powrotny w każdej szynie AC	7,5 kA	7,5 kA
Długość równoległego odcinka	5 km	5 km
Rezystywność gruntu	300 Ωm	300 Ωm
Konduktancja G	0,5 S/km	0,5 S/km
SEM jednostkowa \(E'\)	112,3 V/km	89,5 V/km
SEM na 5 km bez upływu	561,5 V	447,5 V
SEM z uwzględnieniem G	≈ 213,4 V RMS	≈ 170,1 V RMS

Przeprowadzone obliczenia wykazały, że linia AC 25 kV 50 Hz może powodować indukowanie napięć o częstotliwości 50 Hz w szynach sąsiedniego systemu 3 kV DC. Wielkość tych napięć zależy przede wszystkim od wartości prądu płynącego w systemie AC, geometrii wzajemnego usytuowania przewodników, długości równoległego przebiegu linii oraz parametrów elektrycznych obwodu powrotnego.
W analizowanym przypadku zwarcia o prądzie 15 kA, przy odległości 10 m pomiędzy skrajnymi szynami obu systemów, dla odcinka o długości 1 km uzyskano maksymalne napięcia szyna–ziemia wynoszące około **561 V i 447 V . Napięcia te będą mniejsze przy uwzględnieniu konduktancji.**

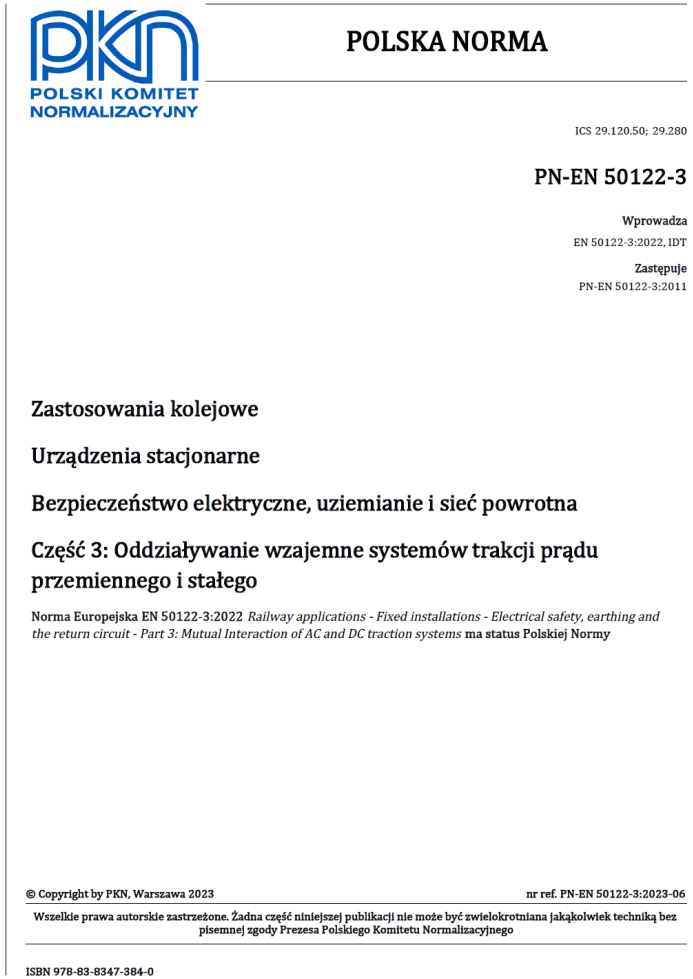
Specjalistyczne narzędzia obliczeniowe



Istnieją specjalistyczne narzędzia komputerowe, które pozwalają analizować dokładnie takie zjawiska: sprzężenia indukcyjne, pojemnościowe i przewodnościowe pomiędzy równoległymi systemami trakcyjnymi AC/DC, przepływ prądów przez ziemię, napięcia indukowane oraz stany zwarciowe.

CDEGS pakiet oprogramowania do analizy uziemienia i oddziaływań elektromagnetycznych. Pakiet CDEGS zawiera pełną gamę dodatkowych narzędzi programowych, które uzupełniają, wspierają i ulepszają metody rozwiązywania różnych problemów związanych z uziemieniem, zakłóceniami elektromagnetycznymi, polami elektromagnetycznymi i zjawiskami przejściowymi.

Oddziaływanie wzajemne systemów trakcyjnych prądu stałego i przemiennego w odniesieniu do wybranych wymagań normy PN-EN 50122-3



POLSKA NORMA

POLSKI KOMITET NORMALIZACYJNY

ICS 29.120.50; 29.280

PN-EN 50122-3

Wprowadza
EN 50122-3:2022, IDT

Zastępuje
PN-EN 50122-3:2011

Zastosowania kolejowe

Urządzenia stacjonarne

Bezpieczeństwo elektryczne, uziemianie i sieć powrotna

Część 3: Oddziaływanie wzajemne systemów trakcji prądu przemiennego i stałego

Norma Europejska EN 50122-3:2022 *Railway applications - Fixed installations - Electrical safety, earthing and the return circuit - Part 3: Mutual Interaction of AC and DC traction systems* ma status Polskiej Normy

© Copyright by PKN, Warszawa 2023

nr ref. PN-EN 50122-3:2023-06

Wszelkie prawa autorskie zastrzeżone. Żadna część niniejszej publikacji nie może być zwielokrotniana jakąkolwiek techniką bez pisemnej zgody Prezesa Polskiego Komitetu Normalizacyjnego

ISBN 978-83-8347-384-0

Norma Europejska PN-EN 50122-3: 2022 „Zastosowania kolejowe - Urządzenia stacjonarne -Bezpieczeństwo elektryczne, uziemianie i sieć powrotna - Część 3: Oddziaływanie wzajemne systemów trakcji prądu przemiennego i stałego„ należy do serii norm dotyczących bezpieczeństwa elektrycznego i uziemień w sieciach powrotnych systemów trakcyjnych”.

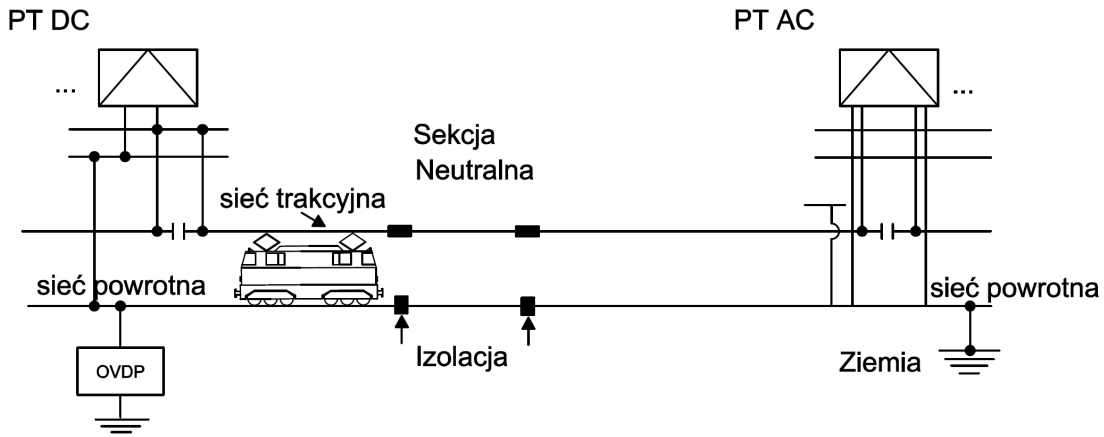
Niniejszy dokument określa wymagania dotyczące środków ochronnych zapewniających bezpieczeństwo elektryczne w instalacjach stacjonarnych, gdy można racjonalnie przewidywać wystąpienie niebezpiecznych napięć lub prądów dla ludzi albo urządzeń wskutek wzajemnego oddziaływania systemów zasilania trakcji elektrycznej prądu przemiennego (AC) i prądu stałego (DC).
Ma on również zastosowanie do wszystkich aspektów instalacji stacjonarnych niezbędnych do zapewnienia bezpieczeństwa elektrycznego podczas prac utrzymaniowych w systemach zasilania trakcji elektrycznej.

Oddziaływanie wzajemne systemów trakcyjnych prądu stałego i przemiennego w odniesieniu do wybranych wymagań normy PN-EN 50122-3

Norma wymienia następujące uwarunkowania przy których wzajemne oddziaływanie ma miejsce:

- równoległy przebieg systemów trakcji elektrycznej AC i DC;
- przecinanie się systemów trakcji elektrycznej AC i DC;
- są wykorzystywane wspólne tory, budynki lub inne konstrukcje przez systemy trakcyjne AC I DC;
- sekcje separacji pomiędzy systemami trakcji elektrycznej AC i DC.





Oddziaływanie wzajemne systemów trakcyjnych prądu stałego i przemiennego w odniesieniu do wybranych wymagań normy PN-EN 50122-3

Zagrożenia i możliwe niekorzystne skutki wynikające z wzajemnego oddziaływania:

- zagrożenie dla bezpieczeństwa osób poprzez występowanie napięć dotykowych ponad wartości dopuszczalne;
- przeciążenie termiczne przewodów i ich ekranów;
- przeciążenie termiczne transformatorów spowodowane nasyceniem magnetycznym rdzeni;
- możliwy niekorzystny wpływ na bezpieczeństwo i prawidłowe funkcjonowanie systemów srk;

Podczas projektowania systemu należy przestrzegać wymagań norm PN-EN 50122-1:2022 i PN-EN 50122-2:2022, dotyczących połączeń z obwodem powrotnym kolei prądu przemiennego oraz połączeń z obwodem powrotnym kolei prądu stałego, aby uniknąć ryzyka niebezpiecznego napięcia dotykowego i prądów błądzących.

Podstawowe wymagania:

- Stosowanie tylko uszynienia grupowego w układzie otwartym na liniach kolejowych DC ;
- Nie dopuszczanie do jednoczesnego uziemienia i uszynienia bezpośredniego obiektów w strefie oddziaływania sieci trakcyjnej DC;
- Do zasilania urządzeń nietrakcyjnych stosować układy zasilania sieciowego TT, układ zasilania TN wymagane zastosowanie dodatkowego transformatora po stronie kolejowej
- Przestrzegać wymagań co do konduktancji jednostkowej sieci powrotnej

  – $G'_{RE} \leq 0{,}5$ S/km na tor oraz $U_{RE} \leq +5$ V dla torowiska otwartego

  – $G'_{RE} \leq 2{,}5$ S/km na tor oraz $U_{RE} \leq +1$ V dla torowiska zamkniętego

Oddziaływanie wzajemne systemów trakcyjnych prądu stałego i przemiennego w odniesieniu do wybranych wymagań normy PN-EN 50122-3

Wzajemne oddziaływanie (sprzężenie)
W systemach trakcyjnych większe zagrożenie powoduje zakłócanie polegające na zakłócaniu systemu DC przez system trakcyjny AC.

Czy projektowana linia 25 kV AC znajduje się w strefie wzajemnego oddziaływania z istniejącą lub projektowaną linią 3 kV DC?
Norma nie podaje ogólnych wartości dla strefy wzajemnego oddziaływania.

Norma podaje odległość 50 m jako próg, poniżej którego strefę wzajemnego oddziaływania przyjmuje się bez dalszego uzasadniania.
Powinna być wtedy wykonana analiza oddziaływania systemy AC na system DC i odwrotnie.
Należy przeanalizować sprzężenia galwaniczne, pojemnościowe i indukcyjne.

Dla odległości przekraczającej 50 m granice strefy **wzajemnego oddziaływania** wyznacza się w oparciu o wartości graniczne napięć dotykowych dla przypadków **łącznego występowania napięć AC i DC i w oparciu o lokalne uwarunkowania.**
Dla odległości przekraczające 50 m należy przeanalizować sprzężenia galwaniczne i indukcyjne.

Oddziaływanie wzajemne systemów trakcyjnych prądu stałego i przemiennego w odniesieniu do wybranych wymagań normy PN-EN 50122-3

Szerokość strefy wzajemnego oddziaływania zależy od następujących głównych parametrów i lokalnych uwarunkowań:

a) rodzaj zastosowanego systemu zasilania trakcyjnego, z podziałem na:
- standardowy system, w którym dla powrotnych prądów trakcyjnych używane są jedynie szyny jezdne,
- system z transformatorami odsysającymi,

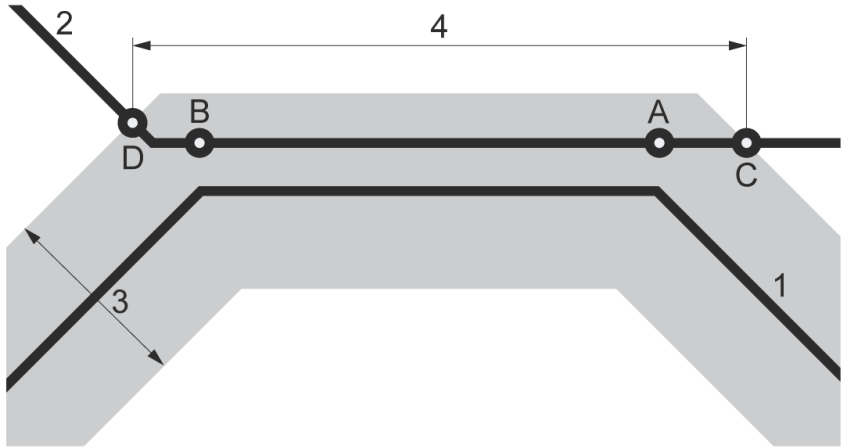
3) system z autotransformatorami;
b) zastosowanie dodatkowych przewodów powrotnych;
c) indukujący prąd trakcyjny;
d) długość odcinka równoległego;
e) geometria i odległość pomiędzy liniami kolejowymi w przypadku, gdy linie kolejowe nie są dokładnie równoległe;
f) rezystywność gruntu;
g) podstawowa częstotliwość (np. 16,7 Hz lub 50 Hz);
h) ekranowanie poprzez inne metalowe konstrukcje lub skutki upływności doziemnej szyn jezdnych, itp.

Oddziaływanie wzajemne systemów trakcyjnych prądu stałego i przemiennego w odniesieniu do wybranych wymagań normy PN-EN 50122-3

Zał. A normy podaje tzw. Analizę podstawową, przypadek referencyjny

Tam gdzie spełnione są wymienione warunki wstępne wartość graniczna odległości pomiędzy systemami AC i DC wynosi 1000 m

- linia dwutorowa, gdzie do obwodu powrotnego wykorzystywane są maksymalnie cztery szyny jezdne systemu AC;
- prąd indukcyjny wynosi 500 A na sieć trakcyjną (łącznie 1 000 A);
- długość równoległego odcinka między koleją AC i DC wynosi 4 km;
- rezystywność gruntu wynosi 100 Ωm;
- częstotliwość systemu AC 50 Hz;
- zakłócany system DC jest izolowany od ziemi na całej swojej długości;
- nie uwzględniono efektów wprowadzanych przez inne obiekty metalowe.



1 linia kolejowa systemu AC;
2 linia kolejowa systemu DC;
3 strefa wzajemnego oddziaływania wywoływana przez linię kolejową systemu AC na system DC;
4 długość odcinka równoległego przebiegu;
A początek równoległego przebiegu linii AC i DC;
B koniec równoległego przebiegu linii AC i DC;
C wjazd kolei DC do strefy wzajemnego oddziaływania;
D wyjazd kolei DC ze strefy wzajemnego oddziaływania.

Powyższa wartość graniczna 1000 m strefy wzajemnego oddziaływania oparty jest o wartość graniczną 35 V indukowanego w systemie DC, dla czasu występowania dłuższego jak 300 s.

Oddziaływanie wzajemne systemów trakcyjnych prądu stałego i przemiennego w odniesieniu do wybranych wymagań normy PN-EN 50122-3

Norma przedstawia wykresy U =f (d), napięć indukowanych w systemie trakcyjnym DC w funkcji szerokości strefy wzajemnego oddziaływania, dla różnych rezystywności gruntu.

Celem jest przedstawienie sposobu wyznaczenia wymiarów strefy wzajemnego oddziaływania. (nie obliczenie napięcia wprowadzanego do systemu DC przez system AC)

W przypadku gdy parametry analizowanych systemów różnią się od wartości użytych do wykreślenia funkcji analizy podstawowej wprowadza się tzw. współczynniki korekcyjne:

a) prądu: $C_I = I_{trc}$ w kA podzielone przez 1 kA;

b) długości równoległej $C_L = L_{//}$ w km podzielona przez 4 km;

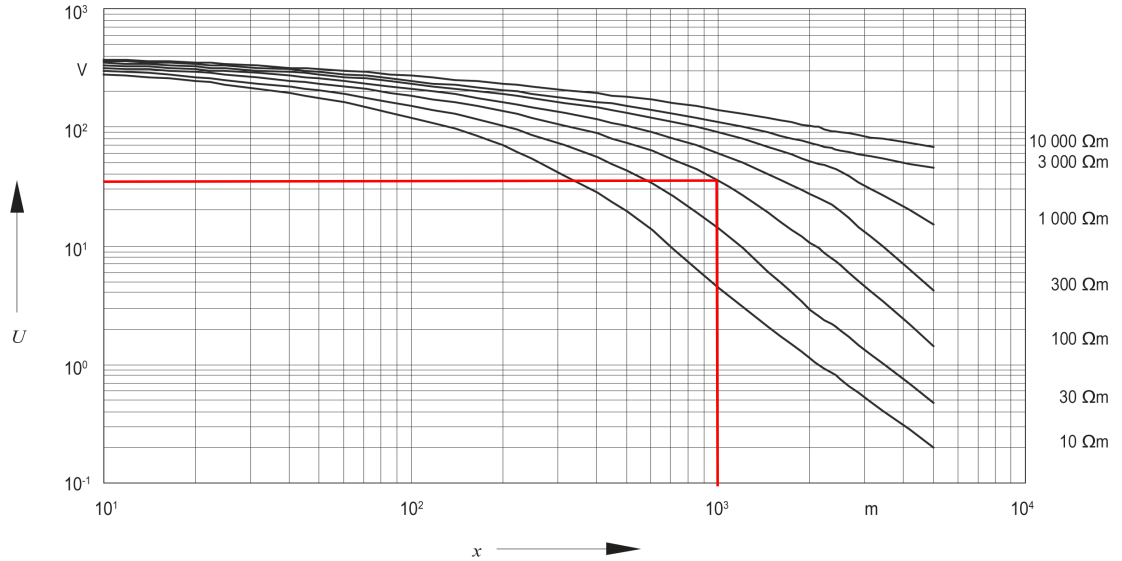
c) częstotliwości: C_f = 0,3 dla 16,7 Hz, C_f = 1,0 dla 50 Hz;

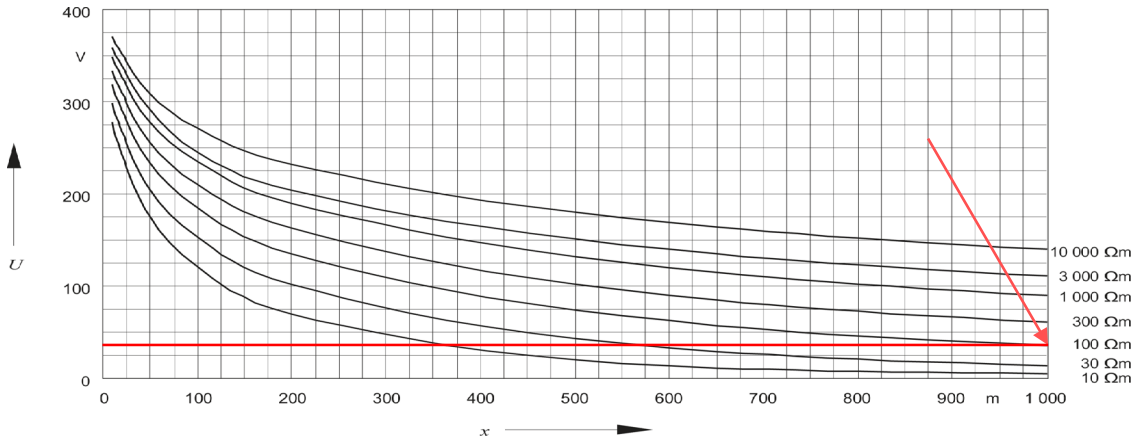
d) obecności dodatkowego przewodu powrotnego: C_S = 0,4 … 0,7

3) autotransformatora lub trafo odsysającego: C_S = 0,1 … 0,4

e) współczynnik środowiskowy C_E = 0,05 … 0,60

współczynnik ten jest powiązany z lokalizacją i konduktancją sieci powrotnej systemu DC (systemu zakłócanego)





Oddziaływanie wzajemne systemów trakcyjnych prądu stałego i przemiennego w odniesieniu do wybranych wymagań normy PN-EN 50122-3

współczynnik środowiskowy

$C_E \leq 0{,}05$ metro w obszarach miejskich;
$C_E \leq 0{,}15$ w centrach miast;
$C_E \leq 0{,}25$ obszary zurbanizowane przyległe do miast;
$C_E \leq 0{,}35$ odległe obszary miejskie;
$C_E \leq 0{,}4$ obszary podmiejskie;
$C_E \leq 0{,}5$ do 0,6 peryferia;

Stosując przedstawione współczynniki korekcyjne, rezystywność gleby i odległość dla wykresów na Rysunku napięcie indukowane do systemu DC można oszacować za pomocą
Podanego wzoru:

$\Pi_C = C_I \cdot C_L \cdot C_f \cdot C_S \cdot C_E$ Iloczyn współczynników

$$U_{sprzężone} = \Pi_C \cdot U_{graph}(\rho, d)$$

Oddziaływanie wzajemne systemów trakcyjnych prądu stałego i przemiennego w odniesieniu do wybranych wymagań normy PN-EN 50122-3

Przykład wyznaczenia strefy oddziaływania

Projektowany sytem AC 2 x 25 kV, średni prąd trakcyjny 600 A na 1 tor, ρ = 300 Ωm /sieć jezdną, o długości równoległej z istniejącą linią DC 5 km.

Linia prowadzona w obszarze nie zabudowanym:

Wyznaczamy współczynniki:

C_I = (600*2)/1000 = 1,2;

C_L = 5/4 = 1,25;

C_f = (dla 50 Hz) 1;

C_S = 0,7 (wynikający z zastosowania autotransformatorów);

$C_E \leq 0,6$ (peryferia);

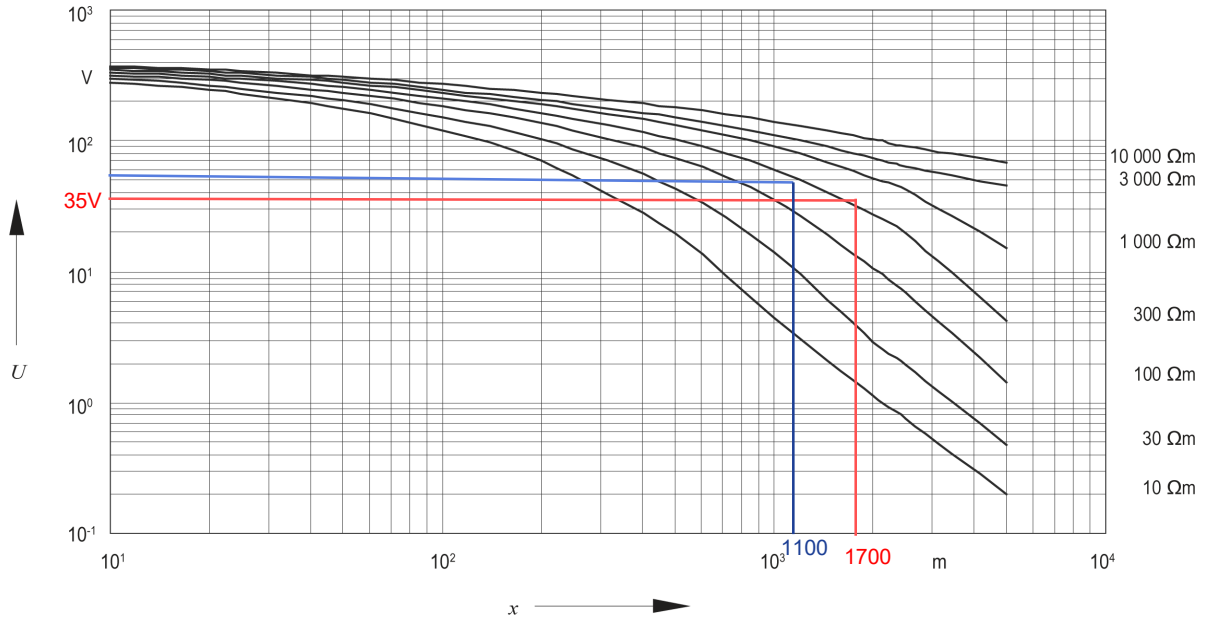
$\rho = 300\ \Omega m$

$\Pi_C = 1,2 \cdot 1,25 \cdot 1 \cdot 0.7 \cdot 0.6 = 0,63$

Jak wynika z przedstawionej charakterystyki dla danej rezystywności gruntu 300 Ωm, dla napięcia referencyjnego 35 V, konieczna by była odległość 1700 m

Iloczyn współczynników dla danego przypadku wynosi 0,63

$U_{graph}(\rho,d) = U_{sprzężone} / \Pi_C = 35/0,63 = 55,5$ V



Dla napięcia 55,5 V z charakterystyki odczytujemy strefę wzajemnego oddziaływania która wynosi ok1100 m

Jeżeli projektowany system mieści się w strefie wzajemnego oddziaływania, konieczne jest wykonanie dalszej analizy obliczeń oddziaływania systemy AC na system DC

Oddziaływanie wzajemne systemów trakcyjnych prądu stałego i przemiennego w odniesieniu do wybranych wymagań normy PN-EN 50122-3

Wynikiem wykonanej symulacji powinny być wartość napięć dla warunków krótkoterminowych i długoterminowych w zakłócanym systemie

Wymagania normy będą spełnione jeżeli wartości graniczne nie będą przekroczone dla przypadków łącznego występowania napięć AC i DC
Weryfikację należy wykonać biorąc pod uwagę składową stałą i zmienną tzw. napięcia łącznego

Wartości graniczne opierają się na maksymalnym dopuszczalnym napięciu dotykowym rażenia U_b dla warunków długoterminowych i na maksymalnym dopuszczalnym napięciu dotykowym efektywnym U_{te} dla warunków krótkoterminowych.
(Wartości podane w PN-EN 50122-1 2022)
Norma wymaga weryfikacji napięć w strefie wspólnej dla następujących warunków pracy systemów:
1) Dla warunków długoterminowych systemu AC i systemu DC;
2) Dla warunków krótkoterminowych systemu AC i warunków długoterminowych systemu DC;
3) Dla warunków długoterminowych systemu AC i warunków krótkoterminowych systemu DC;

Warunki długoterminowe są związane z warunkami pracy, a warunki krótkoterminowe są związane z warunkami awarii lub operacjami łączeniowymi

Nie jest konieczne rozpatrywanie przypadku jednoczesnego występowania zjawisk krótkotrwałych w systemie AC i w systemie DC

Oddziaływanie wzajemne systemów trakcyjnych prądu stałego i przemiennego w odniesieniu do wybranych wymagań normy PN-EN 50122-3

Składowa stała i zmienna napięcia łącznego:

Norma określa, **jak oceniać bezpieczeństwo porażeniowe, gdy w tym samym miejscu i czasie występuje jednocześnie napięcie dotykowe DC oraz AC**. Norma nie pozwala oceniać ich całkowicie niezależnie

Wyobraźmy sobie istniejącą linię **3 kV DC**. Wskutek przepływu prądu trakcyjnego szyny mają względem ziemi pewien potencjał, np.:

U_{DC}=100 V

W strefie oddziaływania istnieje linia **25 kV 50 Hz AC**. W wyniku sprzężenia indukcyjnego lub galwanicznego do układu DC może zostać przeniesiona składowa napięcia AC, np.

U_{AC}=40 V

Człowiek dotykaiacy elementu przewodzącego nie jest narażony oddzielnie na 100 V DC i 40 V AC. Rzeczywiste napięcie dotykowe ma postać

$$u(t) = U_{DC} + \sqrt{2}U_{AC}\sin(2\pi f t)$$

Dla zjawisk trwających dłużej niż 1 s norma rozdziela zmierzone lub obliczone napięcie u(t) na dwie części:

Składowa stała

$$U_{DC} = \frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} u(t)\,dt$$

Składowa zmienna

$$U_{AC} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} [u(t) - U_{DC}]^2 dt}$$

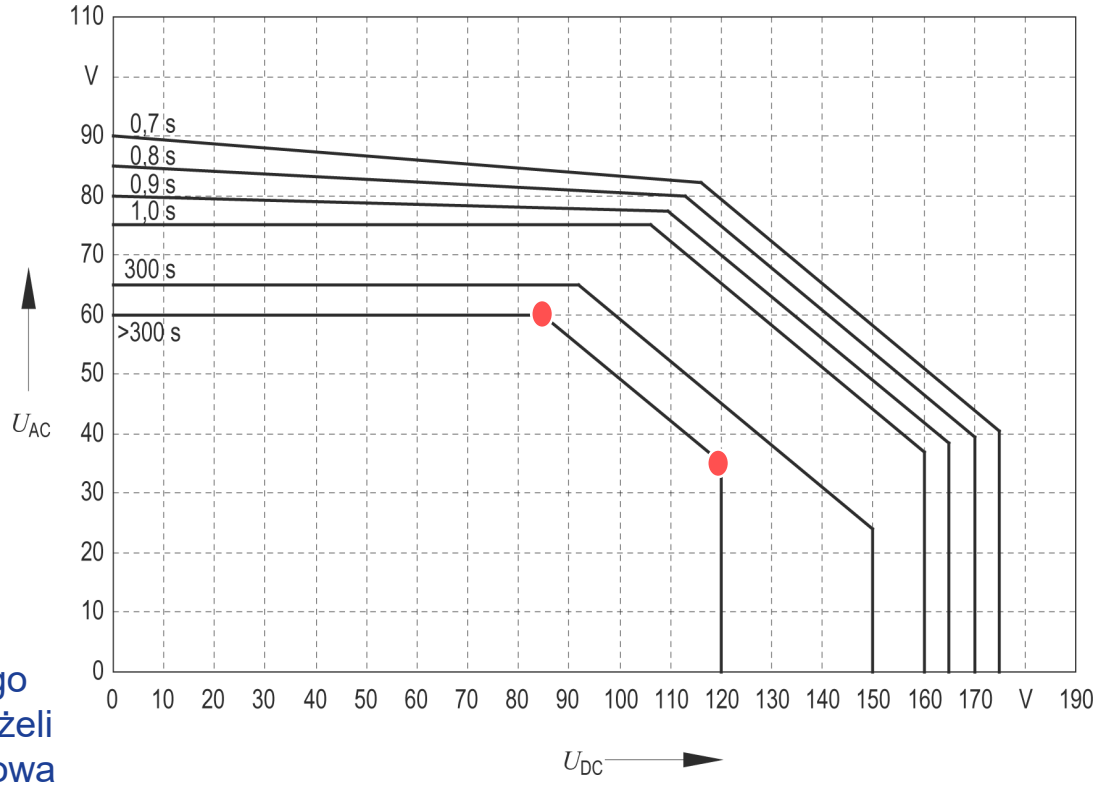
u(t) oznacza napięcie łączne;
U_{DC} oznacza składową stałą napięcia łącznego;
U_{AC} oznacza składową przemienną napięcia łącznego.

Dla warunków długoterminowych systemu AC i systemu DC; z wyłączeniem warsztatów, stacji obsługowych itp.

Norma nie pozwala na dodawanie tych napięć i porównanie wyniku z jedną wartością: $U_{DC,AC}=U_{DC}+U_{AC}$
zamiast tego konieczne jest stworzenie punktu P = (U_{DC},U_{AC}) i sprawdzenie jego położenie względem **obwiedni dopuszczalnych kombinacji AC/DC**

Obowiązuje następujące kryterium akceptacji:

1. $U_{AC} \leq U_{AC\ dop}$ składowa przemienna napięcia łącznego nie powinna przekraczać maksymalnego przemiennego napięcia dotykowego rażeniowego dla danego czasu trwania (podanego w PN-EN 50122-1: 2022, tab. 7);
2. $U_{DC} \leq U_{DC\ dop}$ składowa stała napięcia łącznego nie powinna przekraczać maksymalnego stałego napięcia dotykowego rażeniowego dla danego czasu trwania (podanego w PN-EN 50122-1: 2022, tab. 9)
3. występujące napięcie łączne punkt **P = (U_{DC},U_{AC})** mieści się pod wykresem dla danego czasu trwania, pokazanym na rys.
4. dla czasów trwania przekraczających 1 s **napięcie łączne szczytowe (***combined peak value)* powinno być mniejsze niż $2\sqrt{2}$ krotność maksymalnego dozwolonego napięcia rażeniowego AC, podanego w PN-EN 50122-1:2022, tab7



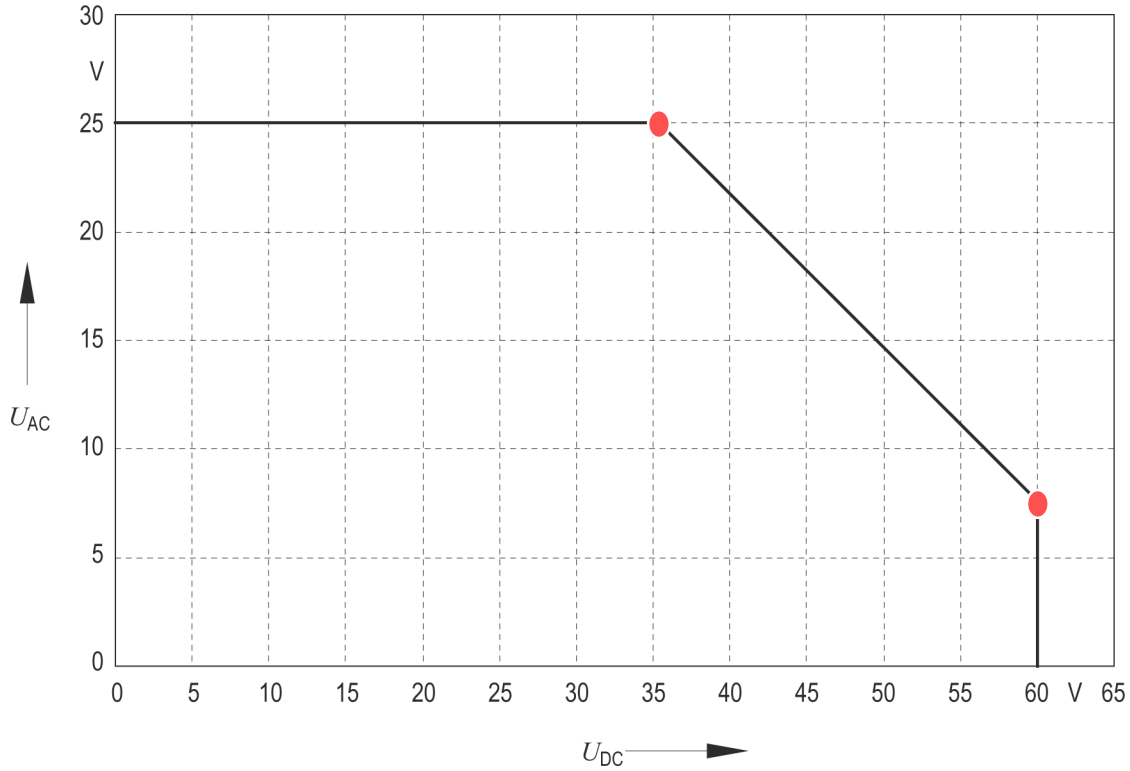
Np. dla czasu trwania >300 s jeżeli składowa stała napięcia łącznego dotykowego rażenia wynosi 120 V, składowa zmienna nie może przekraczać 35 V, lub np. jeżeli składowa zmienna napięcia dotykowego łącznego rażenia wynosi 60V to składowa stała nie może przekraczać 85 V

Oddziaływanie wzajemne systemów trakcyjnych prądu stałego i przemiennego w odniesieniu do wybranych wymagań normy PN-EN 50122-3

Dla warunków długoterminowych systemu AC i systemu DC dla warsztatów, stacji obsługowych itp.

Obowiązuje następujący sposób postępowania w celu sprawdzenia, czy występujące napięcie łączne jest dpuszczalne:

1. $U_{AC} \leq U_{AC\ dop}$ Składowa przemienna napięcia łącznego nie może przekraczać wartości podanych w normie PN- EN 50122-1:2022, 9.2.2.3 (obniżona do 25 V)
2. $U_{DC} \leq U_{DC\ dop}$ Składowa stała napięcia łącznego nie może przekraczać wartości podanych w normie PN- EN 50122-1:2022, 9.3.2.3 (obniżona do 60 V);
3. napięcie łączne jest dopuszczalne, jeśli mieści się w obwiedni określonej na rys.

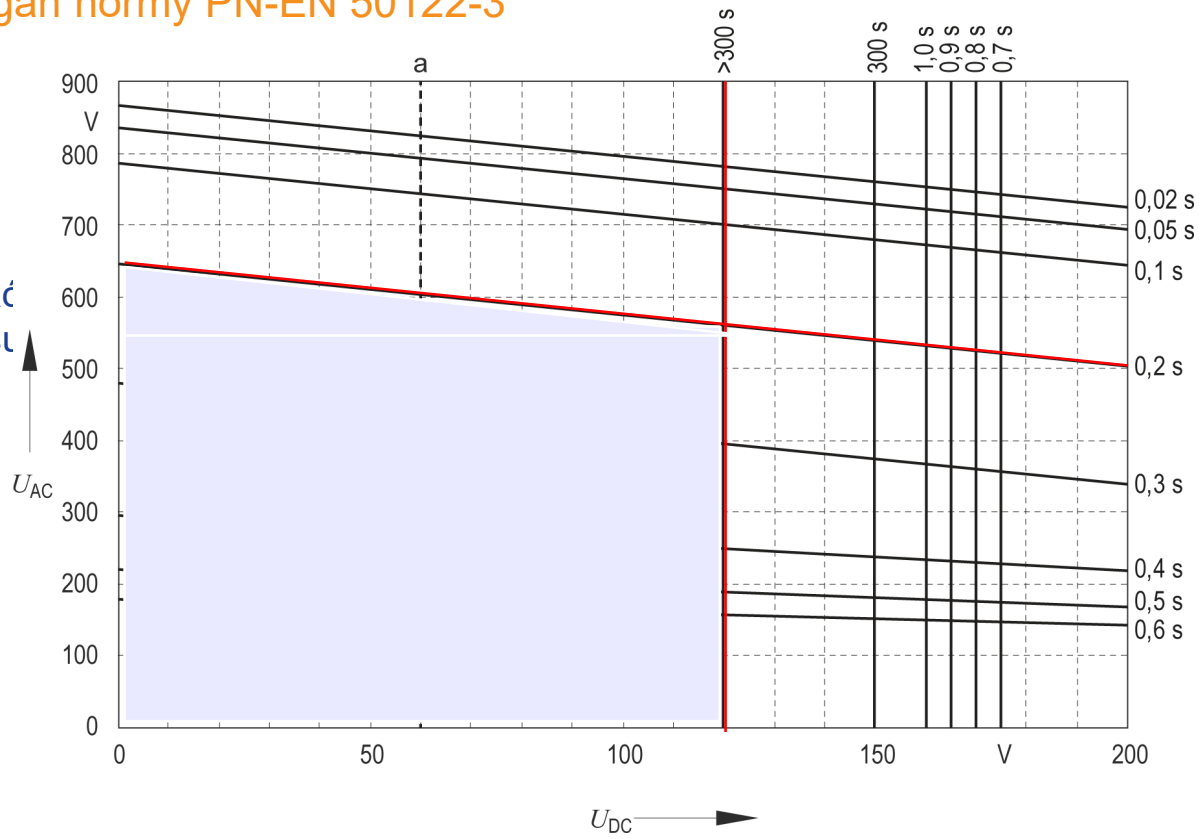


Np. jeżeli składowa stała napięcia łącznego dotykowego rażenia wynosi 60 V, składowa zmienna nie może przekraczać 8 V, lub np. jeżeli składowa zmienna napięcia dotykowego łącznego rażenia wynosi 25 V to składowa stała nie może przekraczać 35 V

Oddziaływanie wzajemne systemów trakcyjnych prądu stałego i przemiennego w odniesieniu do wybranych wymagań normy PN-EN 50122-3

Dla warunków krótkoterminowych systemu AC i warunków długoterminowych systemu DC
Obowiązuje następujące kryterium w celu sprawdzenia, czy występujące napięcie łączne jest dopuszczalne:

1. krótkotrwała składowa przemienna napięcia łącznego nie może przekraczać wartości dopuszczalnej zmiennego napięcia dotykowe AC dla danego czasu trwania według PN- EN 50122-1:2022, tabela 8;
2. składowa stała napięcia łącznego nie może przekraczać wartości dopuszczalnej stałego napięcia dotykowego DC dla danego czasu trwania według PN- EN 50122-1:2022, tabela 10
3. napięcie łączne jest dopuszczalne, jeżeli mieści się w zakresie określonym dla obowiązujących czasów trwania przedstawionym na rysunku

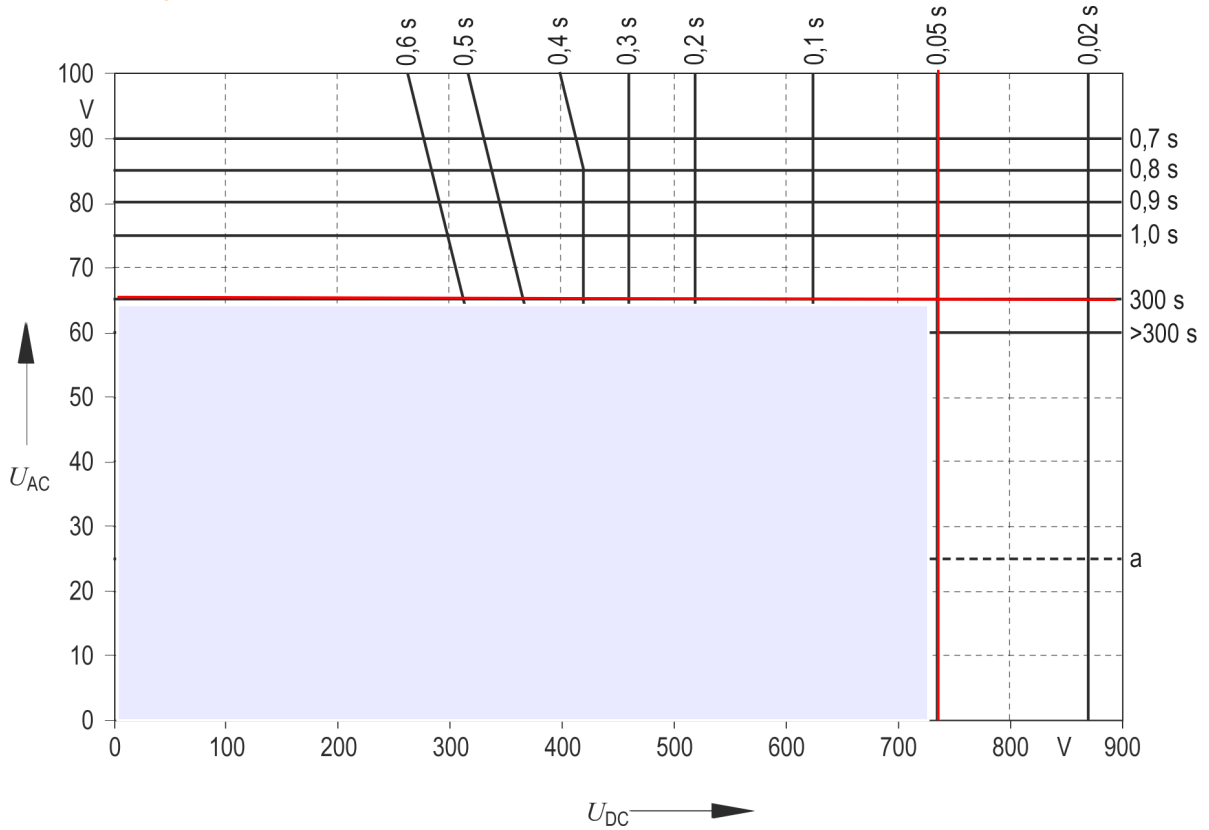


Np. dla czasu trwania napięcia dotykowego AC 0,2 s i czasu trwania napięcia DC > 300 s dopuszczalne jest łączne napięcie w zacienionym obszarze.

Oddziaływanie wzajemne systemów trakcyjnych prądu stałego i przemiennego w odniesieniu do wybranych wymagań normy PN-EN 50122-3

Dla warunków długoterminowych systemu AC i warunków krótkoterminowych systemu DC
Obowiązuje następujący sposób postępowania w celu sprawdzenia, czy występujące napięcie łączne jest dopuszczalne:

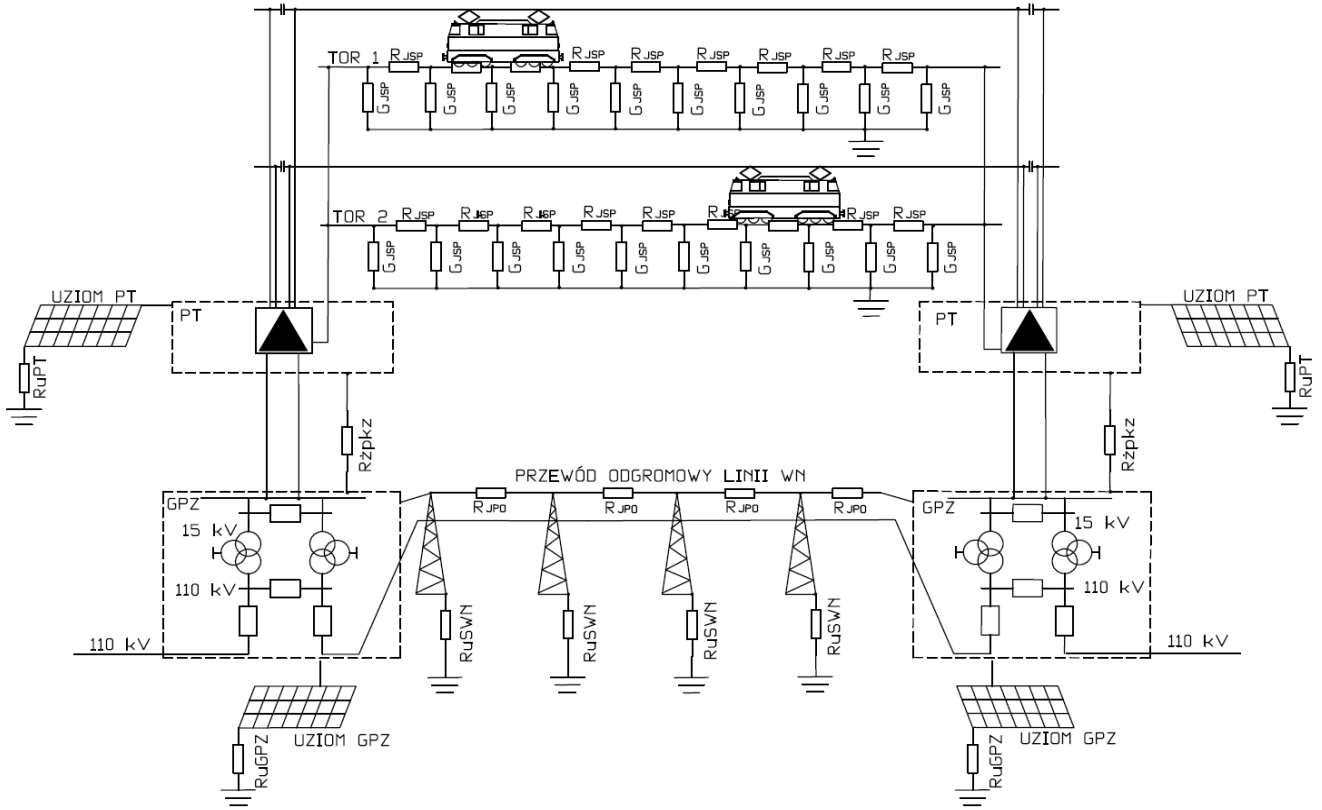
1. składowa przemienna napięcia łącznego nie może przekraczać wartości dopuszczalnej zmiennego napięcia dotykowe AC dla danego czasu trwania według PN- EN 50122-1:2022, tabela 8;
2. składowa stała krótkotrwałego napięcia łącznego nie może przekraczać wartości dopuszczalnej stałego napięcia dotykowego DC dla danego czasu trwania według PN- EN 50122-1:2022, tabela 10
3. napięcie łączne jest dopuszczalne, jeżeli mieści się w zakresie określonym dla obowiązujących czasów trwania przedstawionym na rysunku



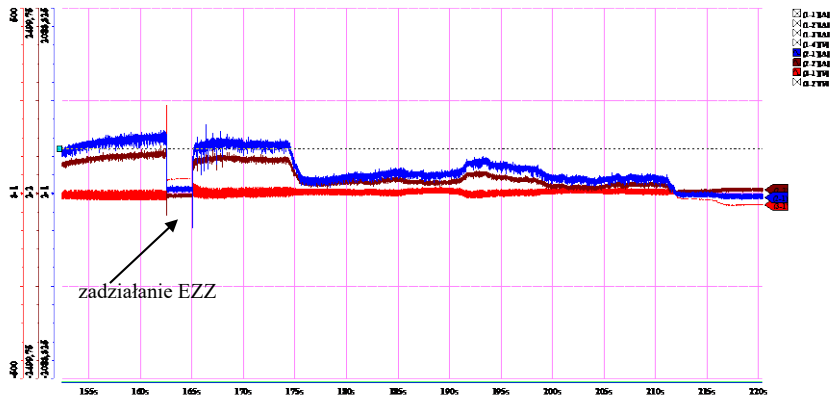
Np. dla czasu trwania napięcia dotykowego AC >300 s i czasu trwania napięcia DC > 0,05 s dopuszczalne jest łączne napięcie w zacienionym obszarze.

Oddziaływanie wzajemne systemów trakcyjnych prądu stałego i przemiennego – badanie terenowe

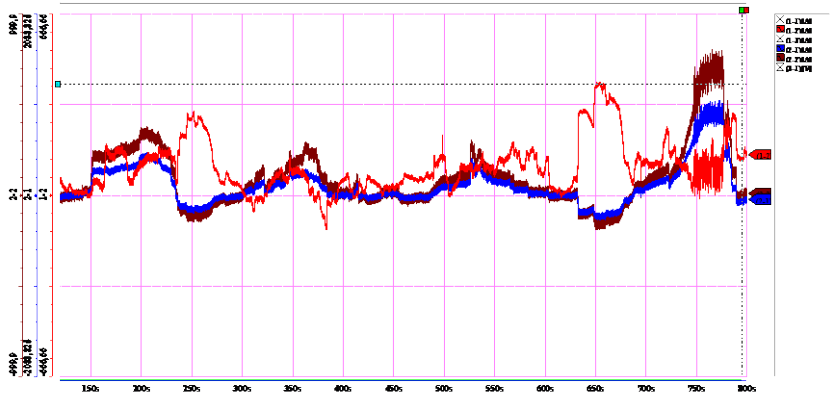
Przedmiotem opisanych badań były obwody ziemnopowrotne zlokalizowane w bliskiej odległości od siebie ok 50 m. Jeden z układów ziemnopowrotnych system zasilania trakcyjnego 3 kV DC. Drugi z układów to linia energetyczna 110 kV zasilająca stacje GPZ zlokalizowane przy podstacjach trakcyjnych



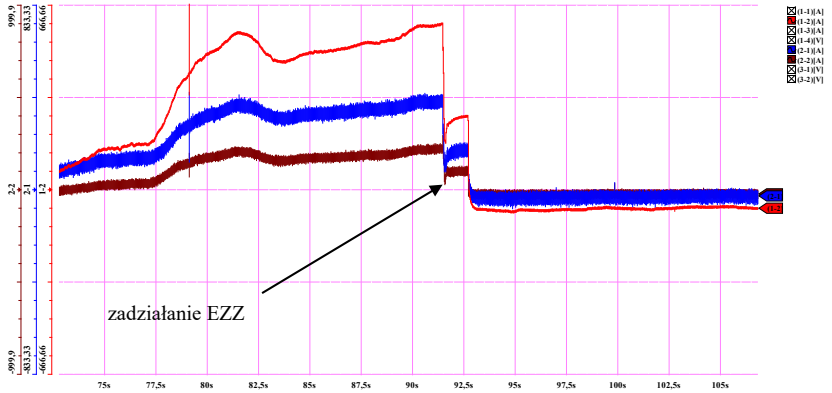
Oddziaływanie wzajemne systemów trakcyjnych prądu stałego i przemiennego – badanie terenowe



Rys. 2. Oscylogram z sesji pomiarowej przy pracy podstacji trakcyjnej z nieuziemioną SM. — CH2-1 prąd kabli powrotnych grupa 1, — CH2-2 prąd kabli powrotnych grupa 2, — CH3-1 napięcie na EZZ



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



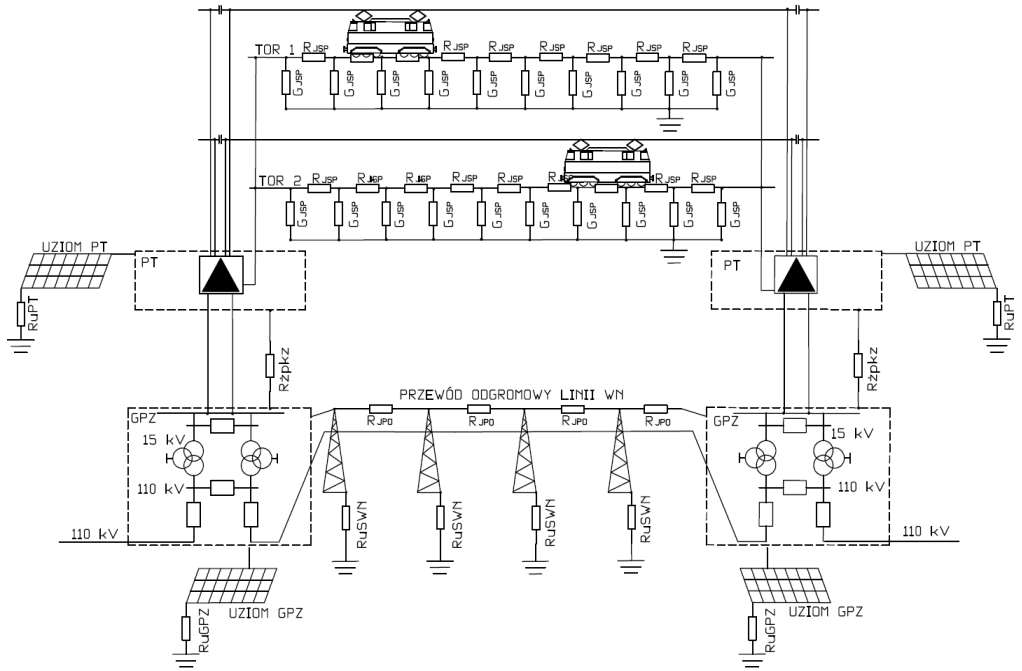
Rys. 4. Oscylogram z sesji pomiarowej przy pracy kabinowej podstacji trakcyjnej z uziemioną SM. — CH2-1 prąd kabli powrotnych grupa 1, — CH2-2 prąd kabli powrotnych grupa 2, — CH1-2 prąd trakcyjny wpływający do SM łącznikiem z GSU podstacji

Zbiorcze zestawienie wyników przeprowadzonych sesji pomiarowych

Opis układu	Nr kan. rej. opis mierzonej wielkości	Wartość max.
Wyniki pomiarów w trybie pracy podstacyjnej z nieuziemioną 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 nie uziemioną SM i GSU podstacji	231
Wyniki pomiarów w trybie pracy podstacyjnej z uziemioną 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 uziemioną 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

Oddziaływanie wzajemne systemów trakcyjnych prądu stałego i przemiennego – badanie terenowe

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



Oddziaływanie wzajemne systemów trakcyjnych prądu stałego i przemiennego – wnioski

Wnioski

1) Podczas planowania linii kolejowej zelektryfikowanych w systemie trakcyjnym AC w bliskiej przestrzeni linii kolejowej DC konieczne jest wyznaczenie tzw. strefy oddziaływania
2) Nie podaje się ogólnych wartości dla strefy wzajemnego oddziaływania. Należy dokonać analizy każdorazowo dla danego projektu w oparciu o lokalne uwarunkowania. Jednak gdy odległość między osiami torów systemu AC i DC jest mniejsza od 50 m, zakłada się strefę wzajemnego oddziaływania, w takim przypadku należy wykonać analizę oddziaływania systemy AC na system DC i odwrotnie, należy przeanalizować sprzężenia galwaniczne, pojemnościowe i indukcyjne. Odległości przekraczające 50 m należy analizować dla sprzężeń galwanicznych i indukcyjnych
3) Zagrożenia i możliwe niekorzystne skutki wynikające z wzajemnego oddziaływania to:
   - zagrożenie dla bezpieczeństwa osób poprzez występowanie napięć dotykowych ponad wartości dopuszczalne;
   - przeciążenie termiczne przewodów i ich ekranów;
   - przeciążenie termiczne transformatorów spowodowane nasyceniem magnetycznym rdzeni;
   - możliwy niekorzystny wpływ na bezpieczeństwo i prawidłowe funkcjonowanie systemów sygnalizacji;

4) Dla wyznaczonej według normy PN-EN 50122-3 strefy wzajemnego oddziaływania należy wykonać symulację wprowadzanego zakłócenia do systemu DC przez system AC i odwrotnie.
5) Wynikiem wykonanej symulacji są wartość napięć dla warunków krótkoterminowych i długoterminowych w zakłócanym systemie
6) Weryfikację należy wykonać zgodnie z PN-EN 50122-3 biorąc pod uwagę składową stałą i zmienną tzw. napięcia łącznego

Dziękuję za uwagę