

## Analiza przebiegów pojawiających się na ekranie ogólnym przewodów oponowych średniego napięcia

*W artykule podjęto próbę wyjaśnienia przyczyn pojawiania się przebiegów pomiędzy ekranem ogólnym a ekranami indywidualnymi żył pomocniczych przewodów oponowych średniego napięcia. W celu uproszczenia obliczeń linię przesyłową zamodelowano posługując się dwoma wariantami czwórników: typu T oraz typu II (także z wykorzystaniem połączeń kaskadowych tych czwórników). Wyniki badań symulacyjnych wskazują, że w czasie, gdy wartość chwilowa prądu roboczego łącznika próżniowego zbliża się do wartości bliskich zeru, pomiędzy ekranami mogą pojawiać się napięcia o wartości kilkuset V i częstotliwości kilkudziesięciu kHz.*

### 1. WPROWADZENIE

Podczas pracy układu kontroli ekranu ogólnego przewodów oponowych pracujących w sieciach 3,3 kV stwierdzono problem wynikający z pojawiania się przebiegów na ekranie ogólnym powodujących uszkodzenia elementów elektronicznych. Przeprowadzone badania laboratoryjne [1] potwierdziły pojawianie się na ekranie ogólnym przebiegów o amplitudzie rzędu kilkuset V i o częstotliwości kilkudziesięciu kHz trwających około 0,6 ms. Wyjaśnienie przyczyn powstawania tych przebiegów powinno pozwolić na wyeliminowanie niekorzystnego ich wpływu na układ pomiarowy.

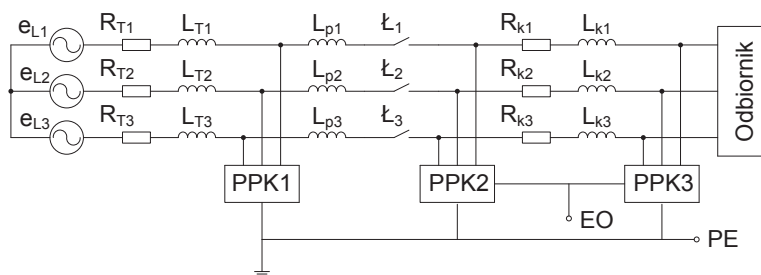
W górnictwie powszechnie stosowane są łączniki próżniowe, które charakteryzują się korzystnymi właściwościami eksploatacyjnymi. Niestety łączniki te posiadają również wady: pojawianie się ucięć prądu (ucinanie prądu i wielokrotne zapłony łuku), odskoki styków łączników, przebicia przerwy między zbliżającymi się stykami, eskalacja napięcia powrotnego, późne zapłony (NSDD – wyładowania niepodtrzymywane) oraz przebiegi pojawiające się podczas wymuszonego ucięcia prądu [2]. Przyjęto więc hipotezę, że podstawową przyczyną pojawiania się odnotowanych przebiegów pomiędzy ekranem ogólnym a ekranami indywidualnymi żył pomocniczych może być wielokrotne przełączanie łączników próżniowych.

W celu przeprowadzenia analizy zaistniałego problemu metodami symulacyjnymi, konieczne stało się

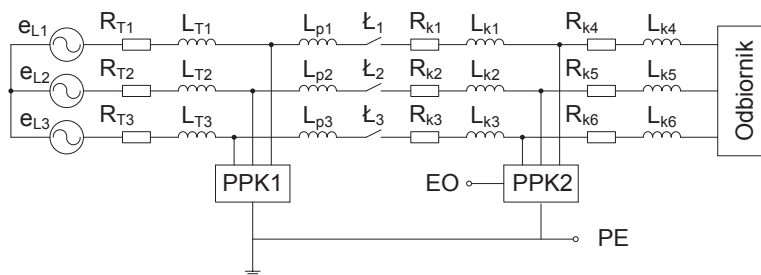
zastąpienie rzeczywistego przewodu oponowego średniego napięcia o parametrach rozłożonych RLC, modelem o parametrach skupionych. Podłużne parametry przewodu oponowego zamodelowano szeregowym połączeniem rezystancji i indukcyjności o zastępczych, skupionych parametrach  $R_k$ ,  $L_k$  (model podłużny przewodu oponowego). Bardziej skomplikowane jest określenie modelu dla przekroju poprzecznego przewodu oponowego (model poprzeczny przewodu oponowego) i wyznaczenie jego parametrów. Na schematach z rysunków 1 i 2, zamodelowano go blokami PPK. Przyjęto, że połączenie podłużnego oraz poprzecznego modelu przewodu oponowego będzie zrealizowane w dwóch wariantach: czwórnika typu II oraz czwórnika typu T. Pierwsze z tych rozwiązań (w postaci czwórnika typu II) zostało pokazane na rysunku 1.

gdzie:

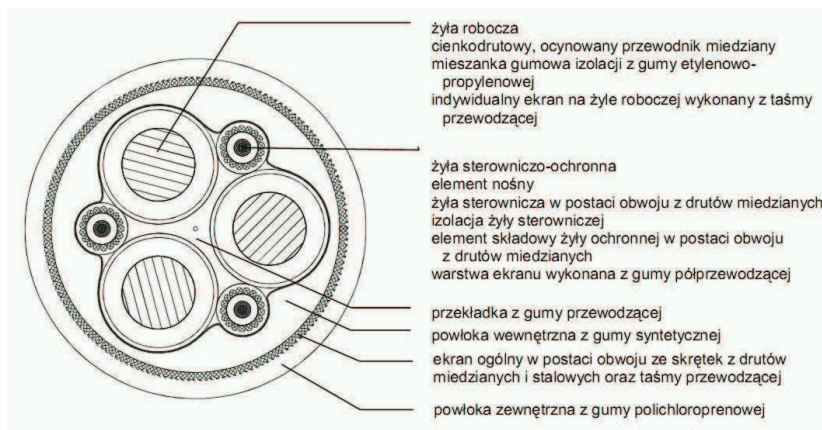
- $e_L$  – źródła napięć zasilających,
- $R_T, L_T$  – zastępcza rezystancja i indukcyjność transformatora,
- $L_p$  – indukcyjności pasożytnicze w obwodzie łącznika,
- $L$  – styki łącznika próżniowego,
- $R_k, L_k$  – zastępcza rezystancja i indukcyjność podłużna przewodu oponowego,
- PPK – parametry poprzeczne przewodu oponowego,
- EO – ekran ogólny,
- PE – żyła ochronna.



Rys. 1. Uproszczony schemat zastępczy sieci średniego napięcia z linią kablową w postaci czwórnik typu II



Rys. 2. Uproszczony schemat zastępczy sieci średniego napięcia z linią kablową w postaci czwórnik typu T

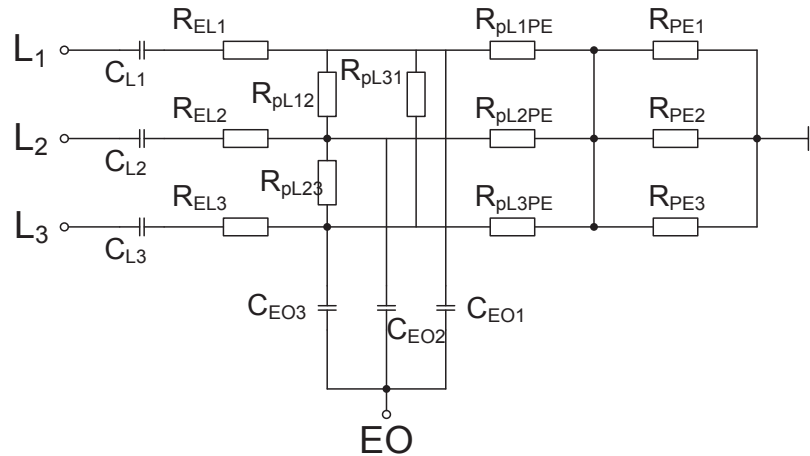


Rys. 3. Przekrój przewodu oponowego średniego napięcia PRYSMIAN PROTOMONT NTSKCGECW0EU

Na rysunku 2 przedstawiono schemat zastępczy sieci zasilającej odbiornik, w którym przewód oponowy zastąpiono czwórnikiem typu T. Należy zwrócić uwagę, że w przypadku gdy wartości parametrów  $R, L$  odbiornika (np. silnika) są znacznie większe od parametrów elementów prawej części czwórnik  $R_k, L_k$  to elementy tej części czwórnik można pominąć (ze względu na to, że są one połączone szeregowo z tym odbiornikiem). W takiej sytuacji przewód oponowy zamodelowany czwórnikiem typu T można zastąpić modelem opartym na czwórniku typu  $\Gamma$ .

Model poprzeczny przewodu oponowego jest ściśle powiązany z przekrojem poprzecznym przewodu oponowego. W ogólnym przypadku, w zależności od rozwiązania można spotkać przewody oponowe: z jednym lub dwoma układami żył roboczych (3–6 żył roboczych), z różną liczbą żył pomocniczych

(1–7), o różnej geometrii przestrzennego rozmieszczenia żył roboczych i pomocniczych, z żyłą ochronną lub bez, z ekranem ogólnym lub bez, z ekranami indywidualnymi żył roboczych i pomocniczych wykonanych z różnych materiałów (miedź lub guma przewodząca) itd. Mnogość dostępnych na rynku rozwiązań sprawia, że przyjęcie jednego, uniwersalnego modelu poprzecznego przewodu oponowego byłoby dosyć kłopotliwe. Należy więc liczyć się z tym, że dla każdego typoszeregu przewodów oponowych należałoby przyjąć konkretny model poprzeczny przewodu oponowego. Prowadzone i opisywane w artykule symulacje są związane z konkretnymi badaniami wykonanymi w warunkach laboratoryjnych. Do badań symulacyjnych należało więc wyznaczyć model poprzeczny przewodu oponowego używanego w czasie badań. Przekrój poprzeczny przewodu oponowego pokazuje rysunek 3.

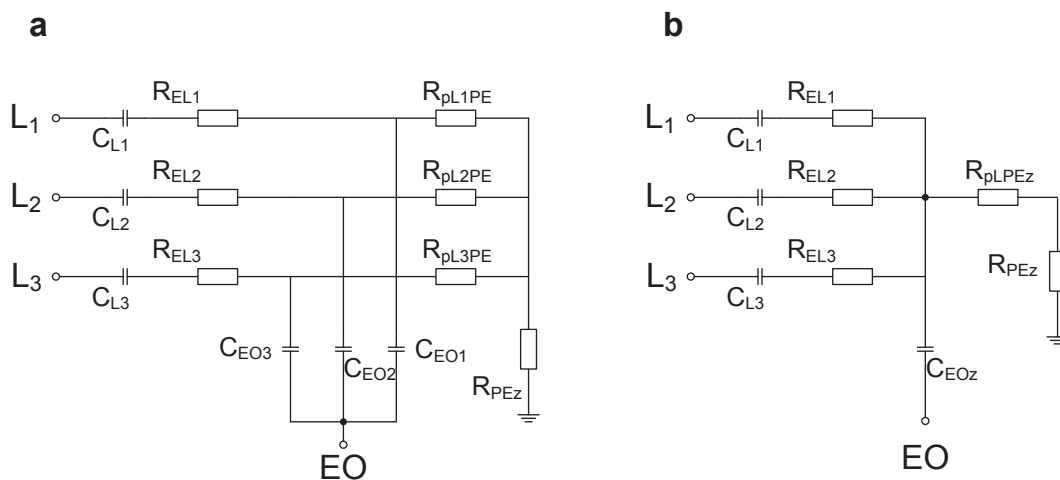


Rys. 4. Schemat zastępczy gałęzi poprzecznej czwórnika zastępującego parametry rozłożone przewodu oponowego

Po przeprowadzeniu analizy budowy przewodu oponowego zaproponowano model poprzeczny przewodu oponowego (PPK) pokazany na rysunku 4.

Na rysunku 5a przedstawiono uproszczony schemat

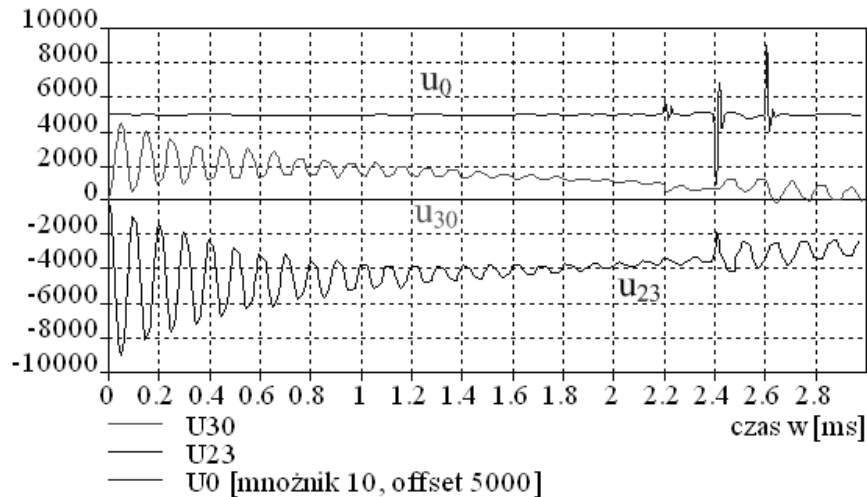
zastępczy modelu poprzecznego przewodu oponowego dla przypadku  $R_{pL} \gg R_{pLPE}$ , zaś na rysunku 5b przedstawiono uproszczony schemat zastępczy modelu poprzecznego przewodu oponowego dla przypadku  $R_{pL} \ll R_{pLPE}$ .



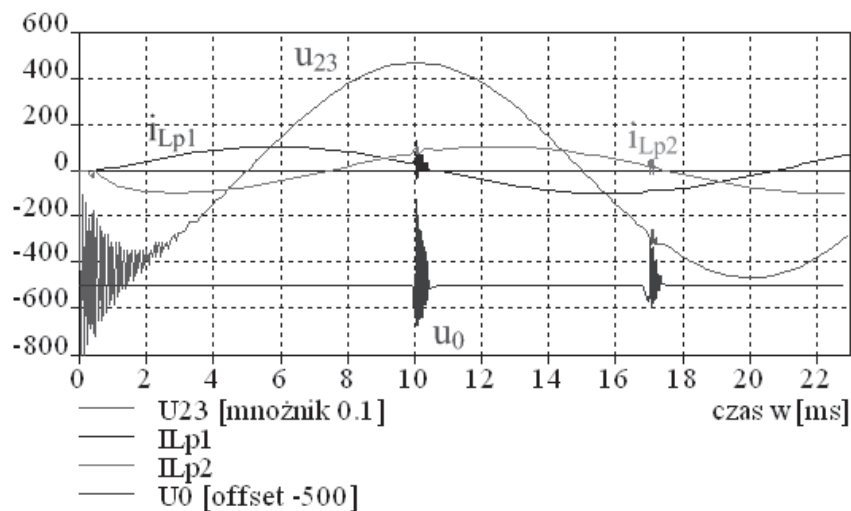
Rys. 5. Schemat zastępczy gałęzi poprzecznej czwórnika zastępującego parametry rozłożone przewodu oponowego dla: a)  $R_{pL} \gg R_{pLPE}$ , b)  $R_{pL} \ll R_{pLPE}$

gdzie:

- |             |   |           |  |
|-------------|---|-----------|--|
| $C_L$       | – pojemność żyły roboczej względem ekranu indywidualnego na izolacji żyły roboczej,   | $R_{pL}$  | – zastępcza rezystancja występująca pomiędzy powierzchniami zewnętrznymi ekranów indywidualnych na izolacjach żył roboczych, |
| $R_{EL}$    | – zastępcza rezystancja ekranu indywidualnego na izolacji żyły roboczej,  | $R_{PE}$  | – zastępcza rezystancja elementu składowego żyły ochronnej,  |
| $R_{pLPE}$  | – rezystancja zastępcza pomiędzy zewnętrzną powierzchnią ekranu indywidualnego na żyły roboczej a elementem składowym żyły ochronnej, | $R_{PEz}$ | – zastępcza rezystancja równoległego połączenia rezystancji $R_{PE}$ ,   |
| $R_{pLPEz}$ | – zastępcza rezystancja równoległego połączenia rezystancji $R_{pLPE}$ ,  | $C_{EO}$  | – zastępcza pojemność pomiędzy ekranem ogólnym a powierzchnią zewnętrzną ekranów indywidualnych na izolacjach żył roboczych. |
|             |   | $C_{EOz}$ | – zastępcza pojemność równoległego połączenia pojemności $C_{EO}$ .  |



Rys. 6. Przebiegi czasowe napięć po załączeniu zasilania sieci kablowej



Rys. 7. Przebiegi czasowe napięć ( $u_{23}$  oraz  $u_0$ ) i prądów łączników ( $I_{L1}$ ,  $I_{L2}$ ) dla czwórnika typu T,  $di/dt < 0$  oraz prądu łączników  $> 0$  w momencie wielokrotnego przełączania łącznika

## 2. BADANIA SYMULACYJNE

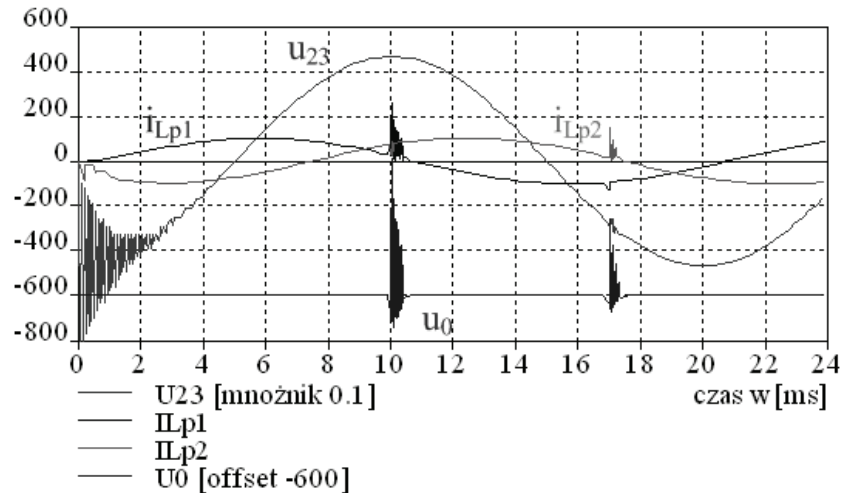
Przeprowadzenie badań symulacyjnych miało na celu zgrubne określenie genyzy przepięć pomiędzy ekranem ogólnym i ekranami indywidualnymi żył pomocniczych oraz określenie warunków kiedy występują zwiększone wartości tych przepięć. W oparciu o schematy zastępcze (omówione we wstępie) utworzono modele symulacyjne, które następnie poddano badaniom symulacyjnym. Do badań symulacyjnych przyjęto następujące wartości parametrów:  $L_k = 116 \mu\text{H}$ ,  $C_L = 0,198 \mu\text{F}$ ,  $R_{EL} = 2 \Omega$ ,  $R_{pLPEz} + R_{PEz} = 4 \Omega$ ,  $f = 30 \text{ kHz}$  (częstotliwość przełączania łączników), czas trwania zakłóceń  $t = 0,4 \text{ ms}$ .

Na rysunku 6 pokazano stan przejściowy, pojawiający się po podaniu napięcia do krótkiej linii kablowej. Załączenie odbiornika nastąpiło po czasie

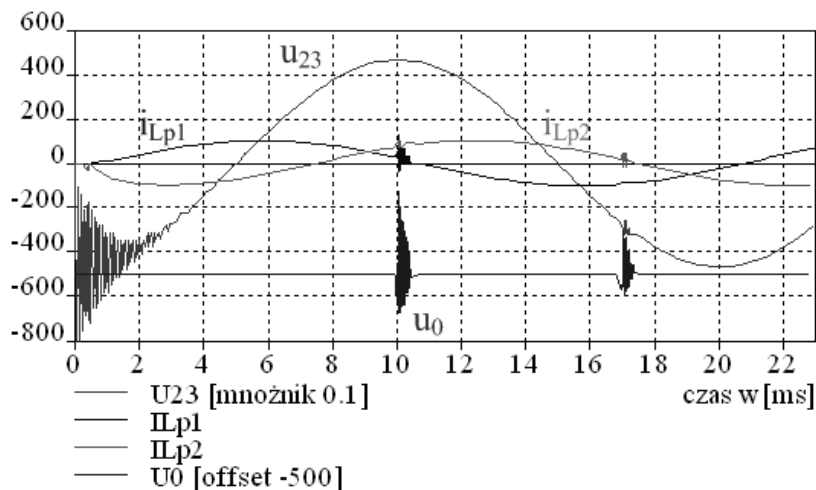
2,2 ms. Przyjęto, że podanie napięcia do odbiornika (załączenie łącznikami  $L$ ) odbywało się niesymetrycznie. Opóźnienie załączenia kolejnych faz wynosiło 0,2 ms.

Z przebiegów wynika, że po podaniu napięcia do krótkiej linii kablowej w napięciach fazowych i międzyprzewodowych pojawiają się przepięcia. Amplituda tych przepięć osiąga wartość  $1,9 U_{nmax}$ , zaś ich częstotliwość (przy dobranych parametrach  $R$ ,  $L$ ,  $C$ ) wynosi około 10 kHz. W momencie załączania łączników pojawia się napięcie pomiędzy ekranem indywidualnym a ekranem ogólnym o maksymalnej amplitudzie 340 V.

Na rysunku 7 przedstawiono wyniki symulacji, w której wystąpiło zjawisko wielokrotnego przełączania łącznika w jednej fazie (najpierw w fazie pierwszej a później w fazie drugiej). Sieć została zamodelowana jako czwórnik typu T. Częstotliwość przełączania łączników



Rys. 8. Przebiegi czasowe napięć ( $u_{23}$  oraz  $u_0$ ) i prądów łączników ( $L_1$ ,  $L_2$ ) dla czwórnika typu II,  $di/dt < 0$  oraz prądu łączników  $> 0$  w momencie wielokrotnego przełączania łącznika



Rys. 9. Przebiegi czasowe napięć ( $u_{23}$  oraz  $u_0$ ) i prądów łączników ( $L_1$ ,  $L_2$ ) dla czwórnika typu T,  $di/dt < 0$  oraz prądu łączników  $> 0$  w momencie wielokrotnego przełączania łącznika, w sytuacji gdy  $R_{pL} \gg R_{pLPE}$

wynosiła 30 kHz. Przełączanie prądu odbywało się przy ujemnej pochodnej odbiornika oraz przy dodatniej wartości prądu łączników wynoszącej odpowiednio około 26 A ( $i_{Lp1}$ ) oraz 15 A ( $i_{Lp2}$ ). Z otrzymanych przebiegów wynika, że pomiędzy ekranem ogólnym a ekranem indywidualnym żył pomocniczych pojawiają się przebiegi o amplitudzie około 400 V i częstotliwości 30 kHz (wynikającej z przełączania łącznika).

Na rysunku 8 przedstawiono wyniki symulacji, w której przewód został zamodelowany jako czwórnik typu II. Pozostałe dane nie uległy zmianie. Uzyskane wartości przebiegów są nieco większe niż dla przypadku, gdy przewód był zamodelowany czwórnikiem typu T.

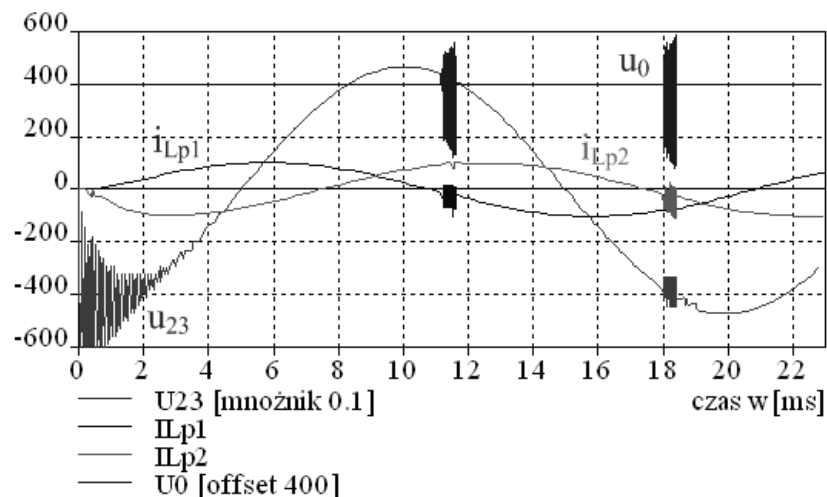
Na rysunku 9 przedstawiono wyniki symulacji dla czwórnika typu T, w sytuacji gdy rezystancja  $R_{pL} \gg$

$R_{pLPE}$ . Wartości przebiegów dla tego przypadku zbliżone są do wyników przedstawionych na rysunku 7.

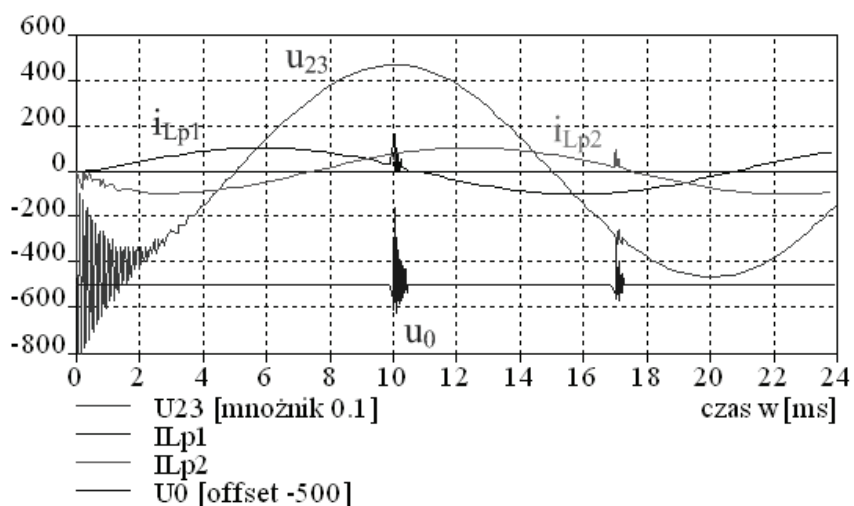
Na rysunku 10 przedstawiono wyniki symulacji dla czwórnika typu T, dla przełączania łączników przy ujemnym prądzie łączników. W tym przypadku zmniejszyła się nieco wartość i kształt pojawiającego się przebiegu.

Na rysunku 11 przedstawiono z kolei wyniki symulacji dla przypadku, gdy przewód został zamodelowany czwórnikiem typu II,  $C_L = 2C$  i  $L_k = 2L$ . Otrzymane przebiegi wykazują mniejsze przebiegi niż na rysunku 8 ( $C_L = C$  i  $L_k = L$ ).

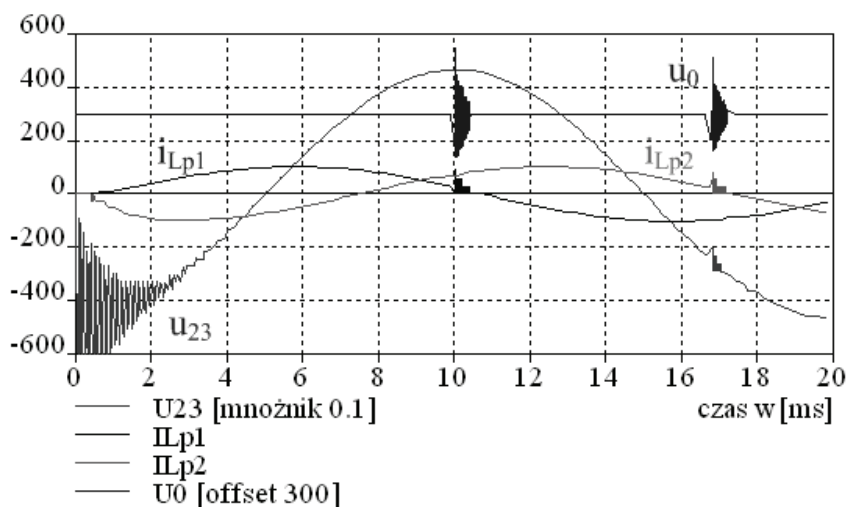
Na rysunku 12 przedstawiono wyniki symulacji dla przypadku, gdy przewód został zamodelowany czwórnikiem typu T oraz gdy częstotliwość przełączeń łączników wynosi  $f_1 = 1,7f$ . Wartość przebiegów



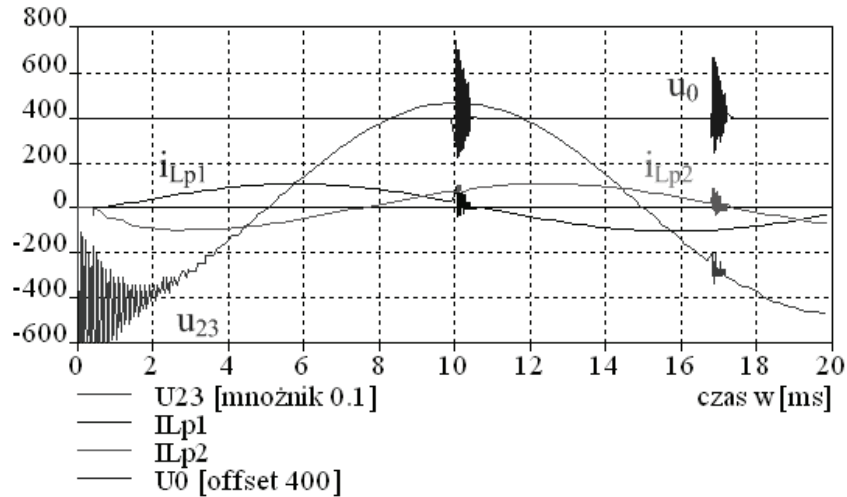
Rys. 10. Przebiegi czasowe napięć ( $u_{23}$  oraz  $u_o$ ) i prądów łączników ( $L_1$ ,  $L_2$ ) dla czwórnika typu T,  $di/dt < 0$  oraz prądu łączników  $< 0$



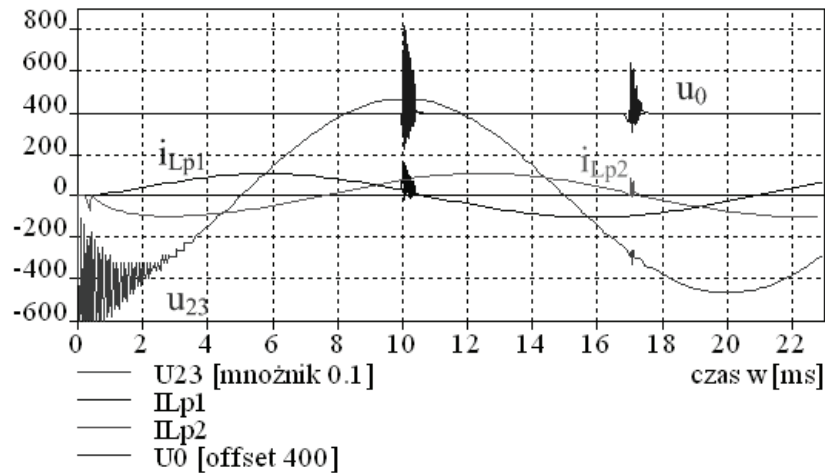
Rys. 11. Przebiegi czasowe napięć ( $u_{23}$  oraz  $u_o$ ) i prądów łączników ( $L_1$ ,  $L_2$ ) dla czwórnika typu II,  $di/dt < 0$  oraz prądu łączników  $> 0$  w momencie wielokrotnego przełączania łącznika dla przypadku  $C_L = 2C$  i  $L_k = 2L$



Rys.12. Przebiegi czasowe napięć ( $u_{23}$  oraz  $u_o$ ) i prądów łączników ( $L_1$ ,  $L_2$ ) dla czwórnika typu T,  $di/dt < 0$  oraz prądu łączników  $> 0$  dla przypadku gdy  $f_1 = 1,7f$



Rys. 13. Przebiegi czasowe napięć ( $u_{23}$  oraz  $u_0$ ) i prądów łączników ( $L_1$ ,  $L_2$ ) dla kaskadowego połączenia czwórników typu T,  $di/dt < 0$  oraz prądu łączników  $> 0$



Rys. 14. Przebiegi czasowe napięć ( $u_{23}$  oraz  $u_0$ ) i prądów łączników ( $L_1$ ,  $L_2$ ) dla kaskadowego połączenia czwórników typu II,  $di/dt < 0$  oraz prądu łączników  $> 0$

dla tego przypadku jest mniejsza niż dla przypadku z rysunku 7, dla którego częstotliwość przełączania łącznika wynosiła  $f$ .

Na rysunku 13 przedstawiono wyniki symulacji, w której linię zastąpiono kaskadowym połączeniem czwórników typu T. Wartości są nieco większe aniżeli w przypadku zastosowania pojedynczego czwórnika typu T.

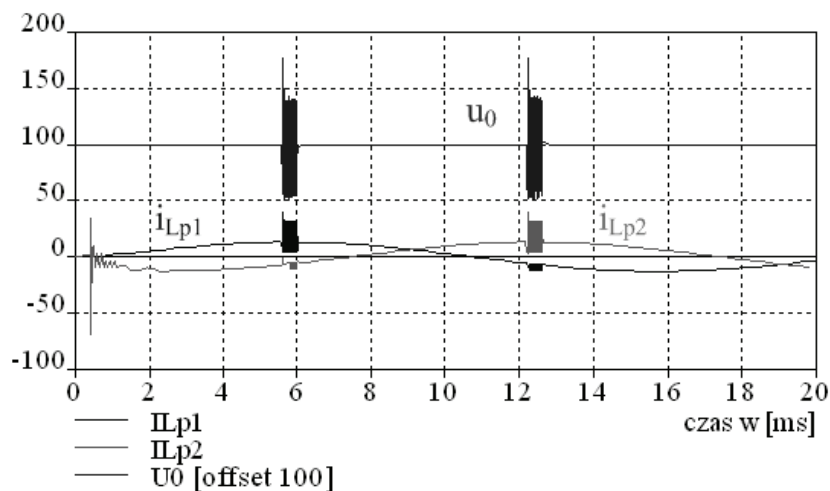
Na rysunku 14 przedstawiono wyniki symulacji, w której linię zastąpiono kaskadowym połączeniem czwórników typu II. Wyniki symulacji wskazują, że przepięcie dla prądu  $i_{pL1}$  jest nieco większe zaś dla prądu  $i_{pL2}$  nieco mniejsze niż miało to miejsce w poprzednim przypadku. Mniejsze przepięcie dla  $i_{pL2}$  głównie wynika z mniejszej wartości początkowej prądu w momencie rozpoczęcia przełączania łącznika.

Na rysunku 15 przedstawiono wyniki symulacji, w której linię zastąpiono czwórnikiem typu T przy ma-

łym prądzie odbiornika oraz niewielkiej wartości  $di/dt$  prądu łącznika. Z otrzymanych przebiegów wynika, że przepięcie jest znacznie mniejsze oraz występuje praktycznie prostokątny przebieg tego przebiegu.

### 3. WNIOSKI

Wyniki symulacji wskazują, że w warunkach przełączania łączników próżniowych (z częstotliwością kilkudziesięciu kHz) pojawiają się przepięcia pomiędzy ekranem ogólnym a ekranami indywidualnymi żył pomocniczych (ekrany te są często stosowane do kontroli ciągłości uziemienia). Wartości przepięć uzależnione są od prądu, przy którym występuje wielokrotne przełączanie łącznika próżniowego. Przepięcia te są większe w przypadku ujemnej po-



Rys. 15. Przebiegi czasowe napięć ( $u_0$ ) i prądów łączników ( $I_{L1}$ ,  $I_{L2}$ ) dla czwórnika typu T,  $di/dt < 0$  oraz prądu łączników  $> 0$  przy małym prądzie odbiornika

chodnej prądu. Ponadto zaobserwowano, że podczas wielokrotnego przełączania łącznika próżniowego dla ujemnej pochodnej prądu przepięcia te są większe przy dodatniej wartości prądu. Jeżeli pochodna prądu w czasie trwania przełączania łącznika próżniowego jest dodatnia to przepięcia w tym czasie są istotnie mniejsze w porównaniu do sytuacji jaka występuje przy ujemnej pochodnej (dla tych samych przyrostów prądu w obu przypadkach). Badania wykazały, że poddając analizie linię o stałych rozłożonych:

- wystarczy zastąpić ją pojedynczym czwórnikiem typu T,
- nie można opierać się na pojedynczym czwórniku typu  $\Pi$ , ze względu na duże rozbieżności obliczonych przepięć.

Zwiększenie częstotliwości przełączania łącznika próżniowego skutkuje zmniejszeniem przepięć pomiędzy ekranem ogólnym a ekranami indywidualnymi żył pomocniczych.

Otrzymane wyniki badań symulacyjnych sugerują, że postawiona we wstępie hipoteza o możliwości powstawania przepięć pomiędzy ekranem ogólnym a ekranami indywidualnymi żył roboczych (pełniących rolę żył ochronnych) w wyniku przełączania łączników próżniowych podczas przechodzenia prądu łączników przez zero jest prawdziwa. Brak szczegółowych informacji o przeprowadzonych badaniach laboratoryjnych uniemożliwia w chwili obecnej udzielenie jednoznacznej odpowiedzi na pytanie czy wielokrotne przełączania łącznika próżniowego są podstawową przyczyną powstawania przepięć pomiędzy ekranem ogólnym i ekranami indywidualnymi żył pomocniczych (zaobserwowanymi w czasie badań laboratoryjnych). Na podstawie posiadanych danych, częstotliwość zaobserwowanych przepięć określono tam na poziomie około 78 kHz, zaś ampli-

tudę przepięć na poziomie 1000 V [1]. Analiza wyników badań symulacyjnych wykazuje, że wzrostowi rezystancji w obwodzie ekranów (rys. 5) towarzyszy wzrost napięcia pomiędzy ekranem ogólnym i ekranami indywidualnymi żył pomocniczych. Wartości tych rezystancji, a tym samym przepięć zależą od konkretnej konstrukcji przewodu oponowego [1].

#### Literatura

- Sprawozdanie poprawności współpracy silnika na napięciu 3,3 kV z przewodem oponowym PRYSMIAN <VDE> PROTOMONT (V) NTSKCGECW0EU 3×70+4(2,ST KON +35/3 KON)+UEL KON 3,6/6 kV WUG GE-3/06 w zakresie kontroli zastosowanych ekranów Centrum EMAG 2007 r. (niepublikowana).
- Wróblewski Z.: Badania i symulacja cyfrowa wybranych właściwości łączników próżniowych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2005.
- Fiuk R., Wróblewski Z.: Symulacja cyfrowa przepięć generowanych przez łączniki próżniowe w obwodach z silnikami indukcyjnymi elektro.info nr 7-8/2006.
- Smeets R., Lathouwers A., Falkingham L., Montillet G.: A summary of non-sustained disruptive discharges (NSDD) in vacuum switchgear.
- PROTOMONT NTSKCGECW0EU 6 kV, dane techniczne, wersja 3.

Recenzent: dr inż. Sergiusz Boron