



# ROZWÓJ ELEKTROENERGETYCZNYCH KOMPAKTOWYCH LINII NAPOWIETRZNYCH WYSOKICH I NAJWYŻSZYCH NAPIĘĆ

dr hab. inż. Waldemar Skomudek, prof. Politechniki Opolskiej / Politechnika Opolska

## 1. WSTĘP

Rezultaty badań, analiz i rozważań prowadzonych przez autora referatu w zakresie zobiektywizowania stopnia zagrożenia układów izolacyjnych przez przebiegi pozwalają stwierdzić, że te specyficzne obciążenia elektryczne, powstające podczas różnego rodzaju stanów nieustalonych w sieciach elektroenergetycznych, mają istotny wpływ na podejmowanie decyzji dotyczących sposobu eksploatacji i wyposażenia sieci elektroenergetycznych średniego, wysokiego i najwyższych napięć [2, 3, 4, 8]. Znaczenie przebieg uzasadnia potrzebę ich badań i analiz, które należy kontynuować i rozwijać w miarę postępu możliwości pomiarowych, obliczeniowych oraz w dziedzinie nowych rozwiązań konstrukcyjnych, w szczególności mających wpływ na wzrost niezawodności dostawy i jakości energii elektrycznej.

Niemniej jednak zaprezentowana w publikacjach [1, 8, 9] możliwość odmiennego podejścia do zasad koordynacji izolacji i ochrony przed przebiegami sieci średniego, wysokiego i najwyższych napięć wskazuje kierunki działań modyfikacyjnych polegających przede wszystkim na:

- zwiększeniu roli naturalnej redukcji poszczególnych rodzajów przebieg
- optymalizacji wytrzymałości udarowej izolacji (ograniczenie przewymiarowania układów izolacyjnych)
- racjonalnym podejściu do wskaźnika ochrony izolacji, uwzględniającego wykorzystanie nowoczesnych urządzeń do ograniczania przebieg
- unifikacji postanowień zawartych w normach odnoszących się do zagadnień koordynacji izolacji i ochrony od przebieg.

Pogłębiona analiza zasadności przyjęcia zaproponowanych kierunków działań modyfikacyjnych uwzględnia również aspekt ekonomiczny procesu inwestycyjnego w elektroenergetyce.

## 2. OCENA POTRZEB INWESTYCYJNYCH

Krajowa elektroenergetyka, podobnie jak firmy tej branży w innych krajach Unii Europejskiej, podlega głębokim przemianom. Począwszy od lat dziewięćdziesiątych XX wieku, w wyniku tworzenia rynków energii elektrycznej, w których dominują konkurencja, demonopolizacja i prywatyzacja, zachodzą w niej zasadnicze przemiany. Istotną staje się ekonomika funkcjonowania tej branży.

Z analizy makroekonomicznych danych statystycznych, charakteryzujących rynek energii elektrycznej na tle tempa wzrostu gospodarczego określanego wskaźnikiem PKB<sup>1</sup>, wynika, że zużycie energii elektrycznej w Polsce w ciągu ostatnich kilku lat ma stałą tendencję wzrostową, jedynie czasowo spowolnioną kryzysem z końca

<sup>1</sup> Produkt krajowy brutto – zagregowana wartość dóbr i usług finalnych wytworzonych na terenie danego kraju w określonej jednostce czasu (np. w ciągu roku).

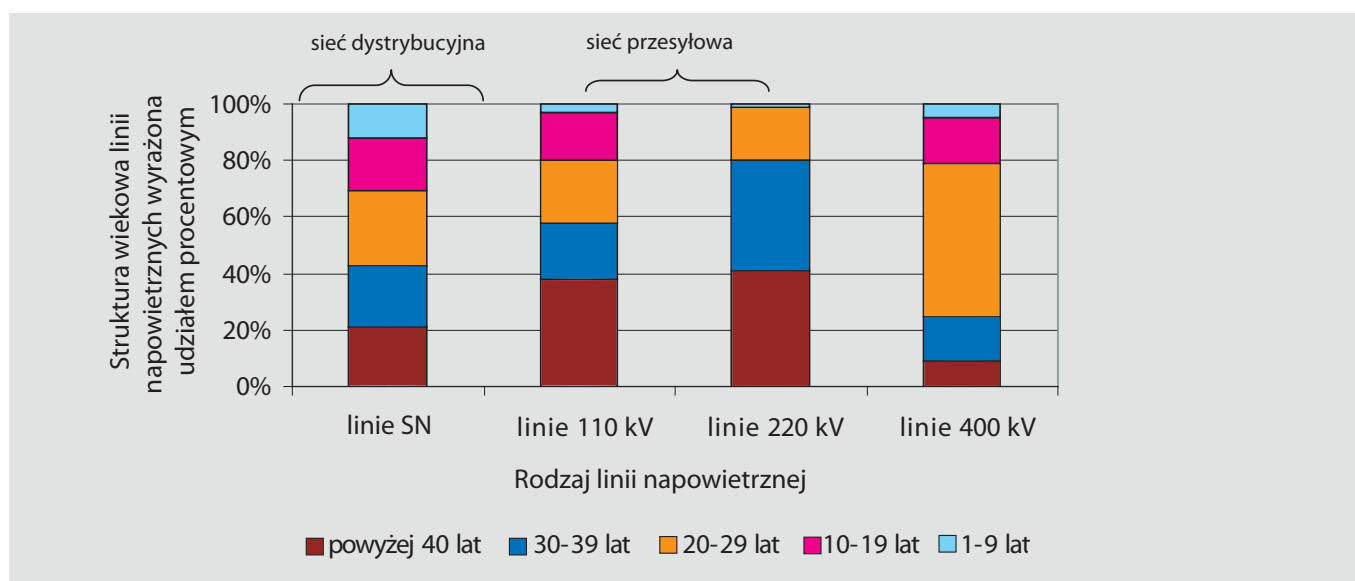
### Streszczenie

*Pogłębiona analiza zasad koordynacji izolacji wskazuje na istniejącą możliwość modyfikacji jej procedury. Podjęcie działań w tym kierunku może doprowadzić do uzyskania wymiernych efektów ekonomicznych, które w świetle obecnych potrzeb inwestycyjnych w zakresie elektroenergetycznej przesyłowej i dystrybucyjnej infra-*

*struktury sieciowej, możliwości finansowych podmiotów zarządzających tą infrastrukturą oraz istniejących barier prawnych i środowiskowych przy ich realizacji (w szczególności dotyczy to inwestycji liniowych) będą czynnikiem o decydującym znaczeniu.*

roku 2009. Obecnie krajowe zużycie energii elektrycznej jest na poziomie roku 2008. Jednak odnotowana konsumpcja energii elektrycznej w pierwszym półroczu 2010 r. jest o ponad 4,7% wyższa od analogicznego okresu roku ubiegłego. I choć ostatnie dwa lata przyniosły polskiej elektroenergetyce istotne zmniejszenie konsumpcji paliw i energii elektrycznej, potwierdzając zagrożenia wynikające z kryzysu finansowego świata, to jednak wzrost ten należy przyjąć jako wyraźny sygnał ożywienia gospodarczego w kraju.

Opierając się na obecnej i prognozowanej tendencji wzrostu PKB, zapotrzebowanie na energię elektryczną brutto<sup>2</sup>, przy jednoczesnym obniżeniu energochłonności gospodarki, osiągnie poziom ok. 200 TWh w roku 2030, przy czym w roku 2010 krajowe zużycie energii elektrycznej wyniosło prawie 155 TWh<sup>3</sup>. Uwzględniając obecne i przyszłe wskaźniki zapotrzebowania na energię elektryczną w analizach potencjału sieciowego dochodzimy jednak do niepokojących wniosków, gdyż stopień dekapitalizacji sieci elektroenergetycznych zarówno przesyłowych, jak i dystrybucyjnych sięga 40-65% (rys. 1).



Rys. 1. Struktura wiekowa krajowych elektroenergetycznych linii napowietrznych

W rezultacie dochowanie reguł rynku konkurencyjnego opartych na równoważeniu popytu i podaży na towar, jakim jest energia elektryczna, odślania znaczną lukę inwestycyjną między innymi w elektroenergetycznych liniach napowietrznych. Szacuje się, że aby zamknąć powstałą lukę, na przestrzeni lat 2011–2020 powinien nastąpić przyrost długości sieci przesyłowych o ok. 2000 km, a dystrybucyjnych o ok. 2800 km. Ponadto struktura wiekowa istniejących linii napowietrznych wskazuje na znaczne potrzeby w zakresie modernizacji, które szacuje się na ok. 9000 km<sup>4</sup>.

Taka skala potrzeb inwestycyjnych jest wystarczającą motywacją do poszukiwania i wdrażania rozwiązań, które pozwolą przede wszystkim uniknąć przerw w dostawie energii, a tym samym zwiększą bezpieczeństwo elektroenergetyczne. Zatem każde zadanie inwestycyjne będzie wyzwać potrzebę prowadzenia pogłębionych analiz ekonomicznych, optymalizujących wydatkowanie celowych środków finansowych.

### 3. OGRANICZENIA PRAWNE I ŚRODOWISKOWE

W procesie realizacji inwestycji elektroenergetycznej, w szczególności inwestycji liniowej, znaczącą rolę odgrywa stosowanie regulacji wielu aktów prawnych, począwszy od prawa energetycznego, poprzez prawo budowlane, prawo zamówień publicznych, prawo o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym aż po szeroko rozumiane prawo związane z ochroną środowiska. Szczególnego znaczenia nabierają ograniczenia środowiskowe podyktowane względami lokalizacyjnymi. Polegają one między innymi na skomplikowanej procedurze planowania przestrzennego, obejmującej:

<sup>2</sup> Energia elektryczna uzyskana z procesu przemiany energetycznej w postaci prądu elektrycznego zmierzzonego na zaciskach generatora.

<sup>3</sup> Dane wg McKinsey & Company, Global Insight, ARE.

<sup>4</sup> Przyjęto zasadę ostrożnego szacowania.

- wprowadzenie inwestycji do miejscowych planów zagospodarowania przestrzennego
- uzyskanie tzw. prawa drogi, czyli prawa do dysponowania terenem pod budowę linii lub stacji, wraz z nadaniem decyzji rygoru natychmiastowej wykonalności
- przeprowadzenie postępowania związanego z oceną oddziaływania na środowisko planowanego przedsięwzięcia
- uzyskanie zgody społecznej na realizację inwestycji.

Z doświadczeń krajowej i międzynarodowej elektroenergetyki wynika, że najwięcej problemów sprawia postępowanie związane z oceną oddziaływania przedsięwzięcia na środowisko. Wiele problemów, które trzeba rozwiązać w toku inwestycji, ma charakter społeczny i wynika wprost z faktu, że inwestycja powstaje w konkretnym środowisku przyrodniczym. Relacje pomiędzy inwestorem, jednostkami administracji terenowej a społecznością lokalną są regulowane przez prawo, które nakłada obowiązek takiego prowadzenia inwestycji, aby zapewnić udział społeczeństwa przy podejmowaniu decyzji dotyczących środowiska. W tym przypadku pojęcie środowiska ma sens zarówno przyrodniczy, jak i społeczno-środowiskowy.

Specyfiką inwestycji liniowych jest to, że trasa linii zazwyczaj przebiega przez tereny zróżnicowane pod wieloma względami, w tym także pod względem stosunków własnościowych. W budownictwie liniowym preferowane są więc takie rozwiązania, które maksymalnie ograniczają ingerencję w środowisko naturalne i własność prywatną (np. stacje małogabarytowe, linie kompaktowe budowane na wąskotrzonowych kratowych słupach stalowych, stalowych słupach pełnościennych lub na słupach betonowych). Stąd wybór trasy oraz odpowiedniego rodzaju i typu linii staje się problemem o decydującym znaczeniu.

Równie istotnym zjawiskiem towarzyszącym pracy każdej linii i stacji elektroenergetycznej jest występowanie wokół nich pola elektromagnetycznego. Pole to może być przyczyną uciążliwości dla środowiska. Szczególnie jego oddziaływanie na organizmy żywe wymusza stosowanie takich rozwiązań, które ograniczą ten negatywny wpływ do możliwie najniższego poziomu, osiągalnego rozsądnymi technicznymi środkami i nakładami kapitałowymi. Na wartość maksymalną i rozkład pola elektrycznego i magnetycznego w otoczeniu linii napowietrznej wpływ głównie mają: rodzaj i wartość napięcia znamionowego, odległość przewodów fazowych od ziemi, odstęp pomiędzy przewodami różnych faz, geometryczny układ przewodów i wysokość ich zawieszenia.

Istotną uciążliwością dla środowiska naturalnego jest także konieczność stworzenia pasa ochronnego (technologicznego) linii, którego szerokość uzależniona jest od napięcia znamionowego linii oraz jej typu<sup>5</sup>. Dąży się zatem do tego, aby linie napowietrzne były budowane z wykorzystaniem słupów praktycznie niedostrzegalnych, idealnie wkomponowanych w krajobraz, a dodatkowo w terenach leśnych lub zadrzewionych jako wąskogabarytowe lub linie o bardzo wysokich słupach, umożliwiającym prowadzenie przewodów nad wierzchołkami drzew (linie wykonane na słupach nadleśnych).

#### 4. IMPLEMENTACJA PRZESŁANEK MODYFIKACJI ZASAD KOORDYNACJI IZOLACJI

Zachowanie linii napowietrznych w warunkach wyładowań piorunowych zależy od wielu czynników, z których najważniejszymi są:

- gęstość wyładowań piorunowych
- wytrzymałość izolacji (układu izolacyjnego)
- wartość rezystancji uziemienia słupa
- ochrona wykonana przewodami odgromowymi
- układ przewodów
- wysokość zawieszenia przewodów linii.

Analiza zasad i reguł obowiązujących przy ustalaniu poziomów wartości amplitud przepięć i wytrzymałości izolacji (układu izolacyjnego) opisana w monografii [8] wykazała, że w przypadku odstępów między przewodami fazowymi a uziemioną konstrukcją słupa można dokonać optymalizacji odległości. Ocena ryzyka przeskoku, wyrażona wskaźnikiem zagrożenia izolacji, wskazuje także na możliwość optymalizacji poziomów ochrony i izolacji. W obu przypadkach optymalizacja może przynieść efekt techniczny i ekonomiczny.

<sup>5</sup> Minimalna odległość od drzew (odległość pionowa) wynosi  $-1,5 \text{ m} + D_{ei}$ , przy czym według PN-EN 50341-1  $D_{ei}$  jest minimalnym odstępem w powietrzu wymagany w celu uniknięcia wyładowania zupełnego pomiędzy przewodem fazowym a obiektami o potencjale ziemi w czasie przepięć o łagodnym lub stromym czole; dla najwyższego napięcia pracy urządzeń  $U_m = 123 \text{ kV}$  odstęp  $D_{ei} = 1 \text{ m}$ .

Aby określić w sposób wymierny efektywność implementacji wyników badań, analiz i ocen w liniach elektroenergetycznych, podjęto próbę oszacowania korzyści, które będą skutkiem:

- minimalizacji rezerw wytrzymałości udarowej izolacji
- koordynacji odstępów izolacyjnych na słupie
- zmniejszenia szerokości pasa ochronnego w trasie linii
- naturalnej redukcji przepięć atmosferycznych poprzez zmniejszenie rezystancji i indukcyjności uziemionych słupów.

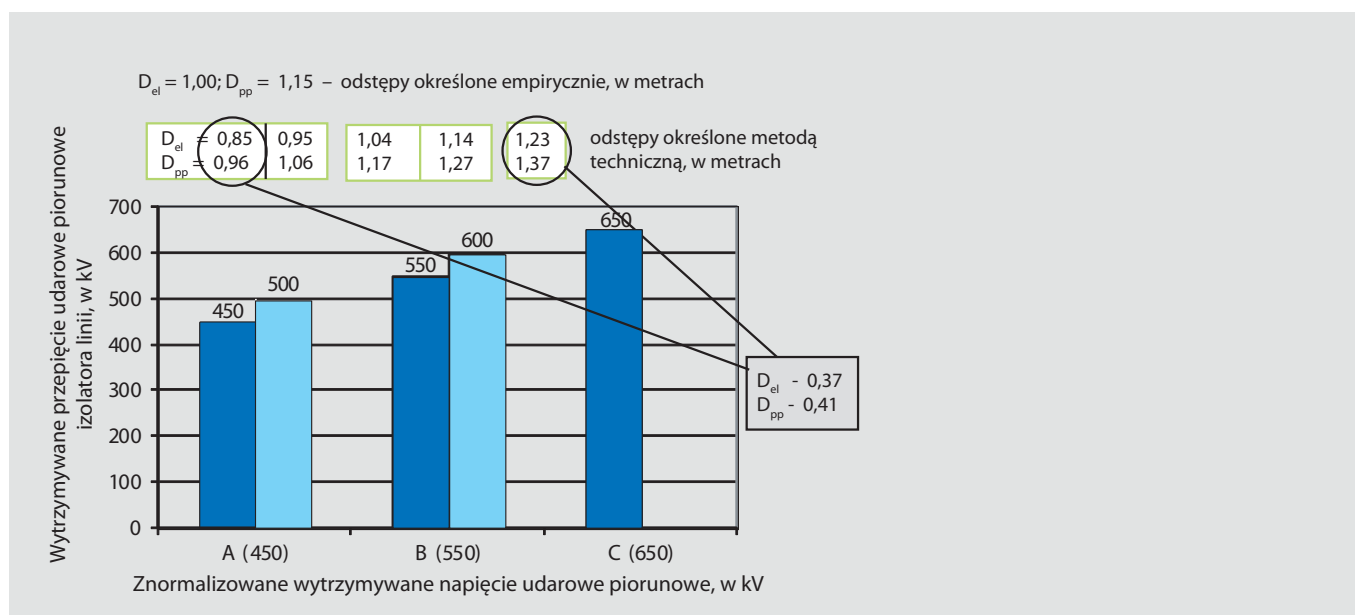
#### 4.1. Optymalizacja wytrzymałości udarowej izolacji

W celu wykonania ekonomicznych projektów elektroenergetycznych linii napowietrznych średniego, wysokiego i najwyższych napięć należy optymalizować poziom rezerwy wytrzymałości udarowej izolacji. W procesie tym decydujące znaczenie przypisuje się napięciom udarowym, które wpływają na dobór odstępów izolacyjnych zarówno zewnętrznych, jak i wewnętrznych linii oraz na szerokość pasa ochronnego w trasie linii. Zaprezentowane na rys. 2 przykładowe wartości odstępów minimalnych w powietrzu, dla różnych wartości znormalizowanego wytrzymywanego napięcia udarowego piorunowego ( $U_w$ ), zostały określone ostrożnie, z uwzględnieniem doświadczeń eksploatacyjnych i ekonomii, i zapewniają określony poziom izolacji.

Zatem, przyjmując w dalszych rozważaniach minimalne odstępki na przykład dla linii napowietrznych o napięciu znamionowym 110 kV dla skrajnych wartości napięcia  $U_w$  (rys. 2 – wartości na szarym tle), możemy uzyskać zmniejszenie ciężaru konstrukcji w szczególności wskutek skrócenia długości poprzeczników i izolatorów, co w przypadku korekty długości izolatora (łańcucha izolatorów) będzie miało dodatkowo wpływ alternatywnie na zmniejszenie zwisu przewodów lub wysokość stupa. Korekta odstępów zewnętrznych i wewnętrznych linii będzie miała wpływ również na szerokość pasa ochronnego.

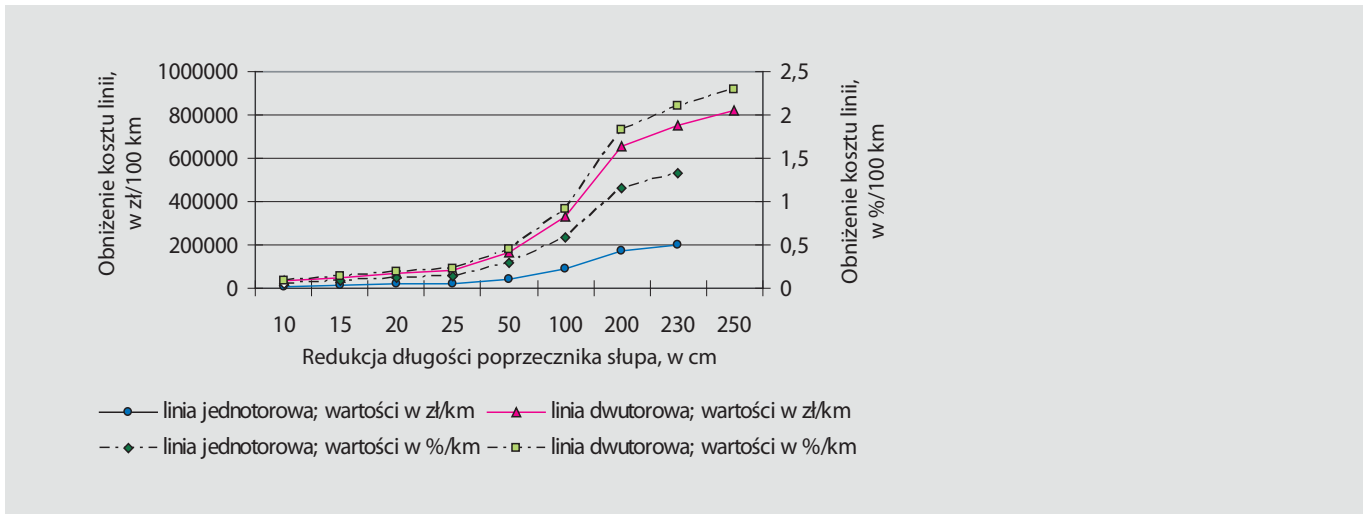
Aby oszacować możliwy do uzyskania poziom korzyści ekonomicznych, wynikający z koordynacji odstępów izolacyjnych, przeprowadzono obliczenia, przyjmując jako podstawowe założenia następujące dane:

- długość jednostkowa linii wynosi 100 km
- udział słupów przelotowych (P) i mocnych (M) w linii wynosi odpowiednio 70% i 30%
- słupy mocne (M) przyjęto jako M3 (lub ON 150)
- skrócenie poprzeczników nie powoduje zmiany kosztów pozostałych elementów linii
- koszty budowy przyjęto jako procent kosztów materiałów (100% kosztów materiałów)
- koszt linii nie uwzględnia wydatków finansowych na pozyskanie praw do terenu
- ceny jednostkowe elementów linii 110 kV przyjęto według stanu na dzień 1 października 2009.



Rys. 2. Prezentacja minimalnych odstępów izolacyjnych w powietrzu dla linii napowietrznych o napięciu znamionowym 110 kV; wartości na szarym tle oznaczają różnicę minimalnych odstępów dla skrajnych wartości znamionowego wytrzymywanego napięcia udarowego piorunowego

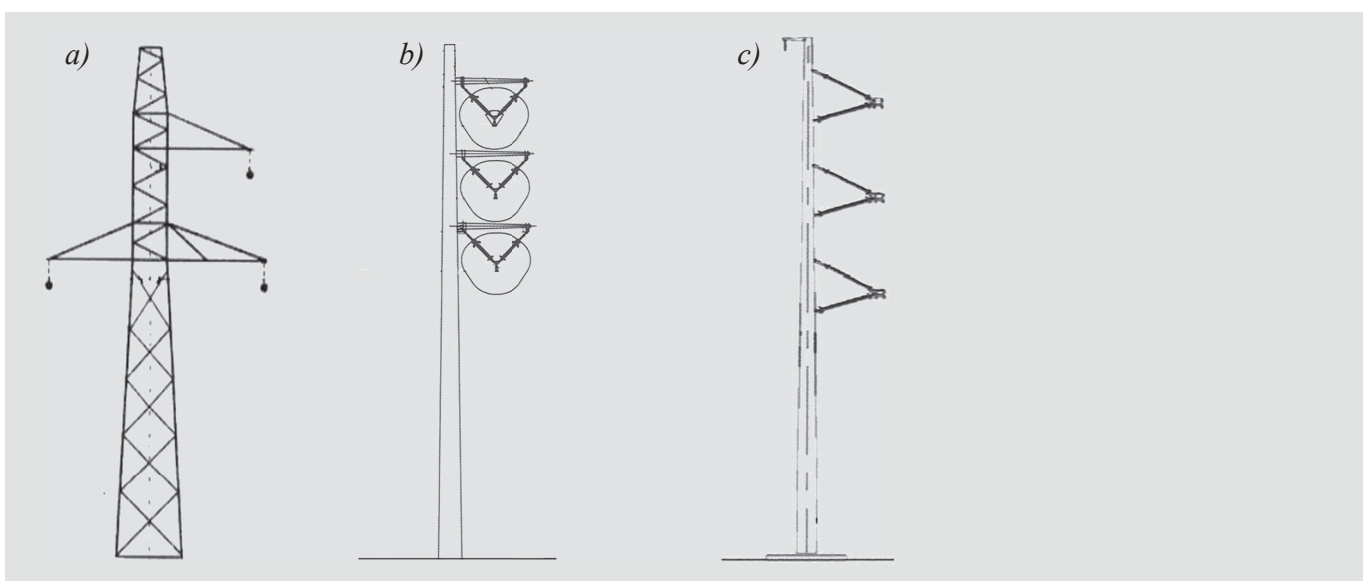
Uzyskane wyniki obliczeń zaprezentowano na rys. 3, przy czym końcowa iteracja zakłada zastąpienie stałych poprzeczników układem izolatorów, na przykład według propozycji zamieszczonych na rys. 4.



Rys. 3. Wpływ redukcji długości poprzeczników słupa na poziom kosztu jednostkowego odcinka linii

Analiza rezultatów obliczeń wykazała, że redukcja długości poprzeczników nieprzekraczająca 40 cm pozwala ograniczyć koszt budowy linii o 0,3–0,5%. Natomiast zastąpienie tradycyjnych poprzeczników na słupach linii napowietrznej układem izolatorów prowadzi do dalszego ograniczenia kosztów budowy linii o 1,3–2,5%. Wdrożenie takich działań wiąże się z możliwością ograniczenia powierzchni pasa ochronnego wzdłuż trasy linii o ok. 6%. Prowadzi również do zmniejszenia oddziaływania wartości maksymalnych pola elektrycznego o ok. 19% i magnetycznego o ok. 28% (przyjmując maksymalną, dopuszczalną pod względem wytrzymałości udarowej redukcję długości poprzeczników słupa).

Zatem można stwierdzić, że ograniczenie odstępów izolacyjnych (przy zachowaniu wymaganych poziomów wytrzymałości udarowej izolacji) prowadzi do uzyskania wymiernego efektu ekonomicznego, przy czym maksymalizacja tego efektu następuje przy jednoczesnym uwzględnieniu istniejących w kraju potrzeb inwestycyjnych w zakresie elektroenergetycznych linii napowietrznych. Nie bez znaczenia dla poziomu uzyskanych korzyści będzie rodzaj zastosowanych linii tj. jedno- czy wielotorowych, oraz przyjęty system mocowania przewodów (poprzeczniki stalowe o zredukowanej długości lub układ izolatorów zastępujący poprzeczniki stalowe).



Rys. 4. Wybrane przykłady układów izolatorów służących do zawieszenia przewodów roboczych linii napowietrznych wysokiego i najwyższych napięć: a) układ tradycyjny z możliwością zredukowania długości poprzeczników, b) układ trójkątowy z pionowym mocowaniem układu izolatorów, c) układ trójkątowy z poziomym mocowaniem układu izolatorów

## 4.2. Naturalna redukcja przepięć atmosferycznych

Jednym ze sposobów ochrony elektroenergetycznych linii napowietrznych przed przepięciami jest niedopuszczenie, aby przepięcia powstające w linii powodowały uszkodzenia izolacji linii. Opisane w publikacjach [5, 6, 7] wyniki analiz propagacji przepięć w liniach napowietrznych wykazały, że działania modyfikacyjne w tym zakresie są możliwe, a jednym z kierunków ich praktycznego wykorzystania jest zwiększenie roli naturalnej redukcji przepięć atmosferycznych w elektroenergetycznych liniach napowietrznych. Można to osiągnąć między innymi poprzez zmianę wartości rezystancji i indukcyjności uziemionych konstrukcji wsporczych. Aby wykazać słuszność takiego działania, poddano analizie zjawisko bezpośredniego uderzenia pioruna w słup elektroenergetycznej linii napowietrznej. Wskutek tego zdarzenia powstaje różnica potencjałów między wierzchołkiem słupa a powierzchnią ziemi, która stanowi napięcie doziemne słupa określone zależnością

$$u_{ws} = i_p \times R_s \quad (1)$$

gdzie:  $R_s$  – opór uziemienia słupa. Zależność ta nie uwzględnia jednak indukcyjnego spadku napięcia. Przyjmując prawdopodobne parametry prądu pioruna (ok. 30–50 kA) oraz wartość rezystancji uziemienia słupa równą 20  $\Omega$ , możemy określić wartość szczytową spadku napięcia na słupie. Jest ona na tyle wysoka, że różnica między napięciem doziemnym słupa a napięciem doziemnym przewodu roboczego<sup>6</sup> zazwyczaj przekracza wartość wytrzymywanego przepięcia udarowego piorunowego izolatora (układu izolacyjnego). Stan taki spowoduje zwarcie doziemne. Ponieważ w tym przypadku słup posiada wyższy potencjał niż przewód roboczy, dochodzi do tzw. przeskoku odwrotnego na izolacji liniowej. Przeskoki odwrotne wystąpić mogą na izolacji jednej fazy lub jednocześnie na izolacji dwóch lub wszystkich faz.

Ponieważ stromość czoła prądu pioruna jest duża, w prowadzonych rozważaniach nie można pominąć indukcyjności słupa. W tym przypadku napięcie wierzchołka słupa będzie powiększone o indukcyjny spadek

napięcia  $L \frac{di_p}{dt}$ . Wówczas napięcie wierzchołka słupa można określić, korzystając ze wzoru

$$u_{ws} = u_R + u_L = R_s \times i_p + L \frac{di_p}{dt} \quad (2)$$

Przy użyciu wzoru (2) można określić wartość maksymalnej rezystancji uziemienia słupa, przy której powstanie przeskok odwrotny dla określonych wartości prądu pioruna i jego stromości czoła. Dokonując prostych przekształceń, warunek ten przyjmuje następującą postać

$$R_s < \frac{U_{ws} - L \frac{di_p}{dt}}{I_p} \quad (3)$$

Jeśli do zależności (3) w miejsce napięcia wierzchołka słupa wstawimy wartość wytrzymywanego przepięcia udarowego piorunowego izolatora (układu izolacyjnego)  $U_w$ , wówczas warunek ten można zapisać wzorem

$$U_w > L \frac{di_p}{dt} \quad (4)$$

Korzystając z zależności (3) i (4), wykonano niezależne obliczenia dla dwóch rodzajów słupów stałowych: kratowych i pełnościennych (tzw. słupów rurowych). Do obliczeń przyjęto wybrane trzy wartości szczytowe i stromości czoła prądu wyładowania piorunowego oraz przyjęto jednostkowe wartości indukcyjności

6 Napięcie doziemne przewodu roboczego składa się z napięcia roboczego i napięcia indukowanego przez prąd pioruna w przewodzie roboczym linii określa zależność 2.41.

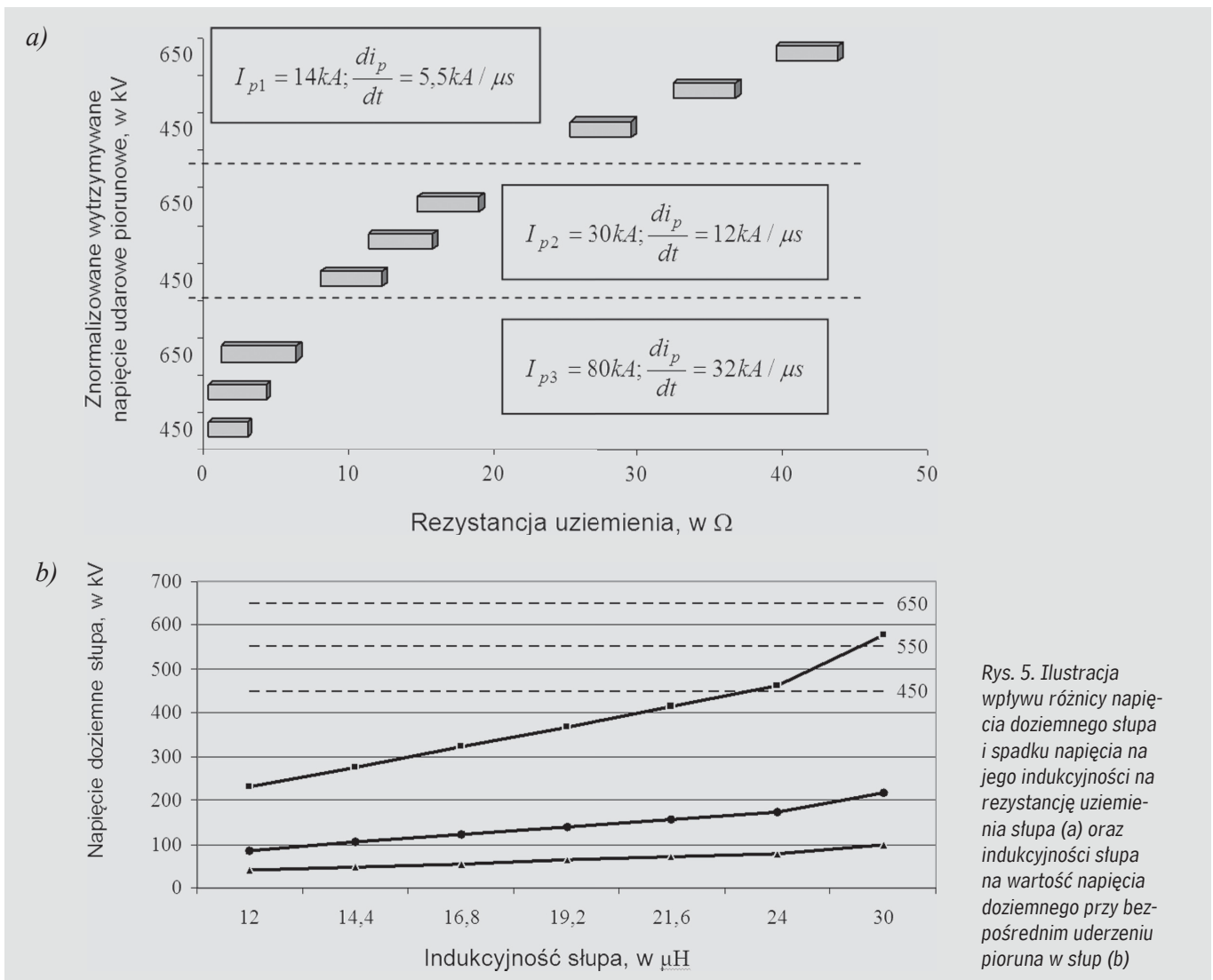
7 Indukcyjność słupa stalowego linii  $L_s = (0,5 \div 1,2) \times l$ , w  $\mu H$  [2]; można ją również określić ze wzoru na indukcyjność własną długiej cewki (przy czym

liczba zwojów  $z = 1$ )  $L_s = \frac{\mu z^2 \pi R^2}{l}$ , gdzie:  $l$  – długość słupa,  $z$  – liczba zwojów,  $R$  – promień długiej cewki [10].

słupów z przedziału  $0,5\text{--}1,2 \mu\text{H}/\text{m}^2$ , przy czym wartości skrajne przedziału odnoszą się odpowiednio do słupa pełnościennego oraz do słupa kratowego. Przeprowadzone obliczenia zostały wykonane przy założeniu, że linia napowietrzna jest wyposażona w przewód odgromowy, który łączy równolegle słup trafiony przez piorun z sąsiednimi słupami. Przy takim założeniu, dodatkowo uwzględniającym występowanie indukcyjności przewodu odgromowego i słupów sąsiednich linii, można przyjąć, że ok. 60% wartości szczytowej prądu pioruna przepływa przez słup uderzony przez piorun. Natomiast rozptył pozostałych 40% wartości prądu pioruna odbywa się symetrycznie, w obie strony linii. Otrzymane z obliczeń wyniki zaprezentowano na rys. 5.

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że porównanie dwóch wielkości, tj. napięcia doziemnego słupa  $U_{ws}$  z wytrzymywanym przepięciem udarowym piorunowym izolatora  $U_w$ , pozwala określić dopuszczalną wartość rezystancji uziemienia słupa  $R_s$ , przy której spodziewane wartości parametrów opisujących prąd pioruna ( $i_{pmax}$  i  $di_{pmax}/dt$ ) nie spowodują przeskoku (rys. 5a). Tym samym, przy określonej wartości rezystancji uziemienia słupa (np. wynikającej z praktycznych możliwości technicznych), można ocenić, czy wystąpi zagrożenie izolacji spowodowane wystąpieniem przeskoku odwrotnych.

W rozpatrywanym przypadku należy również zwrócić uwagę na to, że izolatory są naprężane w polu elektrycznym linii napięciem będącym różnicą między napięciem doziemnym słupa, które składa się z napięcia na uziomie i spadku napięcia indukcyjnego słupa, a napięciem doziemnym przewodu roboczego, składającego się z napięcia roboczego oraz napięcia indukowanego przez prąd pioruna. Zatem aby obniżyć wartość napięcia doziemnego słupa, a tym samym ograniczyć oddziaływanie pola na izolację, należy stosować uziomy konstrukcji wsporczych o niewielkich rezystancjach udarowych i/lub konstrukcje wsporcze o niskiej indukcyjności (np. stalowe słupy rurowe). Przykład zależności napięcia doziemnego słupa od jego indukcyjności przedstawiono na rys. 5b. Stosując odpowiednio niskie wartości indukcyjności konstrukcji wsporczych linii, można wykazać brak zasadności podwyższania stopnia poziomu wytrzymywanego napięcia udarowego piorunowego, co prowadzi do



Rys. 5. Ilustracja wpływu różnicy napięcia doziemnego słupa i spadku napięcia na jego indukcyjności na rezystancję uziemienia słupa (a) oraz indukcyjności słupa na wartość napięcia doziemnego przy bezpośrednim uderzeniu pioruna w słup (b)

optymalizacji marginesu między poziomem podstawowym izolacji a poziomem ochrony. Konsekwencje takiego działania przekładają się również na ograniczenie kosztów izolacji i ochrony.

Stosując zatem konstrukcje wsporcze o niskiej indukcyjności, mamy możliwość oddziaływania na zmniejszenie prawdopodobieństwa wystąpienia przeskoków odwrotnych, a tym samym wpływamy na poprawę niezawodności funkcjonowania tych elementów w sieci elektroenergetycznej.

## 5. PODSUMOWANIE

Przeprowadzona ocena prawidłowości uszeregowania poziomów wytrzymałości elektrycznej w rozważanych liniach napowietrznych, oszacowanie wartości ryzyka przeskoku dla samoregenerującej się izolacji linii oraz ocena stosowanych w tych sieciach zasad ochrony wykazały, że istnieją racjonalne przesłanki do modyfikacji zasad koordynacji izolacji oraz ochrony przed przepięciami. W szczególności wykazano możliwość obniżenia poziomu ochrony, przy stosowanych obecnie rozwiązaniach urządzeń do ochrony przed przepięciami. W praktyce dobór poziomów izolacji i ochrony powinien jednak dodatkowo uwzględniać spodziewany kształt przebiegów przepięciowych, starzenie się izolacji, wpływ czynników środowiskowych oraz wzajemne usytuowanie urządzeń chronionych i ochraniających. I chociaż rzeczywiste parametry elektryczne przepięcia piorunowego z reguły odbiegają (są łagodniejsze) od wartości przyjętych dla przebiegu znormalizowanego ( $1,2/50 \mu s$ ), zakres tych zmian wymaga jednak każdorazowej indywidualnej oceny badanego przypadku, uwzględniającej wymagania w zakresie wytrzymałości elektrycznej i ryzyka przeskoku.

Należy podkreślić, że rozważania prowadzone z wykorzystaniem uzyskanych wyników badań, analiz i ocen stanowią przyczynek do dalszego racjonalnego działania w kierunku modyfikacji zasad koordynacji izolacji, prowadzącej między innymi do uzyskania efektów ekonomicznych. Spodziewane efekty ekonomiczne będą lokowane zarówno w sferze rozwiązań technicznych, jak i oddziaływania na środowisko. Jednak wspólna korzyść będzie wynikała z ekonomiki działania przy realizacji elektroenergetycznych zamierzeń inwestycyjnych.

Przeprowadzone analizy potwierdzają również zasadność wprowadzenia do budownictwa sieciowego stalowych słupów pełnościennych, czyli tzw. słupów rurowych jako alternatywne rozwiązanie dla stalowych słupów kratowych. Niewątpliwie konstrukcje słupów rurowych uwzględniające czynniki optymalizujące ich budowę, z rezygnacją z tradycyjnych poprzeczników stalowych na rzecz układu izolacji kompozytowej włącznie, i poprawiające niezawodność linii napowietrznych są rozwiązaniem, po które coraz częściej sięgają operatorzy sieci przesyłowych i dystrybucyjnych w kraju i za granicą.

## BIBLIOGRAFIA

1. Flisowski Z., Technika wysokich napięć (wyd. 5), WNT, Warszawa 2005.
2. Gacek Z., Technika wysokich napięć. Izolacja wysokonapięciowa w elektroenergetyce. Przepięcia i ochrona przed przepięciami (wyd. 3), Skrypt Politechniki Śląskiej nr 2137, Gliwice 1999.
3. Jakubowski J.L., Podstawy teorii przepięć w układach elektroenergetycznych, PWN, Warszawa 1968.
4. Kosztaluk R., Flisowski Z., Koordynacja izolacji polskich sieci wysokich napięć, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 2/1998, s. 41–45.
5. Skomudek W., Computer analysis of overvoltage hazard due to lightning discharges in medium voltage overhead lines with covered conductors, *Journal of Electrical Engineering*, vol. 55, no. 5-6, Slovakia 2004, pp. 161–164.
6. Skomudek W., Assessment of overvoltage hazard for the polymer insulation of medium voltage electricity distribution cables. CIGRE Gen. Session 2008, rep. B1-201.
7. Skomudek W., The Comparative Analysis of Lightning Overvoltages in Distribution Lines on the Ground of Laboratory Tests and Measurements, *Journal of Material Science*, 3/2009.
8. Skomudek W., Analiza i ocena skutków przepięć w elektroenergetycznych sieciach średniego i wysokiego napięcia, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2008.
9. Skomudek W., Modyfikacja zasad koordynacji izolacji w sieciach wysokiego napięcia w aspekcie ekonomicznym, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 11b/2010.
10. Rawa H., Elektryczność i magnetyzm w technice, PWN, Warszawa 1994.