

Romuald Kosztaluk<sup>1</sup>, Zdobysław Flisowski<sup>1</sup>, Bolesław Kuca<sup>1</sup>

## OGRANICZANIE PARAMETRÓW PRZEPIĘĆ W SIECIACH ROZDZIELCZYCH

**Streszczenie:** Scharakteryzowano stosowane w Polsce metody i środki ograniczania przepięć w sieciach rozdzielczych na napięcie od 3 kV do 30 kV. Metody te skonfrontowano z praktyką krajów Unii Europejskiej i z obowiązującymi w niej normami. W szczególności przeanalizowano sposoby stosowania: kompensacji prądów zwarciovych, rezystorowego uziemiania punktu neutralnego, piorunochronów i przewodów odgromowych oraz odgromników wydmuchowych, ślizgowych i zaworowych. Sformułowano stosowne wnioski.

**Słowa kluczowe:** sieci rozdzielcze, przepięcia, ograniczanie przepięć

### 1. Wstęp

Energetyka krajowa, po przystąpieniu Polski do Unii Europejskiej, jest zobowiązana ujednolicić w krótkim czasie i dostosować metody projektowania, budowy i eksploatacji sieci i instalacji elektrycznych wszystkich napięć do dokumentów normalizacyjnych tej międzynarodowej organizacji. Obowiązek ten dotyczy wielu zagadnień, w tym również wszechstronnie rozumianej koordynacji izolacji [1], [2].

Niniejszy artykuł zawiera analizę metod ograniczania liczby i częstości występowania oraz wartości szczytowych i innych parametrów przepięć, które ukształtowały się w Polsce w sieciach rozdzielczych o napięciu znamionowym od 3 kV do 30 kV [3], oraz w sieciach przesyłowych na napięcie 110 kV, 220 kV i 400 kV [4]. Metody stosowane w Polsce porównano z praktyką eksploatacyjną i z wymaganiami dokumentów normalizacyjnych, obowiązujących w krajach Unii Europejskiej w analizowanym zakresie tematycznym.

### 2. Sposoby ograniczania liczby i parametrów przepięć

W sieciach i w instalacjach elektrycznych stosuje się rozmaite metody ograniczania liczby i wartości przepięć, zagrażających izolacji i ciągłości dostarczania energii elektrycznej. Podstawowe znaczenie ma sposób uziemiania punktu neutralnego sieci. Innymi ważnymi czynnikami są: postęp techniczny, umożliwiający stosowanie aparatury łączeniowej, wypo-

<sup>1</sup> Politechnika Warszawska, Zakład Techniki Wysokich Napięć, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa

sażonej w urządzenia redukujące wytwarzane przepięcia, oraz budowa i instalowanie urządzeń, redukujących wartości szczytowe i inne parametry pojawiających się w sieci przepięć. Należą do nich w szczególności: przewody odgromowe, odgromniki wydmuchowe, ślizgowe i zaworowe, a przede wszystkim nowoczesne ograniczniki przepięć z warystorami z tlenków metali, które w niniejszym referacie i w dwu innych publikacjach [3], [4] zostały nazywane odgromnikami tlenkowymi.

W referacie omówiono metody ograniczania skutków występowania przepięć w sieciach i w instalacjach rozdzielczych dzięki stosowaniu: kompensacji prądu pojemnościowego sieci przy zwarciach doziemnych, rezystorów do uziemiania punktu neutralnego transformatorów, instalacji piorunochronnych i przewodów odgromowych, oraz odgromników wydmuchowych, ślizgowych i zaworowych.

Zagadnienia dotyczące redukcji parametrów przepięć łączeniowych dzięki zastosowaniu rezystorów w wyłącznikach i synchronizacji procesów łączeniowych omówiono łącznie w publikacji [3], a rozwój stosowania nowoczesnych odgromników tlenkowych do ochrony stacji i linii wysokich napięć - w publikacji [4].

### 3. Zastosowanie dławików i transformatorów gaszących

Podstawowym sposobem ograniczania przepięć dorywczych w sieciach rozdzielczych jest obecnie w Europie dławik indukcyjny, instalowany między punktem neutralnym sieci a uziemieniem stacyjnym. Autorem tej metody redukcji przepięć dzięki kompensacji prądu pojemnościowego, płynącego podczas zwarcia jednego z przewodów roboczych (fazowych) z ziemią jest niemiecki inżynier W. Petersen. Jego patent, stosowany już w latach dwudziestych ubiegłego wieku jest obecnie uznawany za podstawowy środek ochrony od dużych wartości przepięć, zapoczątkowanych uderzeniami piorunów i doziemieniami [5].

Obecnie dławiki Petersena są zwykle instalowane w sieciach napowietrznych i w sieciach napowietrzno-kablowych, w których długość linii kablowych jest mniejsza niż 20 % łącznej długości kompensowanej części sieci. Według doświadczeń europejskich dławik Petersena stosuje się w części sieci, w której prąd pojemnościowy przy zwarcu jednej fazy z ziemią nie przekracza 1000 A, a prąd resztkowy w miejscu zwarcia, ograniczony indukcyjnością dławika jest mniejszy niż 150 A [5].

Według wieloletnich doświadczeń energetyki krajowej rozstrojenie kompensacji

$$S = (I_L - I_C)/I_C \quad (1)$$

wywołane prądem indukcyjnym  $I_L$  dławika i prądem pojemnościowym  $I_C$  dwu zdrowych faz typowej sieci powinno spełniać warunek:  $-5\% \leq S \leq 15\%$ , a sieci o dużej asymetrii pojemnościowej poszczególnych faz – warunek:  $5\% \leq S \leq 15\%$ .

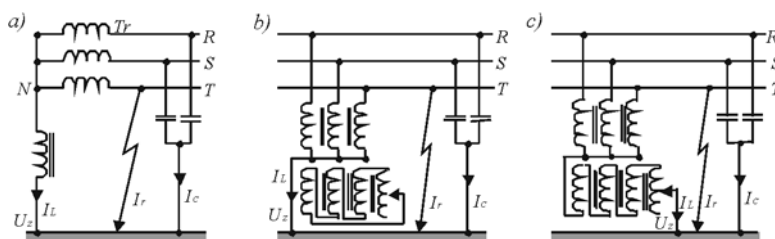
W Polsce dąży się do tego, aby pojemnościowy prąd zwarcia z ziemią nie przekraczał kilkuset amperów. Wartość ta jest kilkakrotnie mniejsza niż dopuszczana w krajach Unii.

Wieloletnie doświadczenia eksploatacyjne pokazują [5], że dławik Petersena, zastosowany w sieciach rozdzielczych pozwala: wybitnie zmniejszyć liczbę zadziałań wyłączników przy doziemieniach powodowanych uderzeniami piorunów i przypadkowymi uszkodzeniami izolacji, wyraźnie zwiększyć ciągłość pracy sieci i niezawodność dostawy energii elektrycznej oraz uprościć układy uziemień stacyjnych i zmniejszyć koszt ich budowy.

Zapewnienie możliwości długotrwałej pracy sieci z doziemieniem jednej fazy wymaga stosowania odgromników o napięciu znamionowym skoordynowanym z napięciem między-

fazowym, co wiąże się ze wzrostem kosztów tych urządzeń. Analiza pokazuje jednak, że w rzeczywistości wzrost ten nie przekracza 0,5 % ogólnych kosztów inwestycyjnych [5].

Urządzenia do kompensacji prądów pojemnościowych, takie jak transformatory Baucha lub Reithofera, są obecnie rzadko stosowane, głównie ze względu na duże ich koszty. Dławik Ferrantiego (patent z 1930 r.), zwany pochłaniaczem fal i zawierający uzwojenie bezrdzeniowe, umieszczone w uziemionej obudowie metalowej, ma obecnie jedynie znaczenie historyczne.



**Rys. 1.** Sposób instalowania w sieci dławika Petersena (a) i transformatorów Baucha (b) lub Reithofera (c);  $Tr$  – transformator,  $N$  – punkt neutralny,  $R, S, T$  – przewody fazowe,  $U_z$  – uziemienie,  $I_L$  – prąd indukcyjny,  $I_r$  – prąd resztkowy,  $I_C$  – prąd pojemnościowy.

Niedogodnością kompensacji prądu pojemnościowego sieci jest konieczność stosowania stosunkowo skomplikowanych układów zabezpieczeń.

Szczególnym zagadnieniem jest wybór napięcia znamionowego  $U_n$  oraz najwyższego napięcia  $U_s$  sieci rozdzielczych. Zwiększenie napięcia znamionowego  $U_n$  z 15 kV do 20 kV, co wiąże się ze wzrostem najwyższego napięcia  $U_s$  sieci z 17,5 kV do 24 kV, pozwala zwiększyć zdolność przesyłową sieci aż o 88 %. Z tego powodu w Europie wybiera się powszechnie w nowo budowanych sieciach napięcie znamionowe  $U_n = 20$  kV zamiast 15 kV.

#### 4. Uziemienie punktu neutralnego sieci przez rezystor

Od kilkudziesięciu lat w krajach europejskich i od kilkunastu lat w Polsce wykonuje się połączenie punktu neutralnego transformatorów z siecią uziomów stacyjnych przez rezystor. Takie układy pracy są często stosowane w sieciach na terenie zakładów przemysłowych i elektrowni. Są to zwykle sieci kablowe na napięcie 6 kV.

Rezystancję uziemiającego rezystora wybiera się tak, aby prąd jednofazowego zwarcia z ziemią został ograniczony w stanie ustalonym do wartości od kilkudziesięciu do kilkuset amperów. Według badań eksperymentalnych [6] zmniejszenie prądu do kilkudziesięciu amperów wskutek zwiększenia rezystancji rezystora prowadzi do wzrostu przepięć. Przy dużych wartościach rezystancji uziemienia istotny wpływ na mechanizm rozwoju przepięć i na ich wartość mają również parametry transformatora.

Przy małej mocy transformatora przepięcia rosną, a prąd zwarcia jest często przerywany. Badania wykazały również, że przy prądzie jednofazowego zwarcia z ziemią o wartości od kilkudziesięciu do kilkuset amperów przepięcia pojawiają się tylko podczas inicjacji zwarć i osiągają od 2,2 do 2,4 napięcia doziemnego, występującego podczas normalnej pracy. W takich przypadkach następuje często samolikwidacja zwarć, wskutek naturalnego wydmuchu łuku [6].

Cytowane badania wykazały również, że przepięcia ziemnozwarciowe w sieci z izolowanym punktem neutralnym osiągają wartości ok. 1,5-krotnie wyższe niż w sieci uziemionej przez rezystor.

## 5. Przewody linii napowietrznych w izolacji polimerowej

W Europie i w Polsce obserwuje się dalszy rozwój linii napowietrznych niskich i średnich napięć z przewodami w izolacji polimerowej. Podstawową zaletą tych linii jest zwiększenie niezawodności zasilania odbiorców i redukcja zabiegów eksploatacyjnych wskutek ograniczenia liczby lub eliminacji zwarć doziemnych i międzyfazowych, wywoływanych takimi czynnikami, jak np. gałęzie, źdźbła zbóż i traw, ptaki, zarzutki.

Wybór rodzaju przewodów (z izolacją pełną lub z izolacją o zredukowanej wytrzymałości) oraz sposoby ochrony tych linii od przepięć wywołały swego czasu żywą dyskusję [7], [8].

W celu ochrony linii z przewodami izolowanymi opracowano w ostatnich latach odgromniki ślizgowe (rys. 2). Korzystną rolę w rozwoju tych linii mogą także odegrać nowoczesne odgromniki tlenkowe, których cena jednostkowa stale maleje, m.in. wskutek zastosowania zewnętrznych przerw izolacyjnych, uproszczenia budowy i zastosowania materiałów osłonowych z tworzyw sztucznych.

Niekorzystną stroną budowy linii z przewodami w izolacji jest konieczność stosowania większej liczby słupów, spowodowanego wzrostem ich obciążenia wskutek zwiększenia ciężaru i zewnętrznej średnicy przewodów.

## 6. Urządzenia piorunochronne i przewody odgromowe

Do ochrony od pioruna napowietrznych i wewnętrznych rozdzielni i stacji stosuje się w Polsce, podobnie jak w innych krajach europejskich, urządzenia piorunochronne. W rozdzielniach napowietrznych zwody i przewody odprowadzające prąd pioruna powinny być tak budowane i rozmieszczane, aby przepływ prądu pioruna nie wywoływał znacznych spadków napięć w konstrukcjach wsporczych, podtrzymujących szyny stacyjne.

W publikacjach z ostatnich lat zwraca się uwagę na możliwość znacznych zakłóceń w instalacjach sterowania i zabezpieczeń (prowadzonych w kanałach podziemnych) przez spadki napięcia, wywoływane prądem pioruna w uziemieniach piorunochronnych. Sposób wykonania i rozmieszczenie tych uziemień powinno być przedmiotem starannej analizy w procesie projektowania stacji napowietrznych [9].

W sieciach rozdzielczych w Europie przewody odgromowe nie są stosowane. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt istnienia tych przewodów w napowietrznych liniach rozdzielczych w Japonii, równocześnie z odgromnikami tlenkowymi. Jest to spowodowane częstym występowaniem w tym kraju burz zimowych, charakteryzujących się długotrwałymi wyładowaniami doziemnymi [9].

## 7. Odgromniki wydmuchowe, ślizgowe i zaworowe

Odgromniki wydmuchowe, opracowane przez S. Grudzieckiego w Zakładzie Wysokich Napięć Politechniki Gdańskiej odegrały w okresie powojennym bardzo ważną i korzystną rolę w poprawie ochrony odgromowej krajowych sieci rozdzielczych.

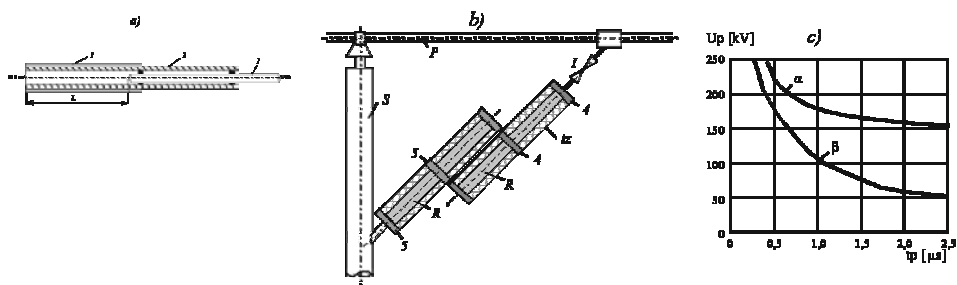
Oryginalna konstrukcja Grudzieckiego z początkowych lat pięćdziesiątych miała rowek śrubowy wewnątrz rury z materiału gazującego (ebonitu). Zapłon łuku następował w niej na prostej drodze osiowej między elektrodami w otworze o małej średnicy (3 mm). Łuk wielkopądowy przerzucał się na drogę śrubową o dużym przekroju i długości. Odgromnik był wyposażony w daszek stalowy, osłaniający górną część rury. Jej dolna część miała ekran metalowy, który sprzyjał rozwojowi iskry między elektrodami i korzystnemu sprzężeniu pojemnościowemu z daszkiem. Odgromnik ten przerywał prawidłowo zarówno małe prądy indukcyjne (ok. 100 A) przy napięciu międzyprzewodowym, jak i prądy zwarciove do 2000 A. W udoskonalonych konstrukcjach S. Grudziecki zastosował kanał szczelinowo śrubowy i daszek izolacyjny. Konstrukcje te, przystosowane do pracy w sieciach od 10 kV do 40 kV, były powszechnie stosowane i jeszcze dzisiaj pracują w sieciach wiejskich na napięcie 15 kV.

Podobnie ważną rolę w ochronie transformatorów i innych urządzeń w stacjach odegrały w okresie powojennym odgromniki zaworowe, produkowane od lat pięćdziesiątych w Zakładach Wytwórczych Aparatury Rozdzielczej w Międzylesiu [10]. W rozwoju konstrukcji odgromników krajowych, który nastąpił w latach 50-tych, ważną rolę odegrał J. Bader i K. Auleitner. W następnych latach do poprawy parametrów odgromników krajowych przyczynili się m. in.: E. Skowroński, P. Korycki, i Z. Szramek. Konstrukcje krajowe były wzorowane na rozwiązaniach renomowanych wytwórców zagranicznych ASEA, BBC, Siemens i Westinghouse.

Obecnie instalowanie odgromników wydmuchowych i zaworowych w sieciach rozdzielczych dobiega końca. Na ich miejsce wprowadza się coraz częściej nowoczesne odgromniki tlenkowe o znacznie korzystniejszych charakterystykach ochronnych.

W ostatnich kilku latach zaproponowano stosowanie w liniach napowietrznych, zwłaszcza w liniach wyposażonych w przewody w izolacji polimerowej, odgromników ślizgowych. Na rys. 2 przedstawiono ich konstrukcję japońską, w której wyładowanie rozwija się wewnątrz rury w osłonie metalowej, oraz konstrukcję rosyjską z wyładowaniem powierzchniowym [9].

W drugim przypadku, wskutek półprzewodzących własności rdzenia R, zapłon wyładowania następuje między okuciami 4 – 4 i 5 – 5, a następnie rozciąga się na całą powierzchnię rury izolacyjnej. Niedogodnością tych rozwiązań jest niekorzystna charakterystyka zapłono-wa napięciowo-czasowa, której przykład pokazano na rys. 2c.



**Rys. 2.** Szkic odgromników ślizgowych: a) japońskich, b) rosyjskich, oraz c) charakterystyki napięciowo-czasowe; 1 – elektroda wewnętrzna, 2 – rura izolacyjna, 3 – rura metalowa, 4, 5 – okucia, L – droga wyładowcza, I – iskiernik 2 cm, R – rdzeń półprzewodzący, iz – izolacja, P – przewód, S – słup,  $\alpha$  – charakterystyka izolatora 10 kV,  $\beta$  – charakterystyka ogranicznika typu LFA 10-B

## 8. Wnioski

- Sposoby redukcji i ograniczanie parametrów przepięć w krajowych sieciach rozdzielczych nie różnią się w zasadzie od sposobów stosowanych w tej dziedzinie w krajach Unii Europejskiej i są zgodne z normami europejskimi.
- Dławiki Petersena do kompensacji prądów pojemnościowych i eliminacji zwarć doziemnych są powszechnie stosowane i korzystnie oceniane w krajach Unii Europejskiej, przy czym rozwiązanie to stosuje się również w sieciach o znacznie (np. 3-krotnie) większych prądach pojemnościowych niż w Polsce.
- W Unii Europejskiej typowym napięciem znamionowym  $U_n$  sieci rozdzielczych jest napięcie  $U_n = 20$  kV ( $U_s = 24$  kV), dzięki czemu uzyskuje się znaczne (88 %) zwiększenie zdolności przesyłowej w porównaniu z siecią na napięcie  $U_n = 15$  kV i  $U_s = 17,5$  kV, przy nieznacznym zwiększeniu kosztów inwestycyjnych, związanym głównie ze stosowaniem transformatorów na wyższe napięcie znamionowe.
- Zastosowanie w sieciach rozdzielczych odgromników dostosowanych do pracy przy napięciu występującym podczas doziemienia jednej fazy (tzn. dostosowanych do napięcia międzyfazowego) w małym stopniu zwiększa koszty budowy sieci napowietrznych (poniżej 1 %).

## Literatura

- [1] EN 60071-1: *Insulation Co-ordination. Part 1: Definitions, Principles and Rules*. CENELEC 1995.
- [2] EN 60071-2: *Insulation Co-ordination. Part 2: Application Guide*. CENELEC 1996.
- [3] **Flisowski Z., Kosztaluk R.**: *Sposoby redukcji przepięć w sieciach przesyłowych*. EUI'2001.
- [4] **Kosztaluk R., Flisowski Z.**: *Ekspansja tlenkowych ograniczników przepięć w sieciach elektrycznych*. EUI'2001.
- [5] CIGRE Session 1998: *General Reports. Group 33. Special reporter M. de Nigris*. Electra No 182. Febr. 1999, p. 83 – 89.
- [6] **Anderson E.**: *Przebiecia wewnętrzne w sieciach średnich napięć i ich ograniczanie*. Komitet Elektrot. PAN, Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej, 1997.
- [7] **Kosztaluk R.**: *Rozwój linii napowietrznych wyposażonych w przewody izolowane*. Przegląd Elektrotechniczny nr 2/97, s. 32 – 38.
- [8] **Gacek Z., Kosztaluk R., Paszek G.**: *Krajowe linie napowietrzne średniego napięcia z przewodami w izolacji polimerowej*. Przegląd Elektrotechniczny nr 3/98, s. 69 – 72.
- [9] **Flisowski Z., Kosztaluk R.**: *Ochrona odgromowa sieci elektrycznych w pracach MKOO 2000*. Przegląd Elektrotechniczny nr 6/2001.
- [10] **Auleitner K.**: *Odgromniki*. WNT Warszawa 1980.

## LIMITATION OF OVERVOLTAGE PARAMETERS IN DISTRIBUTION NETWORKS

**Summary:** Methods and measures applied in Poland for limitation of overvoltages in distribution networks with rated voltages from 3 kV to 30 kV have been characterized. The methods have been confronted with the practice of European Union countries and their binding standards. In particular the methods of fault current compensation, neutral resistor earthing, lightning protection system and shielding wires as well as blowing, sliding and valve arresters application have been analysed. Relevant conclusions have been formulated.