

## **ZARYS METODYKI I PRZYKŁADY OBLICZEŃ ORAZ OCENY ODDZIAŁYWANIA INDUKCYJNEGO LINII NAPOWIETRZNYCH 400 kV NA GAZOCIĄGI PRZESYŁOWE**

**Adam RYNKOWSKI**

Politechnika Gdańsk, Wydział Elektrotechniki i Automatyki  
tel.: 604-196-887, e-mail: adamrynkowski.bmc@gmail.com

**Streszczenie:** Przedmiotem referatu jest przedstawienie zarysu postępowania dla oceny możliwości powstania zagrożenia korozyjnego i niebezpiecznego w podziemnych gazociągach przesyłowych na skutek krzyżowania i zbliżenia do nich trasy linii napowietrznych WN. Określenie generowanych napięć zakłóceń wymaga obliczenia ich wartości w zależności od konfiguracji i rodzaju sprzężeń mogących mieć miejsce w liniach elektroenergetycznych podczas normalnej pracy, jak również podczas zwarć, w warunkach obciążeń symetrycznych jak i niesymetrycznych.

Zgodnie z wymaganiami Operatora Gazociągów Przesyłowych dla oceny zagrożenia eksploatacyjnego gazociągów pod uwagę powinny być wzięte napięcia generowane na drodze sprzężeń indukcyjnych mogących stanowić o niebezpieczeństwie porażenia elektrycznego lub uszkodzenia elektrycznego izolacji i korozyjnego gazociągów.

W referacie przedstawiono obszary zagadnień związanych oraz zarys ogólny metodyki i przykłady obliczeń oraz wykresów indukowanych SEM oraz napięć i lokalnej gęstości prądu w gazociągach DN, w zbliżeniu i skrzyżowaniu z trasami LN 2x400 kV. Zaznaczono korzystne zastosowanie metody kompensacji napięć indukowanych za pomocą systemu uziemiającego, prowadzonego równoległe do trasy chronionego gazociągu. Celem referatu jest ogólne przedstawienie podejścia do obliczeń zagrożeń indukcyjnych oraz podanie przykładowo zakresu wartości parametrów zagrożeniowych, z jakimi możemy mieć do czynienia. Szczegółowe wskazanie metodyki obliczeń dla każdego segmentu obliczeniowego zagadnienia, praktycznie jest nie do zrealizowania w jednym referacie

**Słowa kluczowe:** linie elektroenergetyczne, linie gazowe przesyłowe, napięcia indukowane, zagrożenie elektryczne, zagrożenie korozyjne.

### **1. WPROWADZENIE**

Zagadnienia zagrożeń związanych z indukowaniem napięć w długich obiektach liniowych ułożonych w pobliżu linii elektroenergetycznych dotyczy najczęściej gazociągów (DN) lub linii telekomunikacyjnych (TK). Są to obiekty zawierające w swojej budowie części metalowe izolowane

od ziemi, gdzie pojawienie się nawet stosunkowo niedużego napięcia może spowodować zagrożenie porażeniem lub uszkodzeniem instalacji niskonapięciowych czy obiektów bez napięciowych (gazociągi). Zagadnienia oddziaływania linii elektroenergetycznych na gazociągi napowietrzne lub podziemne jest przedmiotem rozważań i obliczeń od wielu lat.

Zgodnie z wymaganiami Operatora Gazociągów Przesyłowych Gaz-System dla oceny zagrożenia eksploatacyjnego gazociągów pod uwagę powinny być wzięte napięcia generowane na drodze sprzężeń indukcyjnych mogących stanowić o niebezpieczeństwie porażenia elektrycznego lub uszkodzenia elektrycznego izolacji oraz korozyjnego gazociągów. Gęstość prądu korozyjnego w małych defektach nie powinna przekraczać  $20 \text{ A/m}^2$ . Dotyczy to nie tylko odcinka gazociągu w obszarze zbliżenia, ale również w trasie gazociągów do najbliższego monobloku czy stacji ochrony katodowej.

Przepisy dotyczące zagrożenia porażeniowego mają charakter bardziej ogólny i wynikają z norm dotyczących sieci i urządzeń elektroenergetycznych. W odniesieniu do niniejszego opracowania pod uwagę wzięto wymagania normy PN-EN 50522:2011 „Instalacje elektroenergetyczne prądu przemiennego o napięciu wyższym od 1 kV”, . W normie tej podane są m.in. charakterystyki dopuszczalnych napięć dotykowych rażeniowych w funkcji czasu doziemienia oraz zależności między napięciem dotykowym rażeniowym a prądem rażeniowym. Wg tych wymagań napięcie to nie powinno przekroczyć 65 V w przypadku długotrwałego oddziaływania linii na gazociąg, a dla krótkotrwałych przepięć, np. o czasie trwania zwarcia mniejszym równym 0,15 s., nie powinno być większe od 575 V ( dla czasów zwarcia  $t_z=0,6 \text{ s}$   $U_r < 170 \text{ V}$ ).

Określenie generowanych napięć zakłóceń wymaga obliczenia ich wartości w zależności od konfiguracji i rodzaju sprzężeń mogących mieć miejsce w liniach elektroenergetycznych podczas normalnej pracy, jak również podczas zwarć, w warunkach obciążeń symetrycznych jak i niesymetrycznych.

Pod uwagę powinny być wzięte napięcia generowane na drodze sprzężeń magnetycznych lub/i galwanicznych. O zagrożeniu może decydować wartość lokalna, ale przede wszystkim decyduje suma sił elektromotorycznych generowanych na całej długości zbliżeń czy skrzyżowań. Generowane napięcie na gazociągu, będące pochodną sumy

sił elektromotorycznych zależy od parametrów linii elektroenergetycznej oraz gazociągu m.in. wpływności izolacji gazociągu, jak również od warunków uziemienia linii oraz warunków odchodzenia linii zakłócanej od zbliżenia czy skrzyżowania. Ocena zagrożenia korozyjnego musi być poprzedzona koniecznością obliczenia parametrów falowych gazociągów o różnej izolacji i budowie. Impedancje falowe  $Z_C$  i stałe propagacji  $\gamma$  dla gazociągów zawierają się w dość szerokich granicach odpowiednio (11-0,7)  $\Omega$  i (0,4-0,02)/km.

## 2. PROCEDURA POSTĘPOWANIA

W procedurze obliczania napięć zakłóceń generowanych w gazociągach określa się długość zbliżenia i wyznacza odległości  $d_1$  i  $d_2$  dla każdego 6-3 metrowego odcinka zbliżenia, będącego częścią całego zbliżenia tras linii napowietrznej i gazociągów. Odległości te zostają przeliczone na równoległe odległości równoważne 'a'. Dla każdej odległości równoważnej oblicza się napięcie (SEM) jednostkowe  $e$  i napięcie sumaryczne  $sue$  (SEM) przedstawiane i analizowane w funkcji długości trasy linii elektroenergetycznej. Obliczenia prowadzone są w całym zakresie rezystywności ziemi przypisanych do zbliżeń. Wyniki przedstawiane są dla wartości nominalnej lub pomierzonej rezystywności, dla warunków najmniej korzystnych.

Do dalszych obliczeń bierze się pod uwagę większą sumaryczną wartość napięcia zakłóceń. Wartość tego napięcia przelicza się na wartość indukowanego napięcia z uwzględnieniem występujących współczynników redukcyjnych. Oblicza się również wpływ przewodów w ziemi ułożonych w pobliżu. Wyniki obliczeń i analiz przedstawia się na wykresach rozkładu indukowanych napięć wzdłuż długości poszczególnych zbliżeń. W wyniku kolejnych obliczeń określa się warunki, dla których oddziaływanie indukcyjne linii elektroenergetycznej nie stanowiłoby zagrożenia niebezpiecznego i korozyjnego dla gazociągów znajdujących się w tym obszarze np. poprzez zmianę trasy lub zastosowanie innych metod ograniczających wartość indukowanego napięcia. Obliczenia te obejmują nie tylko ocenę zmian wartości maksymalnych lokalnych  $e$  i sumarycznych SEM, ale zmiany napięć na gazociągach i gęstości prądu w małych defektach w funkcji długości zbliżenia i rezystywności gruntu otaczającego gazociąg.

Pod uwagę bierze się zmianę rezystywności ziemi na gazociągach przedzielonych monoblokami izolacyjnymi, które to dla przebiegów falowych stanowią otwarty koniec linii skutkujący wzrostem napięcia, jak również ewentualne zmiany w innych punktach węzłowych.

Następnie prowadzi się obliczenia optymalizacyjne dotyczące zmniejszenia napięć indukowanych do poziomu, który zapewniałby napięcia na tyle niskie aby wzrost potencjału czy napięcia na gazociągu nie przekraczał wartości grożących uszkodzeniem izolacji czy też porażeniem elektrycznym osób związanych z dozorem lub eksploatacją gazociągów. W prowadzonych pracach uwzględnia się możliwość ułożenia równoległych do gazociągów przewodów redukcyjnych.

Określenie wartości napięć na gazociągach jest podstawą do obliczeń gęstości prądu przemiennego dla małych defektów i ocena zagrożenia korozyjnego gazociągów. Ocena zagrożenia korozyjnego poprzedzona jest koniecznością obliczenia parametrów falowych

gazociągów o różnej izolacji i budowie. Kolejnym etapem jest obliczenie napięć na gazociągach poza obszarem zbliżenia, przed i za nim, do najbliższych stacji z monoblokami lub punktami ochrony katodowej.

Postępowanie takie jest realizowane w odniesieniu zarówno do krótkotrwałych prądów zwarciovych jak i długotrwałych prądów obciążeniowych w linii LN 110-400 kV w zależności warunków. Wyniki obliczeń przedstawia się w tabelach i na wykresach rozkładu SEM jednostkowych i sumarycznych wzdłuż długości poszczególnych zbliżeń. Zasada ta dotyczy również wyników i wykresów zmian napięć na gazociągach oraz lokalnych zmian gęstości prądu w małych defektach izolacji gazociągów.

## 3. NAPIĘCIA INDUKOWANE

W podstawowym ujęciu indukowana SEM (napięcie indukowane), w izolowanych, metalowych, równoległe położonych przewodach, jest wprost proporcjonalna do indukcyjności wzajemnej (L), długości równoległego zbliżenia (l) oraz wartości prądu (I) generującego określone pole magnetyczne. Współczynnik r redukcyjny uzależnia wartość indukowanego napięcia od rodzaju linii, jej budowy oraz struktury uziemiowej, w tym przewodów kompensujących, w obszarze rozpatrywanego zbliżenia

$$E \sim \omega L \cdot l \cdot I \cdot (r)$$

lub w ujęciu ogólnym dla przypadku linii napowietrznej niesymetrycznej z przewodem odgromowym:

$$E = (Z_{pr} \cdot I_{pr} + Z_{po} \cdot I_{po} + Z_m \cdot I_o) \cdot (r) \quad [V]$$

Równanie ogólne wskazuje, że generacja napięć zakłóceń może zachodzić w warunkach pracy ciągłej linii oraz w warunkach obciążenia niesymetrycznego, czy awaryjnego.

Przyczyną indukowania napięć w gazociągu może być przepływ prądu w przewodach fazowych, w przewodach odgromowych (żyłach powrotnych) oraz w ziemi ( $3I_o$ ). Impedancje wzajemne  $Z_{zs}$ ,  $Z_{zp}$ ,  $Z_m$  wynikające ze sprzężenia obwodu ziemnopowrotnego obiektu zakłócanego odpowiednio: z przewodami linii, z obwodami ziemnopowrotnymi przewodów odgromowych i z obwodami ziemnopowrotnymi linii ( $I_o$ ). Ta ostatnia część równania ma szczególne znaczenie podczas zwarć jednofazowych, ale zachodzi również podczas pracy długotrwałej w warunkach niesymetryczności linii np. w układzie pionowym faz.

Należy zwrócić uwagę, że działanie przewodów odgromowych w warunkach roboczych linii zwiększa wartość indukowanego SEM w gazociągu na skutek wzajemnego sprzężenia dwóch obwodów ziemnopowrotnych (OPGW-ziemia i DN-ziemia). Działanie to może być pomniejszone za pomocą przewodów redukcyjnych.

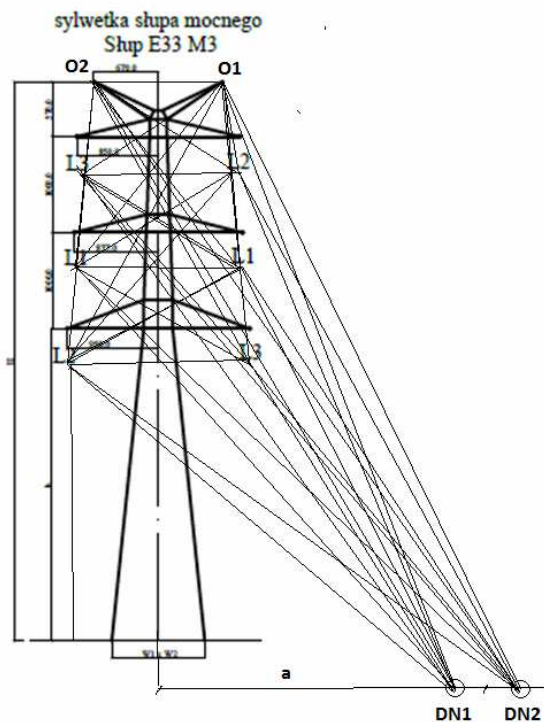
W analizie i obliczeniach prowadzących do określenia wartości napięć indukowanych generowanych przez sieci trójfazowe stosuje się przede wszystkim metody związane z obwodami o składowych symetrycznych oraz z pojęciem obwodu ziemnopowrotnego. Trójfazowe układy niesymetryczne sprowadza się do składowych symetrycznych i obliczenia prowadzi się jak dla układów jednofazowych. W obliczeniach, prowadzonych zasadniczo

na liczbach zespolonych, muszą być brane pod uwagę zagadnienia związane z rozplywem prądu zerowego przez ziemię oraz zagadnienia związane z ekranującym działaniem równoległe położonych metalowych obwodów (np. metalowych ekranów, przewodów odgromowych). Z uwagi na wartość generowanych przepięć, dotyczy to szczególnie zjawisk zachodzących podczas przepływu prądów zwarciovych. Wymagane jest więc przeprowadzenie obliczeń zwarciovych w obwodach sieciowych, w których generowane są prądy zwarciove i w których dochodzi do przedmiotowego krzyżowania czy zbliżenia. Istnieje konieczność wyznaczenia impedancji własnych i wzajemnych dla każdego elementu liniowego poszczególnych sieci oraz impedancji zgodnych i zerowych, w tym impedancji zerowej wynikającej ze sprzężenia obu linii elektroenergetycznych oraz jej zmniejszania z uwagi na obecność przewodów odgromowych. Brane pod uwagę są impedancje uziemienia stacji i miejsc występowania zwań oraz odprowadzania prądów zwarciovych do ziemi.

Ustalenie warunków geometrycznych dotyczących lokalnych zbliżeń, przeliczenie ich na równoważny układ równoległy oraz znajomość rozplywu prądów zwarciovych, prądów zwarcia i prądów uziomowych jest niezbędnym elementem w postępowaniu obliczeniowym dotyczącym zagrożenia zakłóceniewego i niebezpiecznego dla gazociągów.

#### 4. SCHEMATYCZNE PRZYKŁADY WYBRANYCH PARAMETRÓW I WYNIKÓW OBLICZEŃ WIĄZANYCH Z ANALIZĄ I OCENĄ ODDZIAŁYWANIA LN NA GAZOCIĄGI

##### 4.1 Linia napowietrzna



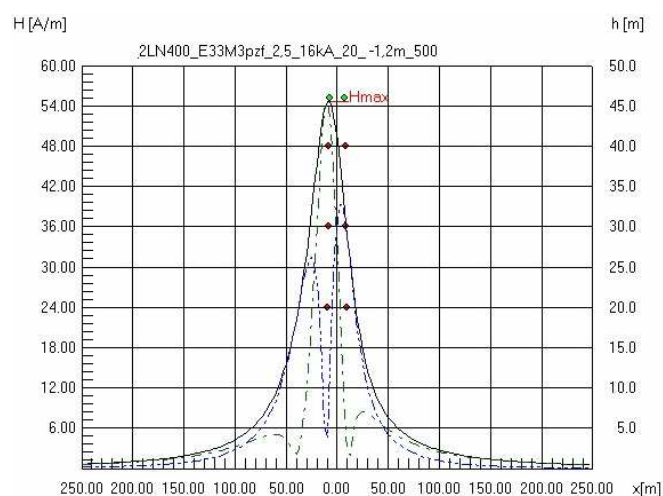
Rys.1 Przykładowy szkic słupeka typu E33 M3. Cienką linią zaznaczono wymiary konieczne do wyznaczenia impedancji własnych, wzajemnych, zgodnych i zerowych dla linii napowietrznej i obiektu zakłócanego (gazociągów)

##### 4.2 Prądy zwarciove

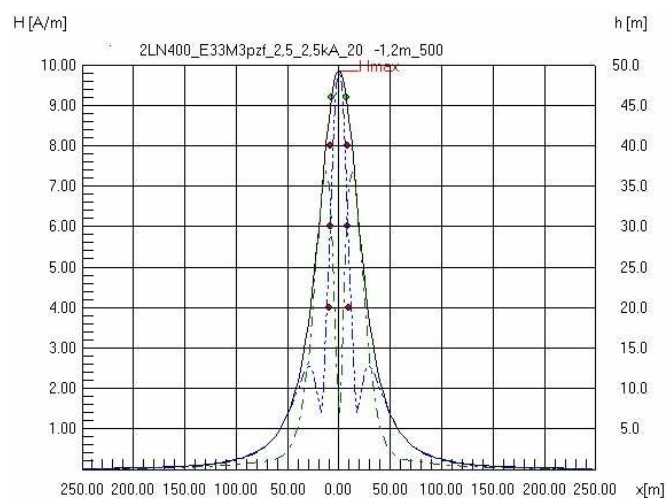
Tabela 1. Przykładowe wyniki obliczenia prądów zwarciovych na początku i na końcu odcinków zbliżenia, w zależności miejsca zwarcia w LN

1	2	3	4	5	6	7	8
lp	Obszar pasa	nr słupa p	nr słupa k	Izp	Izk	Izp	Izk
		-	-	kA	kA	kA	kA
1	ZA	6	9	37,4	37,6	5,5	5,8
2	ZB	24	26	31,3	31,1	11,2	11,4
3	ZC	20	22	28,7	28,2	13,6	14,2
4	ZD	19	21	5,6	5,4	37,7	37,9

##### 4.3 Rozkład pola magnetycznego

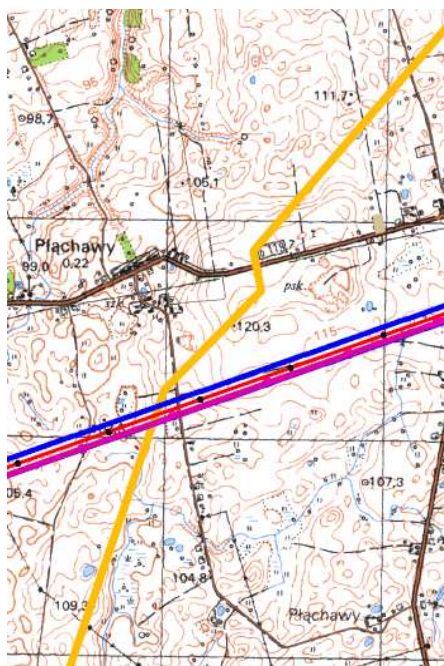


Rys. 2 Rozkład pola magnetycznego w 500 m pasie 2-torowej linii napowietrznej w warunkach zwarciovych, na głębokości ułożenia gazociągów 1,2 m. Przeciwsozna kolejność faz, h=18,8 m.



Rys. 3 Rozkład pola magnetycznego w otoczeniu 2-torowej linii napowietrznej na głębokości ułożenia gazociągów 1,2 m. Przeciwsozna kolejność faz (h=18,8 m, I<sub>dd</sub>=2500 A).

#### 4.4 Plan sytuacyjny zbliżenia LN400 i DN

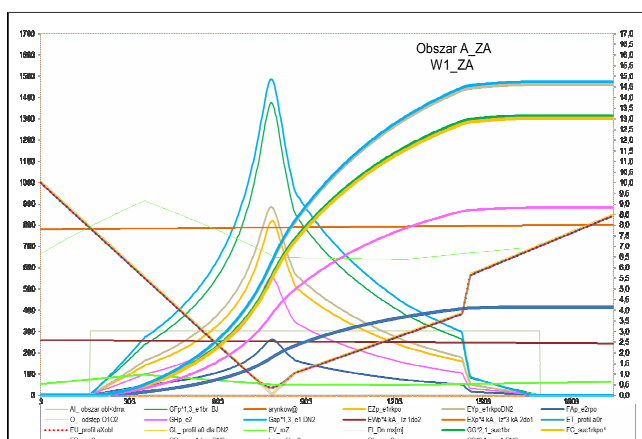


Rys.4 Plan sytuacyjny trasy i skrzyżowania 2-torowej linii napowietrznej 400 kV z trasą gazociągów DN500 i DN400 w obszarze A.

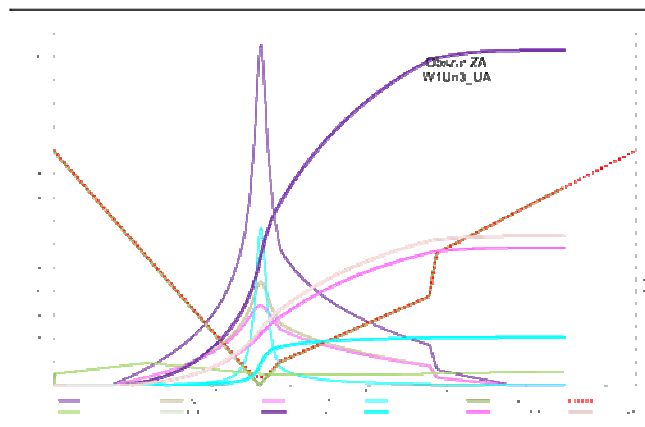
#### 4.5 Przykładowe wyniki obliczeń

lp	d0	st	roZ	s	h	SEM	e	SEM/e	SEM	e GR	SEM GR	e GR	SEM	SEM/rk	
1	2	3	4	5	6	JA	JA	GR	GR	GR	rko	rk1*2*3	rk1*2*3	GR/m	
1	1000	st	115	10	40	1217	5,7	3843	17,8	1806	8,4	288,9	1,7	0,8	0,130
2	1000	st	115	0	35	1272	6,3	4016	19,9	1888	9,4	91,0	0,6	0,8	0,041
3	500	st	115	10	40	1018	5,7	3208	17,8	1508	8,4	12,6	0,3	0,7	0,006
4	250	st	115	10	40	677	5,7	2129	17,8	1001	8,4	12,6	0,3	0,5	0,006
5	500	st	35	10	40	627	4,5	1974	14,3	928	6,7	9,8	0,3	0,4	0,004
6	1000	st	35	10	40	628	4,5	1978	14,3	930	6,7	9,9	0,3	0,4	0,004
7	1000	zm	59	10	40	828	4,9	2604	15,3	1224	7,2	73,6	1,4	0,6	0,033
8	1000	zm	59	8	40	837	4,9	2631	15,5	1237	7,3	73,6	1,4	0,6	0,033
9	1000	zm	59	8	35	844	5,2	2655	16,2	1248	7,6	74,4	1,4	0,6	0,033
10	1000	zm	59	0	35	880	5,5	2769	17,4	1301	8,2	77,5	1,4	0,6	0,035
11	1000	st	115	0	35	1272	6,3	4016	19,9	1888	9,4	295,2	1,7	0,8	0,133
12	1000	st	35	0	35	676	5,2	2130	16,4	1001	7,7	12,2	0,3	0,5	0,005
13	500	st	35	0	35	675	5,2	2125	16,4	999	7,7	12,1	0,3	0,4	0,005
14	1000	st	35	8	35	643	4,8	2026	15,1	952	7,1	10,7	0,3	0,4	0,005

#### 4.6 Napięcia indukowane SEM

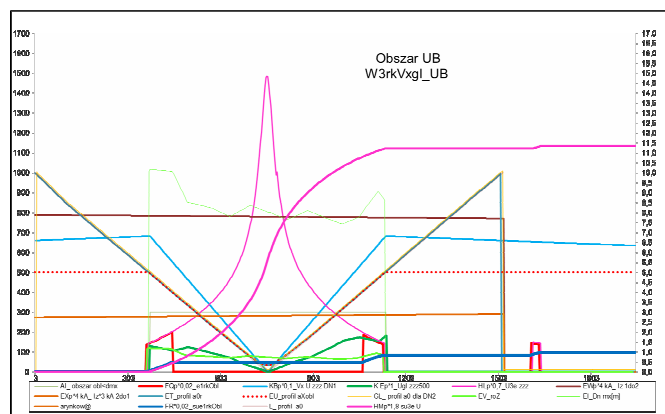


Rys.5 Przykładowe wykresy podstawowych danych i wyników branych pod uwagę podczas obliczeń i analizy wartości napięć indukowanych w gazociągach DN1 i DN2 w warunkach zwarciovych. Pas 2x1000 m. SEM jednostkowa e i sumaryczna sue na różnych stopniach redukcji,



Rys. 6 Wykresy podstawowych danych i wyników obliczeń napięć indukowanych e i sue SEM w gazociągach podczas normalnej eksploatacji linii napowietrznej. Widoczne sumaryczne i jednostkowe efekty oddziaływania If, Iodg i Io.

#### 4.7 Napięcia zredukowane oraz napięcia i gęstość prądu na gazociągach



Rys.7 Wykresy podstawowych danych oraz wyników obliczeń napięć indukowanych w gazociągach (e,sue) w warunkach pracy długotrwałej LN, z uwzględnieniem wpływu systemu uziemień redukcyjnych eIrkObl. Widoczne przebiegi napięcia na gazociągu Vx oraz gęstości prądu gI w małych defektach . Szerokość pasa oddziaływania 2x500 m

### 5. PODSUMOWANIE

Wykonane dotychczas obliczenia i analizy pozwalają na stwierdzenie , że linie napowietrzne 400 kV pracując w zbliżeniu do gazociągów wysokiego ciśnienia w obszarach zbliżeń i krzyżowań tras indukują napięcia , które mogą stanowić zagrożenia niebezpieczne i korozyjne dla infrastruktury przesyłowej gazu.

Napięcia sumaryczne SEM indukowane w gazociągach DN podczas krótkotrwałego przepływu prądu zwarciovego w zakresie 5,4-37,9 kA osiągają przykładowe wartości rzędu 2,7 kV, 8,5 kV, 2,2 kV 2,5 kV, 1,3 kV i 0,1 kV odpowiednio do długości i wzajemnego ułożenia dla analizowanych obszarów, po uwzględnieniu jednoczesnego działania redukcyjnego przewodów odgromowych. Dodatkowe zastosowanie systemu uziemień redukcyjnych pozwoliło na obniżenie podanych napięć do wartości ok. 10 V -135 V dla kolejnych obszarów zbliżenia.

Ocena oddziaływania LN 400 kV obejmuje również istotne zagadnienie generacji napięć w gazociągach podczas pracy długotrwałej linii z uwagi na

zagrożenie korozyjne i porażeniowe. Zagrożenie korozyjne jest ograniczone dopuszczalną gęstością prądu w małych defektach do  $20 \text{ A/m}^2$ . Dopuszczalna wartość napięcia rażeniowego jest określona na 65 V.

Indukowane napięcia w analizowanych gazociągach, w warunkach znamionowego obciążenia LN 400 kV np. prądem 2500 A, osiągają wartości sumaryczne SEM dość różne, zależne od konfiguracji i długości zbliżenia. Maksymalne napięcia jednostkowe i sumaryczne w przykładowych obszarach zbliżenia osiągają wartości rzędu, odpowiednio 0,25 V i 20 V, w innych 0,27 i 88 V, a nawet mniej np. 0,04 V i 11 V. Napięcia sumaryczne SEM indukowane podczas pracy długotrwałej obejmują oddziaływanie indukcyjne na gazociągi będące skutkiem przepływu prądów fazowych, prądów zerowych i prądów generowanych w obwodach ziemno-powrotnych przewodów odgromowych i przekraczają wartości dopuszczalne głównie z powodu oddziaływania korozyjnego.

Napięcia indukowane (SEM) podczas pracy długotrwałej linii np. LN 2x400 kV można zredukować do takich wartości, dla których potencjały i gęstości prądów w małych defektach, na zakończeniach odcinków zbliżeń, zostaną ograniczone do wartości bezpiecznych. Przykładowo wymienione wyżej napięcia mogą być zredukowane do 0,33-0,95 V lub nawet mniej, pod warunkiem zastosowania specjalnie dobranych i obliczonych systemów uziemiających – ułożonych równolegle do trasy gazociągów przesyłowych. Konieczność ograniczenia napięć do mniejszych wartości wynika również z wartości rezystywności gruntu otaczającego gazociągi. Wartości napięć na gazociągach

oraz gęstości prądu generowanych podczas pracy długotrwałej LN można ograniczyć najczęściej do wartości mniejszych od 2-3 V, a prądy od 2-9,5  $\text{A/m}^2$ . Otrzymane wartości zależą od wielu warunków i wielkości (rozdz. 2 i 3), a ich obliczanie wymaga dużej uwagi ponieważ, niektóre z nich wpływają przeciwobnie na wartość indukowanego napięcia i gęstość prądu korozyjnego np. rezystywność ziemi.

Przedstawiony zarys zagadnień związanych z oddziaływaniem indukcyjnym linii napowietrznych na gazociągi obejmuje ogólny sposób podejście dotyczącego oddziaływania linii elektroenergetycznych w n na środowisko i na infrastrukturę gazowniczą, kolejową, telekomunikacyjną, elektryczną oraz ciepłowniczą.

## 6. BIBLIOGRAFIA

1. Rozp.\_MG\_ poz.640 z dnia 26.04.2013 r. w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać sieci gazowe.
2. Technical Brochure 095, CIGRE 1995
3. PN-EN 50522:2011 „Uziemienie instalacji elektroenergetycznych prądu przemiennego o napięciu wyższym od 1 kV”.
4. M.Fiedorowicz „...” Korozja prądu przemiennopięciowego a ochrona katodowa podziemnych rurociągów, PKwOK SEP 2006.
5. A.Rynkowski . Opracowanie nr 116, Dokumentacja projektowa 2016.

## OUTLINE OF METHODOLOGY AND EXAMPLES OF CALCULATION AND ASSESSMENT OF INDUCTIVE IMPACT OF 400 kV OVERHEAD LINES ON TRANSMISSION PIPELINES

The subject of the paper is presentation of the outline of the procedure for assessing the possibility of corrosive and dangerous hazards in underground transmission pipelines as a result of crossing and approaching them the route of overhead lines. Determination of the generated disturbance voltages requires the calculation of their values depending on the configuration and type of couplings that may occur in the power lines during normal operation as well as during short circuits under both symmetrical and asymmetric loads.

**Keywords:** power lines, gas transmission lines, induced voltages, electrical hazards, corrosion hazards.

