P 5344/80

ZESZYTY
NAUKOWE
POLITECHNIKI
ŚLĄSKIEJ

ELEKTRYKA

Z. 67
GLIWICE
1980

P.3347/80

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

ZESZYTY NAUKOWE

Nr 642

ZBIGNIEW GACEK

NIEZAWODNOŚĆ IZOLACJI LINII NAPOWIETRZNYCH WYSOKIEGO NAPIĘCIA NA TERENACH PRZEMYSŁOWYCH

PL ISSN 0072-4688

35 lat POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ W SŁUŻBIE SOCJALISTYCZNEJ OJCZYZNY

GLIWICE 1980

OPINIODAWCY

Prof. mgr inż. Tadeusz Stępniewski
Prof. dr hab. inż. Jerzy Sozański
Doc. dr hab. inż. Romuald Kosztaluk

REDAKTOR NACZELNY WYDAWNICTW UCZELNIANYCH
POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ
Jan Bandrowski

REDAKTOR DZIAŁU
Zofia Cichowska

SEKRETARZ REDAKCJI
Wojciech Mikołajków

OPRACOWANIE REDAKCYJNE
Eugenia Mandrak

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Śląskiej

Dział Wydawnictw Politechniki Śląskiej
Gliwice, ul. Kujawska 2

Nakł. 160+90 Ark. wyd. 6.58 Ark. druk. 6,75 Papier offset. kl. V. 70x100, 70 g
Oddano do druku 26.11.1979 Podpis. do druku 17.12.1979 Druk ukończ. w stycz. 1980
Zamówienie 1540/79 Cena zł 16,—

Skład, fotokopie, druk i oprawę
wykonano w Zakładzie Graficznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach

P. 9/81

SPIS TREŚCI

Str.

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SYMBOLI I OZNACZEŃ 5

1. WSTĘP 7

2. ANALIZA MODELOWA WARUNKÓW PRACY IZOLACJI LINIOWEJ NA TERENACH PRZEMYSŁOWYCH 11

2.1. Izolacja linii napowietrznych na terenach przemysłowych 11

2.2. Narażenia i warunki eksploatacyjne 16

2.3. Wytrzymałość elektryczna układów izolacyjnych 20

3. METODYKA OCENY NIEZAWODNOŚCI IZOLACJI LINII NA TERENACH PRZEMYSŁOWYCH 28

3.1. Matematyczne modelowanie niezawodności izolacji liniowej 28

3.2. Modele obliczeniowe oparte na wynikach badań terenowych i laboratoryjnych 35

3.3. Ocena wpływu kształtu geometrycznego i położenia izolatorów . 43

3.4. Modele odnowy izolacji liniowej w warunkach zabrudzeniowych . 48

3.5. Niezawodnościowe modele obliczeniowe 54

4. TECHNICZNO-EKONOMICZNE ASPEKTY ZAWODNOŚCI IZOLACJI LINIOWEJ 58

4.1. Uogólniony model ekonomiczny 58

4.2. Koszty roczne izolacji liniowej w aglomeracjach przemysłowych 63

4.3. Uzasadniony poziom zawodności i wytrzymałości izolatorów 68

4.4. Dobór izolacji liniowej na terenach przemysłowych 73

5. KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ 82

6. WNIOSKI 84

LITERATURA 86

Streszczenia 95

Załączniki 98

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SYMBOLI I OZNACZEŃ

a - powietrzny odstęp izolacyjny (symbol ogólny)

a_u - droga upływu izolatora (łańcucha izolatorów),

a'_u - jednostkowa droga upływu izolatora,

A, B - parametry, określające jednostkową drogę upływu dla założonej zawodności rocznej łańcucha izolatorów,

c_1 - cena 1 cm drogi upływu izolatora,

$f_\omega(t)$, $F_\omega(t)$ - gęstość prawdopodobieństwa i dystrybuanta czasu między kolejnymi zakłóceniami w stanie zagrożenia ω,

$F(\bar{z}, \sigma)$ - dystrybuanta wytrzymałości (p.u.) układu izolacyjnego,

k_z - równoważnik kosztu strat zawodnościowych,

K - całkowity roczny koszt układu izolacyjnego (izolacji linii),

K_I, K_{rr} - nakład inwestycyjny oraz koszt rozszerzonej reprodukcji,

K_E, K_Z - roczny koszt eksploatacji oraz zawodności,

K_w - średni koszt likwidacji uszkodzeń na 1 wyłączenie linii,

l - długość linii,

L - długość części izolacyjnej izolatora,

$ł$ - łańcuch izolatorów (symbol ogólny),

m_z n_z - zastępcza liczba rzędów obliczeniowych na 1 km linii,

$N_w(T)$ - oczekiwana liczba wyłączeń linii w ciągu roku,

P - prawdopodobieństwo lub zawodność (symbol ogólny),

P_1, P_2 - zawodność zabrudzeniowa łańcucha izolatorów przy napięciu przemiennym oraz przepięciach dorywczych wolnozmiennych,

P_3, P_4 - zawodność izolacyjnego odstępu powietrznego przy przepięciach łączeniowych oraz piorunowych,

P_{1d} - dopuszczalna zawodność roczna łańcucha obliczeniowego,

Q_{SPZ} - prawdopodobieństwo nieudanego zadziałania SPZ,

r_N - rata rozszerzonej reprodukcji,

$r_\omega(t)$ - niezawodność układu izolacyjnego w stanie zagrożenia ω,

$R(t)$ - niezawodność izolacji linii,

s - wskaźnik sezonowości narażenia zabrudzeniowego,

t - czas (symbol ogólny),

t' - zredukowany czas eksploatacji,

T - okres rocznej eksploatacji (rok kalendarzowy),

T' - zredukowany rok obliczeniowy,

T_s - czas trwania sezonu narażenia zabrudzeniowego,

U_m - najwyższe dopuszczalne napięcie międzyprzewodowe,

U_{prz} - zabrudzeniowe napięcie probiercze,

U_{z50} - 50-procentowe napięcie przeskoku zabrudzeniowego,

U_ω - napięcie przeskoku w stanie zagrożenia ω,

z_ω - wytrzymałość układu izolacyjnego (p.u.) w stanie zagrożenia ω,

$\bar{z}_{1;\ min}$ - najmniejsza sezonowa wytrzymałość zabrudzeniowa (wartość średnia),

$\bar{z}_d$ - średnia uzasadniona wytrzymałość (p.u.) łańcucha izolatorów,

$\varkappa$ - konduktywność powierzchniowa powłoki zabrudzeniowej,

$\bar{\lambda}_w\ (T)$ - średnia roczna intensywność wyłączeń zabrudzeniowych na 100 km linii,

$\lambda_{1,\ max}$ - największa sezonowa intensywność zakłóceń zabrudzeniowych,

σ_ω - względne odchylenie standardowe napięcia przeskoku,

τ - czas do zakłócenia lub między kolejnymi zakłóceniami,

τ_o - okres odnowy,

ω - stan zagrożenia izolacji.

1. WSTĘP

Linie napowietrzne wysokiego napięcia na terenach przemysłowych znajdują się pod wpływem różnorodnych narażeń i wykazują pewną specyfikę, wynikającą m.in. z konieczności:

- wprowadzenia do obszarów zabudowanych dużych mocy przy napięciu 110, 220, a nawet 400 kV (złożona konfiguracja sieci, mniejsze rozpiętości przęseł i długości linii, obostrzenia związane z wytrzymałością mechaniczną elementów konstrukcyjnych i izolacyjnych, rozdzielczy charakter sieci 110 kV przy ograniczonych terenach pod budowę),
- uwzględnienia skutków gospodarczych wynikających z przerw w zasilaniu odbiorców przemysłowych i trudności eksploatacyjnych energetyki (zwiększone wymagania dotyczące ciągłości dostawy energii oraz niezawodności elementów linii, rozbudowane układy zabezpieczeń i rezerwowania odbiorców, profilaktyczne zabiegi eksploatacyjne),
- zapewnienia dostatecznej odporności izolacji na rosnące zanieczyszczenie atmosfery w możliwie długim okresie czasu (układy izolacyjne o dużej wytrzymałości i niezawodności zabrudzeniowej),
- zmniejszenia zakłóceń radioelektrycznych i oddziaływań pola elektrycznego (odpowiedni osprzęt łukochronny, ograniczenia w wyborze trasy linii) oraz oddziaływań związanych z dużymi prądami (doziemienia, wpływ na obwody telekomunikacyjne i sterownicze).

Zagadnienia te mają w aglomeracjach miejsko-przemysłowych duże znaczenie techniczne i gospodarcze, szczególnie w okresie napiętego bilansu energetycznego i rosnącego zanieczyszczenia atmosfery. Pomimo trudności i ograniczeń, linie napowietrzne decydować będą jeszcze przez wiele dziesiątków lat m.in. o ciągłości zasilania dużych odbiorców przemysłowych; istotne znaczenie posiada w tym przypadku niezawodność izolacji. Pożądane jest dalsze zmniejszenie liczby awaryjnych wyłączeń linii oraz wynikających stąd strat i zaburzeń technologicznych u odbiorców - przy ograniczeniu kłopotliwych czynności eksploatacyjnych. Wzrost mocy i napięć przesyłowych wymaga jednocześnie ograniczenia wymiarów słupów i układów izolacyjnych w nowo budowanych liniach krajowych oraz wprowadzenia w przyszłości izolatorów z materiałów hydrofobowych (syntetycznych), odpornych na agresywne zanieczyszczenia w powietrzu [65, 105, 140].

Prace nad racjonalizacją układów izolacyjnych prowadzone są od wielu lat w ramach Międzynarodowej Komisji Elektrotechnicznej (IEC). Wyniki tych prac podawane są w formie unormowanych zaleceń w zakresie projektowania

eksploatacji i produkcji. W ciągu kilkudziesięciu lat wprowadzono wymagania wytrzymałościowe przy napięciu przemiennym oraz udarach piorunowych i łączeniowych, będące podstawą koordynacji izolacji w ujęciu deterministycznym (konwencjonalnym). Na początku lat 70 ustalono statystyczne zasady wymiarowania, doboru i koordynacji izolacji napowietrznej w sieciach najwyższych napięć - dopuszczające uzasadnione ryzyko przeskoku i pozwalające na dostosowanie wymagań do istniejących potrzeb eksploatacyjnych [167, 168]. Nie rozwiązanym do końca zagadnieniem jest m.in. dobór i statystyczna koordynacja izolacji w warunkach zwiększonej upływności powierzchniowej. Prace w tym kierunku prowadzone są nadal przez Grupę Roboczą WG 6/TC 36 (od 1977 roku); dokument 36 (Sekretariat) - 79 znajduje się w końcowym stadium opracowania redakcyjnego.

Badania związane z wytrzymałością powierzchniową izolacji, mechanizmem przeskoku zabrudzeniowego i opanowaniem techniki probierczej rozpoczęto w końcu lat 30 (w kraju w latach 50). Spośród bardzo dużej liczby opracowań na ten temat, należy wymienić polskie monografie J. Juchniewicza [67], J. Saferny [132] i Z. Pohla [126, 127] oraz radziecką monografię S.D. Merchaleva i E.A. Solomonika [115]; zawierają one obszerne zestawienia publikacji (głównie z lat 50 i 60). W spisie literatury podano pozycje przede wszystkim z lat 70, opublikowane przez autorów z zagranicznych ośrodków badawczych (głównie z RFN, Francji, Włoch, Wielkiej Brytanii, Japonii, USA, CSSR, NRD, ZSRR). Dotyczy to również wyników badań i dotychczasowych doświadczeń eksploatacyjnych, publikowanych w materiałach kolejnych sesji Międzynarodowej Konferencji Wielkich Sieci (CIGRE) w latach 1970 - 78, np. [59, 73, 75, 93, 96, 149].

Jednej z pierwszych udanych prób probabilistycznej oceny zagrożenia izolacji liniowej w warunkach zanieczyszczeń przemysłowych dokonał F. Szymik w pracy [145]; techniczno-ekonomiczne ujęcie tego zagadnienia przedstawili autorzy radzieccy w pracy [2]. Próby statystycznego sposobu wymiarowania i koordynacji izolacji w sieciach najwyższych napięć przy uwzględnieniu kryteriów techniczno-ekonomicznych podejmowane są również w krajach Europy zachodniej [5, 6, 23, 25, 70, 110, 122].

Mechanizmy wyładowań i wytrzymałość elektryczna układów, szczególnie długich odstępów powietrznych przy udarach łączeniowych i piorunowych, opisane są m.in. w monografii R. Kosztaluka [84]. Podano w niej wyniki badań, wykonane głównie we francuskim ośrodku Les Renardières - wykorzystane następnie przy wymiarowaniu izolacji sieci 400-1500 kV. Zagadnienie izolacji, jako czynnika decydującego o pewności ruchowej linii napowietrznych 220 kV, stanowiło temat pracy W. Czaplaka [17]. Zestawienie dotychczasowych doświadczeń krajowych w zakresie oceny parametrów zabrudzeń, podziału terenu na strefy oraz doboru izolatorów na podstawie wyników badań terenowych i wymaganej drogi upływu, zawierają raporty [133] i [86]. Zagadnienia związane z oceną wytrzymałości powierzchniowej i doborem izolatorów na podstawie wyników pomiaru prądu upływu omówione są m.in. w pracach [14] i [149].

Dotychczasowe prace autora - wykonywane w Politechnice Śląskiej od połowy lat 60 pod kierunkiem prof. T. Stępniewskiego - koncentrują się głównie na techniczno-ekonomicznej ocenie zagrożenia izolatorów liniowych na terenach o silnym zanieczyszczeniu atmosfery. W rozprawie [28] dokonano pierwszych prób szacunkowych obliczeń niezawodnościowych oraz zastosowania uzasadnień techniczno-ekonomicznych do oceny i doboru izolatorów w liniach 110-220 kV na Górnym Śląsku. Oceną niezawodności zabrudzeniowej izolacji zajmował się również autor podczas stażu naukowego w ośrodku badawczym energetyki francuskiej (EdF) w Clamart pod Paryżem [30 do 33]. Wyniki badań wykonanych we Francji, a następnie w kraju - przy współpracy z Biurem Badań i Studiów ZE Gliwice - zostały wykorzystane w rozprawie [36], wydanej w 1977 roku. Dalsze prace opublikował autor w ostatnim okresie w krajowych i zagranicznych czasopismach naukowo-technicznych [37 do 45].

Monograficzne opracowanie stanowi próbę przedstawienia koncepcji praktycznej oceny niezawodności izolacji linii napowietrznych wysokiego napięcia na terenach przemysłowych w szerokim ujęciu techniczno-ekonomicznym (przy uwzględnieniu kosztów związanych z zakupem, eksploatacją i zawodnością izolatorów). Celem pracy jest zaproponowanie metod i modeli obliczeniowych - pozwalających na ocenę niezawodności izolacji, techniczno-ekonomicznych skutków oddziaływania różnorodnych narażeń elektrycznych i środowiskowych w wieloletnim okresie eksploatacji oraz określenie wymiernych i uzasadnionych wymagań niezawodnościowych dla izolatorów w rzeczywistych warunkach zabrudzeniowych. Do rozważań wybrano zagadnienia niedostatecznie dotąd opracowane, a posiadające praktyczne znaczenie dla prac projektowych i eksploatacyjnych - zmierzających do dalszego uzasadnionego zwiększenia niezawodności izolacji napowietrznej. Proponowane metody obliczeniowe wynikają z analiz modelowych rzeczywistych warunków pracy i wytrzymałości układów izolacyjnych oraz z wybranych badań terenowych i laboratoryjnych, a także z wykonanych przez autora statystycznych analiz zakłóceń w liniach napowietrznych w południowym makroregionie przemysłowym (Zakłady Energetyczne Okręgu Południowego).

Wydaje się, że spośród rozpatrywanych zagadnień na podkreślenie zasługują:

- próba modelowego ujęcia wytrzymałości i niezawodności układów izolacyjnych dla rzeczywistych narażeń elektrycznych i środowiskowych,
- metoda obliczania zawodności izolacji linii, przy uwzględnieniu losowej zmienności narażeń środowiskowych,
- propozycje modeli matematycznych, umożliwiających wykorzystanie wyników badań izolatorów do obliczeń niezawodnościowych,
- analiza wpływu kształtu i położenia izolatorów na ich niezawodność zabrudzeniową,
- zastosowanie elementów teorii odnowy do ustalania częstości czyszczenia izolatorów w szczególnie trudnych warunkach środowiskowych,

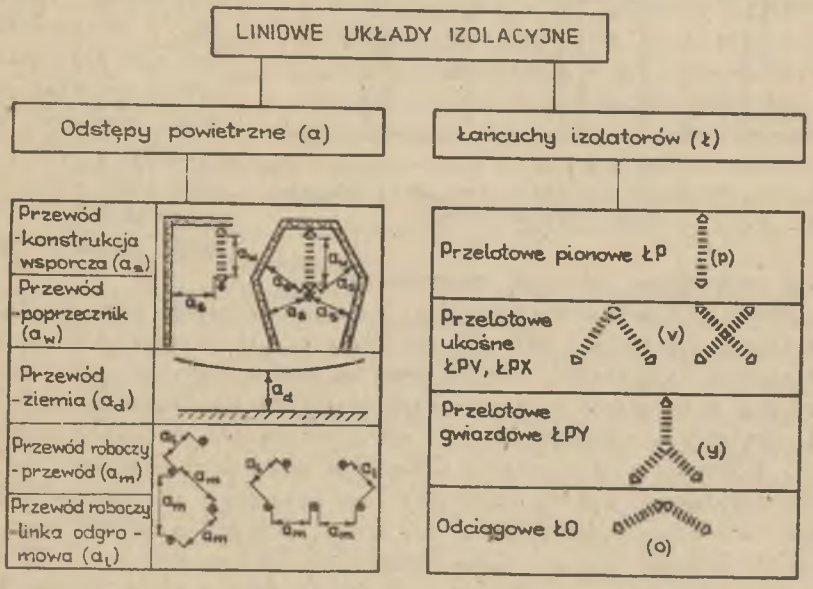
- analiza kosztów inwestycyjnych, eksploatacyjnych i zawodności izolacji krajowych linii 110-220 kV na terenach przemysłowych,
- metoda wyznaczania dopuszczalnej zawodności i uzasadnionej wytrzymałości zabrudzeniowej izolatorów,
- próba oparcia doboru izolatorów do warunków zabrudzeniowych na przesłankach techniczno-ekonomicznych.

Zakres opracowania obejmuje linie o napięciu znamionowym od 110 do 400 kV, znajdujące się na terenach o niepomijalnym zanieczyszczeniu atmosfery. Niezawodnościowe modele obliczeniowe i praktyczne rozważania techniczno-ekonomiczne dotyczą linii 110-220 kV, ze względu na brak danych dla linii 400 kV - nie wprowadzanych na ogół w głąb aglomeracji i nie zasilających bezpośrednio odbiorców. Szczególną uwagę zwrócono na łańcuchy izolatorów w warunkach zabrudzeniowych i związane z nimi odstępy powietrzne (bez uwzględniania wychyleń łańcuchów i przewodów pod wpływem wiatru). Wyniki pomiarowe i eksploatacyjne dotyczą izolatorów długopniowych i kołpakowych, głównie z materiałów ceramicznych. Zakres rozprawy nie obejmuje zagadnień, związanych z mechanizmami wyładowań i zjawiskami starzeniowymi oraz mechanicznymi własnościami izolatorów i wymiarowaniem osprzętu łukochronnego.

2. ANALIZA MODELOWA WARUNKÓW PRACY IZOLACJI LINIOWEJ NA TERENACH PRZEMYSŁOWYCH

2.1. Izolacja linii napowietrznych na terenach przemysłowych

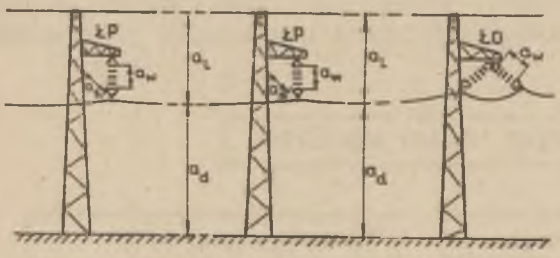
Izolacja linii napowietrznej, składająca się z łańcuchów izolatorów i odstępów powietrznych, jest obiektem pozornie nieskomplikowanym pod względem własności elektrycznych (nie rozpatruje się własności mechanicznych oraz odporności na łuk elektryczny izolatorów i osprzętu). Stanowi przykład samoregenerującej się izolacji zewnętrznej [123, 167], tzn. odtwarzającej swoje własności po przeskokach (z wyjątkiem elementów uszkodzonych termicznie, mechanicznie i przebitych izolatorów kołpakowych). W rzeczywistości, z powodu zróżnicowania ukształtowania i długości odstępów oraz stosowania rozmaitych rodzajów łańcuchów i typów izolatorów, jest ona zbiorem układów niejednorodnych. Najważniejsze rodzaje układów izolacyjnych, spotykanych w liniach wysokiego napięcia na terenach przemysłowych, zestawiono na rys. 1.



Rys. 1. Zestawienie niektórych rodzajów układów izolacyjnych w liniach wysokiego napięcia na terenach przemysłowych

Pod względem wytrzymałościowym i niezawodnościowym, największe znaczenie praktyczne mają układy współpracujące na konstrukcjach wsporczych, tj. łańcuchy izolatorów oraz odstępy powietrzne między przewodami roboczymi a słupem. Wymiary układów są od siebie uzależnione i wynikają z wymagań technicznych, związanych z wytrzymałością przy narażeniach elektrycznych i środowiskowych w czasie eksploatacji; w praktyce dąży się do ich zmniejszenia i najlepszego wykorzystania własności izolacyjnych [64, 84, 142]. Z łańcuchami izolatorów związane są bezpośrednio odstępy powietrzne: przewód - konstrukcja wsporcza a_s oraz przewód-poprzecznik a_w (rys. 1). Wymiary tych odstępów wynikają na ogół z długości łańcuchów izolatorów - szczególnie w warunkach zwiększonej upływności powierzchniowej. Łańcuchy wykazują z kolei zróżnicowaną wytrzymałość i niezawodność, m.in. ze względu na specyfikę zawieszenia izolatorów (rozdział 3.3). Na terenach przemysłowych spotyka się bowiem układy specjalne ukośne ŁPV (odwrócone w zawieszeniu przelotowo-odciągowym) i gwiazdowe ŁPY - oprócz stosowanych powszechnie łańcuchów przelotowych pionowych ŁP i odciągowych ŁO.

Pod względem elektrycznym, izolacja linii napowietrznej stanowi zbiór współpracujących z sobą elementów równoległych o niejednakowej na ogół wytrzymałości względem ziemi. Przykład izolacji doziemnej odcinka linii, składającej się z łańcuchów przelotowych i odciągowych oraz czterech rodzajów odstępów powietrznych, pokazano na rys. 2. W rzeczywistości, izolacja jest obiektem znacznie bardziej złożonym, jeśli uwzględnić rozmaite rodzaje słupów i wynikającą stąd różną konfigurację układów izolacyjnych, łańcuchy specjalne oraz powietrzne odstępy międzyfazowe.



Rys. 2. Przykład izolacji doziemnej odcinka linii napowietrznej

W zakresie wykonywanej analizy, uzasadnione wydaje się pominięcie w dalszych rozważaniach odstępów powietrznych nie związanych bezpośrednio z łańcuchami izolatorów - decydującymi na ogół o elektrycznych własnościach izolacji w warunkach zanieczyszczeń przemysłowych (rozdział 2.3). Pominięcie odstępów międzyfazowych oraz odstępów przewód roboczy-przewód odgromowy i przewód roboczy-ziemia pozwala na znaczne uproszczenie obliczeń niezawodnościowych. Nie do pominięcia jest natomiast niejednorodność zbioru łańcuchów (przelotowe pionowe, odciągowe, układy specjalne) oraz zróżnicowanie narażeń środowiskowych (przynależność odcinków linii do umownych stref zabrudzeniowych). Przy takich założeniach, analizę zawodności zabrudzeniowej izolacji ułatwiają uproszczone modele obliczeniowe. Zastępu-

jąc izolację linii modelem obliczeniowym, należy uwzględnić jej specyfikę na rozpatrywanym terenie oraz liczność różnych rodzajów łańcuchów i długości odcinków linii w kolejnych strefach zabrudzeniowych. Przykłady takich modeli, zaproponowanych przez autora w pracy [44] i wykorzystanych w rozdziale 3.5, znajdują się w zał. 1. W konkretnych przypadkach praktycznych mogą być one zróżnicowane - zależnie od liczności stosowanych rodzajów łańcuchów oraz od warunków środowiskowych wzdłuż trasy linii, która nie musi np. przebiegać przez wszystkie strefy zabrudzeniowe.

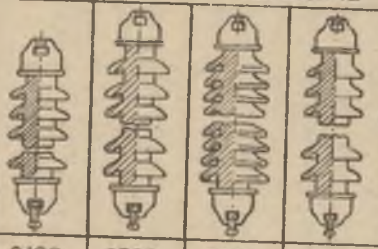
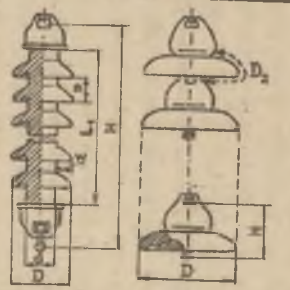
Proponowane ujęcie modelowe - przydatne w obliczeniach niezawodnościowych - jest uproszczone, gdyż w tej samej linii stosuje się często różne izolatory. Do połowy lat 70 próbowano ujednolicić izolację poprzez powszechne wprowadzenie do eksploatacji możliwie małej liczby typów izolatorów długopniowych i konsekwentną eliminację izolatorów kołpakowych. Wskutek dużego niedoboru takich konstrukcji, obecna sytuacja nadal nie jest zadowalająca, ponieważ zaczęto ponownie stosować różnorodne typy izolatorów (w tym również kołpakowe szklane). Wartości parametrów i współczynników konstrukcyjnych niektórych typowych izolatorów długopniowych i kołpakowych zestawiono w tab. 1. W liniach 110-220 kV stosowane są najczęściej izolatory długopniowe krajowe (typu LP 75/17) lub z krajów RWPG(typu VKLF 75/16 i VKLS 75/21), a na znacznie narażonych odcinkach linii 400 kV również z krajów EWG (np. izolatory z firm Norden i RWI).Na terenach o mniejszym zanieczyszczeniu, w liniach 220 i 400 kV, wprowadza się z konieczności izolatory kołpakowe szklane (importowane z krajów RWPG).

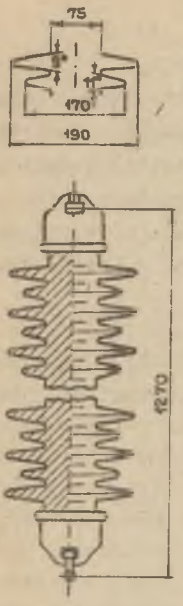
Ze względu na dużą różnorodność istniejących obecnie konstrukcji izolatorów liniowych, ograniczono się do przedstawienia jedynie niektórych rozwiązań. Przegląd najważniejszych typów izolatorów, w tym również specjalnych przeciwzabrudzeniowych z kloszami spiralnymi i schodkowymi, znaleźć można w pracach [126] i [132]. Badania eksperymentalne, mające na celu dobór odpowiednich kształtów izolatorów do warunków zabrudzeniowych, przeprowadzane są nadal w wielu krajach. Jednocześnie, w ramach IEC, prowadzi się prace normalizacyjne nad standaryzacją zasadniczych wymiarów izolatorów długopniowych i kołpakowych.

Przykładem rozwiązania o właściwie zaprojektowanym kształcie jest izolator typu LP 75/17 wg PN-71/E-91056, skonstruowany w Politechnice Śląskiej w 1966 roku. Z badań terenowych, doświadczeń eksploatacyjnych w ZE Gliwice [89] i prób laboratoryjnych [140] wynika, że izolator ten spełnia swoje zadania nawet w warunkach umiarkowanych zabrudzeń. Pomimo mniejszej drogi upływu i długości konstrukcyjnej, jest on praktycznie równoważny wytrzymałościowo prawie dwukrotnie droższemu izolatorowi VKLF 75/16 (zał. 2, rys. 1-Z. 2). Jednym z ciekawych i udanych rozwiązań specjalnych jest np. zachodnioniemiecki izolator długopniowy z kloszami o przemiennie dwóch różnych średnicach (rys. 3). Jak wykazały badania eksploatacyjne, terenowe i laboratoryjne, ma on korzystne własności powierzchniowe w warunkach silnych zabrudzeń przemysłowych [58]. Wynika to jednocześnie z dużej dro-

Niektóre parametry i współczynniki konstrukcyjne izolatorów stosowanych w krajowych liniach 110 – 400 kV

Tabela 1

Typ	LP 75/17	VKLF 76/E	VKLS 75/21	2375 17 N	LK 280/170	LKZ 280/170	PS – 16 B	Uwagi
Producent (kraj)	PRL	NRD		Dania	PRL		ZSRR	
Materiał izolacyjny	Porcelana						Szkło	
Szkic wymiarowy								
Droga upływu a_u mm	2100	2500	3350	2090	300	420	397	
Długość montażowa H [mm]	1120	1270	1270	1270	170	170	170	
Średnica klosza D [mm]	175	170	195	150	280	280	280	Wymiary z rysunków konstrukcyjnych lub danych katalogowych [117, 175, 176]
Średnica pnia d [mm]	75	75	75	75	–	–	–	
Wysięg klosza w [mm]	50	47	60	38	–	–	–	
Podziałka kloszowa p [mm]	52	65	48	60	–	–	–	
Odstęp między okuciami L_1 [mm]	920	1060	1060	1060	–	–	–	
Zastępcza średnica klosza D_z [mm]	–	–	–	–	147	129	~133	$D_z = a_u/\pi f = a_u/\pi \pi R_p$
Współczynnik kształtu f	6,9	7,7	9,2	~7,1	0,65	1,04	0,95	przy czym $f = \frac{1}{\pi}\int_0^{a_u} \frac{da_u}{D(a_u)}$
a_u/L_1	2,28	2,36	3,16	1,97	–	–	–	
a_u/D_z	–	–	–	–	2,04	3,26	~2,92	oraz rezystancja powierzchniowa
w/p	0,96	0,73	1,26	0,63	–	–	–	$R_p = \frac{1}{\pi \pi}\int_0^{a_u} \frac{da_u}{D(a_u)} = \frac{f}{\pi}$



Rys. 3. Izolator długopniowy specjalny typu VKL 75/18 + 18 (RFN) z kloszami o średnicach przemiennych i drodze upływu a_u = 4250 mm [58]

gi upływu i zastosowania wielu cienkich i gładkich kloszy, co powoduje wielokrotny podział wędrujących łuków podłużnych, ogranicza prądy upływu i utrudnia powstanie przeskoku zabrudzeniowego.

W pracy nie rozpatruje się izolatorów z hydrofobowych tworzyw syntetycznych, które - jak dotąd-nie znajdują zastosowania w krajowych liniach wysokiego napięcia. Za granicą, ograniczony zakres stosowania materiałów syntetycznych spowodowany był ich małą odpornością na narażenia środowiskowe i wyładowania powierzchniowa, ale zauważalny jest wyraźny postęp w tej dziedzinie. Szczególnie dobre rezultaty uzyskuje się w przypadku niektórych odmian elastycznych silikonów; wykorzystując dużą wytrzymałość mechaniczną włókna szklanego można skonstruować izolatory prętowe a nawet poprzeczki izolacyjne [12, 13, 137, 140, 146]. Rozwiązania takie są szczególnie przydatne dla linii najwyższych napięć, ze względu na znaczne korzyści konstrukcyjne, wymiarowe i eksploatacyjne. Do najważniejszych zalet takich izolatorów należą: bardzo duża wytrzymałość mechaniczna, mała masa, duża swoboda kształtowania powierzchni, hydrofobowe własności tworzyw, duża długość montażowa ogniw, odporność na działanie łuku elektrycznego [108]. Obecnie opracowywane są zalecenia IEC, dotyczące metod badań izolatorów z tworzyw syntetycznych [69].

Na terenach o bardzo silnym zanieczyszczeniu atmosfery możliwe jest również stosowanie izolatorów ze szkliwem półprzewodzącym - w celu podwyższenia napięcia przeskoku zabrudzeniowego, opanowania zakłóceń radioelektrycznych, zmniejszenia długości łańcuchów, eliminacji drogich i niewygodnych układów specjalnych [141]. Problemy związane z zapewnieniem dostatecznej trwałości i odporności szkliw na wyładowania powierzchniowe nie zostały jeszcze całkowicie rozwiązane, ale zastosowanie tlenków tytanu i antymonu znacznie zwiększyło stabilność ich własności [27, 88, 96, 119, 131].

Wymienione zagadnienia technologiczno-konstrukcyjne wykraczają poza zakres pracy. Wydaje się jednak, że będą one aktualne w kraju już w niedługim czasie, kiedy spełnienie narastających wymagań izolacyjnych nie będzie możliwe jedynie na drodze ulepszania istniejących rozwiązań, lecz będzie wymagało bardziej radykalnych zmian koncepcji konstrukcyjnych i technologicznych [65, 105, 140].

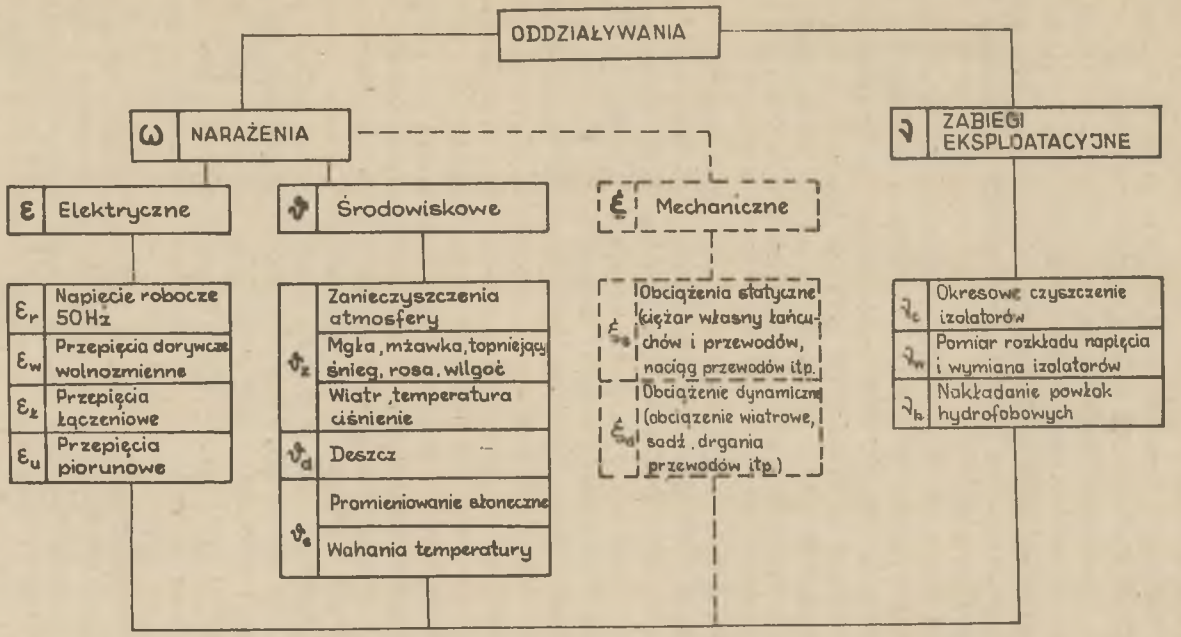
2.2. Narażenia i warunki eksploatacyjne

Izolacja linii napowietrznych na terenach przemysłowych podlega różnorodnym oddziaływaniom w postaci losowych narażeń elektrycznych, środowiskowych i mechanicznych (pominięto termiczny wpływ łuku elektrycznego) oraz poddawana jest zabiegom eksploatacyjnym. Na rys. 4 ograniczono się do zestawienia najważniejszych z nich; parametry charakteryzujące własności elektryczne układów izolacyjnych, będących pod wpływem tych narażeń, omówione są w rozdziale 2.3.

W uproszczonej analizie, narażenia występujące na odcinku linii w niewielkim przedziale czasu można rozpatrywać jako uogólniony wielowymiarowy wektor losowy ω o składowych zestawionych na rys. 4(w rzeczywistości jest to skomplikowana, wielowymiarowa funkcja losowa). Narażenia elektryczne, będące bezpośrednią przyczyną przeskoków w czasie eksploatacji, spowodowane są trwale przyłożonym przemiennym napięciem roboczym (ε_r) oraz krótkotrwałymi przepięciami: dorywczymi wolnozmiennymi (ε_w), łączeniowymi($\varepsilon_ł$) i piorunowymi (ε_u). Napięcie robocze linii jest tylko w przybliżeniu wartością stałą. W rzeczywistości, zależy ono m.in. od położenia rozpatrywanego punktu względem węzłów wytwórczych i rozdzielczych oraz od dobowych i sezonowych zmian obciążenia. Wahania te nie są jednak duże i zgodnie z postanowieniami IEC [167, 168], doziemne napięcie robocze można traktować jako wielkość deterministyczną o wartości odpowiadającej najwyższemu napięciu dopuszczalnemu $U_m/\sqrt{3}$. Dla linii 110, 220 i 400 kV wartości skuteczne międzyfazowego napięcia dopuszczalnego U_m wynoszą odpowiednio 123, 245 i 420 kV [160]. Wartość przepięć, będących zmiennymi losowymi, wyrażane są najczęściej w jednostkach względnych (p.u.), tj. w odniesieniu do wartości szczytowej najwyższego doziemnego napięcia roboczego $\sqrt{2}\,U_m/\sqrt{3}$ (krotności przepięć doziemnych i międzyfazowych).

Przepięcia dorywcze wolnozmienne mają postać słabo tłumionych oscylacji o czasie trwania dochodzącym do ok. 1 s. Powstają m.in. wskutek nagłych zmian obciążenia i zwarć doziemnych oraz zjawisk rezonansowych i ferrorezonansowych; podział, parametry i środki ograniczania tych przepięć omówione są w pracy [49]. Dla sieci o napięciu 110-400 kV ze skutecznie uziemionym punktem zerowym, dorywcze przepięcia doziemne o częstotliwości zbliżonej do 50 Hz nie przekraczają na ogół 1,5 p.u. [49, 101, 137, 167].

Przepięcia łączeniowe mają najczęściej postać silnie tłumionych i szybkozmiennych oscylacji o czasie trwania rzędu ms, wywołanych łączeniami operacyjnymi (w czasie normalnej pracy układu) lub zakłóceniowymi (podczas likwidacji zwarć). Wartości tych przepięć - mających charakter typowo stochastyczny - zależą od schematu, parametrów i stopnia obciążenia sieci oraz własności wyłączników; największe przepięcia powstają przy operacjach łączeniowych w liniach nieobciążonych [20, 83, 169]. Z punktu widzenia zagrożenia eksploatacyjnego, są one szczególnie istotne dla izo-



Rys. 4. Zestawienie oddziaływań dla izolacji linii napowietrznych na terenach przemysłowych

lacji linii przesyłowych o napięciu 400 kV i wyższym. Statystyczne (98 procentowe) doziemne przepięcia łączeniowe w sieciach 110-400 kV nie przekraczają na ogół wartości 2,1 p.u. (wyłączniki z rezystorami tłumiącymi) lub 2,3 p.u. (wyłączniki bez rezystorów). Statystyczne przepięcia międzyfazowe są większe od doziemnych ok. 1,5-krotnie (nie przekraczają 3,3 p.u.), ponieważ składowe na sąsiednich fazach różnią się zwykle biegunowością i osiągają wartości szczytowe praktycznie w tym samym przedziale czasu [24, 48, 50, 169].

Przepięcia piorunowe, spowodowane wyładowaniami atmosferycznymi, mogą osiągać wartości dochodzące w miejscu uderzenia do kilku MV, ale czas ich trwania jest bardzo krótki (do kilkudziesięciu μs); przepięcia międzyfazowe nie są większe od doziemnych. Mają one charakter stochastyczny i powinny być uwzględniane przy wymiarowaniu układów izolacyjnych [18, 57, 64, 85], gdyż mogą być przyczyną przeskoków odwrotnych (szczególnie na słupach).

Spośród narażeń środowiskowych, wymienionych na rys. 4, na terenach przemysłowych najważniejsze są zanieczyszczenia w powietrzu (pyły, gazy). Wskutek wiatru i ruchów termicznych powietrza (przy współudziale pola elektrycznego i ciśnienia), zanieczyszczenia te osadzają się na powierzchni izolatorów. W połączeniu z mgłą, mżawką, topniejącym śniegiem i wilgocią w powietrzu - są one przyczyną tzw. narażenia zabrudzeniowego (v_z). O szkodliwości zabrudzeń decydują: przewodnictwo elektrolitów powstających przy łączeniu się pyłów i gazów z wodą oraz ich skłonności do reakcji chemicznych ze szkliwem izolatorów ceramicznych [127, 132]. W stanie suchym są one najczęściej nieprzewodzące i niegroźne dla izolatorów. Stopień narażenia zabrudzeniowego zależy od rodzaju, natężenia, przyczepności i rozkładu zanieczyszczeń na powierzchni izolatorów oraz od czynników meteorologicznych - szczególnie mokrego śniegu i opadów atmosferycznych o niewielkim natężeniu [11, 115, 126, 132, 154]. Lokalnie niebezpieczny jest również pył słonej mgły, unoszący się z chłodni kominowych oraz nagłe zmiany temperatury przy dużej wilgotności powietrza [91, 127, 132]. Intensywny deszcz i wiatr są w tym przypadku czynnikami powodującymi samoczyszczanie się izolatorów i zmniejszającymi stężenie zanieczyszczeń w powietrzu.

W warunkach pomijalnych zabrudzeń, oddzielnie należy uwzględniać narażenie w postaci deszczu (v_d), natomiast dla izolatorów z materiałów syntetycznych - promieniowanie słoneczne i nagłe zmiany temperatury (v_e), powodujące ich rozkład chemiczny, erozję powierzchniową i procesy starzeniowe [13, 108, 140]; zjawiska te nie są analizowane w dalszych rozważaniach. Poza tym, występują również narażenia środowiskowe na sucho (v_s), tj. bez udziału wilgoci i opadów, ale są one niezbyt groźne dla izolatorów.

Na podstawie wieloletnich doświadczeń eksploatacyjnych [132, 133] stwierdzono, że większość narażeń środowiskowych charakteryzuje się cykliczną zmiennością w czasie. Największe znaczenie posiada zmienność sezonowa, po-

wodująca, że przeskoki na izolatorach występują nierównomiernie i praktycznie tylko w niektórych okresach roku (głównie w miesiącach jesienno-zimowych). Poza tym, istnieje również dobowa zmienność narażeń, związana z występowaniem w pewnych okresach doby (najczęściej w nocy i rano) mgieł, rosy i temperatur, ułatwiających skraplanie pary wodnej na izolatorach. Wyniki analizy częstości zakłóceń zabrudzeniowych w liniach 110-220 kV z terenu ZEOPd opublikował autor w pracach [36] i [41].

Narażenia elektryczne, występujące w warunkach eksploatacyjnych, odwzorowuje się laboratoryjnie za pomocą napięcia sinusoidalnego 50 Hz (napięcie robocze i przepięcia dorywcze) oraz udarów łączeniowych 250/2500 μs i udarów piorunowych 1,2/50 μs przy obu biegunowościach. Sposób i warunki wykonywania prób na sucho i pod deszczem (dla udarów piorunowych tylko na sucho) są znormalizowane [163, 164, 165]. Narażenia zabrudzeniowe odtwarzane są w laboratoriach za pomocą nakładania na izolatory sztucznych powłok o różnej konduktywności powierzchniowej; próby wytrzymałościowe wykonuje się przy napięciu przemiennym [162]. Najważniejsze rodzaje napięć występujące w eksploatacji mają więc swoje odpowiedniki w postaci napięć probierczych, ale dyskusyjny jest sposób wykonywania zabrudzeniowych badań izolatorów (rozdział 2.3).

Narażenia mechaniczne statyczne i dynamiczne - wynikają z ciężaru własnego łańcuchów izolatorów i przewodów roboczych, parcia wiatru, sadzi,

Tablica 2

Tabela 2

Składowe losowego wektora narażeń elektrycznych i środowiskowych dla izolacji liniowej na terenach przemysłowych (rys.4.)

Uogólniony losowy wektor narażeń $\omega[\varepsilon, \vartheta]$			Narażenia środowiskowe ϑ			Uwagi
			Narażenie zabrudzeniowe ϑ_z	Deszcz ϑ_d	Narażenie na sucho ϑ_s	
Narażenia elektryczne ω		Napięcie robocze ε_r	$\omega_{r,z}$	$\omega_{r,d}$	$\omega_{r,s}$	Indeksy odnoszą się kolejno do narażeń elektrycznych i środowiskowych
	Przepięcia	Dorywcze wolnozmienne ε_w	$\omega_{w,z}$	$\omega_{w,d}$	$\omega_{w,s}$	
		Łączeniowe $\varepsilon_ł$	$\omega_{ł,z}$	$\omega_{ł,d}$	$\omega_{ł,s}$	
		Piorunowe ε_u	$\omega_{u,z}$	$\omega_{u,d}$	$\omega_{u,s}$	

drgań przewodów itd. Są one złożone, trudne do określenia i wymagają dalszych badań; grupa ta wykracza poza zakres pracy i nie jest dalej rozpatrywana.

Składowe uogólnionego losowego wektora narażeń $\omega\{\varepsilon, \nu\}$ stwarzających określone stany zagrożenia izolacji, zestawiono w tab. 2. Wpływ tych narażeń na własności rozpatrywanych układów nie jest jednakowy. Narażenia środowiskowe decydują najczęściej o wytrzymałości powierzchniowej izolatorów, ale są praktycznie do pominięcia dla odstępów powietrznych [84, 97, 147, 172]. Do analizy przyjęto więc, że stany zagrożenia łańcuchów izolatorów wywołane są jednoczesnym oddziaływaniem narażeń elektrycznych i środowiskowych, natomiast stany zagrożenia odstępów powietrznych - tylko narażeniami elektrycznymi.

Zabiegi eksploatacyjne mają na celu zapewnienie ciągłości pracy izolacji linii w zadanych warunkach napięciowych i środowiskowych. Zabiegi te - przedstawione formalnie na rys. 4 jako wielowymiarowy wektor ν - można podzielić na okresowe czyszczenie izolatorów ν_c, pomiar rozkładu napięcia i wymianę uszkodzonych izolatorów kołpakowych ν_w oraz nakładanie na powierzchnie izolatorów powłok hydrofobowych ν_h (wykonywane w wyjątkowych przypadkach).

Czyszczenie izolatorów w rejonach szczególnie trudnych warunków środowiskowych wywiera korzystny, ale ograniczony wpływ na ich własności w dalszej eksploatacji. Wykonywane jest okresowo na zagrożonych odcinkach linii (najczęściej na wiosnę lub w lecie) i ma na celu usunięcia trwałego osadu związanego ze szkliwem. Z doświadczeń eksploatacyjnych i pomiarów w naturalnych warunkach wynika, że konduktywności powierzchniowe nowo powstających powłok mogą osiągać bardzo szybko - nawet po kilku tygodniach - wartości graniczne dla danej strefy [89, 90, 91]. Czyszczenie związane jest na ogół z wymianą izolatorów uznanych za uszkodzone, ale nie jest to zabieg masowy, częsty i znaczący dla dużej liczby łańcuchów w linii. Dotyczy to również wymiany uszkodzonych ogniw, stwierdzonych w wyniku okresowych pomiarów rozkładu napięcia na łańcuchach z izolatorów kołpakowych (linie 220-400 kV w strefach niewielkich zabrudzeń).

Nakładanie past i wazelin (powłok hydrofobowych) na powierzchnie izolatorów liniowych w strefach największych zabrudzeń nie ma obecnie większego znaczenia. Są to zabiegi lokalne, doraźne i nie dające w pełni zadowalających rezultatów (wykonywane niekiedy np. w pobliżu chłodni kominowych).

2.3. Wytrzymałość elektryczna układów izolacyjnych

Wytrzymałość elektryczną izolacji charakteryzuje się jako zdolność do wytrzymywania napięcia określonego kształtu w ustalonych warunkach pracy (próby). Ze względu na losowy charakter narażeń środowiskowych oraz war-

tości i czasu trwania przepięć, wytrzymałość łańcuchów izolatorów i odstępów powietrznych jest własnością stochastyczną i powinna być wyrażana za pomocą rozkładu prawdopodobieństwa napięć przeskoku. Miarą wytrzymałości są również wybrane z krzywych rozkładu wartości: średniego (50-procentowego) napięcia przeskoku lub statystycznego napięcia wytrzymywanego (z zadanym prawdopodobieństwem przeskoku). Zgodnie z pracami [167] i [168], prawdopodobieństwo, że statystyczne napięcie wytrzymywane o kształcie odpowiadającym przepięciom piorunowym lub łączeniowym nie spowoduje przeskoku jest równe 90% (prawdopodobieństwo przeskoku 10%).

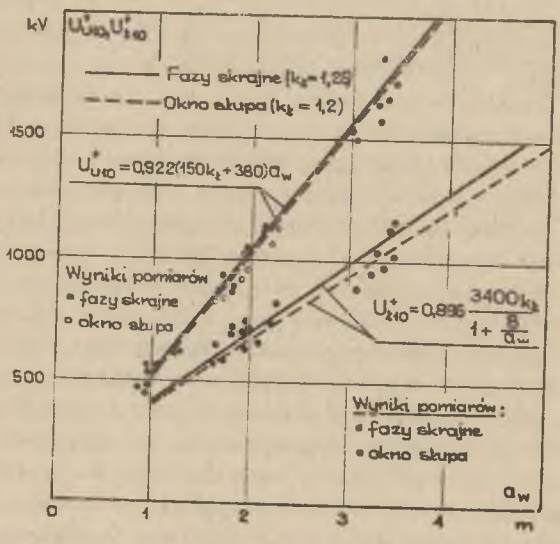
Wytrzymałość izolatorów czystych i odstępów powietrznych sprawdzana jest laboratoryjnie przy podnoszeniu napięcia określonego rodzaju aż do przeskoku [163, 164, 165]. Wyniki tych prób porównywane są z podanymi w normie [160] wartościami znamionowych napięć probierczych:

- przemiennego (50 Hz) na sucho i pod deszczem (linie do 110 kV),
- udarowego piorunowego 1,2/50 μs na sucho przy obu biegunowościach,
- udarowego łączeniowego 250/2500 μs na sucho i pod deszczem przy obu biegunowościach (linie powyżej 110 kV, przy czym dla linii 220 kV dopuszcza się stosowanie napięcia probierczego przemiennego).

Wytrzymałość zabrudzeniowa izolatorów wyznaczana jest w specjalistycznych laboratoriach przy napięciu przemiennym; wartości napięcia probierczego w zadanych warunkach próby nie są określone. Badane izolatory pokrywane są sztucznymi powłokami ciągłymi; sposób wykonywania tych prób jest w Polsce znormalizowany [162]. Narażenia zabrudzeniowe i pochodzenia przemysłowego zaleca się odwzorowywać za pomocą stałej lub półpłynnej powłoki, natomiast narażenia na terenach nadmorskich - za pomocą słonej mgły. Konieczne jest stosowanie transformatorów probierczych o dostatecznie dużym prądzie zwarciowym [162], wyposażonych w odpowiednie układy zasilające, regulacyjne i zabezpieczające. Na podstawie wyników prób wyznacza się charakterystyki zabrudzeniowe, tj. zależności między napięciem przeskoku (wytrzymywanym) a konduktywnością powierzchniową powłoku lub - w przypadku metody mgły solnej - stężeniem solanki (zał. 2, rys. 1-Z. 2). W kraju wykonuje się obecnie badania głównie metodą powłoki półpłynnej - cechującą się prostą procedurą, krótkim czasem próby i nie wymagającą kosztownych urządzeń oraz wielokrotnego nakładania powłok (Politechnika Wrocławska, Instytut Energetyki). W porównaniu z trudniejszą metodą powłoki stałej, daje ona większe rozrzuty wyników przy próbach wielokrotnych(do 10%) i powtarzanych w różnych laboratoriach (do ok. 30%) - przy wątpliwej odtwarzalności narażeń rzeczywistych [16, 58, 71, 102].

Podstawową zaletą badań laboratoryjnych jest możliwość: uzyskania wyników w stosunkowo krótkim czasie, wielokrotnego powtarzania prób dla rozmaitych wartości parametrów powłoki i oszacowania rozrzutu napięć przeskoku. Pomimo wielu długotrwałych prac w tej dziedzinie, stosowane obecnie metody badań są nadal niewystarczające. Wymagają udoskonalenia, uprosz-

czenia i ujednolicenia - w celu dalszej poprawy odtwarzalności narażeń rzeczywistych i powtarzalności wyników [82, 102, 116, 137, 138, 152]. Trwają poszukiwania praktycznego i uzasadnionego fizykalnie miernika stopnia narażenia zabrudzeniowego izolatorów - wspólnego dla różnych metod laboratoryjnych. Dobre wyniki w tym zakresie uzyskuje się za granicą na podstawie pomiarów napięć przeskoku oraz wartości szczytowych prądu upływu w półokresie poprzedzającym przeskok zabrudzeniowy (zał. 2, rys. 2 i 3-Z.2). Uważa się, że prąd upływu - przy zadanym napięciu - może stanowić niezależne kryterium oceny narażenia i wytrzymałości zabrudzeniowej izolatorów, ponieważ nie zależy od sposobu wykonywania próby, a jedynie od drogi upływu izolatora, jeśli żaden jej odcinek nie jest zwierany przez wyładowania między kloszami [14, 15, 149]. W takich badaniach laboratoryjnych i terenowych, wymagających dobrego wyposażenia specjalistycznego i automatycznej aparatury rejestrującej, brał udział również autor - podczas stażu naukowego w Clamart [32].



Rys. 5. Najmniejsze 10-procentowe napięcia wytrzymywane przez odstęp powietrzny przewód-słup przy udarach piorunowych i łączeniowych wg wzorów empirycznych (zał. 3 i 4) oraz wyników pomiarów [18, 85, 118]

Mechanizmy wyładowań i przeskoków w długich odstępach powietrznych nie są jeszcze całkowicie poznane; wyniki badań w tej dziedzinie można znaleźć m.in. w pracach [1, 3, 47, 62, 84, 97, 111, 147, 151, 171]. Przy obliczaniu napięć przeskoku dla izolacyjnych odstępów powietrznych w liniach wysokiego napięcia można posłużyć się wzorami empirycznymi (zał. 3 i 4). Wartości tych napięć zależą od rodzaju narażenia elektrycznego oraz geometrycznego ukształtowania układu (rodzaju, wymiarów, odstępu między elektrodami). Wpływ warunków otoczenia (ciśnienia, temperatury, wilgotności, wiatru, itd.) może być w przybliżeniu pominięty [48, 84]. Zgodność wyników uzyskiwanych ze wzorów empirycznych i badań rzeczywistych układów izolacyjnych wydaje się zadowalająca. Świadczą o tym m.in. wykresy 10-procentowego napięcia wytrzymywanego dla odstępu przewód-słup (poprzecznik) przy dodatnich udarach piorunowych i łączeniowych (rys. 5), naniesione na wyniki pomiarów wytrzymałości układów 110-400 kV, wykonanych w Instytucie Energetyki w Warszawie [18, 85, 118]. Wykonując obliczenia należy uwzględnić jednak, że:

- względne odchylenie standardowe napięcia przeskoku przy 50 Hz wynosi ok. 3...5%, natomiast przy udarach łączeniowych 5...8% [153, 168, 172]; wartości większe odnoszą się do warunków rzeczywistych,
- wartości współczynników geometrycznych dla układów izolacyjnych na słupie (zał. 3) są przy udarach łączeniowych o ok. 10% mniejsze niż przy napięciu przemiennym,
- względne odchylenia standardowe napięć przeskoku przy udarach piorunowych są mniejsze niż przy łączeniowych; w warunkach laboratoryjnych i rzeczywistych wynoszą odpowiednio 1,5...6% [153, 168, 172].

Według dotychczasowych badań, przemienne i udarowe napięcia przeskoku liniowych układów izolacyjnych w różnych warunkach środowiskowych mają rozkład prawdopodobieństwa zbliżony do normalnego [97, 112, 167, 168, 170]. Statystyczne napięcie przeskoku w określonym stanie zagrożenia ω, odpowiadające prawdopodobieństwu przeskoku Q, można wyrazić więc jako zmienną losową:

$$U_\omega = \begin{cases} U_{\omega 50} - x_Q \sigma'_\omega = U_{\omega 50}\,(1 - x_Q \sigma_\omega), & Q \leqslant 0{,}5 \\ U_{\omega 50} + x_Q \sigma'_\omega = U_{\omega 50}\,(1 + x_Q \sigma_\omega), & Q \geqslant 0{,}5 \end{cases} \qquad (1)$$

gdzie: $U_{\omega 50}$ - 50-procentowe (średnie) napięcie przeskoku; σ'_ω - odchylenie standardowe napięcia przeskoku;

$\sigma_\omega = \sigma'_\omega / U_{\omega 50}$ - względne odchylenie standardowe;

x_Q - kwantyl standaryzowanego rozkładu normalnego dla prawdopodobieństwa Q [178].

Podobnie jak wartości przepięć, wytrzymałość statystyczna izolacji wyrażona jest w dalszych rozważaniach w jednostkach względnych (p.u.). Dla układu izolacyjnego w stanie zagrożenia ω, spowodowanym najczęściej jednoczesnym oddziaływaniem narażeń elektrycznych i środowiskowych (tab. 2), wynika ona ze stosunku napięcia przeskoku (wytrzymywanego) do najwyższego roboczego napięcia fazowego linii, czyli jest zmienną losową w postaci:

$$z_\omega = \frac{\sqrt{3}\, U_\omega}{\sqrt{2}\, U_m}, \qquad (2)$$

gdzie: U_ω - wartość szczytowa napięcia przeskoku (wytrzymywanego) w stanie zagrożenia $\omega = 1, \ldots, n$;

U_m - najwyższe dopuszczalne napięcie robocze linii (międzyfazowe, wartość skuteczna).

Dokonując próby uogólnionego ujęcia wytrzymałości układów izolacyjnych w liniach 110-400 kV w warunkach różnych narażeń elektrycznych i środowiskowych, uwzględniono zarówno specyfikę rozpatrywanego zagadnienia (tereny o niepomijalnym zanieczyszczeniu atmosfery), jak i losową zmienność narażeń w czasie. Zmienne z_ω są bowiem w rzeczywistości skalarnymi funk-

cjami losowymi $z_\omega(t)$, które opisują wytrzymałość układu izolacyjnego w czasie kolejnych stanów zagrożenia $\omega = 1,\ldots,n$. Wytrzymałość uogólniona na wszystkie stany zagrożenia jest wielowymiarową funkcją losową $z(t)$, określoną przez układ funkcji $z_\omega(t)$ dla $\omega = 1,\ldots,n$. Pełny opis tak skomplikowanego procesu, wymagający co najmniej:

- wartości średniej $\bar{z}(t) = \left\{\bar{z}_1(t),\ldots,\bar{z}_n(t)\right\}$,
- macierzy korelacyjnej $r_{i,j}(t_1, t_2)$ wytrzymałości w stanach zagrożenia $i \neq j \in \omega = 1,\ldots,n$ oraz w określonych chwilach czasu $t_1 \neq t_2$, jest praktycznie niewykonalny - ze względu na niemożliwość rejestracji chwilowych wartości poziomów wytrzymałościowych. Dla niewielkiego przedziału czasu, lub praktycznie stacjonarnych narażeń w pewnym okresie eksploatacji, funkcja $z(t)$ może być wyrażona za pomocą wielowymiarowej zmiennej losowej (zał. 5).

W przypadku izolatorów czystych i suchych, wytrzymałość układów na słupach linii zależy głównie od długości i kształtu geometrycznego odstępów powietrznych [18, 46, 84, 118, 151]. W warunkach zabrudzeniowych, decydujące znaczenie mają najczęściej powierzchniowe własności zanieczyszczonych i zawilgoconych izolatorów - zależnie od rodzaju łańcucha, typu izolatorów i konduktywności powłoki [22, 55, 63, 73, 113, 114, 134, 154]. Przeskoki zabrudzeniowe na łańcuchach izolatorów oraz przeskoki na odstępach powietrznych wskutek przepięć (w tym również wzdłuż łańcuchów izolatorów czystych i suchych) można traktować więc jako zdarzenia praktycznie niezależne. Pomijając narażenia środowiskowe przy małej wilgotności powietrza, rozpatruje się dalej 4 stany zagrożenia, opisane w tab. 3. Wynikająca stąd uogólniona wytrzymałość układu izolacyjnego sprowadza się więc do czterowymiarowego kolumnowego wektora losowego o składowych:

$$\{z_\omega\} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix} \quad \text{dla } \omega = 1,\ldots 4; \tag{3}$$

gdzie: $z_1,\ldots,z_4$ - wytrzymałości łańcucha izolatorów (w warunkach zabrudzeniowych) lub odstępu powietrznego kolejno przy napięciu przemiennym, przepięciach dorywczych wolnozmiennych, łączeniowych i piorunowych (oznaczenia wg tab. 3).

Wektor losowy $z\{z_\omega\}$ dla $\omega = 1,\ldots,4$ określa dystrybuanta wielowymiarowej zmiennej losowej lub jej parametry rozkładu (zał. 5), obejmujące co najmniej:

a) nielosowy wektor wartości średniej $\bar{z}(\bar{z}_1,\ldots,\bar{z}_4)$ lub kwantyl rzędu Q, tj. wartości wytrzymywanej $z_Q(z_{1Q},\ldots,z_{4Q})$,

b) symetryczną macierz korelacyjną:

$$r_{i,j} = \begin{bmatrix} 1 & r_{1,2} & r_{3,1} & r_{1,4} \\ r_{2,1} & 1 & r_{2,3} & r_{2,4} \\ r_{3,1} & r_{3,2} & 1 & r_{3,4} \\ r_{4,1} & r_{4,2} & r_{4,3} & 1 \end{bmatrix} \quad i \neq j \in \omega = 1,\ldots,4. \qquad (4)$$

Tabela 3

Oznaczenia stanów zagrożenia układów izolacyjnych w liniach napowietrznych na terenach przemysłowych

Rodzaj narażenia 1)	Stan zagrożenia ω			
	1	2	3	4
Elektryczne	Napięcie przemienne robocze (r)	Przepięcia		
		Dorywcze wolnozmienne (w)	Łączeniowe (ł)	Piorunowe (u)
Środowiskowe	Zabrudzeniowe (z) 2)			
Uwagi: 1. wg danych z tab. izolatorów		2. Dotyczy tylko łańcuchów		

Praktyczne znaczenie mają najmniejsze wytrzymałości w rozpatrywanym okresie czasu, ponieważ decydują o wymiarach, niezawodności i doborze izolacji do zadanych warunków eksploatacyjnych. Na terenach przemysłowych, najmniejsza jest zwykle wytrzymałość powierzchniowa izolatorów przy przemiennym napięciu roboczym [59, 63, 94, 103], ponieważ przeskok zabrudzeniowy jest stosunkowo powolnym zjawiskiem termiczno-jonizacyjnym, uzależnionym od energii wydzielanej w powłoce [52, 67, 127, 128]. Wytrzymałość powierzchniowa izolatorów przy napięciu przemiennym może być w warunkach umiarkowanych zabrudzeń (konduktywnościach powierzchniowych ok. 10...15 μS) nawet 3-4-krotnie mniejsza od wytrzymałości na sucho, rosnąc jednak przy zmniejszaniu się czasu przyłożenia napięcia. Szacunkowo, przy przepięciach dorywczych wolnozmiennych w postaci przebiegów oscylacyjnych o częstotliwości zbliżonej do 50 Hz lub bardzo długich udarów jest ona większa 1,2-1,25-krotnie [75, 101, 137], przy przepięciach łączeniowych dodatnich 150...350/2500...3500 μs już 2-2,5-krotnie [59, 74, 88, 98, 100, 103, 124, 125], natomiast przy przepięciach piorunowych dodatnich 1,2/50 μs aż 6-7-krotnie [57, 73]. Przepięcia piorunowe i łączeniowe nie mają więc w tym przypadku znaczenia decydującego. Wyjątkiem

mogą być specyficzne przepięcia łączeniowe, spowodowane kolejnymi zadziałaniami SPZ podczas szczególnie dużego narażenia zabrudzeniowego izolatorów - kiedy wyłączenia linii są praktycznie nieuniknione [36, 41].

Ponieważ przemienne i udarowe napięcia przeskoku układów izolacyjnych w warunkach rzeczywistych mają normalne rozkłady prawdopodobieństwa, powinny być więc skorelowane dodatnio i w przybliżeniu liniowo [51]. Wynika to nie tylko z własności regresji normalnej, ale z praktycznie liniowych zależności między napięciami U_ω ($\omega = 1,\dots,4$) a długością łańcuchów i związanych z nimi odstępów powietrznych na słupach (zał. 4). Zależności takie, co najmniej do ok. 500 kV, występują między:

- wytrzymałością zabrudzeniową przy napięciu przemiennym a liczbą izolatorów w łańcuchu lub jego długością [59, 73, 84, 87],
- wytrzymałością udarową a długością odstępów powietrznych - z uwzględnieniem łańcuchów izolatorów i osprzętu łukochronnego [7, 8, 18, 46, 56, 85].

Własność ta pozwala na wyrażenie wytrzymałości łańcucha izolatorów lub odstępu powietrznego, jednej ze składowych (3), jako:

$$z_{i10} = d_{i,j}\, z_{j10} \qquad (5a)$$

lub

$$i \neq j \in \omega = 1,\dots,4$$

$$\bar{z}_i = \bar{d}_{i,j}\, \bar{z}_j, \qquad (5b)$$

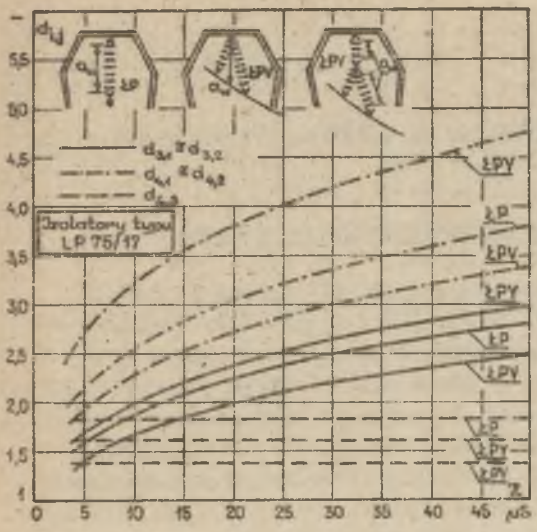
gdzie: $d_{i,j} = z_{i10}/z_{j10} = U_{i10}/U_{j10}$; $\bar{d}_{i,j} = \bar{z}_i/\bar{z}_j = U_{i50}/U_{j50}$ - współczynniki współzależności napięć przeskoku 10-oraz 50-procentowych w różnych stanach zagrożenia.

Liniowa zależność korelacyjna między zmiennymi z_ω ($\omega = 1,\dots,4$) umożliwia znaczne uproszczenie obliczeń, ponieważ w celu opisania $\mathbf{z} \{z_\omega\}$ wystarczy wyznaczyć nielosowe wektory: wartości średnich $\bar{z}_\omega$ lub 10-procentowych kwantyli $z_{\omega 10}$, odchyleń standardowych σ_ω i współczynników współzależności:

$$\mathbf{d}_{1,j} = \begin{bmatrix} 1 & d_{1,2} & d_{1,3} & d_{1,4} \\ d_{2,1} & 1 & d_{2,3} & d_{2,4} \\ d_{3,1} & d_{3,2} & 1 & d_{3,4} \\ d_{4,1} & d_{4,2} & d_{4,3} & 1 \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} 1 & 1 & \frac{1}{d_{3,1}} & \frac{1}{d_{4,1}} \\ 1 & 1 & \frac{1}{d_{3,1}} & \frac{1}{d_{4,1}} \\ d_{3,1} & d_{3,1} & 1 & \frac{1}{d_{4,3}} \\ d_{4,1} & d_{4,1} & d_{4,3} & 1 \end{bmatrix} \quad i \neq j \in \omega = 1,\dots,4, \qquad (6)$$

przy czym $d_{2,1} = 1$, $d_{3,1} \approx d_{3,2}$ i $d_{4,1} \approx d_{4,2}$ (zał. 6).

Wartości współczynników współzależności zależą od położenia układu na słupie, typu izolatorów i rodzaju łańcucha oraz - z wyjątkiem współzależności między wytrzymałościami udarowymi - od warunków środowiskowych (rosną nieliniowo przy wzroście konduktywności powierzchniowej powłoki na izolatorach). Zależności umożliwiające obliczenie współczynników współza-



Rys. 6. Współczynniki współzależności napięć wytrzymywanych przez łańcuchy izolatorów 220 kV w różnych stanach zagrożenia (zał. 6)

leżności dla różnych rodzajów łańcuchów i związanych z nimi odstępów powietrznych przewód-poprzecznik podano w zał. 6, natomiast wyniki obliczeń przykładowych dla łańcuchów przelotowych 220 kV pokazano na rys. 6.

Dla łańcucha ŁP 2 LP 75/17 w warunkach umiarkowanych zabrudzeń (γ= 10 μS) macierz (6) wynosi przykładowo:

$$d_{i,j} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0,5 & 0,4 \\ 1 & 1 & 0,5 & 0,4 \\ 1,9 & 1,9 & 1 & 0,6 \\ 2,5 & 2,5 & 1,8 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Odnosi się ona do łańcuchów izolatorów oraz odstępów powietrznych przewód-poprzecznik (z uwzględnieniem osprzętu łukochronnego) i nie wyczerpuje wszystkich przypadków współzależności wytrzymałości układów na słupach linii (przy zadanym ryzyku przeskoku). W uzasadnionych przypadkach można rozpatrywać również współzależności między wytrzymałościami łańcuchów izolatorów i odstępów przewód-konstrukcja wsporcza. W praktyce dąży się jednak do takiego wymiarowania układów izolacyjnych na słupie, aby łuk elektryczny zainicjowany przez przepięcia palił się na elektrodach osprzętu łukochronnego (odstęp między elektrodami odpowiada w przybliżeniu odstępowi przewód-poprzecznik). Poza tym, wymiary odstępów powietrznych zależą istotnie od przepięć piorunowych (linie 110-220 kV) i łączeniowych (linie 400 kV) tylko w warunkach nieznacznych zabrudzeń [18, 85, 118]. Na terenach o niepomijalnym zanieczyszczeniu atmosfery wynikają one na ogół z długości łańcuchów izolatorów, wymaganych ze względu na narażenie zabrudzeniowe przy napięciu przemiennym (zał. 4.6).

3. METODYKA OCENY NIEZAWODNOŚCI IZOLACJI NA TERENACH PRZEMYSŁOWYCH

3.1. Matematyczne modelowanie niezawodności izolacji liniowej

Niezawodność izolacji liniowej jest własnością, polegającą na spełnieniu przez nią określonych zadań w założonym czasie i warunkach eksploatacji. W rozpatrywanym zakresie, zadanie izolacji polega na zapewnieniu wymaganej wytrzymałości przy różnych narażeniach elektrycznych i środowiskowych. Niezawodność izolacji można ocenić na podstawie odpowiednio prowadzonej statystyki zakłóceń oraz wyników badań terenowych i modelowych. Bezpośrednie wykorzystanie statystyki oficjalnej do obliczeń niezawodnościowych jest obecnie najczęściej niemożliwe, ponieważ nie zawiera ona na ogół informacji o czasie i miejscach występowania przeskoków oraz o przyczynach i skutkach zakłóceń. Dotyczy to nawet niekiedy materiałów źródłowych, tj. protokołów zakłóceń i dyspozytorskich dzienników operacyjnych (brak jest np. udokumentowanych danych o zakłóceniach spowodowanych określonymi rodzajami przepięć). Znacznie utrudnione wydaje się również obecnie szersze zastosowanie metod symulacyjnych do modelowania niezawodności izolacji - przy jednoczesnym uwzględnieniu całego zbioru narażeń. Przyczyną jest brak dostatecznej liczby udokumentowanych danych statystycznych oraz wyników badań układów rzeczywistych. Metody symulacyjne, umożliwiające wykorzystanie maszyn analogowych i cyfrowych, polegają na generowaniu zmiennych losowych o danym rozkładzie prawdopodobieństwa i śledzeniu zmian zachodzących w dynamicznych modelach układów [19, 53, 66]. W przyszłości, powinny one znaleźć większe zastosowanie praktyczne, ze względu na konieczność szybkiej oceny i prognozowania niezawodności izolacji - przy uwzględnieniu uzasadnionych wytycznych pod względem konstrukcyjnym i materiałowym.

Zakłócenia powstające wskutek przeskoków na układach izolacyjnych mogą powodować wyłączenia linii lub mieć charakter przemijający(skuteczne działanie SPZ). Ocena niezawodności izolacji liniowej jest zagadnieniem złożonym, ze względu na bardzo małą częstość, nierównomierność w czasie i losowy charakter przeskoków oraz na niejednorodność zbioru łańcuchów izolatorów i odstępów powietrznych. Zdaniem autora, dobre wyniki można uzyskać na drodze statystycznego modelowania zmienności narażeń w czasie kolejnych stanów zagrożenia i związanych z nimi losowych strumieni zakłóceń, ale ich dokładne matematyczne odwzorowanie jest praktycznie niemożliwe. Miarą niezawodności układu izolacyjnego w rozpatrywanym stanie zagrożenia jest prawdopodobieństwo pracy bez zakłóceń co najmniej przez czas t, czyli:

$$r_\omega(t) = P_\omega(\tau \geq t) = 1 - F_\omega(\tau \leq t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda_\omega(\tau)\, d\tau\right), \omega = 1,\ldots,4, \quad (8)$$

gdzie:

τ - czas do zakłócenia lub między kolejnymi zakłóceniami (zmienna losowa);

$F_\omega(\tau \leq t)$ - dystrybuanta czasu bez zakłóceń (między kolejnymi zakłóceniami;

$f_\omega(t)$ - gęstość prawdopodobieństwa zakłóceń w czasie;

$\lambda_\omega(t) = \frac{f_\omega(t)}{1 - F_\omega(t)}$ - intensywność zakłóceń.

Podstawowym parametrem strumienia zakłóceń jest intensywność $\lambda_\omega(t)$, tj. warunkowa gęstość prawdopodobieństwa czasu pracy układu izolacyjnego, jeśli czas ten wynosi co najmniej t. W przybliżeniu, jest to prawdopodobieństwo zakłócenia w krótkim przedziale czasu, pod warunkiem, że nie wystąpiło ono do rozpatrywanej chwili. W ogólnym przypadku, intensywność zakłóceń można traktować jak funkcję losową składowych poziomów wytrzymałościowych układu izolacyjnego z_ω dla $\omega = 1,\ldots,4$ [30, 35, 36]. Wynika stąd, że niezawodność układu izolacyjnego ze względu na wszystkie rozpatrywane stany zagrożenia:

$$r(t) = \prod_{\omega=1}^{4} r_\omega(t) = \prod_{\omega=1}^{4} \exp\left[-\int_0^t \lambda(z_\omega(\tau))\, d\tau\right]. \quad (9)$$

Izolacja liniowa wykazuje pod względem niezawodnościowym strukturę szeregową, ponieważ przeskok na jednym łańcuchu izolatorów lub odstępie powietrznym może spowodować wyłączenie linii (rys. 7). Oznacza to również, że odstęp czasu między kolejnymi zakłóceniami równy jest czasowi pracy układu o najmniejszej wytrzymałości w określonym stanie zagrożenia. Wypadkowy strumień zakłóceń dla izolacji linii (lub jej odcinka) wynika z superpozycji strumieni pochodzących od wszystkich układów. Zakłócenia spowodowane przez przeskoki - rejestrowane na osi czasu - tworzą sumaryczny strumień zakłóceń, pokazany przykładowo na rys. 8. Dla linii (odcinka) niezawodność łańcuchów izolatorów:

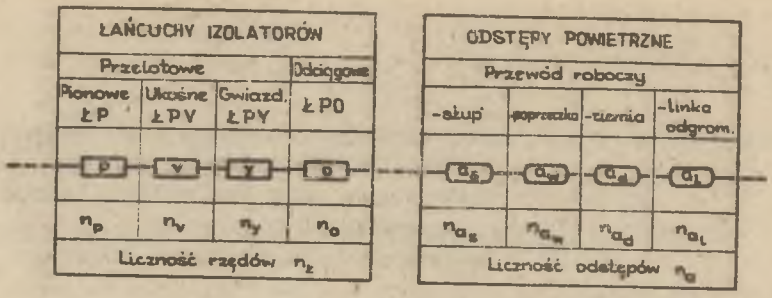
$$R^{\ell}(t) = \prod_{i=1}^{n_\ell} r_i(t) = \prod_{i=1}^{n_\ell} \prod_{\omega=1}^{4} \exp\left(-\int_0^t \lambda_\omega^{\ell}(\tau)\, d\tau\right), \quad (10a)$$

natomiast niezawodność izolacyjnych odstępów powietrznych

$$R^{a}(t) = \prod_{j=1}^{n_a} r_j(t) = \prod_{j=1}^{n_a} \prod_{\omega=1}^{4} \exp\left(-\int_0^t \lambda_\omega^{a}(\tau)\, d\tau\right), \quad (10b)$$

gdzie: n_ℓ, n_a - liczba łańcuchów (rzędów) oraz odstępów powietrznych;

λ_ω^{ℓ}, λ_ω^{a} - intensywność zakłóceń dla jednego łańcucha oraz odstępu powietrznego.



a)

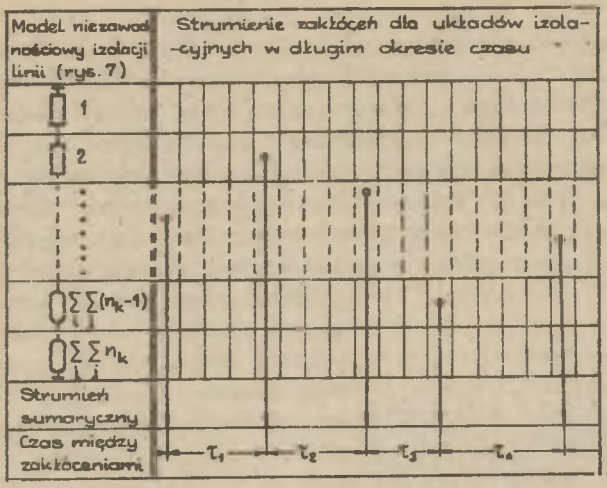
b)

Rys. 7. Model niezawodnościowy izolacji liniowej (struktura szeregowa)
a) schemat logiczny izolacji linii do obliczeń niezawodnościowych, b) graf stanów niezawodnościowych izolacji

Oznaczenia: O - stan normalnej pracy; ● - stan zakłóceniowy (wyłączenie linii lub zakłócenie przemijające); $\lambda^{ł}_{\omega}$, λ^{a}_{ω} - intensywność zakłóceń dla łańcucha izolatorów oraz odstępu powietrznego w stanie zagrożenia ω

Ponieważ przeskoki (zakłócenia) na łańcuchach izolatorów i odstępach powietrznych są na terenach przemysłowych praktycznie zdarzeniami losowymi niezależnymi (rozdział 2.3), więc niezawodność izolacji linii lub jej odcinka

$$R(t) \cong R^{ł}(t)\, R^{a}(t) = \prod_{\omega=1}^{4} \left\{ \prod_{i=1}^{n_ł} \exp\left(-\int_0^t \lambda^{ł}_{\omega}(\tau)\, d\tau\right) \prod_{j=1}^{n_a} \exp\left(-\int_0^t \lambda^{a}_{\omega}(\tau)\, d\tau\right)\right\} \tag{11}$$



Rys. 8.Przykład realizacji strumienia zakłóceń dla izolacji odcinka linii

Obliczenia praktyczne możliwe są przy założeniach upraszczających,pozwalających na:

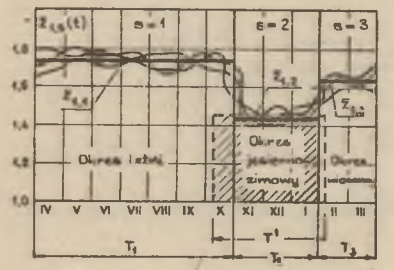
- posługiwanie się prostymi modelami zmienności narażeń w czasie,
- ujednolicenie pod względem niezawodnościowym układów izolacyjnych, występujących w linii, poprzez wprowadzenie zastępczej liczby łańcuchów izolatorów i odstępów powietrznych przy różnych narażeniach elektrycznych i środowiskowych,
- oszacowanie rozkładu krotności (wartości) przepięć łączeniowych wzdłuż trasy linii.

Obliczenie niezawodności zabrudzeniowej izolatorów przy napięciu roboczym - najbardziej znaczącej na terenach przemysłowych - utrudnia cykliczna zmienność narażeń środowiskowych w czasie (rozdział 2.3), będąca przyczyną niestacjonarności strumieni zakłóceń.

Z badań autora wynika, że celowe jest:

- zastosowanie uproszczonych modeli obliczeniowych, opartych na wynikach statystycznego badania zakłóceń [36, 41],
- przyjęcie jednorzędowego łańcucha przelotowego (pionowego) jako tzw. obliczeniowego, traktując pozostałe rodzaje łańcuchów jak układy wielokrotne, składające się z elementów o zróżnicowanej niezawodności (rozdział 3.3),
- rozpatrywanie losowych realizacji poziomów wytrzymałościowych $\bar{z}_i(t)$ i związanych z nimi intensywności $\lambda_i^z(t)$ jako oscylujących w pewnych przedziałach czasu wokół wartości ustalonych [34, 35, 39],
- pominięcie dobowej zmienności narażeń, jeśli dokładność obliczeń do jednego dnia nie jest wymagana [35, 36].

W konkretnych przypadkach należy wyznaczyć i zweryfikować model sezonowej zmienności narażenia na podstawie analizy częstości zakłóceń w wieloletnim okresie czasu. Dzieląc rok na kilka okresów (sezonów), uzyskuje się kilkustanowy model obliczeniowy z przedziałami w przybliżeniu stałych i skokowo zmieniających się poziomach wytrzymałościowych oraz intensywnościach zakłóceń. W takim modelu, rozkłady prawdopodobieństwa czasów między kolejnymi zakłóceniami zbliżone są w każdym z sezonów do rozkładu wykładniczego, a strumienie zakłóceń do prostych strumieni Poissona [19, 51].



Rys. 9. Przykład modelu sezonowej zmienności narażenia zabrudzeniowego [35, 36]
Oznaczenia: s = 1,2 - okresy (sezony) narażenia; T_1, T_2, T_3 - czasy trwania sezonów narażenia; T' - zredukowany rok obliczeniowy

Proponowana metoda została sprawdzona po raz pierwszy przez autora na podstawie wyników wieloletnich rejestracji szczytowych wartości prądu upływu na izolatorach we francuskich stacjach doświadczalnych 120 kV [30 do 33]. Ze względu na znacznie skromniejsze możliwości weryfikacyjne w warunkach krajowych, wykorzystano materiały statystyczne ze stacji doświadczalnych 110 kV Zabrze i Bolesław(udostępnione przez ZE Gliwice) oraz statystykę zakłóceń zabrudzeniowych (opracowaną przez autora) w liniach 110-220 kV na terenie ZEOPd. Wyniki weryfikacji zaproponowanych modeli sezonowej zmienności narażenia opublikowane są w pracach [35] i [36].

Na rys. 9 pokazano przykład modelu, odwzorowującego sezonową zmienność narażenia, w krajowych stacjach doświadczalnych i wynikające stąd średnie wytrzymałości łańcuchów izolatorów $\bar{z}_{1,s}$ (s = 1, 2, 3). Model taki można sprowadzić również do jednostanowej postaci zastępczej, uwzględniając jedynie największe narażenia w ciągu roku (największą sezonową intensywność zakłóceń), kiedy średnia sezonowa wytrzymałość jest najmniejsza ($\bar{z}_{1,2}$ na rys. 9). Narażenia takie występują jednak tylko w ciągu tzw.roku obliczeniowego T', zredukowanego do ok. 20-30% roku kalendarzowego [35, 39]. Uzyskuje się wtedy prosty model obliczeniowy, a niezawodność roczna opisana jest jedynie przez największą sezonową intensywność zakłóceń w zredukowanym roku obliczeniowym (rozdział 3.2).

Dotychczasowe wyniki weryfikacyjne nie podważają słuszności założenia, że strumienie zakłóceń zabrudzeniowych w liniach napowietrznych można traktować w przybliżeniu jako proste przedziałami strumienie Poissona. Z wynikiem dodatnim, autor sprawdzał hipotezę o wykładniczym rozkładzie prawdopodobieństwa czasów między kolejnymi zakłóceniami w poszczególnych se-

zonach narażenia dla izolatorów w stacjach doświadczalnych 120 kV Martigues-Ponteau i Saint-Avold [30, 31, 32], stacjach doświadczalnych 110 kV Zabrze i Bolesław [35, 36] oraz dla izolacji wybranych linii 110 i 220 kV z terenu ZEOPd [35, 36]. Wyniki te są przybliżone i celowe byłyby dalsze opracowania w tym zakresie. Należy jednak podkreślić, że celem tych obliczeń nie była ocena porównawcza własności i niezawodności różnych typów izolatorów, ale sprawdzenie charakteru rzeczywistych strumieni zakłóceń na podstawie dostępnych danych statystycznych. Wybór odcinków linii z jednakową izolacją do rejestracji zakłóceń i następnie do oceny konstrukcji izolatorów pod względem niezawodnościowym jest obecnie praktycznie niemożliwy. Poza tym, brak jest możliwości zdeterminowania miejsca przeskoku przy braku uszkodzeń, czyli w ok. 50% przypadków [41]. Przykładowo, z posiadanego materiału statystycznego zdołano wybrać zaledwie 5 linii 110 kV i 3 linie 220 kV, w których wystąpiło co najmniej kilka zakłóceń w okresie 10 lat. Izolacja w każdej z tych linii nie była jednolita; w strefie III składała się z izolatorów VKLS 75/21 i LKZ 280/170 (linie 110 kV), stanowiących łańcuchy o zbliżonej niezawodności zabrudzeniowej [36, 37]. Z dotychczasowych doświadczeń eksploatacyjnych z terenu ZEOPd [89, 90, 91, 132] wynika ponadto, że przeskoki na izolatorach występują najczęściej w III strefie zabrudzeniowej, a tylko niekiedy w strefie IV (izolacja celowo wzmocniona), natomiast w strefach I i II notowane są sporadycznie. Pozwala to przypuszczać, że ograniczona niejednorodność zbioru danych nie spowodowała istotnych błędów w analizach statystycznych.

Niezawodność odstępów powietrznych związana jest przede wszystkim z narażeniami w postaci przepięć łączeniowych i piorunowych. Wykazują one przypuszczalnie również zmienność w czasie (np. przepięcia piorunowe występują praktycznie tylko w letnim sezonie burzowym), ale określenie modeli zmienności tych narażeń dla krajowych linii na terenach przemysłowych jest obecnie praktycznie niemożliwe (brak udokumentowanych statystyk zakłóceń przepięciowych). Dodatkowymi przeskokami w obliczeniach niezawodnościowych są: stochastyczny charakter i na ogół nieznany rozkład wartości przepięć łączeniowych wzdłuż trasy linii 400 kV, niejednakowa wytrzymałość udarowa różniących się od siebie odstępów powietrznych i wychylenia przewodów pod wpływem wiatru (łańcuchy przelotowe).

Niezawodność wynikającą z narażeń przepięciowych można ocenić na podstawie ryzyka przeskoku w zadanym czasie eksploatacji - stosując metodę statystyczną wg IEC [167, 168]. Ogólne i uproszczone zasady obliczania tego ryzyka dla pojedynczego odstępu powietrznego oraz izolacji linii zestawiono w zał. 7; podano również najważniejsze założenia, określenia i niektóre dane obliczeniowe. Do obliczenia ryzyka przeskoku na jednym odstępie izolacyjnym potrzebna jest gęstość prawdopodobieństwa przepięć i dystrybuanta wytrzymałości udarowej układu w warunkach rzeczywistych. Ze względu na brak dostatecznych danych stosuje się na ogół uproszczoną metodę statystyczną, posługując się wybranymi z krzywych rozkładu wartoś-

ciami: 10-procentowego napięcia wytrzymywanego U_w i 98-procentowego przepięcia statystycznego U_s (metoda A, rys. 1-Z. 7). Ryzyko przeskoku uzależnione jest wtedy od krotności przepięcia statystycznego $k_s = \sqrt{3}\, U_s/\sqrt{2}\, U_n$ oraz od statystycznego współczynnika bezpieczeństwa $\gamma = U_w/U_s \cong 1{,}15 \ldots 1{,}3$ (rys. 2-Z. 7). W przypadku znacznej liczby niejednakowych odstępów powietrznych, obliczenia niezawodnościowe są utrudnione. Dlatego też, w zał. 7 podano również zarys metody statystycznej z dokumentu IEC z roku 1978 [170] dotyczącej przepięć łączeniowych i opierającej się na założonej linearyzacji: rozkładu krotności przepięć wzdłuż trasy linii, statystycznego współczynnika bezpieczeństwa względem liczby odstępów izolacyjnych i zależności ryzyka przeskoku dla jednego odstępu od statystycznego współczynnika bezpieczeństwa w układzie półlogarytmicznym (metoda B, rys. 3-Z. 7).

Z wykonanego zestawienia wynika, że obliczanie niezawodności izolacji liniowej przy przepięciach napotyka jeszcze na znaczne trudności. W celu wprowadzenia dostatecznie uzasadnionych sposobów oceny skutków narażeń przepięciowych w liniach napowietrznych - przydatnych do praktycznych obliczeń niezawodnościowych - niezbędne są dalsze badania i analizy w skali międzynarodowej [109, 147].

W przybliżeniu, ze względu na wszystkie rozpatrywane stany zagrożenia ($\omega = 1, \ldots, 4$), roczną niezawodność izolacji linii 110-400 kV można wyznaczyć na podstawie niezawodności składowych (10 a) i (10 b), dotyczących kolejno łańcuchów izolatorów i odstępów powietrznych (dla $t = T$). Uwzględniając, że zawodność łańcuchów izolatorów związana jest głównie z narażeniami zabrudzeniowymi przy napięciu przemiennym i w znacznie mniejszym stopniu przy przepięciach dorywczych wolnozmiennych [73], a zawodność odstępów powietrznych z przepięciami piorunowymi i łączeniowymi [59], wzór (11) przyjmuje postać:

$$R(T) \cong (1-n_{\ell}P_1)\,(1-n_{\ell}P_2)\,(1-n_{a3}P_3)\,(1-n_{a4}P_4) \quad \text{dla} \quad P_\omega \leq 0{,}01, \omega = 1, \ldots, 4, \tag{12}$$

gdzie:

P_1, P_2 - prawdopodobieństwo zakłócenia zabrudzeniowego w ciągu roku na jednym obliczeniowym łańcuchu izolatorów, przy napięciu przemiennym oraz przepięciach dorywczych wolnozmiennych;

P_3, P_4 - prawdopodobieństwo zakłócenia w ciągu roku na jednym odstępie powietrznym, przy przepięciach łączeniowych oraz piorunowych;

n_{ℓ} - zastępcza liczba łańcuchów obliczeniowych (rozdział 3.5);

$n_{a3} \cong n_{as} + n_{aw} \leq 2n_{\ell}$ - liczba odstępów powietrznych na konstrukcjach wsporczych (rys. 7);

$n_{a4} \cong 2$ - szacunkowa liczba odstępów powietrznych, narażonych na przeskok przy uderzeniu pioruna (przy założeniu przepływu prądu pioruna do ziemi przez uziemioną konstrukcję słupa).

Na terenach o niepomijalnym zanieczyszczeniu atmosfery, zawodność zabrudzeniowa przy przemiennym napięciu roboczym $P_1 \geq P_2 > P_3 > P_4$, ponieważ:

- łańcuchy izolatorów wymiarowane ze względu na narażenie zabrudzeniowe narzucają pośrednio długości pozostałych odstępów izolacyjnych na słupie, najczęściej o dostatecznej wytrzymałości udarowej [84, 85],
- wytrzymałość zabrudzeniowa łańcuchów izolatorów jest znacznie mniejsza od wytrzymałości udarowej współzależnych odstępów powietrznych na słupie (rozdział 2.3),
- możliwość spowodowania przeskoku zabrudzeniowego przez przepięcia(szczególnie piorunowe) jest bardzo ograniczona ich krótkim czasem trwania oraz praktycznie pomijalnym prawdopodobieństwem występowania przepięć o znacznych amplitudach w chwilach największego narażenia zabrudzeniowego w ciągu roku [98, 100, 113, 120, 124, 125],
- zwarcia spowodowane przeskokami na odstępach powietrznych wskutek przepięć są na ogół skutecznie likwidowane przez automatyczne układy zabezpieczeń, szczególnie SPZ.

Wynika stąd, że w obliczeniach praktycznych:

$$R(T) \cong (1-n_1 P_1)\,(1-n_1 \psi_2 P_1)\,(1-n_{a3} \psi_3 P_1)\,(1-n_{a4} \psi_4 P_1) \leq (1-n_1 P_1) = R_1(T), \quad (13)$$

gdzie: $\psi_\omega = P_\omega / P_1 = P_\omega / F\left(\frac{1-\bar{z}_1}{\sigma_1}\right) < 1$ dla $\omega = 2,3,4$ - względna zawodność roczna układu izolacyjnego w różnych stanach zagrożenia w odniesieniu do zawodności zabrudzeniowej łańcucha obliczeniowego przy napięciu roboczym (posiadane dane pozwalają jedynie oszacować, że $\psi_\omega \to 0$, szczególnie dla łańcuchów o wytrzymałości $\bar{z}_1 \geq 1,4$).

Ze względu na zakres pracy i wyniki powyższej analizy, dalsza część rozdziału 3 dotyczy wyłącznie zawodności zabrudzeniowej przy przemiennym napięciu roboczym (stan zagrożenia $\omega = 1$) oraz wynikających stąd modeli obliczeniowych dla izolacji liniowej na terenach przemysłowych.

3.2. Modele obliczeniowe oparte na wynikach badań terenowych i laboratoryjnych

Badania terenowe w stacjach doświadczalnych mają na celu przede wszystkim sprawdzenie określonych konstrukcji izolatorów w trudnych warunkach zabrudzeniowych. Są one dotychczas nieznormalizowane i obejmują: obserwację wyładowań niezupełnych, rejestrację przeskoków, okresowe pomiary rezystancji powierzchniowej izolatorów, natężenia zabrudzeń i czynników meteorologicznych oraz niekiedy rejestrację prądów upływu. Ze względu na ograniczone możliwości wykonywania prób laboratoryjnych i znaczną niejednolitość izolacji liniowej, wyniki tych badań dostarczają ważnych informacji o praktycznej przydatności różnych typów izolatorów. Uważane są za

miarodajne, jakkolwiek mają najczęściej charakter porównawczy i odnoszą się do warunków lokalnych [54, 77, 96, 138, 148, 150]. Wykonywane są jednak w warunkach rzeczywistych i zmiennych w czasie narażeń środowiskowych oraz przy praktycznie stałym napięciu roboczym (niezakłócone procesy powstawania przeskoków).

Dotychczasowe próby wykorzystania rejestrowanych w stacjach czasów do przeskoku do oceny własności izolatorów nie dawały oczekiwanych rezultatów. Zdaniem autora, wynika to nie tylko z krótkiego niekiedy okresu badań, ale przede wszystkim z nieuwzględniania sezonowej zmienności narażenia zabrudzeniowego w ciągu roku. Zmienność ta powoduje, że rejestrowane czasy do przeskoku nie mogą być bezpośrednio wykorzystywane do obliczeń niezawodnościowych. Konieczny jest ich podział na czasy sezonowe - zsumowane dla każdego z okresów T_s, wynikających z modelu zmienności narażenia (np. rys. 9). Czasy te mają w przybliżeniu wykładniczy rozkład prawdopodobieństwa, ponieważ sezonowe intensywności przeskoków:

$$\lambda_s \approx \frac{1}{\tau_{p,s}} = \text{const}, \quad \text{przy czym} \quad \tau_p = \sum_s \tau_{p,s}, \tag{14}$$

gdzie: $s = 1,2,\ldots,$-wskaźnik sezonowości narażenia w ciągu roku;
$\tau_{p,s}$-średni sezonowy czas do przeskoku;
τ_p-zarejestrowany czas do przeskoku (łączny).

Znając model zmienności narażenia w ciągu roku (rozdział 3.1) oraz sezonowe czasy do przeskoku (po rozłożeniu zarejestrowanych czasów na składniki odpowiadające każdemu z sezonów), prawdopodobieństwo przeskoku w okresie T_s, czyli tzw. zawodność sezonowa badanego układu wynosi:

$$P_1(T_s) = 1 - \exp\left(-\frac{T_s}{\tau_{p,s}}\right), \quad s = 1,2,\ldots \tag{15}$$

Prawdopodobieństwo przeskoku w ciągu roku, tj. zawodność roczna układu:

$$P_{/1}(T) = 1 - \prod_s (1 - P_1(T_s)) = 1 - \exp\left(-\sum_s \frac{T_s}{\tau_{p,s}}\right) = 1 - \exp(-\lambda_{1,max} T'), \tag{16}$$

gdzie: $\lambda_{1,max}$ - największa sezonowa intensywność przeskoków w ciągu roku;
T' - zredukowany rok obliczeniowy [36, 39].

Proponowany sposób postępowania został sprawdzony i wykorzystany przez autora dla izolatorów liniowych badanych w latach 1965-1976 w stacjach doświadczalnych 110 kV Zabrze i Bolesław [36, 37]. Stacje te zlokalizowane są w Górnośląskim Okręgu Przemysłowym, w miejscach o znacznym zanieczyszczeniu atmosfery (warunki zbliżone do strefy IV, konduktywności powierzchniowe powłok na izolatorach w przybliżeniu 25...30 μS). Próby tam wykonywane są reprezentatywne dla terenów, na których występują największe trudności eksploatacyjne [89, 90]. Z powodu różnic jakościowych w

składzie zanieczyszczeń, specyfika zabrudzeniowa nie jest w obu stacjach jednakowa, ale jak wykazały pomiary konduktywności powłok i czasów do przeskoku [89, 91, 92], zagrożenie izolatorów jest bardzo podobne (wyniki potraktowano łącznie). Analizowany materiał obejmował czasy do przeskoków dla różnych izolatorów, ponad 470 wyników pomiaru konduktywności powłok i 120 wyników natężenia opadów atmosferycznych w różnych okresach roku [36, 37]. Istotne zagrożenie izolatorów występowało jedynie w okresie od października do marca; model sezonowej zmienności narażenia - zbliżony do podanego na rys. 9 - sprawdzono statystycznie w pracy [35] oraz opisano w [36] i [37].

Na podstawie sezonowych czasów do przeskoku obliczono zawodności roczne 20 łańcuchów izolatorów długopniowych i kołpakowych. Ocena porównawcza tych układów była jednak znacznie utrudniona, ponieważ materiał statystyczny był ograniczony i dotyczył izolatorów umieszczanych na stanowiskach probierczych w rozmaitych okresach roku (istotne zwłaszcza dla izolatorów najmniej wytrzymałych, zawieszanych latem, na których przeskoki występowały w najbliższym okresie jesienno-zimowym). Innego rodzaju trudność wynika z charakteru prób w stacjach doświadczalnych, które są przyspieszane ze względu na oszczędność czasu. W praktyce osiąga się to w ten sposób, że bada się układy o wytrzymałości na ogół znacznie mniejszej od wymaganej w tych samych warunkach podczas eksploatacji (mogą być stosowane dopiero po zwielokrotnieniu liczby izolatorów). Przykładowo, roczne zawodności badanych łańcuchów przekraczały 60%, tzn. były wielokrotnie większe od wartości dopuszczalnych w eksploatacji. Nieliniowe i trudne do określenia zależności między zawodnością a drogą upływu izolatorów mogą być poza tym przyczyną błędnej oceny praktycznie stosowanych rozwiązań [36]. Najlepsze byłoby porównywanie układów o zawodności rocznej $P_1(T) < 0{,}01$ w zadanych warunkach środowiskowych, ale ze względu na zbyt długi okres prób jest to praktycznie niemożliwe.

Badania terenowe powinny być jednak kontynuowane, a nawet wykonywane w szerszym niż dotąd zakresie (rejestracja szczytowych wartości prądu upływu). Wynika to z potrzeb konstrukcyjnych, eksploatacyjnych i racjonalnego doboru izolatorów [77, 86, 95, 149]. Na podstawie wyników tych badań można wykonywać również obliczenia niezawodnościowe dla różnych typów izolatorów w naturalnych warunkach zabrudzeniowych. Wyrażając zawodność sezonową (15) za pomocą dystrybuanty rozkładu normalnego wytrzymałości badanego łańcucha izolatorów [36, 43], uzyskuje się bowiem, że:

$$P_1(T_s) = 1 - \exp(-\lambda_s T_s) = P_1(\bar{z}_s \leq 1) = \Phi\left(\frac{1 - \bar{z}_s}{\sigma_1 \bar{z}_s}\right) = 0{,}5 + \Phi\left(\frac{1 - \bar{z}_s}{\sigma_1 \bar{z}_s}\right), \qquad (17)$$

gdzie: $\bar{z}_s$ - średnia wytrzymałość sezonowa (p.u.);

$\sigma_1 = 0{,}1$ (0,15) - względne odchylenie standardowe napięcia prze-

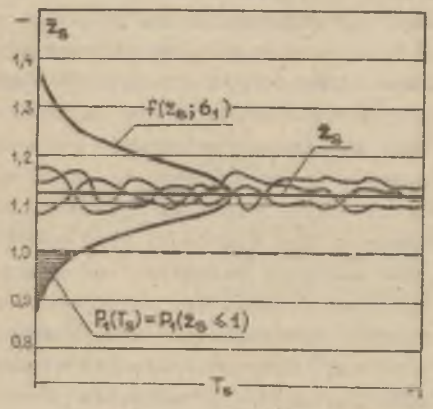
skoku zabrudzeniowego w warunkach rzeczywistych (s.|40-41);

$w = \frac{1 - \bar{z}_s}{\sigma_1 \bar{z}_s}$ - unormowana wytrzymałość sezonowa;

$F(\bar{z}_s; \sigma)$ - dystrybuanta rozkładu normalnego;

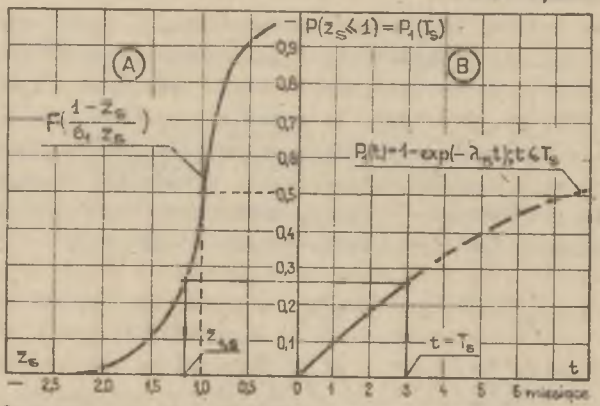
$\Phi(w) = \int_0^{|w|} (-0{,}5v)\, dv$ - stablicowana funkcja Laplace'a [178].

Przykład zależności prawddopodobieństwa (17) od sezonowej wytrzymałości pokazano na rys. 10. W przybliżeniu, jest ono równe liczbowo zakreskowanej powierzchni pod krzywą gęstości prawdopodobieństwa $f(\bar{z}_s; \sigma_1) = dF(\bar{z}_s; \sigma_1)/d\bar{z}_s$ i rośnie przy zmniejszaniu się $\bar{z}_s$ oraz wzroście σ_1. Na podstawie wyników prób w stacji doświadczalnej oraz dystrybuanty rozkładu normalnego można oszacować więc - jak pokazano na rys. 11-średnią wytrzymałość sezonową badanego łańcucha izolatorów $\bar{z}_{1,s}$, odpowiadającą zawodności (15). W taki sam sposób wyznacza się najmniejszą roczną wytrzymałość $\bar{z}_{1,min}$ (najmniejszą z wartości sezonowych), odpowiadającą zawodności (16), ponieważ:



Rys. 10. Ilustracja zależności między zawodnością sezonową a wytrzymałością zabrudzeniową łańcucha izolatorów

$$P_1(T) = 1 - \exp(-\lambda_{1,max} T') = P_1(\bar{z}_{1,min} \leq 1) = F\left(\frac{1 - \bar{z}_{1,min}}{\sigma_1 \bar{z}_{1,min}}\right). \quad (18)$$



Rys. 11. Sezonowe prawdopodobieństwo przeskoku zabrudzeniowego na łańcuchu izolatorów wyrażone ze pomocą dystrybuanty rozkładu:

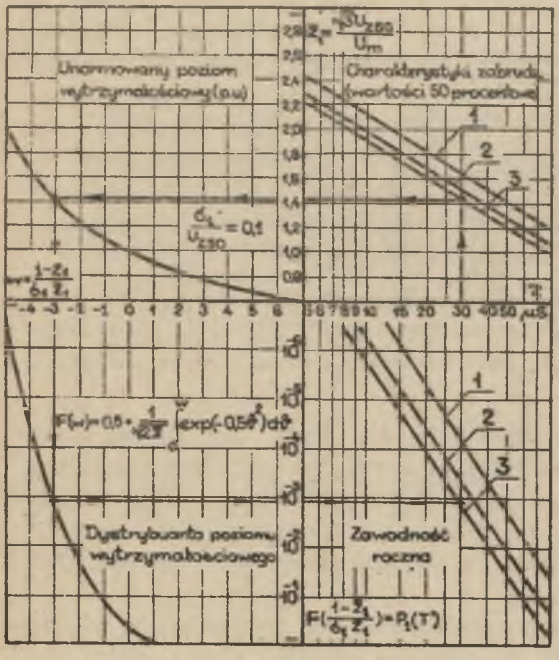
A) normalnego (dla średniej sezonowej wytrzymałości $\bar{z}_s$), B) wykładniczego (dla sezonu o czasie trwania T_s)

Podana zależność pozwala również na pośrednie wykorzystanie wyników laboratoryjnych prób wytrzymałościowych izolatorów do szacunkowych obliczeń niezawodnościowych. Zakładając, że wytrzymałość $\bar{z}_1$, wynikająca z charakterystyki zabrudzeniowej, odpowiada $\bar{z}_{1,min}$ [43], największa sezonowa intensywność przeskoków dla badanego łańcucha izolatorów

$$\lambda_{1,max} = -\frac{1}{T} \cdot \ln\left[0{,}5 - \Phi\left(\frac{1-\bar{z}_{1,min}}{\sigma_1\ \bar{z}_{1,min}}\right)\right]. \qquad (19a)$$

natomiast oczekiwana liczba przeskoków w ciągu roku

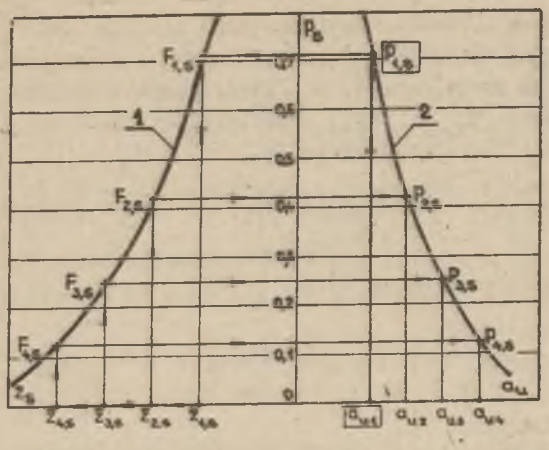
$$N_p(T) = \lambda_{1,max} T = -\ln\left[0{,}5 - \Phi\left(\frac{1-\bar{z}_{1,min}}{\sigma_1\ \bar{z}_{1,min}}\right)\right]. \qquad (19b)$$



Rys. 12. Graficzno-analityczny sposób wyznaczania rocznej zawodności zabrudzeniowej izolatorów na podstawie wyników prób laboratoryjnych (rys. 1 -Z. 2). Oznaczenia charakterystyk izolatorów: 1-VKLS 75/21,2-VKLF 75/16, 3-LP 75/17

Sposób graficzno-analityczne wyznaczania zawodności rocznej izolatorów na podstawie danych laboratoryjnych ilustruje rys. 12; strzałki pokazują kolejność postępowania. Obliczenia przykładowe wykonano dla łańcuchów przelotowych 110 kV (pojedyncze izolatory długopniowe). W prawej dolnej półpłaszczyźnie rysunku uzyskano zależności między zawodnością roczną izolatorów a konduktywnością powierzchniową powłoki.

Zasadniczych danych do obliczeń niezawodnościowych dostarczają jednak obecnie pomiary wykonywane w stacjach terenowych, które można wykorzystać również do oceny izolatorów w warunkach zbliżonych do rzeczywistych w eksploatacji. Metoda zaproponowana przez autora [36, 38] polega na zastosowaniu w tym celu tzw. charakterystyk zawodnościowych, czyli zależności między roczną zawodnością w warunkach rzeczywistych a drogą upływu łańcuchów izolatorów. Dla znanego modelu zmienności narażenia w ciągu ro-



Rys. 13. Ilustracja sposobu wyznaczania sezonowej charakterystyki zawodnościowej:
1 - dystrybuanta rozkładu normalnego $F\left(\frac{1-\bar{z}_s}{\sigma_1 \bar{z}_s}\right) = P_s = P_1(T_s)$ dla $\sigma_1 = \text{const.}$

ku współrzędnymi pierwszego punktu sezonowej charakterystyki zawodnościowej (rys. 13) są: zawodność $P_{1,s} = P_1(T_s)$ wg wzoru (15) i droga upływu a_{u1}, zbadanego łańcucha izolatorów. Współrzędne dalszych punktów charakterystyki można obliczyć przy założeniu, że napięcia przeskoku zabrudzeniowego ma rozkład normalny i rośnie praktycznie liniowo ze wzrostem drogi upływu i liczby izolatorów w łańcuchu [2, 55, 59, 87, 117]. Po naniesieniu na osi odciętych prawej półpłaszczyzny kolejnych wartości drogi upływu a_{u2}, a_{u3}, ..., zwiększających się skokowo w stosunku do a_{u1}, ze wzoru (17) i tablicy rozkładu normalnego wynika średnia sezonowa wytrzymałość:

- zbadanego łańcucha $\bar{z}_{1,s}$ (dla znanej zawodności $P_{1,s} = P_{1,s}$),
- układu o założonej do obliczeń drodze upływu, np. $a_{u2} > a_{u1}$, wynosząca $\bar{z}_{2,s} = \eta_1 \bar{z}_{1,s}$ ($\eta_1 = a_{u2}/a_{u1} > 1$ jest krotnością drogi upływu zbadanego łańcucha).

Odczytana z tablicy wartość dystrybuanty $F_{2,s}$ dla $\bar{z}_{2,s}$ (przy ustalonym σ_1), przeniesiona na prawą półpłaszczyznę rys. 13, wyznacza drugi punkt charakterystyki $(P_{2,s}; a_{u2})$. Po obliczeniu zawodności sezonowych dla kolejnych wartości drogi upływu (wyznaczeniu charakterystyk sezonowych), za pomocą wzoru (16) uzyskuje się roczną charakterystykę zawodnościową.

W podany sposób wyznaczono roczne charakterystyki zawodnościowe dla 20 typów izolatorów liniowych, uzyskując znacznie różniące się wyniki dla szerokiego przedziału $\sigma_1 = 0{,}05 \ldots 0{,}2$ [36, 37]. Dokładne wartości odchyleń σ_1 nie są znane, wiadomo jednak, że podczas prób laboratoryjnych są one mniejsze niż w warunkach rzeczywistych (nierównomierne powłoki na izolatorach i wahania napięcia w sieci). Na podstawie dotychczasowych danych wydaje się, że względne odchylenie standardowe napięcia przeskoku dla pojedynczych łańcuchów izolatorów zbliżone jest w warunkach rzeczywistych do 0,1 (0,15), a wartości $\sigma_1 \geq 0{,}15$ występują sporadycznie i prowadzą do zbyt pesymistycznej oceny ich własności, ponieważ:

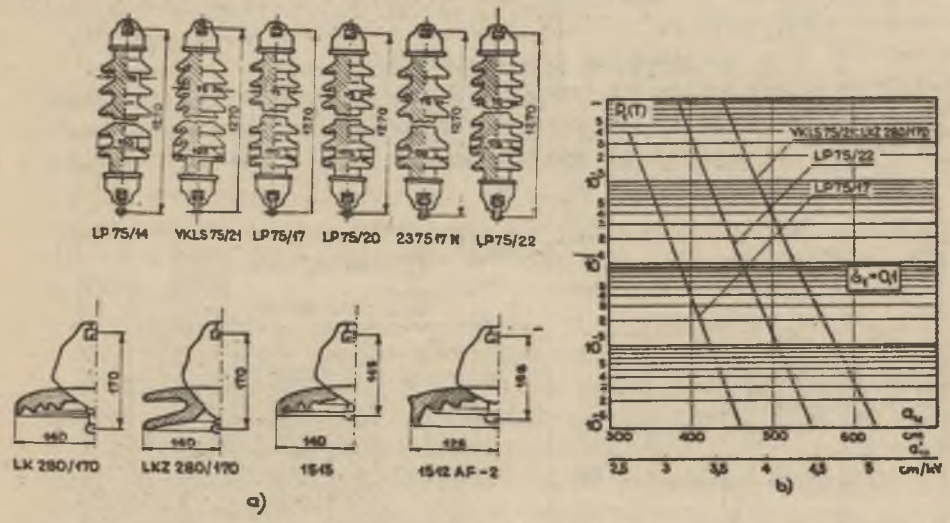
- nierównomierny rozkład warstwy przewodzącej na powierzchni izolatorów

nie powoduje znacznego wzrostu rozrzutu napięć przeskoku [71, 76,82, 99, 121, 135, 136],

- wytrzymałości obliczone dla takich odchyleń są bardzo małe; nie potwierdzają tego dotychczasowe dane krajowe i zagraniczne [28, 32, 33,152],
- droga upływu łańcucha izolatorów, wyznaczona z charakterystyk zawodnościowych dla znacznych odchyleń standardowych, jest kilkakrotnie większa od wartości wymaganych, wynikających z wieloletnich doświadczeń eksploatacyjnych [36, 37].

Do podobnych wniosków doszedł autor na podstawie wyników badań izolatorów we francuskich stacjach doświadczalnych [30 do 33], porównując wytrzymałości bezpośrednio przed przeskokiem, wyznaczane kolejno za pomocą: rejestrowanych wartości szczytowych prądu upływu i charakterystyk laboratoryjnych $\bar{z}_1 = f(U\sqrt{I_u})$, tak jak na rys. 2 -Z. 2 oraz normalnego rozkładu prawdopodobieństwa (dla $P_1 = 1$).

Przykładowe zestawienie niektórych typów badanych izolatorów i wybranych charakterystyk zawodnościowych znajduje się na rys. 14. Ograniczono



Rys. 14. Niektóre izolatory liniowe badane w stacjach doświadczalnych 110 kV Zabrze i Bolesław oraz wybrane charakterystyki zawodnościowe [36,37]:
a) typy izolatorów, b) charakterystyki zawodnościowe

się do pokazania zawodności $P_1(T) \leq 0{,}01$, tzn. istotnych z praktycznego punktu widzenia [39]. Na osi odciętych wprowadzono dodatkową skalę dla jednostkowej drogi upływu $s'_u = s_u/U_m$ (U_m=123 kV). Wykonana analiza wykazała znaczne różnice własności powierzchniowych rozmaitych typów izolatorów, ale potwierdziła istotne znaczenie drogi upływu jako parametru konstrukcyjnego [36, 40, 42]. Stwierdzone różnice między jednostkowymi drogami upływu sięgały 50% przy tych samych niezawodnościach. Największą efektyw-

ność wykorzystania drogi upływu wykazywały izolatory długopniowe o mniejszej liczbie kloszy przy zadanej długości konstrukcyjnej (np. LP 75/17) oraz większość izolatorów kołpakowych (z wyjątkiem LKZ 280/170).

Charakterystyki zawodnościowe, wyrażone w półlogarytmicznym układzie współrzędnych, można aproksymować liniowo w przedziale $P_1(T) = 10^{-6}...10^{-2}$ (rys. 14). Jednostkowa droga upływu izolatora związana jest więc z roczną zawodnością łańcucha obliczeniowego w określonych warunkach środowiskowych następująco:

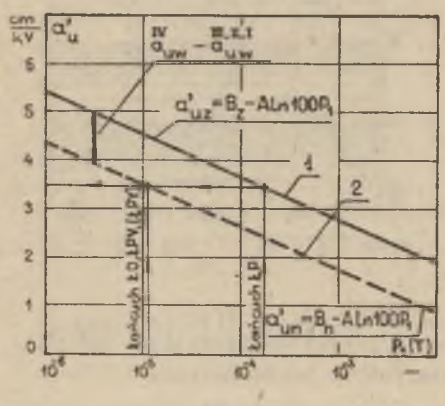
$$a'_u = B - A \ln 100 P_1 \quad \text{dla} \quad 10^{-6} \leq P_1 (T) \leq 0{,}01, \qquad (20)$$

gdzie: B[cm/kV] - parametr przesunięcia zależny od rodzaju łańcucha, typu izolatora i strefy zabrudzeniowej;

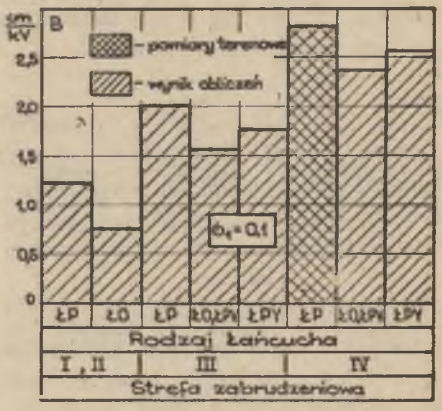
A[cm/kV] - parametr nachylenia charakterystyki (20).

Wyznaczone w pracy [36] średnie wartości parametrów A i B dla 20 typów izolatorów w warunkach zbliżonych do IV strefy zabrudzeniowej (łańcuchy przelotowe) wynoszą odpowiednio 0,13...0,3 cm/kV i 2,82...3,4 cm/kV (dla $\sigma_1 = 0{,}1...0{,}15$). Ze względu na jednoczesną zmienność nachylenia i przesunięcia charakterystyk (20) nie stwierdzono wyraźnej zależności stosunku wartości tych parametrów od typu izolatorów.

Obecnie brak jest możliwości doświadczalnego ich wyznaczenia dla różnych rodzajów łańcuchów i stref zabrudzeniowych. Przyjmując w uproszczeniu, że wartości parametru A nie ulegają zmianie [36], można zastosować



Rys. 15. Charakterystyki zawodnościowe:
1 - znana z prób w stacji doświadczalnej w określonej, np. IV strefie zabrudzeniowej (łańcuchy przelotowe),
2 - nieznana, wyznaczana obliczeniowo dla pozostałych stref zabrudzeniowych i rodzajów łańcuchów, a_{uw} - minimalne wymagane drogi upływu izolatorów w strefach I...IV [161]



Rys. 16. Średnie wartości parametru przesunięcia w charakterystyce (20) dla różnych rodzajów łańcuchów izolatorów i stref zabrudzeniowych [44]

przybliżony sposób postępowania, wynikający z rys. 15 i polegający na wykorzystaniu równoległych z założenia charakterystyk zawodnościowych:

1) znanej z pomiarów, np. dla izolatorów zawieszonych pionowo w IV strefie,
2) nieznanej, tj. dla pozostałych rodzajów łańcuchów we wszystkich strefach i łańcuchów przelotowych poza strefą IV.

Średnie wartości parametru przesunięcia dla różnych rodzajów łańcuchów izolatorów i stref zabrudzeniowych podano na rys. 16. Szczegółowe wyniki obliczeń znajdują się w pracy [44]. Parametry B dla łańcuchów przelotowych w strefach poza IV obliczono przy założeniu, że średnie jednostkowe drogi upływu, wynikające ze wzoru (20), odpowiadają wartościom wymaganym w normie [161]; dla rzędów izolatorów w łańcuchach odciągowych i specjalnych uwzględniono wpływ położenia na ich niezawodność (rozdział 3.3).

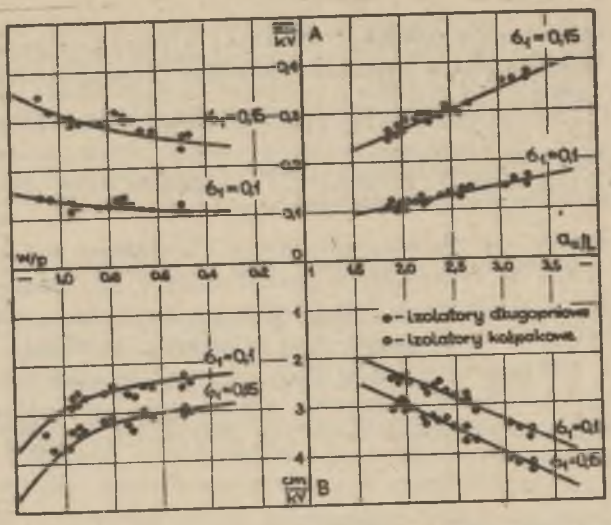
3.3. Ocena wpływu kształtu geometrycznego i położenia izolatorów

Wytrzymałość powierzchniowa izolatorów zależy nie tylko od długości drogi upływu, ale również od kształtu geometrycznego (rodzaju konstrukcji, ukształtowania kloszy); wynika to z badań laboratoryjnych i modelowych [61, 113, 114, 126, 127, 134]. Jednocześnie, zastosowanie rozmaitych rozwiązań konstrukcyjnych daje przy tej samej drodze upływu zróżnicowane efekty niezawodnościowe. Wykazują to m.in. badania izolatorów w stacjach doświadczalnych na terenach przemysłowych [148, 150] oraz analiza wykonana przez autora na podstawie wyników rejestracji maksymalnych wartości prądu upływu [33].

Wyniki uzyskane w krajowych stacjach doświadczalnych 110 kV [36, 38] pozwoliły na dokonanie przybliżonej oceny wpływu kształtu geometrycznego izolatorów na ich niezawodność w warunkach zbliżonych do eksploatacyjnych. Wykorzystano w tym celu parametry obliczeniowe A i B z charakterystyki (20), stanowiące wskaźniki zróżnicowania ich własności powierzchniowych. Mniejsze wartości tych parametrów świadczą o lepszej efektywności konstrukcji, ponieważ odpowiadają mniejszym zawodnościom przy tej samej jednostkowej drodze upływu (rys. 14). Oznacza to, że do zapewnienia określonej niezawodności w zadanych warunkach środowiskowych wystarcza mniejsza droga upływu.

Na rys. 17 podano zależności między parametrami obliczeniowymi a współczynnikami:

- e_u/L, stosunkiem drogi upływu do długości części izolacyjnej badanych izolatorów (silne dodatnie korelacje liniowe),
- w/p, stosunkiem wysięgu do podziałki kloszy (silne korelacje nieliniowe).



Rys. 17. Zależności parametrów A i B od współczynników konstrukcyjnych a_u/L oraz w/p dla izolatorów liniowych badanych w stacjach terenowych Zabrze i Bolesław [36]

W obliczeniach przyjęto w uproszczeniu, że stopień ukształtowania powierzchni izolatora określa współczynnik a_u/L, przy czym L jest długością części izolacyjnej konstrukcji w końcowym stadium przeskoku zabrudzeniowego. Jak podano w tab. 1, dla izolatorów długopniowych jest to odstęp w powietrzu między okuciami ($L = L_1$). Dla izolatorów kołpakowych, ze względu na przyleganie łuku kaskadowego do okuć kolejnych ogniw w łańcuchu, jest to w przybliżeniu zastępcza średnica klosza ($L \equiv D_z$), związana z rezystancją powierzchniową izolatorów [2, 114].

Na podstawie wykonanych badań terenowych i analizy regresji [36] stwierdzono, że efektywność wykorzystania własności powierzchniowych izolatorów maleje ze wzrostem współczynnika a_u/L (w miarę skomplikowania kształtu geometrycznego) oraz ze wzrostem współczynnika w/p (przy zagęszczaniu kloszy). Zbyt skomplikowany kształt i nieodpowiednia koordynacja wymiarów - przy jednostronnej tendencji do wydłużania drogi upływu - mogą więc być przyczyną niewspółmiernie małego wzrostu wytrzymałości i niezawodności izolatorów w warunkach rzeczywistych, przede wszystkim wskutek pogorszenia zdolności do ich samooczyszczania. Spośród badanych izolatorów, dobrą efektywność pod względem własności powierzchniowych i niezawodności w warunkach rzeczywistych wykazywały konstrukcje o współczynniku ukształtowania powierzchni $a_u/L < 2,5$ i zagęszczenia kloszy $w/p < 1$.

Przedstawione rezultaty analizy odnoszą się do izolatorów długopniowych z kloszami daszkowymi, śrubowymi i schodkowymi oraz do niektórych typów izolatorów kołpakowych - badanych w krajowych warunkach silnych zabrudzeń przemysłowych. Nie dotyczą one izolatorów długopniowych o bardzo

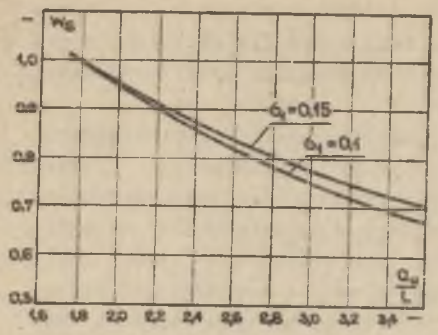
krótkim skoku oraz o kloszach z przemiennie różnymi średnicami (w Polsce nigdy nie stosowanych). Uzyskane rezultaty mają wprawdzie charakter przybliżony, ale są zgodne z wynikami wykonanych poprzednio prób modelowych i laboratoryjnych [113, 114, 121, 127, 144].

Należy podkreślić, że mniejsze wartości współczynników ukształtowania powierzchni (a_u/L) i zagęszczenia kloszy (w/p) nie świadczą jednoznacznie o lepszych własnościach izolatora w każdych warunkach zabrudzeniowych; istotne są również pozostałe parametry konstrukcyjne - szczególnie wysięg, podziałka, średnica i kąt nachylenia kloszy [115, 126, 127]. Najważniejsza jest jednak dostateczna wytrzymałość i niezawodność łańcucha izolatorów w określonych warunkach środowiskowych, przy zadanym napięciu roboczym. Przykładowo, wartości współczynników, świadczące o dobrej efektywności konstrukcji ($a_u/L = 2{,}28$ i $w/p = 0{,}96$), posiada w przybliżeniu izolator długopniowy typu LP 75/17, przydatny w liniach 110 kV w warunkach konduktywności powierzchniowej powłoki do ok. $10\,\mu S$ [89]. Podane warunki spełniają również, praktycznie już nie stosowane, izolatory typu LP 75/12 i LP 75/14, ale ze względu na zbyt małą drogę upływu nie mogą one pojedynczo zapewnić dostatecznej wytrzymałości i niezawodności w linii 110 kV, nawet przy słabym zanieczyszczeniu atmosfery.

Droga upływu - jeden z najważniejszych parametrów konstrukcyjnych - wpływa znacznie na niezawodność izolatorów (duża stromość charakterystyk na rys. 14). Efektywność jej wykorzystania można ocenić na podstawie charakterystyk (20) oraz linii regresji parametrów obliczeniowych A i B względem współczynnika ukształtowania powierzchni, który dla rzeczywistych konstrukcji izolatorów nie przekracza na ogół wartości $(a_u/L)_{min} = 1{,}8$ (rys. 17). Przyjmując za miarę efektywności stosunek jednostkowych dróg upływu (20) dla założonej wartości odniesienia $a_u/L = 1{,}8$ oraz wartości współczynnika ukształtowania powierzchni rozpatrywanego izolatora, wyznaczono tzw. wskaźnik skuteczności:

$$w_s \cong \frac{1}{0{,}25\,\frac{a_u}{L} + 0{,}56} \quad \text{dla} \quad \sigma_1 = 0{,}1 \ldots 0{,}15, \tag{21}$$

który jest tym mniejszy, im większa jest droga upływu izolatora od wymiaru, wzdłuż którego przebiega wyładowanie zupełne w swym stadium końcowym. Pomimo różnego sposobu ujęcia, istnieje dobra zgodność wyników uzyskanych przez autora i rezultatów badań opublikowanych w pracy [114], wykorzystanych następnie w radzieckich wytycznych doboru izolatorów [174]. Zależność tego wskaźnika od współczynnika ukształtowania powierzchni przedstawiono na rys. 18. Przykładowo, izolatory typu LP 75/17 posiadają duży wskaźnik skuteczności, wynoszący 0,88, natomiast izolatory typu VKLS 75/21 tylko ok. 0,74. W takim ujęciu, wskaźnik skuteczności określa również w przybliżeniu wpływ kształtu izolatora na jego niezawodność, ponieważ dobór innych parametrów konstrukcyjnych ograniczony jest wskutek ich wzajemnych, często przeciwstawnych, uzależnień [127].



Rys. 18. Wskaźnik skuteczności wykorzystania drogi upływu izolatorów liniowych w naturalnych warunkach zabrudzeniowych [36, 40]

Poza kształtem geometrycznym, znaczny wpływ na niezawodność wywiera położenie izolatorów w różnych rodzajach łańcuchów. Wskutek znacznie intensywniejszego samooczyszczania przez deszcz i wiatr oraz bardziej równomiernego powierzchniowego rozkładu napięcia, niezawodność w położeniu poziomym lub ukośnym jest znacznie większa niż w położeniu pionowym, przy czym brak jest istotnych różnic przy odchyleniu od pionu o kąt z przedziału 20...90° [21, 26, 104, 143]. W obliczeniach praktycznych dla terenów przemysłowych (ZEOPd) przyjęto, że:

- wyłączenia linii 110 kV powodowane są co najmniej 30-krotnie rzadziej przez przeskoki na łańcuchach odciągowych niż przelotowych [36, 89, 90],
- oczekiwana liczba wyłączeń linii jest proporcjonalna do liczności rzędów izolatorów w łańcuchach i prawdopodobieństwa przeskoku na każdym z nich [36, 39],
- porównywane rodzaje łańcuchów nie są jednakowo liczne, ale zawierają takie same zestawy izolatorów.

Dla linii 110 kV oraz w znacznym przybliżeniu dla linii 220 kV, roczna zawodność jednego rzędu izolatorów w łańcuchu odciągowym lub specjalnym ukośnym:

$$P_1^{o,v} \cong \gamma_o \frac{m_p n'_p}{m_o n'_o} P_1 = k_{o,v} P_1, \qquad (22)$$

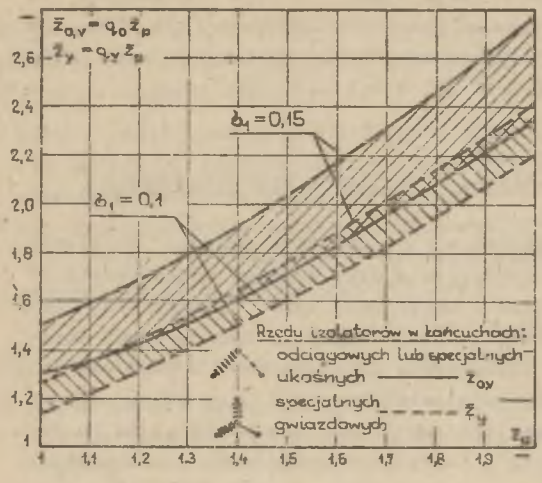
gdzie: $\gamma_o \cong \frac{1}{30}$ - względna liczba wyłączeń linii wskutek przeskoków na łańcuchach odciągowych [36, 89, 90];

$m_p n'_p$, $m_o n'_o$ - liczności rzędów w łańcuchach przelotowych i odciągowych w przeliczeniu na 1 km linii 110 kV (zał. 8);

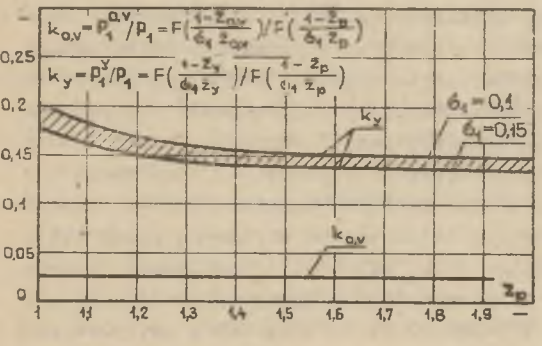
$k_{o,v} \cong 0{,}025$ - względna zawodność rzędu obliczeniowego w łańcuchu odciągowym lub specjalnym ukośnym w odniesieniu do zawodności łańcucha przelotowego [44].

Na podstawie wzoru (18), względna zawodność ukośnie zawieszonego rzędu izolatorów:

$$k_{o,v} = \frac{P_1^{o,v}}{P_1} = \frac{P\left(\frac{1 - \bar{z}_{o,v}}{\sigma_1 q_o \bar{z}_p}\right)}{P\left(\frac{1 - \bar{z}_p}{\sigma_1 \bar{z}_p}\right)} = \frac{P\left(\frac{1 - q_o \bar{z}_p}{\sigma_1 q_o \bar{z}_p}\right)}{P\left(\frac{1 - \bar{z}_p}{\sigma_1 \bar{z}_p}\right)} = \varphi(\bar{z}_p; \sigma_1, q_o), \qquad (23)$$



Rys. 19. Wytrzymałość zabrudzeniowa rzędów obliczeniowych izolatorów w łańcuchach odciągowych i specjalnych względem łańcuchów przelotowych w liniach 110 i 220 kV [44]



Rys. 20. Względna zawodność zabrudzeniowa rzędów obliczeniowych izolatorów w łańcuchach odciągowych i specjalnych w odniesieniu do łańcuchów przelotowych w liniach 110 220 kV [44]

gdzie: $\bar{z}_p, \bar{z}_{o,v}$ - średnie wytrzymałości (p.u.) jednego rzędu izolatorów w łańcuchu przelotowym oraz odciągowym lub ukośnym;

$q_o = \bar{z}_{o,v}/\bar{z}_p = 1,16...1,37$ wytrzymałość względna rzędu izolatorów zawieszonego ukośnie dla $\sigma_1 = 0,1...0,15$ [44].

Wytrzymałość względną q_o dla $\bar{z}_p \geq 1$ obliczono na podstawie wartości: dystrybuanty $F(\bar{z}_p; \sigma_1) = P_1(T)$, zawodności (22) i wytrzymałości $\bar{z}_{o,v}$ (z tablic rozkładu normalnego). Zależności między rozpatrywanymi poziomami - praktycznie liniowe dla $\bar{z}_p \geq 1,4$ - pokazano na rys. 19. Wynika stąd, że łańcuch izolatorów w położeniu ukośnym ma wytrzymałość większą niż w położeniu pionowym o ponad 15...35%; podobne wyniki uzyskano w pracach [26, 143].

Dla rzędu izolatorów w specjalnym układzie gwiazdowym, średnia wytrzymałość:

$$\bar{z}_y = 0,5\,(\bar{z}_p + \bar{z}_o) = 0,5\,(1 + q_o)\,\bar{z}_p = q_y \bar{z}_p \qquad (24)$$

oraz względna zawodność roczna:

$$k_y = \frac{p_1^y}{p_1} = \frac{F\left(\frac{1-\bar{z}_y}{\sigma_1 \bar{z}_y}\right)}{F\left(\frac{1-\bar{z}_p}{\sigma_1 \bar{z}_p}\right)} = \frac{F\left(\frac{1-q_y \bar{z}_p}{\sigma_1 q_y \bar{z}_p}\right)}{F\left(\frac{1-\bar{z}_p}{\sigma_1 \bar{z}_p}\right)} = \varphi(\bar{z}_p; \sigma_1, q_y), \qquad (25)$$

gdzie: $q_y = 0,5\,(1 + q_o) = 1,08...1,18$ - wytrzymałość względna jednego rzędu izolatorów w układzie gwiazdowym dla $\bar{z}_p \geq 1,4$ i $\sigma_1 = 0,1...0,15$ [44].

Wytrzymałość rzędu izolatorów w układzie gwiazdowym (rys. 19) jest więc większa niż w położeniu pionowym tylko o ok. 10...20% (mniej niż w poło-

żeniu ukośnym). Względna zawodność takiego rzędu maleje początkowo ze wzrostem wytrzymałości analogicznego łańcucha przelotowego (rys. 20), ale dla $\bar{z}_p \geq 1,4$ - wartości występujących w warunkach eksploatacyjnych -jest praktycznie stała i średnia $k_y \cong 0,14$ ($\sigma_1 = 0,1...0,15$).

3.4. Modele odnowy izolacji liniowej w warunkach zabrudzeniowych

Korzystny wpływ na izolację liniową w rejonach największego narażenia zabrudzeniowego wywiera okresowe czyszczenie oraz wymiana uszkodzonych izolatorów. Ze względów gospodarczych i organizacyjnych, energetyka zainteresowana jest w przedłużaniu okresów między czyszczeniami(zabiegi kosztowne i kłopotliwe). Skuteczność czyszczenia związana jest z jego częstością, która zależy od natężenia, rodzaju zanieczyszczeń i wytrzymałości (niezawodności) izolacji. Ustalana jest ona dotychczas arbitralnie na podstawie doświadczeń eksploatacyjnych i obserwacji wyładowań niezupełnych na izolatorach w niekorzystnych warunkach atmosferycznych [90].Wydaje się że bardziej obiektywną kontrolę izolatorów oraz czasu do kolejnego czyszczenia można by przeprowadzać na podstawie wyników rejestracji prądu upływu. Wskaźnikiem byłaby różnica między maksymalnymi wartościami prądu dopuszczalnego dla danego łańcucha izolatorów i zarejestrowanego w warunkach naturalnych [149]. Sposób ten umożliwia skuteczne i uproszczone działanie eksploatacyjne, jeśli dysponuje się dobrze wyposażonym laboratorium (w celu pomiarów maksymalnych dopuszczalnych wartości prądu upływu przed przeskokiem zabrudzeniowym) oraz aparaturą rejestrującą prądy upływu na izolatorach testowych w warunkach rzeczywistych.

Wymaganą częstość czyszczenia izolatorów na zagrożonych odcinkach linii można również oszacować na podstawie spodziewanego prawdopodobieństwa przeskoku na łańcuchach przelotowych w najcięższych warunkach pracy [28], tzn. w okresie kilku miesięcy w ciągu roku (rys. 9). Proponowana metoda znalazła praktyczne zastosowanie przy wyznaczaniu wymaganych czasokresów czyszczenia izolatorów liniowych 110-220 kV na terenie GOP - po wprowadzeniu nowego podziału terenu na strefy zabrudzeniowe [90].

Zdaniem autora, bardziej uzasadnione wyniki - przydatne również w analizie niezawodnościowej - uzyskuje się w oparciu o teorię odnowy [9, 81], ponieważ czyszczenie:

- nie jest potrzebne, jeśli izolacja ma dostateczną niezawodność,
- jest rodzajem cyklicznej odnowy uprzedzającej wykonywanej wtedy, gdy roczna zawodność izolacji przekroczy poziom uznany za dopuszczalny.

Dokonując próby wyznaczenia uzasadnionej częstości czyszczenia uwzględniono, że konduktywności powłok na izolatorach osiągają wartości graniczne dla strefy w krótkim okresie czasu [86, 91], a koszt związany z niepłanowym wyłączeniem linii jest dużo większy od kosztu czyszczenia izola-

torów na zagrożonym odcinku linii [36, 45]. Rozważania są przybliżone i nie mają charakteru optymalizacyjnego pod względem ekonomiczno-organizacyjnym ze względu na:

- brak w pełni uzasadnionych danych o rzeczywistym rozkładzie czasu między kolejnymi zakłóceniami dla izolacji odcinków linii w szczególnie trudnych warunkach środowiskowych,
- nie wymaganą dużą dokładność obliczeń, sprawdzającą się w praktyce do ok. 0,5 roku (z wyjątkiem przypadków szczególnych, izolatory liniowe czyszczone są na wiosnę lub w lecie).

Zgodnie z prostą okresową strategią zamian profilaktycznych na nieograniczonym odcinku czasu [9, 72], odnowy dokonuje się wówczas, gdy:

a) minął pewien okres czasu τ_o - tzw. przedział odnowy - po którym intensywność zakłóceń na odcinku linii zaczyna wzrastać (czyszczenie izolatorów),
b) nastąpiło wyłączenie linii, spowodowane uszkodzeniem izolatorów lub osprzętu (wymiana awaryjna uszkodzonych elementów).

Założono przy tym, że:

- czyszczenie jest zastępstwem profilaktycznym wykonywanym ściśle co okres τ_o, natomiast awaryjna wymiana izolatorów i osprzętu następuje po każdym wyłączeniu linii wskutek uszkodzeń,
- zastępstwo i wymiana stanowią tzw. odnowę czystą [9], a więc element pierwotny i odnowiony ma taki sam rozkład czasu do przeskoku,
- każdej odnowy dokonuje się w ciągu pomijalnego krótkiego okresu czasu w porównaniu z czasem eksploatacji izolacji linii,
- funkcja wzrostu intensywności zakłóceń w czasie (po okresie τ_o) jest nieznana,
- zredukowany czas eksploatacji t' i okres odnowy τ_o rozpatruje się zgodnie z modelem sezonowej zmienności narażenia, w którym strumień zakłóceń zbliżony jest do prostego strumienia Poissona (rozdział 3.1).

Zgodnie z przyjętymi założeniami, dla odcinka linii 110-220 kV w szczególnie trudnych warunkach środowiskowych, dystrybuanta czasu między kolejnymi wyłączeniami wskutek uszkodzeń izolatorów lub osprzętu:

$$F(t') = 1 - \exp(-\lambda_z t') \tag{26}$$

a funkcja rozkładu czasu między czyszczeniami:

$$G(t') = \begin{cases} 0, & t' \leq \tau_o = \text{const.} \\ 1, & t' > \tau_o \end{cases} \tag{27}$$

gdzie: $\lambda_z = l_z^{m_z} n_z Q_{SPZ}^{k_u} \lambda_{1p}$ - zastępcza intensywność wyłączeń z uszkodzeniami;

l_z [km] - długość odcinka linii;

$m_z n_z$ = 6,6...14,4 [1/km]- zastępcza liczba obliczeniowych rzędów izolatorów [44];

Q_{SPZ} = 0,63...0,59 - prawdopodobieństwo nieudanego działania SPZ [41];

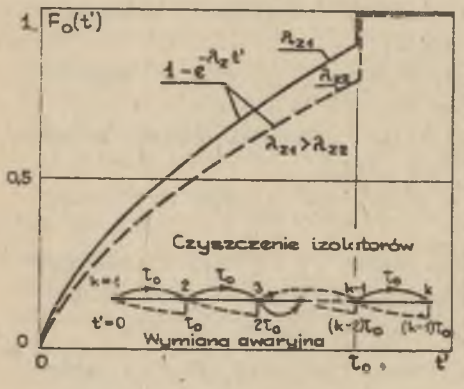
k_u = 0,55...0,43 - współczynnik uszkadzalności izolacji i osprzętu [41];

λ_{1p} - intensywność przeskoków dla łańcucha obliczeniowego.

Dystrybuanta czasu odnowy (rys. 21), tj. między kolejnymi odnowami w postaci czyszczenia lub awaryjnej wymiany:

$$F_o(t') = 1 - \bar{F}(t')\,\bar{G}(t') = \begin{cases} 1-\exp(-\lambda_z t'), & t' \leq \tau_o \\ 1 & t' > \tau_o \end{cases} \qquad (28)$$

gdzie: $\bar{F}(t') = 1 - F(t')$ oraz $\bar{G}(t') = 1 - G(t')$ - funkcje rozkładu wyrażające prawdopodobieństwo, że w okresie $(0,t']$ nie wystąpi wymiana awaryjna i czyszczenie.



Rys. 21. Dystrybuanta czasu między kolejnymi odnowami izolacji liniowej na terenach przemysłowych

Ponieważ transformata Laplace'a-Stieltjesa dystrybuanty (28) odpowiada transformacie Laplace'a $\mathcal{L}$ gęstości prawdopodobieństwa $f_o(t') = dF_o(t')/dt'$, tzn.:

$$\int_0^{\infty} \exp(-pt')\,dF_o(t') \triangleq f_o(t') \triangleq$$

$$\triangleq \frac{1}{p+\lambda_z}\left[\lambda_z + p\exp\left(-(p+\lambda_z)\,\tau_o\right)\right] \qquad (29)$$

więc postać operatorowa tej dystrybuanty:

$$F_o(p) = \frac{1}{p+\lambda_z}\left[\frac{1}{p}\,\lambda_z + \exp(-p+\lambda_z)\,\tau_o\right] \qquad (30)$$

oraz funkcji gęstości:

$$f_o(p) = p\,F_o(p) - F_o(t')_{t=0} = p\,F_o(p), \qquad (31)$$

w półpłaszczyźnie zmiennej zespolonej dla $\mathrm{Re}\,p > 0$.

Wynikająca stąd postać operatorowa gęstości odnowy:

$$n_o(p) = p\,N_o(p) - N_o(t')_{t=0} = p\,N_o(p) = \int_0^{\infty} \exp(-pt')\,dN_o(t') = \frac{f_o(p)}{1-f_o(p)} =$$

$$= \left[\frac{\lambda_z}{p} + \exp\left(-(p+\lambda_z)\,\tau_o\right)\right]\left[1-\exp\left(-(p+\lambda_z)\,\tau_o\right)\right] \qquad (32)$$

oraz oczekiwanej liczby odnowień:

$$N_o(p) = \frac{\lambda_z}{p^2[1-\exp(-(p+\lambda_z)\tau_o)]} + \frac{\exp(-\lambda_z\tau_o)}{p[\exp(p\tau_o)-\exp(-\lambda_z\tau_o)]}. \qquad (33)$$

Po wykonaniu odwrotnej transformacji Laplace'a, oczekiwana liczba odnowień (czyszczenia i wymian awaryjnych łącznie) w zredukowanym przedziale czasu $(0,t']$ wynosi:

$$N_o(t') = \frac{1}{[1-\exp(-\lambda_z\tau_o)]^2}\,[\lambda_z t'-(\lambda_z t'+\lambda_z\tau_o-1)\exp(-\lambda_z\tau_o)-\exp(-2\lambda_z\tau_o) -$$

$$-(\lambda_z t'-\lambda_z k\tau_o+1)\exp(-\lambda_z k\tau_o)+(\lambda_z t'-(k-1)\lambda_z\tau_o+1)\exp(-\lambda_z(k+1)\tau_o)]$$

$$\text{dla}\quad \tau_o(k-1) \le t' \le \tau_o k, \quad k = 1,2,\ldots, \qquad (34)$$

natomiast oczekiwana liczba czyszczeń izolacji na odcinku linii:

$$N_c(t') = N_o(t') - N_{wu}(t') = N_o(t') - k_u N_w(t') = N_o(t') - Q_{SPZ}k_u N_p(t') =$$

$$= \frac{1}{[1-\exp(-\lambda_z\tau_o)]^2}\Big\{(\lambda_z t'-\lambda_z\tau_o+1)\exp(-\lambda_z\tau_o)-(\lambda_z t'+1)\exp(-2\lambda_z\tau_o) -$$

$$-(\lambda_z t'-\lambda_z k\tau_o+1)\exp(-\lambda_z k\tau_o)+(\lambda_z t'+1-(k-1)\lambda_z\tau_o)\exp(-\lambda_z(k+1)\tau_o)\Big\} =$$

$$= \frac{1}{[1-\exp(-\lambda_z\tau_o)]^2}\Big\{\exp(-\lambda_z\tau_o)\Big[\lambda_z t'-\lambda_z\tau_o\,\frac{1-\exp(-k\lambda_z\tau_o)}{1-\exp(-\lambda_z\tau_o)}+1\Big] -$$

$$-(\lambda_z t'-k\lambda_z\tau_o+1)\exp(-k\lambda_z\tau_o)\Big\} \quad \text{dla}\quad \tau_o(k-1) \le t' \le \tau_o k,\ k = 1,2\ldots, \qquad (35)$$

gdzie: $N_{wu}(t') = \lambda_z t'$ - oczekiwana liczba wyłączeń z uszkodzeniami dla odcinka linii (wymian awaryjnych);
$N_w(t')$ - oczekiwana liczba wyłączeń łącznie;]
$N_p(t')$ - oczekiwana liczba przeskoków.

Funkcja (35) jest lewostronnie ciągła i równa zeru dla $k = 1$, tj. dla $0 \le t' < \tau_o$ (pierwsze czyszczenie dopiero po czasie τ_o), natomiast dla każdego okresu odnowy:

$$N_c(\tau_o) = \exp(-(k-1)\lambda_z\tau_o)\,[\lambda_z t'-(k-1)\lambda_z\tau_o+1] = 1, \quad k = 2,3,\ldots \qquad (36)$$

W praktyce, okres między czyszczeniami jest zwykle większy od zredukowanego roku eksploatacji ($\tau_o > T'$) oraz $N_w(T') < N_w(\tau_o)$. Wyjątek mogą stanowić jedynie pojedyncze słupy w miejscach szczególnie silnego zagrożenia lokalnego, np. w pobliżu chłodni kominowych, gdzie zastosowanie nawet bardzo wytrzymałych układów izolacyjnych może nie zapobiec częstym wyłączeniom linii. W celu wyznaczenia wymaganej częstości czyszczenia izolacji na odcinku linii w ciągu roku, dla każdego okresu odnowy uwzględniono, że:

- zredukowany czas eksploatacji można wyrazić jako $t' = nT'$, jeśli $n = \tau_o / T'$ jest względnym okresem odnowy, odniesionym do zredukowanego roku obliczeniowego,
- oczekiwana liczba wyłączeń z uszkodzeniami (wymian awaryjnych) wynosi:

$$N_w(\tau_o) = N_{wu}(nT') = \lambda_z nT' \qquad (37)$$

- niezawodność izolacji na odcinku między kolejnymi czyszczeniami nie powinna być większa od wartości wymaganej:

$$R_w = \exp\left(-\frac{\lambda_z \tau_o}{Q_{SPZ}^{k_u}}\right) \quad \text{skąd} \quad \lambda_z \tau_o = -Q_{SPZ}^{k_u} \ln R_w. \qquad (38)$$

Niezawodność (38), wynikająca z doświadczeń eksploatacyjnych lub ustalana arbitralnie, związana jest następująco z liczbą przeskoków w okresie między kolejnymi czyszczeniami:

Liczba przeskoków $N_p(\tau_o)$	1	2	3	4	5
Wymagana niezawodność $R_w(\tau_o) = \exp(-N_p(\tau_o))$	0,368	0,135	0,050	0,018	0,007

Dla linii 110-220 kV odpowiada ona najczęściej przedziałowi oczekiwanej liczby przeskoków $1 < N_p(\tau_o) \leq 2$ lub liczby wyłączeń $0,6 < N_w(\tau_o) \leq 1,2$ (przeskoki świadczą o konieczności czyszczenia). Z braku innych uzasadnień można przyjąć w przybliżeniu, że niezawodność R_w odpowiada nie więcej niż 2 przeskokom na izolacji odcinka linii w okresie odnowy.

Na podstawie wzoru (36) dla $k = 2$ oraz powyższych założeń:

$$N_c(nT') = \exp(-\lambda_z \tau_o)(\lambda_z nT' - \lambda_z \tau_o + 1) =$$

$$= R_w^{Q_{SPZ}^{k_u}} [Q_{SPZ}^{k_u} n N_p(T') + Q_{SPZ}^{k_u} \ln R_w + 1] = 1, \qquad (39)$$

natomiast wymagana częstość czyszczenia izolacji na odcinku linii w ciągu roku:

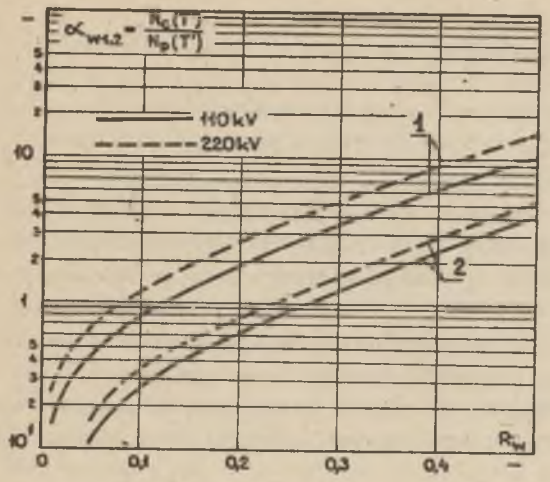
$$N_c(T') = \frac{1}{n} = \frac{Q_{SPZ}^{k_u} N_p(T')}{R_w^{-Q_{SPZ}^{k_u}} - Q_{SPZ}^{k_u} \ln R_w - 1} = \alpha_{w1} N_p(T') \cong \alpha_{w1}^{*} N_p(T') \qquad (40)$$

oraz wymagany okres czasu między kolejnymi czyszczeniami:

$$\tau_o = \frac{T'}{\alpha_{w1} N_p(T')} \cong \frac{T'}{\alpha_{w1}^{*} N_p(T')} \quad \text{dla} \quad R_w = \text{const}, \qquad (41)$$

gdzie: $\alpha_{w1} = f(R_w; Q_{SPZ}, k_u)$ - względna częstość czyszczenia w odniesieniu do liczby przeskoków (krzywe 1 na rys. 22);

$\alpha_{w1}^{*} = 1,1 \ldots 1,7$ - względna częstość czyszczenia izolacji odcinka linii 110 i 220 kV dla niezawodności R_w odpowiadającej 2 przeskokom w okresie odnowy.



Rys. 22. Względna częstość czyszczenia izolacji odcinka linii 110-220 kV na terenach przemysłowych w zależności od poziomu niezawodności R_w wymaganej między kolejnymi czyszczeniami ze względu na:
1 - przeskoki, 2 - wyłączenia zabrudzeniowe

Odnosząc wymagania niezawodnościowe w okresie odnowy do liczby wyłączeń, wzór (38) przyjmuje postać:

$$R_w = \exp(-\lambda_w \tau_o) = \exp\left(-\frac{\lambda_z \tau_o}{k_u}\right)$$

skąd $$\lambda_z \tau_o = -k_u \ln R_w, \quad (42)$$

natomiast wymagana częstość czyszczenia w ciągu roku:

$$N_c(T') \cong \frac{Q_{SPZ} k_u N_p(T')}{R_w^{-k_u} - k_u \ln R_w - 1} \cong$$

$$\cong \alpha_{w2} N_p(T') \cong \alpha^*_{w2} N_p(T'), \quad (43)$$

gdzie: $\alpha_{w2} = f(R_w; Q_{SPZ}, k_u)$ - względna częstość czyszczenia w odniesieniu do oczekiwanej liczby wyłączeń (krzywe 2 na rys.22);

$\alpha^*_{w2} = 0{,}4...0{,}5$ - względna częstość czyszczenia izolacji na odcinku linii 110 i 220 kV dla niezawodności R_w odpowiadającej wyłączeniom w okresie odnowy.

Z przeprowadzonych rozważań wynika, że roczna częstość czyszczenia rośnie ze wzrostem zawodności izolatorów, nieskuteczności SPZ oraz wymaganego poziomu niezawodności w okresie między czyszczeniami. W praktycznych obliczeniach niezawodnościowych dla linii 110 i 220 kV można przyjąć w przybliżeniu, że:

$$(0{,}65...0{,}85) N_w(T') \cong \frac{1}{Q_{SPZ}} \alpha^*_{w2} N_w(T') < N_c(T') \approx$$

$$\approx N_p(T') < \alpha^*_{w1}(T') \cong (1{,}1...1{,}7)\ N_p(T'), \quad (44)$$

przy czym wymagana niezawodność izolacji odcinka linii w odniesieniu do liczby przeskoków oraz wyłączeń między kolejnymi czyszczeniami (rys. 22) wynosi wtedy odpowiednio $R_w = 0{,}1...0{,}25$. W celu dokładniejszego wyznaczenia tej niezawodności oraz częstości czyszczenia, konieczne są dalsze badania terenowe i modelowe izolatorów w rejonach o szczególnie dużym zanieczyszczeniu atmosfery. W przyszłości, uzasadnione wydaje się wykorzystanie w tym celu pomiarów maksymalnych wartości prądu upływu w warunkach rzeczywistych i laboratoryjnych [15, 129, 149].

3.5. Niezawodnościowe modele obliczeniowe

Sposób wykonywania uproszczonych obliczeń niezawodnościowych dla izolacji krajowych linii wysokiego napięcia - na podstawie statystycznego modelowania zmienności narażenia w czasie - przedstawił autor w pracach [36] i [39]. Uproszczenia polegały m.in. na pominięciu łańcuchów odciągowych i nielicznych układów specjalnych oraz zróżnicowaniu narażeń środowiskowych wzdłuż trasy linii. Poniżej zaproponowano niezawodnościowe modele obliczeniowe dla typowych linii 110 i 220 kV na terenach przemysłowych, wykorzystując dane z terenów ZEOPd [44, 45] i uwzględniając niejednorodność zbioru łańcuchów izolatorów oraz skokową zmienność narażenia - wynikającą z podziału na strefy zabrudzeniowe. Proponowane modele wyznaczono na podstawie wyników badania rzeczywistych strumieni zakłóceń, spowodowanych przez przeskoki na izolatorach.

Nie rozpatrywano linii 400 kV, które nie są na ogół obecnie narażone na intensywne oddziaływanie zanieczyszczeń pochodzenia przemysłowego, a wykonanie dla nich statystyki zakłóceń przydatnej do obliczeń niezawodnościowych jest praktycznie niemożliwe. Przykładem są dane dla najstarszej polskiej linii 400 kV Mikułowa-Joachimów o długości ok. 350 km z okresu od 1964 do 1978 roku (na podstawie nie publikowanych wyników analizy autora). W podanym okresie nie stwierdzono bowiem ani jednego wyłączenia linii z powodu uszkodzenia izolacji lub przeskoków zabrudzeniowych na izolatorach (typu 237517 firmy Norden), a tylko 6 wyłączeń, które można uznać za wynik prawdopodobnych przeskoków spowodowanych przepięciami.

Przeskoki zabrudzeniowe powstają w warunkach eksploatacyjnych w wyniku skomplikowanego procesu oddziaływania losowych narażeń elektrycznych i środowiskowych, stwarzających nie tylko zagrożenie dla izolatorów, ale powodujących również ich samooczyszczanie (pod wpływem deszczu i wiatru). Mogą one wystąpić np. w przypadku gwałtownego wzrostu lokalnego zagrożenia, doboru izolatorów o niewystarczającej wytrzymałości w danej strefie lub nieprzestrzegania harmonogramu czyszczenia (w szczególnie trudnych warunkach środowiskowych na ograniczonym obszarze). Wpływ czyszczenia izolatorów na niezawodność linii w eksploatacji uwzględniono w modelach w sposób pośredni, przyjmując, że przestrzeganie poprawnie ustalonych harmonogramów przeciwdziała powstawaniu zakłóceń na najbardziej zagrożonym odcinku linii w krótkim okresie czasu; z analizy statystyki zakłóceń wynika, że odstępstwa od tej reguły należą w praktyce do rzadkości i mają charakter lokalny [41].

Odwzorowanie niestacjonarnych strumieni zakłóceń o bardzo małej intensywności (rozdział 3.1) możliwe jest wtedy, gdy:

- zmienność dobowa narażeń jest do pominięcia (dokładność obliczeń do jednego dnia nie jest wymagana),

- strumienie zakłóceń w każdej linii traktuje się jako pojedyncze (tylko jedno zakłócenie w krótkim okresie czasu),
- prawdopodobieństwo zakłócenia w określonym przedziale czasu nie zależy od zakłóceń poprzednich (tzw. brak następstw).

Za proponowanym modelem obliczeniowym przemawia bardzo mała częstość zakłóceń w liniach rzeczywistych oraz możliwość praktycznego pominięcia starzenia izolatorów z materiałów tradycyjnych, krótkich okresów czasu bezpośrednio po każdym czyszczeniu lub wymianie i wyjątkowo silnych lokalnych narażeń przy nieprzestrzeganiu harmonogramu czyszczenia. W praktyce możliwe są niekiedy sytuacje, że strumień zakłóceń zabrudzeniowych będzie pojedynczy, ale z ograniczonymi następstwami (prawdopodobieństwo przeskoku zależeć będzie od przeskoków wcześniejszych). Przykładem mogą być przypadki ponownego wyłączenia linii, załączonej uprzednio po nieudanym zadziałaniu SPZ (w stanie beznapięciowym brak jest korzystnego działania termicznego prądu upływu) oraz wyłączenia wskutek przeskoków na izolatorach w bliskiej odległości od chłodni kominowych. Z dotychczasowych danych [41] wynika jednak, że ponowne wyłączenia po okresie przerwy beznapięciowej w trudnych warunkach atmosferycznych są przypadkami wyjątkowymi, jeśli nie ma uszkodzeń izolatorów lub osprzętu. Przypadki wyłączeń linii spowodowanych przez przeskoki na izolatorach w pobliżu chłodni kominowych dotyczą niewielkich obszarów, wymagając szczególnego i szczegółowego rozpatrzenia (rozdział 3.4).

W praktycznych obliczeniach niezawodnościowych uwzględniono, że:

- liczba zakłóceń w ciągu roku jest znikomo mała w porównaniu z liczbą łańcuchów w linii [36 39],
- stacjonarny charakter sezonowych strumieni zakłóceń nie ulega zmianie wskutek okresowego czyszczenia izolatorów (szybkie narastanie konduktywności powłok zabrudzeniowych),
- różne rodzaje łańcuchów w poszczególnych strefach zabrudzeniowych można zastąpić układami jednorodnymi o zróżnicowanej niezawodności.

Przykłady modeli obliczeniowych zaproponowanych przez autora w pracy [44] dla typowych linii 110-220 kV na terenach przemysłowych w ZEOPd znajdują się w zał. 1. Długości odcinków linii z różnymi rodzajami łańcuchów w poszczególnych strefach obliczono przy założeniu, że łańcuchy przelotowe pionowe i układy specjalne stosowane są alternatywnie, przy czym:

- w strefie III przeważają łańcuchy przelotowe pionowe i brak jest układów gwiazdowych (tylko układy ŁPV),
- w strefie IV występują tylko układy specjalne (szczególnie gwiazdowe ŁPY)

Ze względu na nieznaczną współzależność zakłóceń zabrudzeniowych w liniach dwutorowych i zbiegających się we wspólnych węzłach [36, 38, 41], wydaje się, że można pominąć w przybliżeniu wpływ konfiguracji sieci na niezawodność izolacji liniowej; skuteczność rezerwowania odbiorców oraz prze-

łączeń dyspozytorskich w stanach awaryjnych uwzględniono w rozważaniach techniczno-ekonomicznych (rozdział 4.2). Oczekiwana liczba wyłączeń typowych linii 110-220 kV w ciągu roku, spowodowanych zakłóceniami zabrudzeniowymi, jest więc sumą logiczną - wynikającą z możliwości przeskoku na jednym z łańcuchów w jednej ze stref zabrudzeniowych:

$$N_w(T) = \bigcup_{ł} \bigcup_{r} N_{w(ł,r)} = \bigcup_{r=1}^{3} \left(N_{w(p,r)} + N_{w(v,r)} + N_{w(y,r)} + N_{w(o,r)}\right) =$$

$$= Q_{SPZ} \bigcup_{ł} \bigcup_{r} l_{(ł,r)} m_ł n_ł' P_1(T) = Q_{SPZ} l m_z n_z P_1(T), \qquad (45)$$

gdzie: $ł \in p,v,y,o$ - symbol łańcucha izolatorów (rys. 1);

$r = 1,2,3$ - umowny numer strefy zabrudzeniowej (zał. 1);

$l_{(ł,r)}$ - długość odcinka linii dla określonych [rodzajów łańcuchów i stref zabrudzeniowych (zał. 1);

l [km] - długość linii;

$m_ł n_ł'$ [1/km] - liczności rzędów obliczeniowych w różnych rodzajach łańcuchów (zał. 8);

$m_z n_z = \uparrow_p m_p n_p' + \uparrow_v k_v m_v n_v' + \uparrow_y k_y m_y n_y' + k_o m_o n_o' = 6,6 \ldots 14,4$ [1/km] - zastępcza liczba rzędów obliczeniowych (oznaczenia i dane z zał. 1 i 8).

Niezawodność roczna izolacji linii sprowadza się przy wykonanych założeniach do wzoru (13) i wynosi:

$$R_1(T) = \prod_{i=1}^{n_z} \exp(-N_1(T)) \cong \prod_{i=1}^{n_z} (1-N_1(T)) = 1 - l m_z n_z P_1(T) \text{ dla } N_1(T) \cong P_1(T) < 0,01, \qquad (46)$$

gdzie: $N_1(T)$ - oczekiwana liczba zakłóceń dla jednego łańcucha obliczeniowego w ciągu roku.

Prawdopodobieństwo przeskoku na jednym łańcuchu w ciągu roku można obliczyć na podstawie badań terenowych (rozdział 3.2), lub - w przybliżeniu - statystyki zakłóceń, znając średnią roczną intensywność wyłączeń na 100 km. Dla rozpatrywanych linii 110-220 kV roczna zawodność obliczeniowego łańcucha izolatorów:

$$P_1(T) \cong \frac{0,01}{m_z n_z} \cdot \frac{\bar{\lambda}_w(T)}{Q_{SPZ}} = (0,0024 \ldots 0,0012)\, \bar{\lambda}_w(T), \qquad (47)$$

gdzie: $\bar{\lambda}_w(T)$ [1/100 km.rok] - średnia roczna intensywność wyłączeń zabrudzeniowych na 100 km linii.

Przykładowo, roczna zawodność jednorzędowego łańcucha przelotowego $P_1(T) = 0,0011 \ldots 0,0006$, jeśli $\bar{\lambda}_w(T) = 0,44 \ldots 0,53$ 1/100 km.rok (wartości średnie dla linii 110-220 kV w latach 1965-1976 na terenie ZEOPd [41].

Proponowany sposób postępowania pozwala na uwzględnienie w obliczeniach wszystkich rodzajów łańcuchów (w kolejnych strefach zabrudzeniowych),

sprowadzonych do najliczniejszych i najbardziej zawodnych łańcuchów przelotowych. W przypadku zastosowania teoretycznego modelu izolacji jednolitej, składającej się wyłącznie z łańcuchów przelotowych we wszystkich strefach, oczekiwana liczba wyłączeń linii 110 i 220 kV byłaby większa odpowiednio o ok. 36 i 25% od wartości wynikających ze wzoru (45), ponieważ liczność rzędów obliczeniowych wynosiłaby wtedy 9 i 18 1/km (zał. 8). Ze względu na znaczne rozbieżności wyników, całkowite pomijanie łańcuchów odciągowych i specjalnych w obliczeniach niezawodnościowych nie wydaje się więc uzasadnione - szczególnie w strefach największego zanieczyszczenia atmosfery.

4. TECHNICZNO-EKONOMICZNE ASPEKTY ZAWODNOŚCI IZOLACJI LINIOWEJ

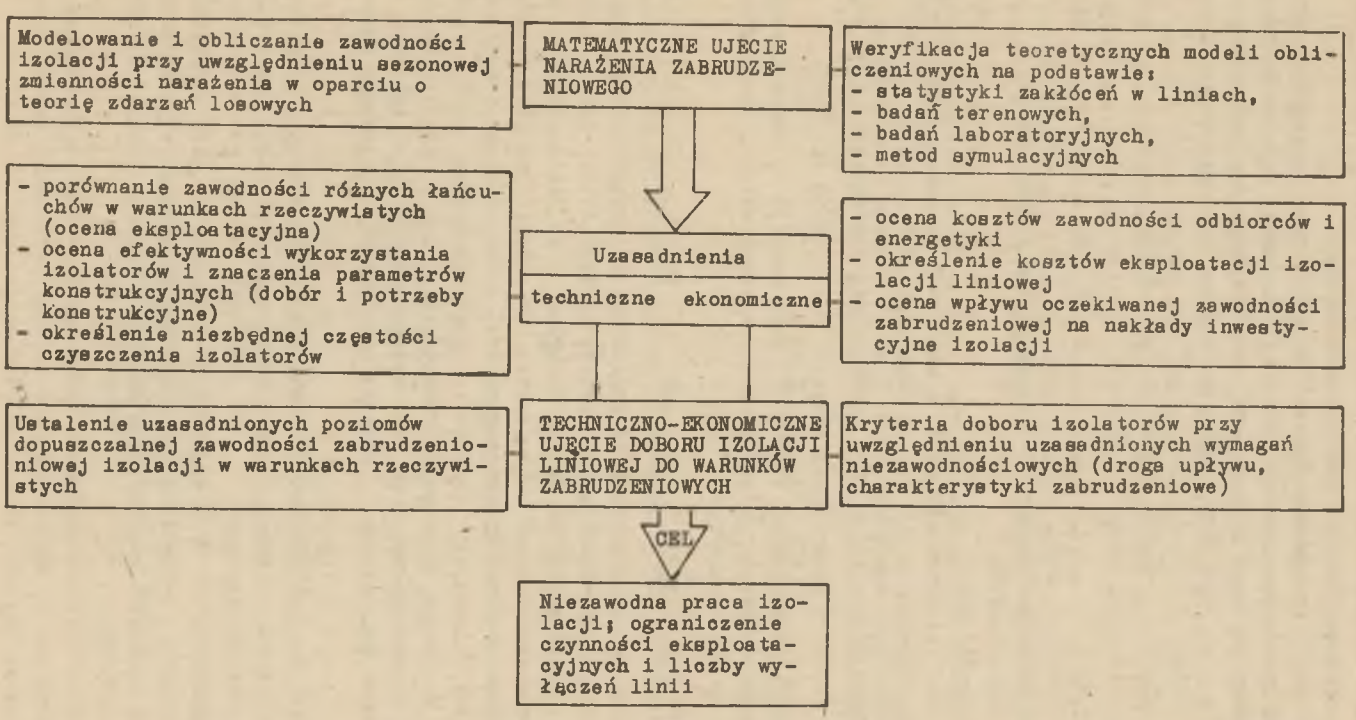
4.1. Uogólniony model ekonomiczny

Zawodność izolacji liniowej - związana z oddziaływaniem różnych narażeń elektrycznych i środowiskowych - stanowi skomplikowany problem techniczno-ekonomiczny, jeśli uwzględnia się straty gospodarcze odbiorców(wskutek przerw w zasilaniu) oraz trudności eksploatacyjne energetyki. Zdaniem autora, taki sposób ujęcia pozwala jednak na wprowadzenie uzasadnionych wymagań niezawodnościowych dla izolacji - w celu ograniczenia liczby wyłączeń linii i kłopotliwych czynności eksploatacyjnych [28, 29, 36]. W celu zmniejszenia zawodności izolacji i strat odbiorców przemysłowych stosuje się:

- układy izolacyjne o dostatecznej wytrzymałości,
- okresowe czyszczenie i hydrofobizację izolatorów w szczególnie trudnych warunkach środowiskowych,
- zabezpieczenia i układy automatyki sieciowej (np. SPZ),
- rezerwowe zasilanie odbiorców oraz przełączenia dyspozytorskie w przypadkach awaryjnych.

Pomimo stosowania doraźnych środków zapobiegawczych, przeskoki zabrudzeniowe są często przyczyną wyłączeń linii na terenach o niepomijalnym zanieczyszczeniu atmosfery i dużych strat gospodarczych oraz trudności eksploatacyjnych - szczególnie u dużych odbiorców przemysłowych. Przy napiętym bilansie mocy sytuację komplikuje jeszcze fakt, że większość przeskoków występuje w miesiącach jesienno-zimowych, tj. w najtrudniejszym okresie dla energetyki [36, 41]. Zagadnienia związane z odwzorowaniem i oceną narażenia zabrudzeniowego izolacji liniowej oraz techniczno-ekonomicznym ujęciem jego skutków zestawiono na rys. 23. Osobnym i ważnym problemem techniczno-ekonomicznym, wykraczającym jednak poza zakres rozprawy, jest optymalne ograniczenie typów stosowanych izolatorów. Powszechne stosowanie układów typowych ułatwia bowiem projektowanie, montaż i wymianę uszkodzonych elementów. Standaryzacja zasadniczych wymiarów izolatorów długopniowych i kołpakowych dokonywana jest w skali międzynarodowej w ramach prac IEC.

Ekonomiczny aspekt zawodności izolacji, związanej z oddziaływaniem różnych narażeń elektrycznych i środowiskowych, można wyrazić za pomocą nakładów inwestycyjnych oraz kosztów eksploatacji i zawodności, spowodowanych nieplanowanymi wyłączeniami linii. W przedstawionym poniżej ogólnym mode-



Rys. 23. Techniczno-ekonomiczne ujęcie oceny narażenia zabrudzeniowego izolacji liniowej

lu obliczeniowym zastosowano metodę kosztów rocznych [68], rozważając w uproszczeniu strumienie stałych kosztów składowych.

Proponowane ujęcie wydaje się uzasadnione cykliczną zmiennością narażeń w kolejnych latach eksploatacji oraz w przybliżeniu poissonowskim charakterem strumieni zakłóceń w odpowiednio zredukowanym roku obliczeniowym (rozdziały 3.1 i 3.5). Ogólnie, całkowity roczny koszt układu izolacyjnego:

$$K = r_N K_I(\bar{z}_1,\ldots,\bar{z}_4) + K_E(\bar{z}_1,\ldots,\bar{z}_4) + K_Z(\bar{z}_1,\ldots,\bar{z}_4) \qquad (48a)$$

lub

$$K = r_N K_I(P_1,\ldots,P_4) + K_E(P_1,\ldots P_4) + K_Z\ (P_1,\ldots,P_4), \qquad (48b)$$

gdzie: K_I - nakład inwestycyjny sprowadzony na rok zerowy (cena);

K_E - koszt eksploatacji;

K_Z - koszt zawodności;

$\bar{z}_\omega$, P_ω - średnia wytrzymałość (p.u) i zawodność roczna układu izolacyjnego w stanie zagrożenia $\omega = 1,\ldots 4$ (rozdziały 2.3 i 3.1);

$r_N = \frac{p(1-p)^N}{(1+p)^N-1} = 0{,}1\ldots 0{,}15$ - rata rozszerzonej reprodukcji dla stopy akumulacji $p = 0{,}08$ i okresu eksploatacji $N = 20\ldots 10$ lat [68].

Dla danego układu izolacyjnego, koszt [48] jest funkcją współzależnych poziomów wytrzymałościowych lub zawodności w różnych stanach zagrożenia, tworzących ogólne równania więzów:

$$\varphi_I(\bar{z}_1,\ldots,\bar{z}_4) = 0 \qquad \text{lub} \qquad \varphi_{II}(P_1,\ldots,P_4) = 0. \qquad (49)$$

Metoda kosztów rocznych pozwala na porównywanie i wybór optymalnych gospodarczo łańcuchów izolatorów oraz odstępów powietrznych. Przy zadanych warunkach pracy linii kryterium optymalizacyjnym jest minimalizacja kosztu rocznego [48], stanowiącego funkcję celu [68, 139]. Najlepszą przydatność techniczno-ekonomiczną wykazuje więc taki układ, którego całkowity koszt roczny jest najmniejszy. Parametrem optymalizacyjnym może być wytrzymałość lub zawodność; w dalszych rozważaniach rolę tę pełni zawodność roczna układu. W celu praktycznego zastosowania metody dla izolacji liniowej na terenach przemysłowych przyjęto następujące założenia upraszczające:

1. Rozpatruje się łańcuch izolatorów i związany z nim odstęp powietrzny przewód-poprzecznik, skoordynowany z odstępem przewód-słup (poprawnie dobrany osprzęt łukochronny).
2. Przeskoki zabrudzeniowe mogą wystąpić na izolatorach przy przemiennym napięciu roboczym i ewentualnie przepięciach dorywczych wolnozmiennych: przeskoki na odstępach powietrznych spowodowane są przepięciami łączeniowymi i piorunowymi.
3. Nie wszystkie rodzaje narażeń mają jednakowy wpływ na wymiarowanie i dobór izolacji linii; największe znaczenie ma narażenie zabrudzeniowe przy przemiennym napięciu roboczym (stan zagrożenia $\omega = 1$).

4. Najważniejszym parametrem optymalizacyjnym jest roczna zawodność zabrudzeniowa łańcucha izolatorów $P_1(T) = P_1$, związana z jego wytrzymałością $\bar{z}_{1,min} = \bar{z}_1$ (wzór(28)); współzależności poziomów wytrzymałościowych w różnych stanach zagrożenia wynikają z wzoru (6).
5. Zawodności roczne $P_\omega(T) \ll P_1(T)$ dla $\omega = 2,3,4$ na terenach o niepomijalnym zanieczyszczeniu atmosfery (rozdział 3.1).
6. Nakłady inwestycyjne rosną w przybliżeniu proporcjonalnie ze wzrostem drogi upływu (wytrzymałości) izolatorów oraz długości izolacyjnych odstępów powietrznych (wymiary konstrukcji wsporczych nie ulegają zmianie).
7. Koszty eksploatacji równe są kosztom czyszczenia izolatorów i zależą praktycznie tylko od wytrzymałości i zawodności zabrudzeniowej łańcuchów [28, 36].
8. Koszty zawodności nie zależą od przyczyny wyłączeń linii (stanu zagrożenia izolacji).

Po uwzględnieniu założeń 1 do 5 oraz względnej zawodności γ_ω ze wzoru (13), całkowity roczny koszt układu izolacyjnego oraz równania więzów:

$$\left.\begin{aligned} K &= r_N K_I(P_1,P_\omega) + K_E(P_1,P_\omega) + K_Z(P_1,P_\omega) \\ \varphi_{II}(P_1,P_\omega) &= \gamma_\omega P_1 - P_\omega = 0 \end{aligned}\right\} \quad \omega = 2,3,4. \qquad \begin{matrix}(50a)\\ (50b)\end{matrix}$$

Stosując metodę mnożników Lagrange'a, równanie (50a) przyjmuje postać zmodyfikowaną:

$$K^* = r_N K_I(P_1,P_\omega) + K_E(P_1,P_\omega) + K_Z(P_1,P_\omega) + \sum_{\omega=2}^{4} L_\omega \varphi_{II}(P_1,P_\omega). \qquad (51)$$

Kryterium optymalizacyjne spełnione jest przy minimum zmodyfikowanej funkcji celu, zgodnie z warunkami:

$$\frac{\partial K^*}{\partial P_1} = r_N \frac{\partial K_I}{\partial P_1} + \frac{\partial K_E}{\partial P_1} + \frac{\partial K_Z}{\partial P_1} + \sum_{\omega=2}^{4} L_\omega \frac{\partial \varphi_{II}(P_1,P_\omega)}{\partial P_1} = 0 \qquad (52a)$$

$$\frac{\partial K^*}{\partial P_\omega} = r_N \frac{\partial K_I}{\partial P_\omega} + \frac{\partial K_E}{\partial P_\omega} + \frac{\partial K_Z}{\partial P_\omega} + L_\omega \frac{\partial \varphi_{II}(P_1,P_\omega)}{\partial P_\omega} = 0, \quad \omega = 2,3,4 \qquad (52b)$$

skąd nieoznaczony mnożnik Lagrange'a:

$$L_\omega = -\frac{\dfrac{\partial K_I}{\partial P_\omega} + \dfrac{\partial K_E}{\partial P_\omega} + \dfrac{\partial K_Z}{\partial P_\omega}}{\dfrac{\partial \varphi_{II}(P_1,P_\omega)}{\partial P_\omega}}, \quad \omega = 2,3,4. \qquad (53)$$

i układ czterech równań:

$$\frac{\partial K}{\partial P_1} = r_N \frac{\partial K_I}{\partial P_1} + \frac{\partial K_E}{\partial P_1} + \frac{\partial K_Z}{\partial P_1} - \sum_{\omega=2}^{4} \left(r_N \frac{\partial K_I}{\partial P_\omega} + \frac{\partial K_E}{\partial P_\omega} + \frac{\partial K_Z}{\partial P_\omega} \right) \frac{\dfrac{\partial \varphi_{II}(P_1, P_\omega)}{\partial P_1}}{\dfrac{\partial \varphi_{II}(P_1, P_\omega)}{\partial P_\omega}} = 0 \qquad (54a)$$

$$\varphi_{II}(P_1, P_\omega) = 0, \quad \omega = 2,3,4. \qquad (54b)$$

Ponieważ jednak:

$$\frac{\partial \varphi_{II}(P_1, P_\omega)}{\partial P_1} + \frac{\partial \varphi_{II}(P_1, P_\omega)}{\partial P_\omega} \cdot \frac{\partial P_\omega}{\partial P_1} = 0 \qquad (55)$$

oraz

$$\frac{\dfrac{\partial \varphi_{II}(P_1, P_\omega)}{\partial P_1}}{\dfrac{\partial \varphi_{II}(P_1, P_\omega)}{\partial P_\omega}} = - \frac{\partial P_\omega}{\partial P_1} \cong - \psi_\omega \qquad (56)$$

więc:

$$\frac{\partial K}{\partial P_1} = r_N \frac{\partial K_I}{\partial P_1} + \frac{\partial K_E}{\partial P_1} + \frac{\partial K_Z}{\partial P_1} + \sum_{\omega=2}^{4} \left(r_N \frac{\partial K_I}{\partial P_\omega} + \frac{\partial K_E}{\partial P_\omega} + \frac{\partial K_Z}{\partial P_\omega} \right) \frac{\partial P_\omega}{\partial P_1} = 0. \qquad (57)$$

Na podstawie założeń 6 do 8, oznaczających kolejno, że $\partial K_I/\partial P_\omega = c_{1w} \partial K_I/\partial P_1$, $\partial K_E/\partial P_\omega \cong 0$ i $\partial K_Z/\partial P_1 = \partial K_Z/\partial P_\omega$ dla $\omega = 2,3,4$, równanie (57) przybiera postać:

$$\frac{dK}{dP_1} \cong r_N \frac{dK_I}{dP_1} + \frac{dK_E}{dP_1} + \frac{dK_Z}{dP_1} + \left(r_N c_{1w} \frac{dK_I}{dP_1} + \frac{dK_Z}{dP_1} \right) \sum_{\omega=2}^{4} \psi_\omega = 0 \qquad (58)$$

lub

$$\frac{dK}{dP_1} \cong r_N \left(1 + \sum_{\omega=2}^{4} \psi_\omega \right) \frac{dK_I}{dP_1} + \frac{dK_E}{dP_1} + \left(1 + \sum_{\omega=2}^{4} \psi_\omega \right) \frac{dK_Z}{dP_1} = 0, \qquad (59)$$

gdzie: $c_{1w} = c'_1/c_1 \cong 2$ - stosunek cen jednostkowych łańcucha, odniesionych do 1 cm długości montażowej (c'_1) oraz drogi upływu (c_1) izolatorów [36].

Równanie (59) pozwala określić minimum warunkowe całkowitego kosztu układu izolacyjnego ze względu na zawodność P_1 - przy uwzględnieniu zawodności układu w pozostałych stanach zagrożenia. Ponieważ jednak na terenach o niepomijalnym zanieczyszczeniu atmosfery $\psi_\omega \to 0$ (rozdział 3.1), sprowadza się ono do cząstkowego warunku optymalizacyjnego:

$$\frac{dK}{dP_1} \cong r_N \frac{dK_I}{dP_1} + \frac{dK_E}{dP_1} + \frac{dK_Z}{dP_1} = 0, \qquad (60)$$

przy

$$\frac{d^2K}{dP_1^2} \cong r_N \frac{d^2K_I}{dP_1^2} + \frac{d^2K_E}{dP_1^2} + \frac{d^2K_Z}{dP_1^2} > 0. \qquad (61)$$

Metodę kosztów rocznych i uproszczone kryterium optymalizacyjne (60) zastosowano w dalszych rozważaniach nad techniczno-ekonomicznymi aspektami zawodności zabrudzeniowej izolacji linii 110 i 220 kV (ZEOPd). Oprócz nakładów inwestycyjnych, uwzględniono skutki gospodarcze, związane z wieloletnią eksploatacją izolacji i nieciągłością zasilania odbiorców przemysłowych. Analiza nie obejmuje linii 400 kV - ze względu na pomijalną jak dotąd zawodność izolacji, spowodowaną narażeniami zabrudzeniowymi(rozdział 3.5) oraz na znaczne trudności wymiernej oceny strat gospodarczych odbiorców i energetyki (sieć 400 kV nie ma charakteru rozdzielczego).

4.2. Koszty roczne izolacji liniowej w aglomeracjach przemysłowych

Nakłady przeznaczane na zakup izolacji nie przekraczają na ogół 10% całkowitego kosztu budowy linii wysokiego napięcia, dlatego też spotykane niekiedy tendencje do tzw. oszczędnego doboru izolatorów wydają się niezrozumiałe. Najprostszym i stosowanym od dawna miernikiem ekonomicznym określonej konstrukcji jest tzw. cena jednostkowa, odniesiona do 1 cm drogi upływu lub skoku izolatora [28, 36]. Cena łańcucha izolatorów zależy od jego rodzaju (przelotowy, odciągowy, specjalny), liczby rzędów, ilości i typu izolatorów; uwzględnić należy również osprzęt łukochronny.

Roczny nakład inwestycyjny, wyrażony ogólnie w postaci kosztu rozszerzonej reprodukcji:

$$K_{rr} \cong \beta r_N c_1 U_m \sum_{ł} \sum_{r} 1_{(ł,r)} m_ł n_ł a'_{u(ł,r)} = r_N c_1 U_m \sum_{ł} \sum_{r} 1_{(ł,r)} m_ł n_ł (B_{(ł,r)} - A \ln 100\, P_1), \quad (62)$$

gdzie: $\beta \cong 1{,}1 \ldots 1{,}2$ - współczynnik uwzględniający koszt osprzętu łukochronnego [36, 177];

$c_1 = 3 \ldots 4$ [zł/cm] - średnia cena 1 cm drogi upływu izolatorów dla poziomu cen z lat 1975-1977 [36];

$a'_{u(ł,r)}$ [cm/kV] - jednostkowa droga upływu (20) obliczeniowego rzędu izolatorów w łańcuchu.

Dla linii 110-220 kV typowych na terenach przemysłowych (zał. 1), roczny nakład inwestycyjny:

$$K_{rr} \cong \beta r_N c_1 U_m 1 (B_z - A_z \ln 100 P_1) = \beta r_N c_1 U_m 1 (B_z - A_z \ln \frac{100\, N_w}{Q_{SPZ}^{1} m_z n_z}), \quad (63)$$

gdzie: $B_z = m_p n'_p (\gamma_{11} B_{p,1} + \gamma_{21}\gamma_2 B_{p,2}) + m_v n'_v [\gamma_{21}(1-\gamma_2) B_{v,2} + \gamma_{21}(1-\gamma_3) B_{v,3}] +$

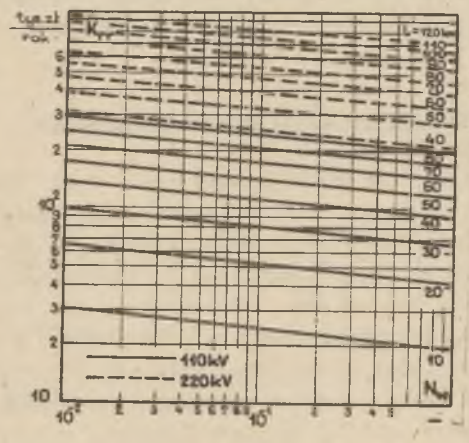
$+ m_y n'_y \gamma_{31} B_{y,3} + m_o n'_o (\gamma_{11} B_{o,1} + \gamma_{21} B_{o,2} + \gamma_{31} B_{o,3}) = 43{,}1 \ldots 46{,}3$ [cm/kV.km] - zastępczy jednostkowy parametr przesunięcia [45];

$m'_y n'_y$ = 13,5...18 [1/km] - zastępcza liczba rzędów w układach gwiazdowych w rachunku kosztów (zał. 8);

$A_z = A\{m_p n'_p(\gamma_{11}+\gamma_{21}\gamma_2)+m_v n'_v[\gamma'_{21}(1-\gamma_2)+\gamma'_{31}(1-\gamma_3)] + m'_y n'_y \gamma_{31}\gamma_3+m_o n'_o\}$ = 5,0...5,2 [cm/kV.km] - zastępczy jednostkowy parametr nachylenia [45];

N_w - liczba wyłączeń linii w ciągu roku (45).

Na podstawie wzoru (63) można ocenić współzależność między rocznymi nakładami na zakup izolatorów i osprzętu a spodziewaną liczbą wyłączeń zabrudzeniowych linii. Na rys. 24 podano wyniki obliczeń nakładów $K_{rr} = f(N_w; l)$ dla średnich wartości parametrów występujących w (63), 20-letniego okresu eksploatacji izolatorów (r_N = 0,1) oraz różnych długości linii [45]. Przykładowo, dla linii 110 i 220 kV o długościach 40 i 70 km oraz intensywnościach wyłączeń zabrudzeniowych 0,176 i 0,371 1/rok [41], roczne nakłady inwestycyjne wynoszą odpowiednio ok. 105 i 415 tys.zł/rok. Znaczne zwiększenie niezawodności, odpowiadające np. ograniczeniu liczby wyłączeń z 1 do 0,01 w ciągu roku, wymaga zwiększenia nakładów na izolację o mniej niż 50% w stosunku do kosztów pierwotnych. Wynika stąd, że roczne nakłady inwestycyjne wykazują tendencję do stosunkowo niewielkiego wzrostu przy zmniejszaniu się spodziewanej liczby wyłączeń linii, a więc uzależnione są w nieznacznym stopniu od niezawodności izolacji [36, 45].



Rys. 24. Roczne nakłady inwestycyjne na izolację linii 110 i 220 kV o różnych długościach w zależności od spodziewanej liczby wyłączeń zabrudzeniowych w ciągu roku [45]

Koszty eksploatacji izolacji liniowej na terenach przemysłowych sprowadzają się praktycznie do kosztów czyszczenia izolatorów - znacznie większych od kosztów pomiaru rozkładu napięcia na łańcuchach izolatorów kołpakowych i kosztów hydrofobizacji [28, 36]. Przyjmując z nadmiarem, że roczna częstość czyszczenia zbliżona jest zgodnie ze wzorem (44) do oczekiwanej liczby przeskoków w ciągu roku, roczny koszt eksploatacji typowych linii 110 i 220 kV:

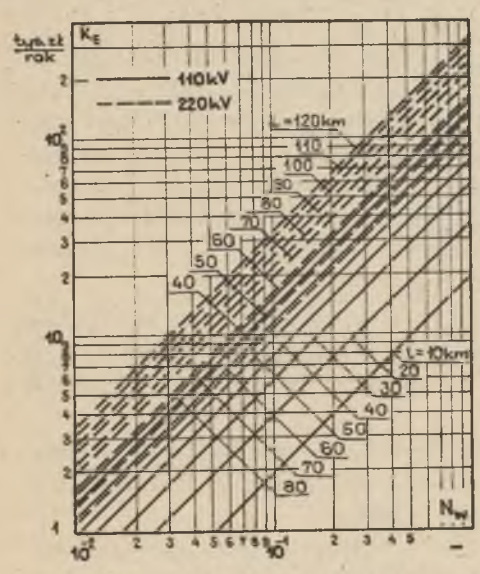
$$K_E \approx \frac{N_w}{Q_{SPZ}} \sum_{ł} \sum_{r} k_c(ł,r)^1(ł,r) = \frac{N_w^1}{Q_{SPZ}} k_c, \qquad (64)$$

gdzie: $k_{c(ł,r)}$ [zł/km] - jednostkowy koszt czyszczenia izolatorów liniowych [36];

$$k_c = \gamma_{11}(k_{c(p,1)} + k_{c(o,1)}) + \gamma_{21}[\gamma_2 k_{c(p,2)} + (1-\gamma_2)k_{c(v,2)} + k_{c(p,2)}] + \gamma_{31}[(1-\gamma_3)k_{c(v,3)} + \gamma_3 k_{c(y,3)} + k_{c(o,3)}] = 1221...1639 \text{ [zł/km]}$$

- zastępczy jednostkowy koszt czyszczenia [45].

Zależność między rocznymi kosztami eksploatacji a spodziewaną liczbą wyłączeń rozpatrywanych linii podane są na rys. 25. Widoczna jest wyraźna tendencja do szybkiego wzrostu tych kosztów ze wzrostem liczby wyłączeń wskutek zawodności zabrudzeniowej izolatorów - wynikająca z konieczności ich częstszego czyszczenia (rozdział 3.4). Dla linii 110 i 220 kV o podanej przykładowo intensywności wyłączeń 0,176 i 0,371 1/rok, roczne koszty czyszczenia izolatorów wynoszą odpowiednio ok. 14 i 72 tys. zł/km. Są one do pominięcia dla spodziewanej liczby wyłączeń mniejszej od 0,05 w ciągu roku, wzrastając jednak ok. 10-krotnie, gdy zwiększa się ona o jeden rząd wielkości [45].



Rys. 25. Roczne koszty eksploatacji izolacji linii 110 i 220 kV o różnych długościach w zależności od spodziewanej liczby wyłączeń zabrudzeniowych w ciągu roku [45]

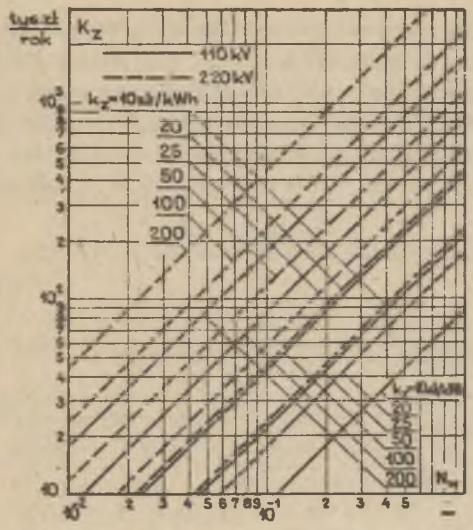
Koszty zawodności zabrudzeniowej izolacji wynikają z nieplanowanych wyłączeń linii, będących przyczyną:

- bezpośrednich strat odbiorców przemysłowych, spowodowanych zakłóceniami w procesach technologicznych i niewykonaniem planowej produkcji wskutek przestojów (zależnych m.in. od rodzaju, technologii i energochłonności procesu oraz czasu trwania ograniczenia zasilania i chwili wyłączenia),
- strat energetyki wynikających z kosztów wymiany uszkodzonych izolatorów i osprzętu.

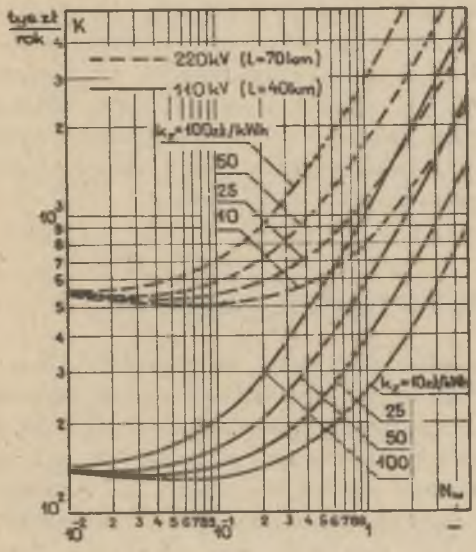
Ustalenie skutków gospodarczych nieciągłości zasilania odbiorców, w rozmaitych gałęziach przemysłu, jest zagadnieniem skomplikowanym, wymagającym rozpoznania procesu wytwórczego oraz pracochłonnych, kosztownych i długotrwałych badań. W pracy zastosowano metodę przybliżonego wyznaczania spodziewanych kosztów zawodności odbiorców za pomocą równoważnika gospodarczego strat jednostkowych [78, 79, 139] oraz wielkości niedostarczonej e-

nergii - przy uwzględnieniu systemu rezerwowania i przełączeń dyspozytorskich [36, 41]. Pominięto grupę kosztów związaną z pośrednimi stratami odbiorców wskutek ograniczenia produkcji i usług (w tym również komunalnych) oraz straty energetyki wynikające z niesprzedanej odbiorcom energii elektrycznej [36, 139, 173]. W rozważaniach wykorzystano wyniki statystycznej analizy zakłóceń zabrudzeniowych, wykonanej przez autora na podstawie danych z dzienników operacyjnych oraz kart ewidencyjnych i badania zakłóceń w liniach 110 i 220 kV na terenie ZEOPd w okresie 1965-1976 [36, 41]. Nie rozpatrywano złożonego problemu lokalizacji i efektywności usuwania uszkodzeń oraz wpływu różnych czynników (np. dużej niejednolitości stosowanych izolatorów) na długość czasów obsługi. Obliczono częstość wyłączeń, czasy trwania przerw beznapięciowych i wartości niedostarczonej energii oraz oszacowano skuteczność działania SPZ, rezerwowania i przełączeń dyspozytorskich, jak również uszkadzalność elementów linii i koszty usuwania uszkodzeń. Porównano obliczone roczne intensywności wyłączeń z wartościami dopuszczalnymi oraz oceniono spodziewane koszty strat odbiorców przemysłowych, zasilanych liniami 110 i 220 kV, stwierdzając, że:

- średnia roczna intensywność wyłączeń $\bar{\lambda}$ = 0,4...0,5 1/100 km.rok znacznie przekracza poziom, który można uznać za dopuszczalny (rozdział 4.3); nie obserwuje się trwałej tendencji do zmniejszenia się liczby wyłączeń linii,
- jedną z przyczyn wydłużania się czasów usuwania uszkodzeń jest powstawanie zakłóceń w okresie najtrudniejszym dla energetyki (październik-luty) oraz w nocy i wczesnych godzinach rannych,
- rozkłady prawdopodobieństwa czasów przerw beznapięciowych mieszczą się na ogół w klasie rozkładu Weibulla, z wyjątkiem wyłączeń z uszkodzeniami (rozkład normalny); wartości oczekiwane tych czasów zależą od skutków wyłączeń i są znacznie większe dla linii 220 kV,
- wartość oczekiwana niedostarczonej energii wskutek jednego wyłączenia linii 110 kV, związanego z ograniczeniem zasilania odbiorców, wynosi ok. 17 MWh (rozkład Weibulla); w odniesieniu do jednego wyłączenia linii 110 kV wynosi ona ok. 8,5 MWh, a linii 220 kV szacunkowo 23 MWh,
- skuteczność działania SPZ nie przekracza w przypadku zakłóceń zabrudzeniowych 40%; skuteczność rezerwowania odbiorców i przełączeń dyspozytorskich 110 kV można uznać za dostateczną, gdyż ograniczenia w zasilaniu odbiorców występują wprawdzie w 50% wyłączeń, ale niedostarczona moc nie przekracza średnio w każdym z przypadków ok. 14% mocy przesyłowej linii,
- współzależność, jako zjawisko jednoczesnego, nieplanowanego i nieprzypadkowego wyłączenia sąsiadujących linii dwutorowych oraz we wspólnych węzłach (wynikająca ze zbliżenia konstrukcyjnego i nieprawidłowego działania zabezpieczeń) nie przekracza łącznie 10% i w pierwszym przybliżeniu może być pominięta.



Rys. 26. Roczne koszty zawodności w zależności od liczby wyłączeń zabrudzeniowych linii 110 i 220 kV dla różnych wartości równoważnika kosztów strat odbiorców przemysłowych [45]



Rys. 27. Całkowite koszty roczne izolacji linii 110 i 220 kV;obliczenia przykładowe wg danych z rys. 24-26

Na podstawie tych danych,spodziewane roczne koszty strat odbiorców i energetyki wskutek zawodności zabrudzeniowej izolacji linii 110-220 kV:

$$K_Z \cong k_z k_r N_w + k_u k_w N_w =$$

$$= (k_z A_n + K_w) N_w, \qquad (65)$$

gdzie: k_z[zł/kWh] - równoważnik kosztu strat zawodnościowych [79, 139];

k_r = 0,5 - współczynnik skuteczności rezerwowania odbiorców zasilanych liniami 110 kV [36, 41](dla linii 220 kV brak danych);

$A_w=17.10^3$ [kWh]- wartość oczekiwana niedostarczonej energii podczas jednego wyłączenia linii 110 kV,związanego z ograniczeniem zasilania odbiorców [36] (dla linii 220 kV brak danych);

$A_n=k_r A_w=(8,5...23)10^3$ [kWh]- wartość oczekiwana niedostarczonej energii wskutek jednego wyłączenia [36, 41] (dla linii 220 kV wartość szacunkowa);

k_u = 0,55...0,43 - współczynnik uszkadzalności izolacji;

$k_w=(7,4...13)10^3$[zł]- średni koszt wymiany uszkodzonych elementów w przeliczeniu na jedno wyłączenie z uszkodzeniami [36 , 41];

$K_w=k_u k_w=4070...5590$[zł]-średni koszt wymiany uszkodzonych elementów na jedno wyłączenie.

Zależności między rocznymi kosztami zawodności a liczbą wyłączeń linii podano na rys. 26. Obliczenia wykonano dla szero-

kiego przedziału wartości gospodarczego równoważnika niedostarczonej energii elektrycznej (od 10 do 200 zł/kWh). Z obliczeń wynika, że koszty te rosną bardzo wyraźnie ze wzrostem liczby wyłączeń linii. Przykładowo, koszty zawodności izolacji linii 110 i 220 kV wynoszą ok. 38 i 215 tys.zł/rok przy założeniu niezbyt dużego równoważnika k_z = 25 zł/kWh, a więc są prawie 3-krotnie większe od kosztów eksploatacji (dla N_w=0,776 i 0,371 1/rok).

Całkowity roczny koszt izolacji linii wynika z sumy kosztów (63),(64), (65) i wynosi:

$$K=K_{rr}+K_E+K_Z=\beta r_N c_1 U_m^1 (B_z - A_z \ln \frac{100\, N_w}{Q_{SPZ}^{1m_z} n_z}) + (\frac{1k_c}{Q_{SPZ}} + k_z A_n + K_w) N_w. \quad (66)$$

Wyniki obliczeń przykładowych dla linii 110 i 220 kV o średnich długościach 40 i 70 km znajdują się na rys. 27. Podane długości linii dotyczą rozległych terenów południowego makroregionu przemysłowego, jednakże w strefach dużych zabrudzeń spotyka się linie 110 kV nie przekraczające 20km (dane z Wydziału Eksploatacji ZEOPd w Katowicach i ZE Gliwice). Z wykonanych obliczeń wynika, że ze wzrostem liczby wyłączeń linii w ciągu roku (szczególnie po przekroczeniu wartości 0,1), całkowity koszt (66)wyraźnie i szybko rośnie - na skutek gwałtownego wzrostu kosztów zawodności i eksploatacji.

Ocenę ekonomicznych aspektów zawodności izolacji liniowej utrudniają względy metodologiczne oraz zmienność cen izolatorów, spodziewanych kosztów eksploatacji i strat gospodarczych odbiorców (zagadnienie to wymaga dalszych badań). Wydaje się jednak, że zaproponowana uproszczona metoda obliczeń pozwala zarówno na przybliżoną ocenę techniczno-ekonomicznych skutków wyłączeń zabrudzeniowych linii napowietrznych, jak i na wprowadzenie uzasadnionych wymagań niezawodnościowych dla izolatorów.

4.3. Uzasadniony poziom zawodności i wytrzymałości izolatorów

Z przeprowadzonej analizy kosztów rocznych wynika, że wymagania niezawodnościowe, stawiane izolacji liniowej na terenach przemysłowych powinny być uzależnione przede wszystkim od spodziewanych skutków gospodarczych w całym okresie eksploatacji, wywołanych nieplanowanymi wyłączeniami odbiorców. Ze wzrostem zawodności zabrudzeniowej należy się liczyć z wyraźnym wzrostem kosztów eksploatacji, a szczególnie strat odbiorców i energetyki - przy możliwości nieznacznego zmniejszenia nakładów inwestycyjnych. Prawidłowość ta, wynikająca z niewspółmiernie dużej "odpowiedzialności" technicznej izolatorów w stosunku do ich nieskomplikowanej budowy i stosunkowo niskiej ceny [17], pozwala na wyznaczenie uzasadnionej pod względem techniczno-ekonomicznym liczby wyłączeń linii w oparciu o kryterium mini-

malizacji (60). Ze względu na niesymetryczny charakter zależności z rys. 27, spowodowany szybkim wzrostem kosztów zawodności i eksploatacji, jest to jednocześnie uzasadnione minimum liczby wyłączeń linii w ciągu roku, przy ograniczeniu kłopotliwego czyszczenia izolatorów.

Po uwzględnieniu wzorów (45) i (66), warunki (60) i (61) przyjmują postać:

$$\frac{dK}{dN_w} = -\frac{1}{N_w}\beta r_N c_1 U_m l A_z + \frac{lk_c}{Q_{SPZ}} + k_z A_n + K_w = 0 \qquad (67)$$

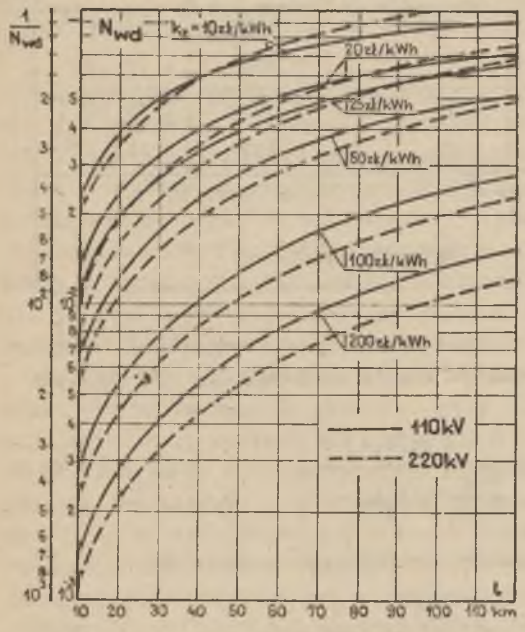
oraz

$$\frac{d^2K}{dN_w^2} = \frac{1}{N_w^2}\beta r_N c_1 U_m l A_z > 0 \qquad (68)$$

ponieważ wszystkie czynniki są dodatnie.

Wynikająca stąd dopuszczalna (uzasadniona pod względem techniczno-ekonomicznym) liczba wyłączeń zabrudzeniowych linii 110-220 kV w ciągu roku:

$$N_{wd} \leq \frac{\beta r_N c_1 U_m A_z l}{\frac{lk_c}{Q_{SPZ}} + k_z A_n + K_w} \qquad (69)$$



Rys. 28. Dopuszczalna liczba wyłączeń zabrudzeniowych w zależności od długości linii 110 i 220 kV dla różnych wartości równoważnika kosztów strat [45]

zależy przede wszystkim od kosztów strat zawodnościowych (szczególnie od wartości równoważnika k_z) oraz długości linii (rys. 28). Obliczenia wykonano dla różnych długości linii, równoważnika kosztów strat 10 do 200 zł/kWh oraz średnich wartości pozostałych parametrów [45]. Oprócz N_{wd}, na oś rzędnych wprowadzono skalę wartości odwrotnych, odpowiadających w przybliżeniu liczbie lat między kolejnymi wyłączeniami. Przy określonych kosztach zawodności dopuszczalna liczba wyłączeń (69) wzrasta z długością linii (wskutek szeregowej struktury niezawodnościowej izolacji). Zestawienie wartości parametrów, określających wymagania niezawodnościowe dla izolacji linii 110-220 kV w dużych aglomeracjach przemysłowych, znaj-

duje się w tab. 4. Wyniki obliczeń potwierdzają celowość zakładania tym mniejszych wartości N_{wd}, im większe są spodziewane straty odbiorców wskutek niedostarczenia energii elektrycznej. Izolacja zapewniająca tak dużą niezawodność (prawdopodobne wyłączenie linii raz na ponad 20 lat) nie wymaga praktycznie czyszczenia.

Tabela 4

Wymagania niezawodnościowe dla izolacji liniowej ze względu na narażenie zabrudzeniowe na terenach przemysłowych [45]

Charakterystyka linii 1)		Równoważnik kosztów strat odbiorców	UZASADNIONE WARTOŚCI DOPUSZCZALNE			
			Oczekiwana liczba		Średnia roczna intensywność wyłączeń na 100 km	Prawdopodobieństwo przeskoku na jednym łańcuchu w ciągu roku 3)
Napięcie robocze	Długość		wyłączeń w ciągu roku	lat między kolejnymi wyłączeniami 2)		
U_m	l	k_z	N_{wd}	$1/N_{wd}$	$\bar{\lambda}_{wd}$	P_{1d}
kV	km	zł/kWh	-	-	1/100km.rok	-
123	40	25	0,0336	30	0,0840	$2,01.10^{-4}$
		50	0,0195	51	0,0488	$1,17.10^{-4}$
245	70	25	0,0461	22	0,0658	$7,76.10^{-5}$
		50	0,0264	38	0,0378	$4,46.10^{-5}$

Uwagi: 1) Linie 110 i 220 kV typowe dla terenu ZEOPd (zał. 1)
2) Wartości przybliżone
3) Jednorzędowy łańcuch przelotowy (obliczeniowy)

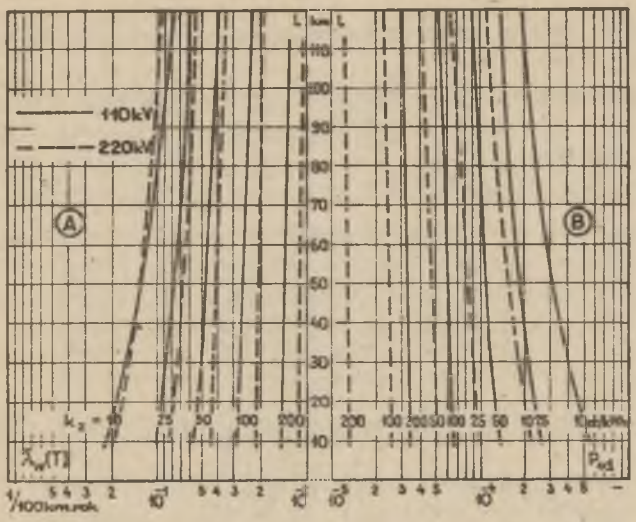
Wzór (69) pozwala również na obliczenie średniej dopuszczalnej intensywności wyłączeń zabrudzeniowych w ciągu roku w odniesieniu do 100 km linii:

$$\bar{\lambda}_{wd} = \frac{100}{l} N_{wd} \leq \frac{100 \beta r_N c_1 U_m^a A_z}{\frac{lk_c}{Q_{SPZ}} + k_z A_n + K_w} \qquad (70)$$

oraz dopuszczalnej zawodności obliczeniowego łańcucha izolatorów:

$$P_{1d} = \frac{N_{wd}}{m_z n_z 10^4} \leq \frac{\beta r_N c_1 U_m^a A_z}{m_z n_z (lk_c + Q_{SPZ} k_z A_n + Q_{SPZ} K_w)}. \qquad (71)$$

Wyniki obliczeń obu tych wielkości podano na rys. 29. Intensywność dopuszczalna $\bar{\lambda}_{wd}$ maleje ze wzrostem długości linii praktycznie tylko dla $k_z < 50$ zł/kWh, kiedy istotną rolę odgrywają zarówno koszty zawodności, jak i



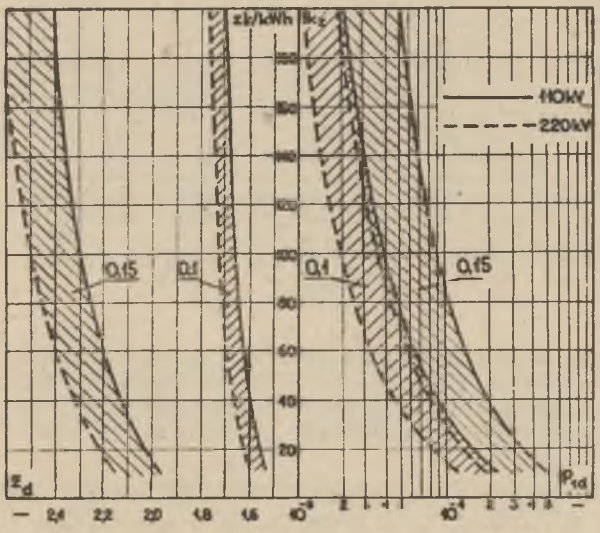
Rys. 29. Wymagania niezawodnościowe dla izolacji linii 110 i 220 kV ze względu na narażenie zabrudzeniowe na terenach przemysłowych:
A) dopuszczalna intensywność wyłączeń w ciągu roku, B)dopuszczalne prawdopodobieństwo przeskoku na jednorzędowym łańcuchu przelotowym w ciągu roku

eksploatacji (czyszczenie izolatorów). Z obliczeń wynika, że nie powinna ona przekraczać 0,1 a nawet 0,05 1/100 km.rok - szczególnie w liniach 220 kV, przy znacznych kosztach zawodności (tab. 4). Wymagania te są już obecnie możliwe do praktycznego zrealizowania, chociaż rzeczywiste wartości wskaźników mogą być wielokrotnie większe [41, 155]. Przykładowo, średnie intensywności wyłączeń zabrudzeniowych linii 110 i 220 kV na terenie ZEOPd w latach 1965-1976 wynosiły odpowiednio aż 0,44 i 0,53 1/100 km.rok, ale po częściowym przeizolowaniu tych linii były one już kilkakrotnie mniejsze [41].

Dopuszczalna zawodność roczna (71) zmniejsza się wyraźnie ze wzrostem strat odbiorców wskutek wyłączeń (rys. 29) oraz nieznacznie ze wzrostem długości linii, szczególnie, jeśli $k_z \geq 50$ zł/kWh [43].Z obliczeń wynika, że dla łańcuchów w rozpatrywanych liniach 110 i 220 kV nie powinna ona przekraczać wartości, wynoszących odpowiednio 10^{-4} i 4.10^{-5}(tab.4).Mniejsze wartości dopuszczalne dla linii 220 kV wynikają z większych strat zawodnościowych i przesyłanych mocy oraz utrudnionego skutecznego rezerwowania węzłów rozdzielczych i odbiorców. Podane wymagania odnoszą się do jednorzędowego łańcucha przelotowego, którego niezawodność zabrudzeniowa jest zwykle najmniejsza. Ze względu na celowość stosowania możliwie jednolitej izolacji w określonych warunkach środowiskowych, celowy wydaje się jednak dobór takich samych zestawów izolatorów w rzędach różnych rodzajów łańcuchów. Układy izolacyjne, wykazujące w położeniu pionowym zawodność nie przekraczającą P_{1d} (w położeniu poziomym lub ukośnym znacznie mniej-

szą), nie będą praktycznie wymagały czyszczenia - ze względu na pomijalną liczbę wyłączeń linii [36, 45].

Dla znanej zawodności (71), ze wzoru (18) można obliczyć najmniejszą dopuszczalną średnią wytrzymałość łańcucha izolatorów w ciągu roku (rys. 30). Obliczenia wykonano dla linii 110 i 220 kV o długościach 20...60 km i 40...100 km oraz dla uśrednionych w tych przedziałach wartości P_{1d}, ze



Rys. 30. Dopuszczalna zawodność i średnia wytrzymałość zabrudzeniowa (p.u.) łańcucha izolatorów liniowych 110 i 220 kV w ciągu roku w zależności od równoważnika kosztów strat odbiorców k_z i odchylenia standardowego napięcia przeskoku σ_1 [45]

względu na ich praktycznie pomijalną zależność od długości linii; rozważano zakłócenia przy uwzględnieniu SPZ (przeskoki lub wyłączenia). Z obliczeń wynika, że 50-procentowe napięcie przeskoku zabrudzeniowego (p.u.) przelotowego łańcucha izolatorów powinno wynosić w tych liniach co najmniej $\bar{z}_d$ = 1,6...1,65 (dla równoważnika $k_z \leq 50$ zł/kWh i względnego odchylenia σ_1 = 0,1). Rezultaty uzyskane dla odchylenia σ_1 = 0,15 nie wydają się uzasadnione - z powodu znacznych wartości dopuszczalnych dla łańcucha izolatorów, praktycznie niemożliwych do zrealizowania w praktyce (rozdział 3.2).

Wyznaczone poziomy zawodności i wytrzymałości zabrudzeniowej - szczególnie dla izolacji linii 220 kV - mogą wydawać się zawyżone i prowadzić w konsekwencji do konieczności zwiększenia wymiarów konstrukcji wsporczych w strefach największych zabrudzeń. Ze względu na praktyczne trudności wprowadzenia jednolitych wymagań w liniach 110-220 kV proponuje się

więc średnią dopuszczalną wytrzymałość przelotowego łańcucha izolatorów $\bar{z}_d = 1,6$ - odpowiadającą zawodności rocznej $P_{1d} = 0,0001$ przy umiarkowanych kosztach strat odbiorców i energetyki.

W przyszłości należy się liczyć jednak z możliwością wprowadzenia ostrzejszych wymagań niezawodnościowych; istotna jest nie tylko tendencja do wzrostu cen izolatorów (trudności z zakupem), ale przede wszystkim kosztów eksploatacji (brak wykwalifikowanego personelu) i kosztów strat gospodarczych odbiorców wskutek nieciągłości zasilania (nowoczesne technologie są na ogół bardziej "wrażliwe" na przerwy w dostawie energii). Wynika to m.in. z trudności eksploatacyjnych i sytuacji energetycznej - szczególnie w okresach jesienno-zimowych.

4.4. Dobór izolacji liniowej na terenach przemysłowych

Poprawne wymiarowanie i dobór izolacji linii napowietrznych o dostatecznej i uzasadnionej pod względem techniczno-ekonomicznym niezawodności jest zagadnieniem nadal aktualnym. Zasady postępowania w tym zakresie ulegają bowiem zmianom w miarę rozwoju techniki izolacyjnej (przy tendencji do normalizacji słupów i zmniejszania szerokości pasa terenu zajmowanego przez linie). Ogólne przepisy budowy linii oraz wymagania stawiane izolatora podane są w normach krajowych [158] i [159]. Zgodnie z aktualnymi zaleceniami [167, 168], wymagania dotyczące udarowej wytrzymałości izolacji napowietrznej sieci najwyższych napięć ($U_m \geq 300$ kV) powinny być uzależnione od statystycznie wyznaczonych wartości i częstości występowania określonego rodzaju przepięć oraz dopuszczalnego ryzyka przeskoku (zał.7). Minimalne wymiary odstępów powietrznych przy zadanych w [160] napięciach probierczych zależą od: rodzaju odstępu (układu przestrzennego i kształtu elektrod), typu izolatorów i osprzętu, rodzaju łańcuchów, sylwetki słupów (przelotowe, mocne), wychyleń przewodów (łańcuchy przelotowe), skuteczności środków ochrony przeciwprzepięciowej [3, 4, 84, 112, 113]. W celu opracowania szczegółowych zasad wymiarowania układów izolacyjnych, o dostatecznej niezawodności w czasie eksploatacji, konieczne są dalsze badania. Próby wytrzymałości elektrycznej izolacji krajowych linii 110-400 kV prowadzone są m.in. w Instytucie Energetyki w Warszawie [18, 85, 118].

Łańcuchy izolatorów i odstępy powietrzne muszą spełniać jednocześnie wymagania elektryczne, dotyczące:

- wytrzymałości przy napięciu roboczym i przepięciach (w tym również w warunkach zabrudzeniowych),
- odporności izolatorów na działanie łuku elektrycznego,
- poprawnego działania izolatorowego osprzętu łukochronnego oraz wymagania, związane z wytrzymałością mechaniczną izolatorów i osprzętu. Dobór izolacji w tak szerokim i skomplikowanym ujęciu wykracza znacznie poza

zakres pracy. W dalszych rozważaniach ograniczono się do zagadnienia doboru izolatorów liniowych ze względu na narażenie zabrudzeniowe - mające szczególnie istotne znaczenie na terenach przemysłowych.

Wymagania elektryczne, stawiane izolatorom ze względu na wytrzymałość powierzchniową, dotyczącą napięcia przemiennego 50 Hz, przy którym jest ona najmniejsza (pośrednio, również przepięć dorywczych wolnozmiennych). Wymagania te określone są obecnie nie za pomocą napięć probierczych dla zadanych warunków pracy, ale przez podanie minimalnych wymaganych jednostkowych dróg upływu dla umownych stref zabrudzeniowych - zarówno w normach krajowych [161], jak i w aktualnych zaleceniach IEC [168]; wartości te podano w tab. 5. Taki sposób doboru - wygodny pod względem obliczeniowym - nie jest jednak ścisły, ponieważ:

- droga upływu nie jest jedynym i wystarczającym miernikiem wytrzymałości i niezawodności zabrudzeniowej izolatorów (pomija się wpływ kształtu geometrycznego),
- brak jest wyraźnie ustalonych wymagań niezawodnościowych (arbitralne ustalenia wynikają z doświadczeń eksploatacyjnych),
- nie uwzględnia się ekonomicznych skutków oddziaływania narażeń w czasie wieloletniej eksploatacji.

Poniżej omówiono aktualne zagadnienia dyskutowane w kraju i za granicą oraz propozycje autora w zakresie doboru izolatorów liniowych do warunków zabrudzeniowych - oparte na przesłankach techniczno-ekonomicznych [36,45] Niektóre wyniki tych rozważań zostały wykorzystane przy dokonywanej obecnie nowelizacji normy [161]; przewiduje się, że nowa norma [166] obowiązywać będzie od stycznia 1980 roku.

Jednostkowa droga upływu może stanowić przybliżone kryterium doboru izolatorów ze względu na narażenia zabrudzeniowe, sprowadzające się dla jednego łańcucha do warunku:

$$\frac{a_u}{U_m} \geq \frac{a_{uw}}{U_m} = a'_{uw} \quad \text{lub} \quad a_u \geq a_{uw} = a'_{uw} U_m \quad \text{dla} \quad \varkappa \leq \varkappa_{max}, \qquad (72)$$

gdzie: a_u[cm] - droga upływu izolatorów w łańcuchu;

a'_{uw}[cm/kV] - wymagana jednostkowa droga upływu odniesiona do najwyższego dopuszczalnego napięcia roboczego linii (tab. 5);

a_{uw}[cm] - wymagana minimalna droga upływu izolatorów w łańcuchu;

$\varkappa_{max}$[μS] - graniczna konduktywność powierzchniowa powłoki w umownej strefie zabrudzeniowej (tab. 5).

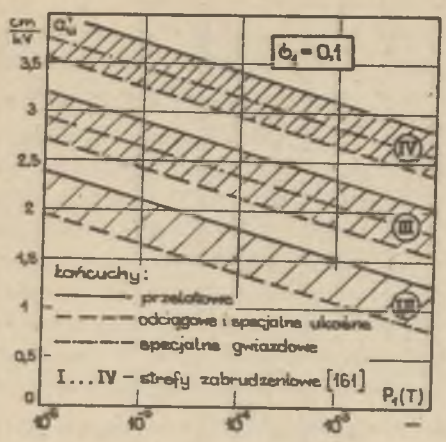
Poprawne ustalenie wymagań dotyczących minimalnych jednostkowych dróg upływu oraz granicznych konduktywności powierzchniowych powłok w stefach zabrudzeniowych jest zagadnieniem trudnym - m.in. ze względu na konieczność wykonywania długotrwałych pomiarów parametrów zapylenia i powłok na powierzchni izolatorów. Wynikiem wieloletnich prób izolatorów naturalnie

Tabela 5

Wymagane minimalne jednostkowe drogi upływu izolatorów liniowych ze względu na narażenie zabrudzeniowe

Strefa zabrudzeniowa (Zanieczyszczenie atmosferyczne)	Zalecenia IEC [168]		PN-68/E-06303 [161]		Proj. PN-78/E-06303 [166]		TGL 8678/231 [179]		Dane z rys. 31	
	Konduktywność graniczna γ_{max}	$\frac{a_{uw}}{U_m}$ [1]	Konduktywność graniczna γ_{max} [2]	$\frac{a_{uw}}{U_m}$ [3]	Konduktywność graniczna γ_{max}	$\frac{a_{uw}}{U_m}$	Konduktywność graniczna γ_{max}	$\frac{a_{uw}}{U_m}$ [4]	Konduktywność graniczna γ_{max}	$\frac{a_{uw}}{U_m}$ [5]
	μS	cm/kV	μS	cm/kV	μS	cm/kV	μS	cm/kV	μS	cm/kV
I Pomijalne	5... 10	1,1... 1,45	6	1,3	8	1,7	5... 10	1,7–1,5–1,5	6	–
II Słabe	10... 20	1,75... 2,0	10	1,7	15	2,3	10... 15	2,5–2,2–2,2	10	1,8
III Silne	20... 40	2,3 ... 2,9	20	2,3	30	3,1	15... 50	3,3–2,9–2,9	20	2,6
IV Bardzo silne	⩾ 50	3,5	50	3,1	50	3,1 [6]	>50	4,5–3,9–3,5	50	3,4 [7]

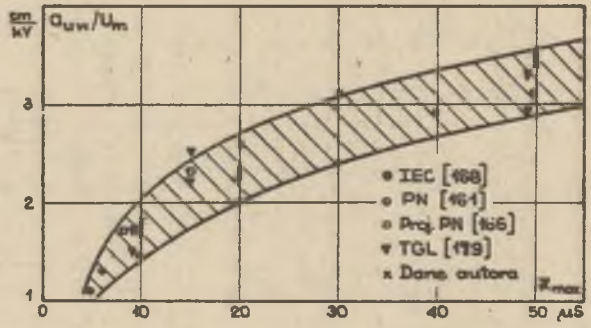
Uwagi: 1) Przeliczone z napięcia doziemnego $U_m/\sqrt{3}$. 2) Oszacowane na podstawie wartości zalecanych przez IEC 3) Przeliczone z napięcia znamionowego U_n. 4) Wartości wymagane kolejno dla linii 110, 220 i 400 kV. 5) Dla łańcuchów przelotowych pionowych o dopuszczalnej zawodności rocznej $P_{1d} = 0{,}0001$. 6) Przy założeniu że stosowane wyłącznie układy specjalne. 7) Dla łańcuchów ŁO i ŁPV oraz ŁPY odpowiednio 3,0 i 3,2 cm/kV.



Rys. 31. Średnie jednostkowe drogi upływu izolatorów liniowych w zależności od zawodności rocznej łańcucha [44]; wartości odniesione do napięcia U_m

i sztucznie zanieczyszczonych oraz doświadczeń eksploatacyjnych w różnych krajach są aktualne zalecenia IEC [168], ale prace w tym kierunku trwają nadal.

Zdaniem autora, wymagane minimalne jednostkowe drogi upływu izolatorów w krajowych liniach 110-220 kV powinny być ustalane tak, aby zawodność roczna jednorzędowego łańcucha przelotowego nie przekraczała wartości dopuszczalnej (71). Na rys. 31 zestawiono średnie jednostkowe drogi upływu izolatorów w różnych rodzajach łańcuchów i strefach zabrudzeniowych - w zależności od spodziewanej rocznej zawodności łańcucha ($\sigma_1 = 0,1$). Wynikają one z charakterystyk zawodnościowych (20) dla średnich wartości parametrów A = 0,13 cm/kV i B z rys. 16. Na tej podstawie można wyznaczyć wartości wymagane - zależnie od strefy, dopuszczalnej zawodności i położenia izolatorów. Dla dopuszczalnej zawodności łańcucha przelotowego w ciągu roku $P_{1d} = P_1 = 0,0001$ wynoszą one odpowiednio 1,8; 2,6 i 3,4 cm/kV w strefie I i II (łącznie), III i IV, a więc są nieznacznie większe od wymaganych przez PN-68/E-06303 i mieszczą się w górnych częściach przedziałów wartości zalecanych przez IEC (tab. 5). Zbiorcze zestawienie wymaganych wartości jednostkowej drogi upływu, w zależności od granicznych konduktywności powierzchniowych powłok na izolatorach, przedstawiono na rys. 32 (dane



Rys. 32. Zestawienie wymaganych jednostkowych dróg upływu izolatorów liniowych w zależności od granicznej konduktywności powierzchniowej powłoki wg różnych źródeł (tab. 5)

wynikają z różnych zaleceń lub przepisów). Wartości te, rosnąc nieliniowo ze wzrostem zanieczyszczenia atmosfery, są jednak dość zróżnicowane - zależnie od umownego podziału terenu na strefy zabrudzeniowe oraz doświadczeń eksploatacyjnych w różnych krajach. Widoczna jest więc potrzeba dalszego uściślenia i ujednolicenia wymagań w skali międzynarodowej.

Wydaje się, że dalszym krokiem w zakresie doboru izolatorów może być wykorzystanie laboratoryjnych charakterystyk zabrudzeniowych izolatorów [36, 43, 106, 107], ale niezbędna jest w tym celu dalsza poprawa odtwarzalności narażeń rzeczywistych i powtarzalności wyników w różnych laboratoriach (rozdział 2.3). Szczególnie istotne znaczenie ma zapewnienie dostatecznej odtwarzalności, aby 50-procentowe napięcia przeskoku izolatorów z charakterystyk odpowiadały wartościom średnim w warunkach naturalnych [16, 21, 102, 128]. Pomimo pewnego postępu w zakresie krajowej bazy laboratoryjnej (Instytut Energetyki, Politechnika Wrocławska) brak jest nadal praktycznie w pełni udokumentowanych charakterystyk zabrudzeniowych, odtwarzających krajowe narażenia środowiskowe i umożliwiających wyznaczenie rozkładu prawdopodobieństwa napięcia przeskoku. W przypadkach wątpliwych można obniżyć więc wartości wynikające z charakterystyk o kilka-kilkanaście procent, zmniejszając ryzyko zbyt optymistycznej oceny wytrzymałości izolatorów.

Z powyższych przyczyn, proponowany sposób doboru może obecnie wydawać się dyskusyjny. Celowość takiego ujęcia wynika jednak m.in. z potrzeby określenia napięć probierczych, uwzględniając pośrednio wymagania niezawodnościowe dla izolatorów (perspektywicznie, również z materiałów syntetycznych). W kraju, prowadząc prace nad nowelizacją normy [161], dokonano w tym celu:

- podziału terenu na strefy zabrudzeniowe na podstawie opracowanych statystycznie wyników pomiarów natężenia osadów i konduktywności zapylenia [86, 91],
- weryfikacji wartości granicznych konduktywności powierzchniowej powłok naturalnie zabrudzonych izolatorów w poszczególnych strefach [91]; proponowane wartości $\varkappa_{max}$ podano w tab. 5.

Podobne badania przeprowadzono m.in. we Francji (EdF), Wielkiej Brytanii (CEGB) i we Włoszech (ENEL). Podziału na strefy dokonano na podstawie wyników rejestracji szczytowych wartości prądu na izolatorach testowych w warunkach rzeczywistych i laboratoryjnych [14, 15]; próby laboratoryjne przeprowadzano metodą mgły solnej (w kraju obecnie nie stosowaną).

Proponowany przez autora sposób wykorzystania udokumentowanych charakterystyk laboratoryjnych w celu doboru izolatorów opiera się na założeniu, że wymagania napięciowe powinny być tak ustalone, aby roczna zawodność łańcucha izolatorów nie przekroczyła wartości dopuszczalnej P_{1d}, uzasadnionej pod względem techniczno-ekonomicznym (rozdział 4.3). Dla linii 110-220 kV, warunek niezawodnościowy w postaci:

$$P_1(\bar{z}_{1,min} \leq 1) = F\left(\frac{1-\bar{z}_{1,min}}{\sigma_1 \bar{z}_{1,min}}\right) \leq P_{1d} = F\left(\frac{1-\bar{z}_d}{\sigma_1 \bar{z}_d}\right) = 0{,}0001 \qquad (73)$$

jest spełniony, jeśli najmniejsza średnia wytrzymałość łańcucha izolatorów w ciągu roku:

$$\bar{z}_{1,min} = \frac{\sqrt{3}\, U_{z50}(\alpha_{max})}{U_m} \geq \bar{z}_d = 1{,}6 \quad \text{czyli} \quad U_{z50}(\alpha_{max}) \geq \frac{\bar{z}_d U_m}{\sqrt{3}} = 0{,}92 U_m, \qquad (74)$$

gdzie: $\bar{z}_d$ - średnia uzasadniona wytrzymałość (p.u.) łańcucha izolatorów (rys. 30);

$U_{z50}(\alpha_{max})$ - 50-procentowe napięcie przeskoku łańcucha izolatorów z charakterystyki laboratoryjnej dla granicznej wartości konduktywności powłoki w strefie zabrudzeniowej.

Praktyczne zastosowanie warunku (74) może być jednak utrudnione, jeśli dysponuje się charakterystyką określającą napięcie wytrzymywane, które nie jest dotychczas zdefiniowane i odpowiada zazwyczaj prawdopodobieństwu przeskoku nie przekraczającemu 2% [16, 58, 104, 127]. Przy takim założeniu, napięcie to jest mniejsze od wartości 50-procentowej o podwojoną wartość względnego odchylenia standardowego, które - przy próbach laboratoryjnych - mieści się na ogół w przedziale 3...6% [16, 75, 76, 110, 127]. W warunkach rzeczywistych, odchylenia te są większe i wynoszą ok. 10% (rozdziały 2.3 i 3.2). Poza tym, zgodnie z zaleceniami IEC, uzasadnione jest zachowanie jednolitych zasad doboru izolacji ze względu na rozmaite narażenia elektryczne i rozpatrywanie wytrzymywanego napięcia zabrudzeniowego w warunkach rzeczywistych jako wartości 10-procentowej (zał. 7).

Z własności normalnego rozkładu prawdopodobieństwa wynika jednak, że 2- i 10-procentowe napięcia wytrzymywane są praktycznie równe liczbowo dla względnych odchyleń standardowych, wynoszących odpowiednio ok. 0,06 i 0,1; podobnie przy wzroście wartości odchyleń do ok. 0,1 i 0,15 (w warunkach laboratoryjnych i rzeczywistych). Własność ta pozwala na wyznaczenie przybliżonej wartości umownego napięcia probierczego dla łańcucha izolatorów - przy zadanych wartościach granicznych konduktywności powłok w strefach zabrudzeniowych. Łańcuch izolatorów wytrzymujący w warunkach rzeczywistych takie napięcie (z prawdopodobieństwem 90%) wykazuje jednocześnie zawodność nie większą od dopuszczalnej pod względem techniczno-ekonomicznym. Wykorzystując warunek analogiczny do (74) i zastępując $\bar{z}_d = 1{,}6$ odpowiadającym mu 10-procentowym poziomem $z_{d10} = 1{,}39$, zabrudzeniowe napięcie probiercze łańcucha izolatorów w liniach 110-220 kV wynosi:

$$U_{prz} \geq U_{d10} = \frac{U_m}{\sqrt{3}} \bar{z}_d (1 - 1{,}3 G_1) = \frac{U_m}{\sqrt{3}} z_{d10} \approx 0{,}8\, U_m \quad \text{dla} \quad \alpha \geq \alpha_{max}, \qquad (75)$$

gdzie: U_{d10} - 10-procentowe napięcie wytrzymywane, uzasadnione pod względem techniczno-ekonomicznym (odpowiada zawodności $P_{1d} = 0{,}0001$ oraz $\bar{z}_d = 1{,}6$ i $z_{d10} = 1{,}39$ dla $G_1 = 0{,}1$).

Dobór izolatorów na podstawie charakterystyk laboratoryjnych sprowadza się więc do:

- zakwalifikowania terenu do strefy zabrudzeniowej i przyjęcia wartości granicznej konduktywności powierzchniowej powłoki $\varkappa_{max}$,
- odczytania z charakterystyki napięcia wytrzymywanego przez łańcuch izolatorów $U^*_{z2}(\varkappa_{max}) = U_{z10}(\varkappa_{max})$,
- porównania tego napięcia z wartością U_{d10}, odpowiadającą zabrudzeniowemu napięciu probierczemu (układ spełnia wymagania, jeśli $U^*_{z2}(\varkappa_{max}) \geq U_{prz}$).

Dla zilustrowania proponowanego sposobu doboru wykonano przykład obliczeniowy dla łańcuchów przelotowych w linii 110 kV, dla różnych warunków środowiskowych. Rozpatrzono izolatory LP 75/17 i VKLS 75/21 - zawieszenie w układzie pionowym, ukośnym i gwiazdowym - o wytrzymałości zabrudzeniowej wynikającej z charakterystyk laboratoryjnych z rys. 1-Z. 2. Z wyników obliczeń podanych w tab. 6 wynika, że jeden izolator LP 75/17 zawieszony pionowo ma zawodność nie większą od dopuszczalnej i wytrzymałość $\bar{z}_{1,min} \geq 1{,}6$ dla konduktywności granicznej $\varkappa_{max} \leq 15\,\mu S$, natomiast VKLS 75/21 dla $\varkappa_{max} \leq 30\,\mu S$. W przypadku większego zanieczyszczenia atmosfery celowe jest zastosowanie układów specjalnych ukośnych, posiadających w każdym z rzędów po jednym izolatorze LP 75/17 ($\varkappa_{max} \leq 40\,\mu S$) lub VKLS 75/21 ($\varkappa_{max} \leq 50\,\mu S$); w szczególnie trudnych warunkach środowiskowych można stosować bardzo wytrzymałe specjalne układy ŁPY (w każdym rzędzie po 2 rozpatrywane izolatory). Wyniki obliczeń przykładowych potwierdzają również, że istnieje możliwość zapewnienia dostatecznej niezawodności izolacji liniowej w szerokim zakresie zmienności narażeń zabrudzeniowych za pomocą 1-2 typów izolatorów długopniowych.

Stosowane obecnie metody badań zabrudzeniowych izolatorów nie są powszechnie uznawane za wystarczające (dyskusyjna odtwarzalność narażeń rzeczywistych, niejednolitość stosowanych metod, niepomijalne rozbieżności wyników w różnych ośrodkach). Próby ich udoskonalenia oparte są głównie na wykorzystaniu rejestrowanych wartości szczytowych prądów upływu (zał.2). Istnieją również wyraźne tendencje stosowania takich pomiarów do oceny własności powierzchniowych izolatorów w warunkach naturalnych (w tym również zdolności do samooczyszczania) oraz do wyznaczania wymaganych minimalnych długości drogi upływu i granicznych poziomów narażeń w strefach zabrudzeniowych. Przegląd koncepcji i propozycji wysuwanych w różnych krajach w tym zakresie zawiera raport z sympozium CIGRE z 1977 roku [138].

Ponieważ maksymalny prąd upływu w półokresie poprzedzającym przeskok na izolatorze nie zależy praktycznie od zastosowanej metody badań, może być więc wykorzystywany jako parametr pomiarowy zarówno w próbach laboratoryjnych, jak i terenowych [14, 15, 149]. Pozwala to wyznaczyć graniczne wartości tego prądu dla określonych typów izolatorów, w zadanych warunkach środowiskowych, oraz - perspektywicznie - zastosować statystyczne zasady doboru, wynikające z podanych w zał. 7 zaleceń IEC [167, 168]. W ta-

Tabela 6

Przykład doboru łańcuchów izolatorów 110 kV ze względu na narażenie zabrudzeniowe wg kryterium (75)

Konduktywność graniczna powłoki γ_{max} [μS] 1)			5	8	10	15	20	30	40	50
Rodzaj łańcucha 2)	Typ izolatora 3)	Liczba izolatorów w łańcuchu 4)	Oznaczenia: ŁP – Łańcuch przelotowy pionowy. ŁPV – odwrócony układ specjalny „V". ŁPY – odwrócony układ specjalny „Y". – – – – rozwiązanie dopuszczalne 5) ——— rozwiązanie proponowane 6)							
ŁP	LP75/17	1 (1)	140 (2,27)	123 (1,99)	116 (1,88)	105 (1,7)	98 (1,58)	88 (1,42)	82 (1,33)	78 (1,26)
ŁPV 7)		2 (1)	161 (2,61)	141 (2,28)	133 (2,15)	122 (1,97)	114 (1,85)	104 (1,68)	99 (1,6)	96 (1,55)
ŁPY 7)		3 (2)	300 (4,86)	266 (4,31)	251 (4,06)	227 (3,67)	212 (3,43)	192 (3,11)	180 (2,91)	172 (2,78)
ŁP	VKLS75/21	1 (1)	158 (2,56)	140 (2,27)	132 (2,14)	119 (1,93)	110 (1,78)	100 (1,62)	93 (1,51)	87 (1,41)
ŁPV		2 (1)	182 (2,95)	161 (2,61)	152 (2,46)	137 (2,22)	128 (2,07)	116 (1,88)	110 (1,78)	104 (1,68)
ŁPY 7)		3 (2)	338 (5,47)	300 (4,86)	282 (4,56)	255 (4,13)	238 (3,85)	216 (3,50)	201 (3,25)	188 (3,04)

Uwagi: 1) Wartości odpowiadające umownym strefom zabrudzeniowym z tab. 5.·2) Łańcuchy przelotowe pojedyncze. 3) Dane w tab. 1. 4) Łącznie (w nawiasach liczba izolatorów w rzędzie obliczeniowym).
5) Dla $U^*_{z2} \cong U_{z10} \gg U_{d10} \cong 0{,}8U_m \cong 98{,}5$ kV. Poniżej podano wartości napięcia wytrzymywanego przez łańcuch izolatorów U^*_{z2} w kV (rys. 1 – Z.2); w nawiasach obok $z_{1,min}$ – najmniejszą średnią wytrzymałość łańcucha izolatorów (p.u.). 6) W praktyce układy specjalne stosowane tylko w strefach największych zabrudzeń
7) Względne poziomy wytrzymałości izolatorów w zawieszeniu ukośnym i gwiazdowym wg danych z rys. 19 (dla $\delta_1 = 0{,}1$).

kim ujęciu, zasady obliczania ryzyka przeskoku pozostałyby niezmienione, lecz zmienną losową byłby maksymalny prąd upływu. Rozkłady prawdopodobieństwa wytrzymałości udarowej i przepięć należałoby zastąpić odpowiednio rozkładami prądów upływu rejestrowanych na izolatorach w laboratorium i w warunkach naturalnych (dla tych samych napięć i narażeń środowiskowych). Ogólne zasady statystycznego doboru izolatorów na terenach nadmorskich Danii i Szwecji przedstawiono w pracy [77], ale dotychczasowe wyniki badań są jeszcze niewystarczające i prace w tym zakresie trwają nadal.

5. KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ

Praca nie wyczerpuje szerokiej problematyki, dotyczącej niezawodności izolacji napowietrznej na terenach przemysłowych. Wydaje się, że będzie ona aktualna jeszcze przez wiele lat - aż do czasu zastąpienia linii napowietrznych liniami kablowymi. Uzasadnione są więc dalsze badania nad optymalizacją wymiarów i wytrzymałości układów izolacyjnych w rozbudowywanych w kraju sieciach 110-400 kV, celem zwiększenia ich niezawodności, opanowania następstw wzrostu mocy oraz ograniczenia coraz większych strat spowodowanych nieciągłością zasilania odbiorców. Większą uwagę należy zwrócić na ujednolicenie izolacji krajowych linii napowietrznych poprzez konsekwentne stosowanie niewielkiej liczby typów izolatorów (podstawowych standardowych typów oraz sprawdzonych izolatorów specjalnych).

Uzasadnione wydaje się podjęcie lub rozszerzenie zakresu badań dotyczących:

- wytrzymałości rzeczywistych układów izolacyjnych na słupach linii (weryfikacja zasad wymiarowania odstępów powietrznych i łańcuchów izolatorów),
- niezawodności izolacji związanej z oddziaływaniem przepięć w krajowych liniach najwyższych napięć (odpowiednie prowadzenie statystyki zakłóceń, modelowanie fizyczne i symulacyjne),
- optymalnych metod laboratoryjnego badania wytrzymałości powierzchniowej izolatorów dla warunków zabrudzeniowych w kraju (odtwarzalność rzeczywistych narażeń, udokumentowane charakterystyki zabrudzeniowe stosowanych izolatorów),
- wytrzymałości, niezawodności i efektywności samooczyszczania różnych typów izolatorów (w tym również konstrukcji z kloszami o przemiennych średnicach) na terenach o różnym stopniu i charakterze zanieczyszczenia atmosfery (badania terenowe i modelowe),
- współzależności wyników badań terenowych i laboratoryjnych (pomiary maksymalnych prądów upływu w celu wprowadzenia nowych kryteriów oceny i doboru izolatorów do warunków zabrudzeniowych),
- zagadnień technologiczno-konstrukcyjnych, związanych z wytrzymałością i odpornością izolatorów z tworzyw syntetycznych na rozmaite narażenia (prace przygotowawcze, mające na celu zastosowanie w kraju wysokonapięciowych izolatorów z tworzyw hydrofobowych).

Można przypuszczać, że rosnące trudności techniczne - związane z wpływem narażeń środowiskowych i elektrycznych - nie będą mogły być w przyszłości opanowane jedynie na drodze ulepszeń rozwiązań konwencjonalnych, ale

zmuszą do wprowadzenia jakościowo nowych konstrukcji i materiałów izolacyjnych (linie wielotorowe o zróżnicowanych napięciach przesyłowych, wykorzystanie materiałów syntetycznych o własnościach hydrofobowych). Wymaga to dalszych prac badawczych, konstrukcyjnych i technologicznych w szerokim zakresie przy ściślejszej współpracy międzynarodowej.

6. WNIOSKI

Przeprowadzone rozważania pozwalają na zaproponowanie praktycznych metod i modeli obliczeniowych w szerokim ujęciu techniczno-ekonomicznym, przydatnych do oceny niezawodności izolacji krajowych linii napowietrznych wysokiego napięcia na terenach przemysłowych. Wyniki dotychczasowych badań terenowych i laboratoryjnych oraz wykonanych analiz statystycznych i modelowych umożliwiają wyprowadzenie następujących wniosków.

1. Wytrzymałość i niezawodność układów izolacyjnych w liniach 110-400 kV, wynikające z rzeczywistych narażeń elektrycznych i środowiskowych, można wyrazić za pomocą składowych losowych - skorelowanych dodatnio i w przybliżeniu liniowo; największe znaczenie praktyczne ma niezawodność zabrudzeniowa izolatorów przy napięciu roboczym.
2. Zakłócenia zabrudzeniowe w liniach 110-220 kV tworzą w przybliżeniu strumienie Poissona w odpowiednio zredukowanych okresach czasu. Praktyczne modele obliczeniowe, uwzględniające sezonową zmienność narażeń środowiskowych i niejednorodność zbioru łańcuchów, pozwalają na wyznaczenie prawdopodobieństwa przeskoków, oczekiwanej liczby wyłączeń linii i uzasadnionej częstości czyszczenia izolatorów w ciągu roku.
3. Proponowane metody obliczeniowe umożliwiają efektywne wykorzystanie wyników badań izolatorów w terenowych stacjach doświadczalnych do analiz niezawodnościowych, mających na celu ocenę zróżnicowania powierzchniowych własności izolatorów w warunkach eksploatacyjnych - w zależności od ich kształtu geometrycznego i położenia.
4. Istnieje praktyczna możliwość oceny ekonomicznych aspektów zawodności izolacji liniowej 110-220 kV za pomocą całkowitych kosztów rocznych; dla linii 400 kV konieczne są dalsze prace w tej dziedzinie. Uzasadnione wymagania niezawodnościowe - wynikające z kryterium minimalizacji całkowitego kosztu rocznego - potwierdzają celowość oraz możliwość dalszego ograniczenia częstości wyłączeń linii i czyszczenia izolatorów.
5. Zawodność zabrudzeniową typowych linii 110-220 kV na terenach przemysłowych można uznać obecnie dla umiarkowanych kosztów strat ($k_z \leq 50$ zł/kWh) za dopuszczalną, jeśli prawdopodobieństwo przeskoku na pojedynczym łańcuchu izolatorów nie przekracza w ciągu roku wartości 10^{-4}, a średnia wytrzymałość izolatorów w łańcuchu jest mniejsza od 1,6(p.u.).
6. Wymierne wymagania niezawodnościowe, oparte na przesłankach techniczno-ekonomicznych, pozwalają na uściślenie zasad doboru izolatorów linio-

wych do warunków zabrudzeniowych - zgodnie ze współczesnymi tendencjami w tej dziedzinie. Zaproponowano praktyczny sposób wykorzystania w tym celu również udokumentowanych laboratoryjnych charakterystyk zabrudzeniowych izolatorów.

7. Ze względu na konieczność spełnienia wzrastających wymagań izolacyjnych i niezawodnościowych oraz opanowania ujemnych skutków narażeń w aglomeracjach przemysłowych, celowe wydają się badania terenowe i laboratoryjne o szerszym niż dotąd zakresie oraz prace konstrukcyjno-technologiczne, zmierzające do wprowadzenia nowych jakościowo układów i materiałów izolacyjnych.

LITERATURA

[1] Allibone T.E., Dring D., Dragan G.: Sparkover of rod gaps stressed with impulse voltage of nonstandard waveshapes. Proc. IEE Elektron. Power Control a.Sc. 1975, vol. 122, n°5, ss. 581-548.

[2] Aleksandrov G.N. i in.: Električeskaja pročnosť naružnoj vysokovoltnoj izoljacii. Energia. Leningrad 1969.

[3] Aleksandrov G.N., Lyskov Ju. I., Redkov B.N.: Električeskaja pročnosť vozdušnogo promežutka meždu provodom i oporoj pri komutacjonnych perenaprjaženijach. Električestvo 1972, n°5, s. 20-24.

[4] Aleksandrov G.N., Polovoj I.F., Gerasimov Ju.A.: O charakteristikach električeskoj pročnosti izoljacii VL sverchvysokogo naprjaženija i metodike jeje ispytanij. Električestvo 1967, n°12, ss. 13-20.

[5] Aslaksen E.W.: Die Zuverlässigkeit als wirtschaftliche Grösse Überlegungen am Beispiel von Stromversorgungsanlagen. Bull. Schweiz. Elektrot. Ver. 1978, n°4, ss. 157-161.

[6] Augé J. i in.: Risque de défaillance et planification des réseaux á tres haute tension. CIGRE 1972. Rap. 31-06.

[7] Bahder G. i in.: Nonlinearity in impulse breakdown of very large air gaps. IEEE Trans. Power App. Syst. 1974, vol. PAS-93, n°3, ss.960-968.

[8] Baker A.C., Kawai M.: A study on dynamic voltage distribution on contaminated insulation surface. Trans. Power App. Syst. 1973, vol.PAS-92, n°5, ss. 1517-1524.

[9] Beichelt P.: Problemy niezawodności i odnowy urządzeń technicznych. WNT, Warszawa 1974.

[10] Borgnovo G., Santagostino G.: Evaluation du risque de claquage dû aux surtensions de manoevre dans les réseaux à UHT. CIGRE 1978 Rap. 33-14.

[11] Buda F.A., Dejneko V.A.: Opyt ekspluatacii VL 35-220 kV v rajonach s zagrjaznennoj atmosferoj. Elektr. Stancii 1973, n°7, ss. 74-75.

[12] Carpena A. i in.: Solution techniques pour les nouvelles lignes de transport italiennes. CIGRE 1976. Rap. 22-13.

[13] Cattaruzza M. i in.: Development of fiberglass-core PTFE - covered insulators for HV transmission systems. IEEE-PES Conference Paper (Summer Meeting). Anheim, July 1974, c. 74 338-0.

[14] Cimador A., Cojan M. i in.: Method of dimensioning insulators for overhead lines in polluted areas. CIGRE 1978. Rep. 33-04.

[15] Claverie P., Porcheron Y.: La pollution des isolateurs. R.G.E. 1973, t. 82. n°3, ss. 166-197.

[16] Claverie P., Vignaud E.: Comparaison de principales méthodes d'essais d'isolateurs sous pollution artificielle. Note EdF, HM/72/2634. Clamart 1974, s. 17.

[17] Czaplak W.: Zagadnienia izolacji jako czynnika decydującego o pewności ruchowej linii napowietrznych wn. Pr. doktorska w Pol. Wrocławskiej, Warszawa 1975.

[18] Dąbrowski J., Kołodziejski E.: Badania łańcuchów izolatorów z osprzętem ochronnym. Energetyka 1977 n°1, ss. 33-36.

[19] Diedkov V.K., Severcev N.A.: Osnovnyje voprosy ekspluatacji složnych sistjem. Vysšaja Škola. Moskva 1976.

[20] Dillard J.K., Hileman A.R.: Comportement des réseaux de transport en présence des surtensions de manoeuvre. CIGRE 1970. Rap. 33-07.

[21] Diesendorf J.L. i in.: Laboratory test of self-cleaning properties of pollued high-voltage insulators. Proc. IEE 1974, vol. 121, n°4, ss. 287-292.

[22] Dorsch H.: Beitrag zur Bemessung und Bevertung von Freileitungsisolatoren unter Fremdschichteinfluss. ETZ-A 1973, vol. 94, n°4, ss. 190--195.

[23] Elovaara J.: Risk of failure determination of overhead line phase-to-earth insulation under switching surges. Elektra 1978, n°56, ss. 69--87.

[24] Erche M. Guide d'évaluation des facteurs de surtensions entre phases ot phase-terre. Proj. CE 33 de la CIGRE, CT 33-02, 1977.

[25] Eriksson R.: Statistical methods for insulation coordination. Dep. of Electr. Power Syst. Eng. Royal Inst. of Technology. Stockholm 1975.

[26] Flugum R.W., Karcic A.J.: Effect of configuration on contamined insulator string performance. IEEE, paper n°71 CP 131, PWR.

[27] Fukui H. i in.: A practical study on application of semiconducting glaze insulators to transmission lines. IEEE Trans. Power App.Syst. 1974, vol. PAS-93, n°5, ss. 1430-1443.

[28] Gacek Z.: Aspekty ekonomiczne doboru izolacji liniowej wysokiego napięcia na terenach o silnym zanieczyszczeniu atmosfery. Praca doktorska, Pol. Śląska, Gliwice 1972.

[29] Gacek Z.: Dobór izolatorów liniowych wysokiego napięcia pod względem techniczno-ekonomicznym na terenach uprzemysłowionych. Zesz. Nauk. Pol. Śl. Gliwice. Elektryka 1974, n°42, ss. 91-101.

[30] Gacek Z.: Défiabilité des isolateurs de lignes sous pollution naturelle à la station de Martigues-Ponteau. Note EdF HM/72/2898. Clamart 1974.

[31] Gacek Z.: Défiabilité des isolateurs des lignes sous pollution industrielle à la station Saint-Avold. Note EdF HM/72/2921. Clamart 1974.

[32] Gacek Z.: Comportement des isolateurs de ligne à la station d'essais sous pollution naturelle de Martigues-Ponteau. Note EdF HM/72/2828. Clamart 1974.

[33] Gacek Z.: Quelques paramèters d'isolation de lignes aèriennes du point de la défiabilité sous pollution naturelle. Note EdF HM/72/2922. Clamart 1974.

[34] Gacek Z., Kiś W.: Próba oceny zawodności zabrudzeniowej izolacji wn. Zesz. Nauk. Pol. Śl. Gliwice. Elektryka 1976, n°52, ss. 3-14.

[35] Gacek Z., Kiś W.: Modele obliczeniowe zawodności zabrudzeniowej izolacji liniowej. Zesz. Nauk. Pol. Sl. Gliwice, Elektryka 1976, n°52, ss. 15-33.

[36] Gacek Z.: Techniczne i ekonomiczne aspekty zawodności zabrudzeniowej izolacji liniowej wn. Zesz. Nauk. Pol. Sl. Gliwice, Elektryka 1977, n°56 (monografia), s. 78.

[37] Gacek Z.: Wykorzystanie wyników prób terenowych do oceny zagrożenia zabrudzeniowego izolatorów. Energetyka 1977, n°3, ss. 96-99.

[38] Gacek Z.: Analiza zagrożenia zabrudzeniowego izolatorów w warunkach naturalnych. Energetyka 1977, n°6, ss. 244-247.

[39] Gacek Z.: Matematyczne ujęcie zawodności zabrudzeniowej izolacji liniowej. Przegl. Elektrot. 1977, n°10, ss. 440-443.

[40] Gacek Z.: Zróżnicowanie powierzchniowych własności izolatorów w warunkach zabrudzeniowych. Prace IESU Pol. Śląskiej, Gliwice, listopad 1977, ss. 209-217.

[41] Gacek Z.: Wyniki analizy zakłóceń zabrudzeniowych w liniach 110 i 220 kV na terenie ZEOPd. Energetyka 1978, n°3, ss. 87-92.

[42] Gacek Z., Pohl Z.: Povrchová dráha jako kritérium odolnosti vysokonapěťových izolátorů vůči znečištění. Elektrot. Obzor. 1979, n° 1, ss. 7-10.

[43] Gacek Z.: Nowe kryteria doboru izolatorów ze względu na zagrożenie zabrudzeniowe. Energetyka 1978, n°9, ss. 357-360.

[44] Gacek Z.: Modele obliczeniowe izolacji linii 110 i 220 kV stosowane w warunkach zabrudzeniowych. Przegl. Elektrot. 1980, n°1.

[45] Gacek Z.: Dopuszczalna zawodność zabrudzeniowa izolacji liniowej. Przegl. Elektrot. 1980, n°2 (w druku).

[46] Gallet G., Bettler M., Leroy G.: Switching impulse results obtained on the outdoor testing area of Renardières. IEEE Trans. Power App. Syst. 1976, vol. 95, n°2, ss. 580-585.

[47] Gallet G., Hutzler B., Riu J.: Analysis of the switching impulse strengh of phase-to-phase air gaps. IEEE Trans. Power App. Syst. 1978, n°2, ss. 485-493.

[48] Gary C., Cristescu D., Dragan G.: Lightning overvoltages entering a station and lightning currents through arresters. Rep. at the Colloq. of CIGRE SC n°33. London June 1977.

[49] Gert R., Glavittsch H. i in.: Surtensions temporaires, leur classification, grandeur, durée, forme d'onde et fréquence. CIGRE 1972. Rap. 33-12.

[50] Gert R., Jirku J. i in.: Surtensions de manoevre entre phases dans les réseaux à très haute tension. CIGRE 1978. Rap. 33-03.

[51] Gniedenko B.W.: Matematyczne metody w teorii niezawodności. WNT, Warszawa 1968.

[52] Golabra D.R.: Polluted insulator breakdown mechanism. I. Discharge elongation. Proc. 5 th Iran. Conf. Elec. Eng., Shiraz 1975, vol. 1 ss. 106-121.

[53] Gordon G.: Symulacja systemów. WNT, Warszawa 1974.

[54] Gorsenin N.A. i in.: Avtomatirizovannyj stend dla issledovanija zagrjaznnoj vysokovoltnoj izoljacii v polovych uslovijach. Electričestvo 1974, n°4, ss. 68-70.

[55] Gruber G., Kosztaluk R.: Contribution à l'essai sous pollution artificielle de longues chaînes d'isolateurs. (Intern. High Voltage Symp.) Zürich. Semptember 1975. Rap. 4.3-02.

[56] Harda T., Aihara Y., Aoshima Y.: Influence of switching impulse vave shape on flashover voltage of air gaps. IEEE Trans. Power Syst. 1973, n°3, ss. 1085-1090.

[57] Havelka J., i in.: Choix des chaînes d'isolateurs pour les lignes à très haute tension en Tchécoslovaquie. CIGRE 1974. Rap. 33-05.

[58] Heise E. i in.: Assessment of the solid layer artificial pollution test. CIGRE 1972. Rep. 33-09.

[59] Hirose Y., Seta T. i in.: Caractéristiques d'isolants aux surtensions de manoevre d'isolateurs dans les conditions de pollution. CIGRE 1972. Rap. 33-02.

[60] Hoblova M.: Souvislost meži přeskokom po znečišlennych izolátorech a povrchovymi vyboji. Elektrot. Obzor 1975, t. 64, n°9, ss. 546-550.

[61] Huraux C., Rahal A.M.: Le contournement des isolateurs HT. Aproche à l'aide d'un modèle de laboratorie. R.G.E. 1975, vol. 94, n° 6, ss. 425-429.

[62] Hutzler B., Gallet G.: Apport de la phisique des décharges à la coordination des isolement. CIGRE 1976. Rap. 33-04.

[63] Itabashi T. i in.: A study of short-time AC Flashover voltage of contaminated insulators and a consideration of its application to transmission line insulation desing. IEEE Trans. Power App. Syst. 1976, vol. PAS-95, n°5, ss. 1723-1731.

[64] Jaczewski M.: Koordynacja izolacji. PAN: Postępy Techniki Wysokich Napięć, z. 6, PWN, Warszawa 1966.

[65] Jaczewski M., Kosztaluk R.: Zagadnienia sieci przesyłowych na światowym Kongresie Elektrotechniki w Moskwie. Przegl. Elektrot. 1978, n°4 ss. 141-145.

[66] Jermakow S.M.: Metoda Monte Carlo i zagadnienia pokrewne. PWN, Warszawa 1976.

[67] Juchniewicz J.: Przeskok zabrudzeniowy. WNT, Warszawa 1966.

[68] Kamiński A.: Zasady rachunku ekonomicznego w elektroenergetyce. Kompendium dla słuchaczy st. podypl. elektroenerg. Pol. Śl. - ZEOPd Katowice, Gliwice 1970.

[69] Karady G., Vinet R., Soucheraau N.: Nouvelles méthodes d'essais des isolateurs syntétiques. CIGRE 1976. Rap. 22-15.

[70] Karady G., Dallaire D., Mukhedkar D.: Statistical method for transmission line insulation design for poluted areas.IEEE Power Eng. Soc. Text. A-Pap. Winter Meet., New York 1976, ss. 220-224.

[71] Karady G., Holte K., Rodriguez G.D.: Comparative test method for transmission-line insulation desing for polluted areas. IEEE Power Eng. Soc., Text A-Pap. Summer Mett., Mexico City 1977, ss. 564-658.

[72] Karpiński J.: Optymalizacja wymian profilaktycznych. Metody statystyczne w sterowaniu jakością. Inst. Bad. System. PAN. Ossolineum. Wrocław 1977 ss. 209-229.

[73] Kawai M., Sforzini M.: Problèmes se rattachant au comportement des isolateurs à UHT des conditions de pollution. CIGRE 1974. Rap. 33-19.

[74] Kawaguchi I., Takagi K.: Switching surge flashover characteristics of contaminated insulators. Electr. Engineering in Japan 1971, n°3, ss. 71-78.

[75] Kizevietter V.E. i in.: Caractéristiques de l'isolement à très haute tension sous pollution et à l'humidité. CIGRE 1974. Rap. 33-16.

[76] Kelnar O., Kohoutová.: Výzkum vztahu meži provoznim a laboratornim značistenim izolátorů. Výzk. ustav energet. Praha 1970.

[77] Keller-Jacobsen i in.: Essais au laboratoire et en plain air pour dimensionner correctement les isolateurs exposés à la pollution saline. CIGRE 1978. Rap. 33-11.

[78] Knothe St.: Koszty zawodności sieci energoelektrycznych w zakładach przemysłowych. Przegl. Elektrot. 1972, n°6, ss. 241-247.

[79] Knothe St.: Obliczanie niezawodności sieci energoelektrycznych w zakładach przemysłowych. Przegl. Elektrot. 1972, n°7, ss. 302-309.

[80] Kohoutova D., Tichy J.: Vliv tloušťky vrstvy znečištěni na velikost preskokoveho napětí při skouškach umele znečištěne izolace střídavym napětim. Elektrot. Obzor. 1971, t. 60, n°8, ss. 400-403.

[81] Kopociński B.: Zarys teorii odnowy. WNT, Warszawa 1973.

[82] Korbut E.V., Merchalev S.D. i in.: Razriadnyje napriaženija ravnomierno i nieravnomierno zagrjazniennych izoljatorov. Električestvo, 1978, n°2, ss. 56-59.

[83] Kostienko M.V., Michajlov A., Chalilov F.Ch.: Untersuchungen der Form von Schaltüberspannungswellen in Elektroenergienetzen unter Betriebsbedingungen. Elektrie 1977, n°10, ss. 536-538.

[84] Kosztaluk R.: Izclacja sieci skrajnie wysokich napięć.Pr. Inst. Energetyki, z. 3, Warszawa 1975 s. 104.

[85] Kosztaluk R.: Wytrzymałość elektryczna długich łańcuchów izolatorów. Arch. Elektrot. 1977 t. 26, z. 3, ss. 507-522.

[86] Kosztaluk R., Czaplak W., Kucharski K.: Mesures de pollution, essais d'isolateure pollués, choîx des isolateurs. CIGRE 1978. Rap. 33-07.

[87] Krylov S.V., Samsiev A.S.: Vlagorazrjadnye charakteristiki izoljatorov v uslovijach zagrjaznenij. Elektr. Stancii 1972, n°8, ss.62-67.

[88] Kučera J., Plechanova M.: Odolnost izolátorů s vodivou vrstvou při sovčasném namahani napětim 50 Hz a spinacim přepětim. Elektrot. Obzor. 1973, n°1, ss. 7-11.

[89] Kucharski K. i in.: Ocena nowych konstrukcji liniowych izolatorów długopniowych. Biuro Badań i Studiów ZE, Gliwice 1975.

[90] Kucharski K.: Czasokresy czyszczeń łańcuchów izolatorów długopniowych linii napowietrznych 110-220 kV pracujących na terenie GOP. Pr. Nauk. Inst. Podstaw Elektrot. i Elektrotechnol. Pol.Wrocławska n°14, konfer. (2). Wrocław 1976, ss. 62-74.

[91] Kucharski K.: Ocena terenu pod względem zagrożenia zabrudzeniowego izolacji. Energetyka 1976, n°10, ss. 358-361.

[92] Kucharski K.: Metody pomiaru przewodności powierzchniowej izolatorów zabrudzonych. Energetyka 1975, n°3, ss. 89-93.

[93] Lambeth P. i in.: Rechérches internationales sur la pollution des isolateurs. CIGRE 1970. Rap. 33-02.

[94] Lambeth P.J.: Effect of pollution on high-voltage outdoor insulators. Proc. IEE 1971, vol. 110, n°9, ss. 1107-1130.

[95] Lambeth P.J., Looms J.S., Sforzini M. i in.: The salt fog test and its use in insulator selection for polluted localities. Trans. Power App. Syst. 1973, vol. PAS-92, n°6, ss. 1876-1887.

[96] Lambeth P.J. i in.: Essais do pollution naturelle d'isolateurs destinés à des réseaux de transport à ultra-haute tension. CIGRE 1974. Rap. 33-12.

[97] Leroy G., Gallet G., Kosztaluk R., Kromer I.: Réseaux aériens á ultra-haute tension: calcul des distances d'isolement. RGE. Juin 1974, n° spec., ss. 27-35.

[98] Levšunov R.T., Novikov R.D., Višnjakov A.A.: Grjazerazrjadnye charakteristiki izoljatorov pri kombinovannom vozdejstvii naprjaženija 50 Hz i komutacjonnym perenaprjaženij. Električestwo 1970, n°6, ss. 76-78.

[99] Levšunov R.T., Novikov A.A., Chramov L.F.: Razrjadnye naprjaženija izoljatorov s neodnokovoj provodimostju zagrjaznenija. Električestvo 1971, n°11, ss. 88-89.

[100] Levšunov R.T., Chramov L.F., Novikov A.A.: Grjazerazrjadnye naprjaženija izoljatorov pri komutacionnych perenaprjaženijach. Elektr. Stancii 1972, n°12, ss. 66-68.

[101] Levšunov R.T.: O vybore urovnej izoljacii v zagrjaznennych rajonach. Električestvo 1973, n°6, ss. 85-86.

[102] Luxa G.F. i in.: Contribution of laboratories te the determination of validity, repeatability and reproducibility of the dust deposit artifical pollution test. 33-70 (WGOU) 15-IWD, 1970.

[103] Macchiaroli B., Turner F.J.: Switching surge performance of contaminated insulators. IEEE Trans. Power App. Syst., July/August 1971, vol. PAS-90, ss. 1612-1627.

[104] Macchiaroli B.: Artificial evaluation of the self-washing performance of contaminated insulators. Proc. IEE 1971, vol. 118, n°9, ss.1314 - 1318.

[105] Majewski J.: Kierunki rozwoju budowy napowietrznych linii przesyłowych w świetle prac CIGRE. Energetyka 1977, n°5, ss. 185-190.

[106] Majkopar A.S. i in.: Metodika ocenki rabotosposobnosti liniejnoj izolacii po vlagorazrjadnym charakteristikam. Električestvo 1970 n°12, ss. 62-67.

[107] Majkopar A.S., Vol'kov K.D.: O metodike ocenki rabotosposobnosti liniejnoj izoljacii v rajonach s promyšlennymi zagrjazneniami. Električestvo 1974, n°8, ss. 57-59.

[108] Malaguti C., Sforzini M.: Experiences on the use of composite insulators in Italy and prospect for the future. Word Elektrot. Congr. Moscow 1977. Rep. 2-28, s. 20.

[109] Markussen K.A., Huse J.: Simulation du comportement des lignes de transport aux surtensions de manoeuvre. CIGRE 1974. Rap. 33-13.

[110] Mattson P., Nuder J.: Emploi simplifie des statistiques de défauts pour l'optimisation de la conception des réseaux et de l'équipement. CIGRE 1974. Rap. 31-06.

[111] Menemenlis C., Harbec G.: Coefficient of variation of the positive impulse breakdown of long air-gaps. IEEE Trans. Power App. Syst. 1974, vol. PAS-93, May/June, ss. 916-927.

[112] Menemenlis C., Mc Gillis D.: La tenue de l'air aux impulsions de manoevre; application à la conception de l'isolation externe pour la THT et la UHT. CIGRE 1974. Rap. 33-08.

[113] Merchalev S.D., Solomonik E.A.: Vlijanie konfiguracii izoljatorov na vybor dlin-y girlandy VL. Elektr. Stancii 1968, n°7, ss. 89-93.

[114] Merchalev S.D.: Zavisimost' razrjadnych charakteristik zagrjaznennych izoljatorov v normalnom ekspluatacjonnom režimie ot ich konfiguracii. Izv. NIIPT. Sb. stat. pered. energ. postojan. i perem. tokom 1968, vyp. 14, ss. 169-183.

[115] Merchalev S.D., Solomonik E.A.: Izoljacija linij i podstancij v rajonach s zagrjaznennoj atmosferoj. Energia. Leningrad 1973.

[116] Merchalev S.D., Rejn B.M., Solomonik E.A.: Parametry nierawnomiernogo sloja zagrjaznenija izoljatorov. Izv. NIIPT 1967, n°23.

[117] Melnikov N.A., Rokotjan S.S., Šerencis A.N.: Projektirovanije električeskoj časti vozdusnych linij elektroperedači 330-500 kV. Energia. Moskva 1974.

[118] Mikulski J., Grabowska I.: Badania wytrzymałości elektrycznej układów izolacyjnych słupów linii 110 i 220 kV. Energetyka 1977, n°3, ss 117-122.

[119] Meran I.H., Powell D.G.: Resistance graded insulators - the ultimate solution to the contamination problem? Trans. Power App. Syst. 1972, n°6, ss. 2452-2458.

[120] Okada T., Koga S.: Switching surge flashover Characteristics of long disk insulators strings under polluted conditions. Trans. Power App. Syst. 1970, t. 89, n°3, ss. 437-441.

[121] Palit B.B.: Fremdschichtüberschlag an einer Modellanordnung. Bull. SEV 1973, t. 64, n°20, ss. 1239-1247.

[122] Paris L. i in.: Etude de la sécurité d'un réseau à très haute tension of fonction de la structure et des caractéristiques de ses composants. CIGRE 1972. Rap. 31-14.

[123] Paris L.: Terminologie concernat l'étude de la coordination de l'isolement du point de vue probabiliste. Elektra 1973, n°26, ss. 43.

[124] Plechanová M.: Electrické charakteristiky znečištěných izolátorů při pusobeni aperiodickich vln. Elektrot. Obzor. 1971, t. 60.

[125] Plechanová M., Beran J., Paulusz M.: Výzkum metod pro stanoveni izolačni odolnosti znečištěných izolátoru pri kombinovaném namáhani. Elektrot. Obzor. 1976, n°9, ss. 533-535.

[126] Pohl Z.: Izolatory wysokiego napięcia do warunków zabrudzeniowych. WNT, Warszawa 196[illegible].

[127] Pohl Z.: Izolacja wysokonapięciowa w warunkach zwiększonej upływności powierzchniowej. Pr. Nauk. Inst. Podst. Elektrot.i Elektrotechnol. Polit. Wrocł. n°10/4 (monografia) Wrocław 1975.

[128] Reghuveer M.R. Kuffel E.: Experimental and analitycal studies of factors which affect flashover voltage an polleted insulation surfaces. IEEE Trans. Power App. Syst. 1974, vol. PAS-93, n°1, ss. 312--320.

[129] Rivière R., Parraud R.: Réflexion sur les mesures d'impulsions de courant de fuite effectuées en exploitation sur les chaînes d'isolateurs. R.G.E. 1973, n°3, ss. 189-194.

[130] Rizk P.A.M., Atared A.A.: Flashover Tests on Dust Contaminated Insulators. IEEE Trans. Power App. Syst. 1972, n°1, ss. 328-335.

[131] Russak M.A., Mc Laren M.G.: Development of a semiconducting glaze for high tension porcelain insulation. Am. Ceram. Soc. Bull. 1973. n°3, ss. 271-275.

[132] Saferna J.: Praca izolatorów liniowych i stacyjnych w warunkach zabrudzeniowych. WNT, Warszawa 1968.

[133] Saferna J., Kosztaluk R.: Field investigations of line insulation in pollution areas. CIGRE 1972. Rep. 33-13.

[134] Samsiev A.S., Burchanov S.S., Kolobova O.I.: K voprosu v vlijanii konfiguracii izoljatorov na naprjaženie ich perekrytija. Izv. Ak. Nauk SSSR. En. i Transport 1975, n°3, ss. 58-67.

[135] Seta T., Arai N., Udo T.: Natural pollution tes of insulators energized with DC High Voltage.IEEE Trans. Power App. Syst. 1974 vol. PAS-93, May/June, ss. 878-883.

[136] Splomonik E.A., Tichodeev N.N.: Zur Theorie des Überschlags von Kappenisolatoren mit unterschiedlicher Verschmutzung der Schir - ober und - Unterseite. Elektrie 1974, Jg 28, n°11, ss. 585-587.

[137] Sforzini M.: L'isolamento in atmosfera contaminata. Elektrotechnica 1972, n°3.

[138] Sforzini M.: Methods of measuring pollution site severity and application of these and of laboratory test results for the proper selection of insulation. Rap. at the Colloq. of CIGRE SC n 33. London. June 1977.

[139] Sozański J.: Niezawodność urządzeń i układów elektroenergetycznych. Kom. Energetyki PAN, Warszawa 1974.

[140] Stępniewski T.: Tendencje i ograniczenia w zastosowaniu wysokonapięciowej izolacji napowietrznej. Konf. Izolat. Karpacz, czerwiec 1976, ss. 4-18.

[141] Stępniewski T.: Zastosowanie szkliw półprzewodzących dla opanowania wyładowań niezupełnych i sterowania rozkładu napięcia na izolatorach wysokonapięciowych. Konf. Izolat. Zakopane, 1976.

[142] Stępniewski T.: Aktualne zagadnienia koordynacji izolacji urządzeń wysokonapięciowych jako środka zapewnienia niezawodności izolacji. Mat. Konf. Nau. - Techn.: "Ciągłość zasilania z systemów elektroenerg. z. III. IESU Polit. Śląskiej. Gliwice, październik 1977, ss. 35-44.

[143] Streubel H.: Die Regenüberschlag-wechselspannung von Isolatoren bei hoher Regenwasserleitfähigkeit und unterschiecher Isolatorenlage. Hermsd. Techn. Mitt. 1968, H. 22, ss. 696-700.

[144] Streubel H., Pillau G.: Freileitungsisolatoren bei Vereisung und Verschmutzung. 22 Int. Wiss. Kolloq. Hochsch. Ilmenau 1977, H. 1,ss.139 -142.

[145] Szymik P.: Zagrożenie awaryjne sieci napowietrznej w warunkach zabrudzeniowych. Biul. Inst. Energetyki 1959, z. 1 i 2.

[146] Thibault M., Tallou B.: Etude des risques inhérents á l'emploi d'isolants syntétiques. R.G.E. 1975, t. 85, n°3, ss. 194-195.

[147] Tochev P., Todorova A., Vandev D.: Caractéristiques statistiques de l'isolement dans l'air lors de surtensions de manoevre. CIGRE 1978. Rap. 33-12.

[148] Verma M.: Isolierverhalten von Hochspannungs-Langstabisilatoren verschiedener Bauform unter natürlichen Fredschichtbedingungen. ETZ-A 1971, vo. 92, z.n°7, ss. 407-413.

[149] Verma M.P., Niklasch H. i in.: Critère do contournement par pollution et ses applications pour le dimensionnement et contrôle de l'isolation. CIGRE 1978. Rap. 33-09.

[150] Verma M.P., Niklasch H., Kolossa I.: Hochspannungs-Stützisolatoren unter natürlichen Fremdschichtbedingungen. ETZ-A 1974, Bd 95, ss. 98 -105.

[151] Veverka A.: Minimum přeskokoveho napětí pri spinacich vlnach. Elektrot. Obzor. 1977, n°7, ss. 342-343.

[152] Vignaud E.: Tenue sous pollution des isolateurs de lignes aériennes. Note EdF HM/72/12751, Clamart 1974, s. 10.

[153] Weck K.H.: Risque d'amorcage produit par des surtensions de manoeuvre dans un poste à UHT. CIGRE 1974, Rap. 23-06.

[154] Voskresenskij V.F.: Iz opyta raboty izolacii v uslovijach zagrjaznennoj atmosfery. Elektr. Stancii 1971, t. 42, n°2.

[155] Zieliński Z.: Wyniki badania ciągłości zasilania odbiorców z sieci energetyki zawodowej. Energetyka 1978, n°3, ss. 85-87.

NORMY, KATALOGI I INNE

[156] PN-74/E-02051. Elektroenergetyczne izolatory wn. Nazwy i określenia oraz podział i oznaczenia.

[157] PN-74/E-01051. Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna. Terminy.

[158] PN-66/E-06308. Elektroenergetyczne izolatory wn. Izolatory liniowe. Wymagania ogólne i metody badań.

[159] PN-75/E-05100. Elektroenergetyczne linie napowietrzne. Ogólne przepisy budowy.

[160] PN-75/E-05001. Urządzenia elektroenergetyczne wn. Napięcia probiercze izolacji.

[161] PN-68/E-06303. Elektroenergetyczne izolatory wn. Dobór izolatorów napowietrznych ze względu na zagrożenie zabrudzeniowe.

[162] PN-74/E-04068. Pomiary wysokonapięciowe. Próby zabrudzeniowe izolacji napowietrznej.

[163] PN-75/E-04060. Pomiary wysokonapięciowe. Próby napięciem przemiennym.

[164] PN-75/E-04061. Pomiary wysokonapięciowe. Próby napięciem piorunowym.

[165] PN-70/E-04067. Pomiary wysokonapięciowe. Próby napięciem łączeniowym.

[166] PN-78/E-06303. Urządzenia elektroenergetyczne wysokiego napięcia. Narażenia zabrudzeniowe izolacji napowietrznej i dobór izolatorów do warunków zabrudzeniowych (obowiąz. od 1 stycznia 1980 r.).

[167] IEC Publication 71-1 (1976) Sixth edition: Insulation coordination. Part. 1: Terms, definitions, principales and rules.

[168] Rev. de la publ. 71A de la CEI 28 (Bureau Central) 42. Coordination de l'isolement. Deuxième partie: Guide d'application. Publication 71-2 (2 édition). Rap. de la CEI. Juin 1976.

[169] Groupe de Travail CIGRE 13-02. Les surtensions de manoeuvre dans les réseaux à THT et UHT, et en particulier les surtensions d'enclenchement et de réenclechement des lignes de transport. Electra 1973, n°30, s. 70.

[170] IEC Publication: Recommendations for overhead lines. Part. 1. TC11 (Secretariat) 24. June 1978.

[171] L'amorcage en polarité positive des grands intervalles aux Renardières. Electra. Juillet 1977, n°53.

[172] Docum. EdP. Dir. des Etudes et Rech. Lignes aériennes à haute et très haute tension. Règles d'isolation. Paris. Juin 1976.

[173] Instrukcja badania ciągłości zasilania odbiorców z sieci energetyki zawodowej. Zjednocz. Energetyki. Warszawa 1973.

[174] Rukovadjaščije ukazanija po vyboru i ekspluatacii izolacji v rajonach s zagrjaznennoj atmosferoj. Min. Energ. i Elektrif. SSSR Moskva 1975.

[175] VEM-Handbuch. Elektroenergieanlagen Grundlagen und Anlageteile. VEB Verlag Technik. Berlin 1974.

[176] Katalog izolacji liniowej. Opracowanie Biura Badań i Studiów ZE, Gliwice 1975.

[177] Katalog wyrobów, osprzęt ochronny. BELOS 1974. Zjednoczenie Przem. Maszyn Górniczych.

[178] Bolšev L.N., Smirnov N.W.: Tablicy matematičeskoj statistiki. AN SSSR Moskva 1968.

[179] TGL 8678/231. Freiluftisolation für Nennspannungen 110 kV und darüber. Bemessung gegen Isolationsminderung durch Fremdschichten. 1968.

NIEZAWODNOŚĆ IZOLACJI LINII NAPOWIETRZNYCH WYSOKIEGO NAPIĘCIA NA TERENACH PRZEMYSŁOWYCH

S t r e s z c z e n i e

Przedmiotem rozprawy jest analiza przyczyn oraz skutków technicznych i ekonomicznych zagrożenia izolacji linii napowietrznych w aglomeracjach przemysłowych. Rozważania oparto na wybranych wynikach badań laboratoryjnych i terenowych oraz statystyki zakłóceń. Dokonano próby syntetycznego ujęcia wytrzymałości i niezawodności układów izolacyjnych w rozmaitych stanach zagrożenia oraz określono niezawodnościowe modele obliczeniowe dla rzeczywistych linii.

Zaproponowano metodę obliczania niezawodności izolacji przy uwzględnieniu zmienności zagrożenia w czasie oraz wykorzystaniu wyników badań izolatorów w stacjach doświadczalnych i statystyki zakłóceń. Oceniono wpływ kształtu i położenia izolatorów na ich niezawodność w eksploatacji oraz częstość czyszczenia w szczególnie trudnych warunkach środowiskowych.

Dokonano analizy kosztów inwestycyjnych, eksploatacyjnych i zawodności dla typowych linii wn na terenach aglomeracji przemysłowych i zaproponowano metodę określania dopuszczalnej zawodności oraz uzasadnionej wytrzymałości zabrudzeniowej łańcuchów izolatorów. Zaproponowano uzasadnione sposoby doboru izolatorów ze względu na narażenia zabrudzeniowe. Omówiono kierunki badań nad dalszą racjonalizacją technicznych rozwiązań izolacji.

НАДЁЖНОСТЬ ЛИНЕЙНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ В ПРОМЫШЛЕННЫХ РАЙОНАХ

Р е з ю м е

Сутью диссертации является анализ причин, а также технических и экономических последствий угрозы изоляции воздушных линий высокого напряжения в крупных промышленных районах. Рассуждения основаны на результатах избранных лабораторных и натурных исследований, а также на статистиках нарушений. Сделана попытка синтетического подхода к вопросу прочности и надёжности изоляционных схем в различных состояниях угрозы, определены расчётные модели ненадежности для реально существующих линий электропередачи.

Предложен метод расчёта ненадёжности изоляции с учётом изменчивости угрозы во времени и использования результатов исследований изоляторов в экспериментальных стендах, а также статистики нарушений. Сделана оценка влияния формы и расположения изоляторов на их эксплуатационную надёжность и частоту очистки в особенно трудных условиях загразнения.

Сделан анализ капиталовложений, эксплуатационных расходос и ущерба от недоотпуска электроэнергии для типических высоковольтных ЛЭП в промышленных районах и предложен метод определения допустимой ненадёжности и обоснованной прочности гирлянд изоляторов в условиях загрязнения. Предложен метод выбора изоляторов с точки зрения опасности в условиях загрязнения. Обсуждены направления исследований в области дальнейшей рационализации технических решений конструкции изоляции.

RELIABILITY OF HIGH VOLTAGE OVERHEAD LINES INSULATION IN INDUSTRIAL AREAS

S u m m a r y

The object of the dissertation is the analysis of the causes and technical, and economic effects due to the hazards of overhead insulation lines in industrial areas. The present considerations are based on the results taken from laboratory and territorial tests as well as interference statistics. An attempt was made at synthetic presentation of the electric strength and reliability of insulation systems in various hazard conditions. Calculative reliability models were determined for real lines.

There was suggested a method for calculating insulation reliability while having considered hazard changeability in time and utiliznig the results of insulator tests in test stations and the inteference statistics. The offect of insulator shape and position on their reliability in operation condutions was estimated together with the cleaning frequency in particulary anvironmental difficult conditions.

The analysis of investement, operation and unreliability costs for typical high voltage lines on the industrial agglomeration territories was made and a method determing the admissible unreliability as woll as the jestified resistance to pollution of insulator chains was suggested. The ways of choice insulator in relation to pollution hazard were proposed. The directions of investigations concerned with further technical development in insulation systems were discussed.

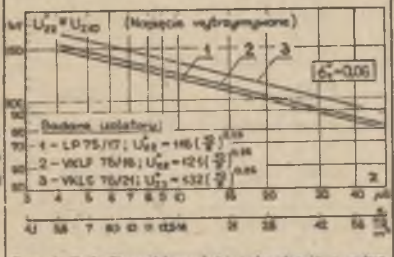
Załącznik 1

Modele obliczeniowe dla linii 110 i 220kV na terenach zabrudzeniowych ZEOPd [44]

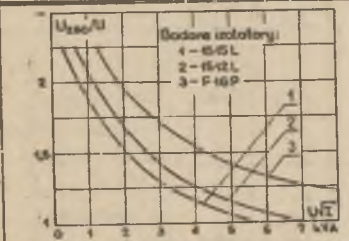
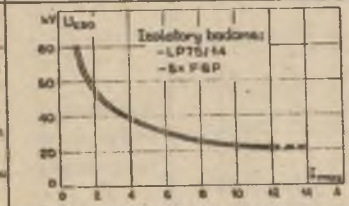
Strefa zabrudzeniowa			I i II		III		IV		Długość odcinków linii z różnymi łańcuchami izolatorów			
r			1		2		3		Bezwzględne l_k [km]		Względne $\gamma_k = l_k / l$	
									110kV	220kV	110kV	220kV
Przelot pionowy (p)	Rodzaj łańcucha k	Długość odcinków linii $l_{k,r}$	$l_{p,1} = l_1$		$l_{p2} = \gamma_2 l_2$		—		$l_p = \gamma_{pl} = l_{p,1} + l_{p,2}$		$\gamma_p = \gamma_{1,l} + \gamma_{2,l}\,\gamma_2$	
									25,2	51,8	0,63	0,74
Przelot ukośny (v)			—		$l_{v,2} = (1-\gamma_2) l_2$		$l_{v,3} = (1-\gamma_3) l_3$		$l_v = \gamma_{vl} = l_{v,2} + l_{v,3}$		$\gamma_v = \gamma_{2,l}(1-\gamma_2) + \gamma_{3,l}(1-\gamma_3)$	
									5,2	6,3	0,13	0,09
Przelot gwiazd. (y)			—		—		$l_{y,3} = \gamma_3 l_3$		$l_y = \gamma_{y,l} = l_{y,3}$		$\gamma_y = \gamma_{3,l}\,\gamma_3$	
									9,6	11,9	0,24	0,17
Odciąg. gowy (o)			$l_{o,1} = l_1$		$l_{o,2} = l_2$		$l_{o,3} = l_3$		$l_o = \gamma_{ol} = l_{o,1} + l_{o,2} + l_{o,3}$		$\gamma_o = 1$	
									40	70	1	1
Napięcie znamionowe linii			110kV	220kV	110kV	220kV	110kV	220kV	Uwagi: 1) Udziały długości odcinków linii 110kV... 220kV z łańcuchami przelotowymi pionowymi w strefie III i gwiazdowymi w strefie IV wynoszą $\gamma_2 = \gamma_3 = 0{,}8 \ldots 0{,}85$ w stosunku do długości odcinków z układami specjalnymi ukośnymi. 2) Średnie długości linii 110... 220kV wynoszą 40... 70km			
Długość odcinków linii w strefie zabrudzniowej	l_r	[km]	l_1		l_2		l_3					
			14	28	14	28	12	14				
	$\gamma_{r,l}$	[–]	$\gamma_{1,l}$		$\gamma_{2,l}$		$\gamma_{3,l}$					
			0,35	0,40	0,35	0,40	0,30	0,20				

Załącznik 2

Przykładowe wyniki laboratoryjnych badań zabrudzeniowych izolatorów liniowych przy napięciu przemiennym

Rodzaj badań	Przykłady charakterystyk	Zależności obliczeniowe	Oznaczenia	Uwagi
Metoda powłoki stałej, półpłynnej lub solnej mgły	 Rys. 1 - Z. 2. Charakterystyki zabrudzeniowe wybranych izolatorów liniowych długopniowych [140, 178]	W warunkach laboratoryjnych: $U^*_{zz} = U_{z50}(1 - 2{,}6\delta_1^*)$ W warunkach rzeczywistych: $U_{z50} = U_{z50}(1 - 1{,}3\delta_1)$ Funkcje aproksymacyjne: $U^*_{zz} = \hat{U}_{z50} = \hat{U}_{z50}(\frac{10}{Z})^{\delta}$ dla wartości odniesienia $\hat{U}_{z50}(Z=10\mu S)$	U^*_{zz}, U_{z50} [kV] – 2 i 10 procentowe napięcie wytrzymywane w warunkach laboratoryjnych i rzeczywistych; U_{z50} [kV] – 50 procentowe napięcie przeskoku; Z [μS] – konduktywność powierzchniowa powłoki zabrudzeniowej; $\hat{U}_{z10}$ [kV] – 10 procentowe napięcie wytrzymywane dla Z = 10 μS; δ = 0,25 – aproksymacyjny współczynnik potęgowy; δ_1^*, δ_1 – względne odchylenia standardowe napięcia przeskoku zabrudzeniowego w warunkach laboratoryjnych i rzeczywistych.	Charakterystyki wykonane w laboratorium firmy Harmsdorf (NRD) metodą powłoki półpłynnej. Zależności między konduktywnością powłoki Z a stężeniem solan ki a wg [73].

Załącznik 2, c.d.

Rodzaj badań	Przykłady charakterystyk	Zależności obliczeniowe	Oznaczenia	Uwagi
Metoda solnej mgły połączona z pomiarem szczytowych wartości prądu upływu	 Rys. 2 - Z. 2. 50 procentowe poziomy wytrzymałościowe izolatorów w zależności od prądu upływu i napięcia probierczego [15, 32]	Wg [15], warunek zapłonu łuku elektrycznego: $U\sqrt{I} = 800X$ oraz przeskoku zabrudzeniowego: $U_{z50}\sqrt{I_{max}} = 800X$	U [V] – napięcie na izolatorze podczas próby; I [A] – najwyższa wartość prądu upływu przy napięciu U; I_{max} [A] – wartość szczytowa prądu upływu w półokresie poprzedzającym przeskok; X [cm] – maksymalna długość łuku elektrycznego przy napięciu U; X_{kr} [cm] – krytyczna długość łuku elektrycznego (bezpośrednio przed przeskokiem)	Charakterystyki wykonane w laboratorium EdF w Clamart (Francja); prądy upływu mierzone oscylograficznie
Dowolna metoda laboratoryjna połączona z pomiarem szczytowych wartości prądu upływu	 Rys. 3 - Z. 2. Przykładowa 50 procentowa napięcia przeskoku izolatorów w zależności od maksymalnego prądu upływu [149]	Przybliżona wartość szczytowa prądu upływu przed przeskokiem zabrudzeniowym: $I_{max} = \frac{(800 \cdot 2/3 \cdot a_u)^2}{U_{z50}} = \frac{(533 a_u)^2}{U_{z50}}$ dla izolatorów normalnych, jeśli $(a_{u1}/l_1)_{max} < 3{,}5$	a_u [cm] – droga upływu izolatora; a_{u1}/l_1 – stosunek drogi upływu do odstępu w powietrzu między dwoma punktami na powierzchni izolatora	Charakterystyki wykonane w laboratorium IFGH w Hannowerze (RFN) metodą powłoki stałej i solnej mgły; prądy upływu mierzone oscylograficznie

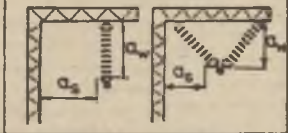
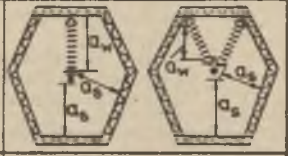
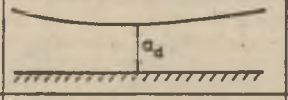
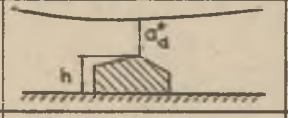
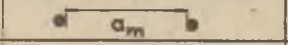
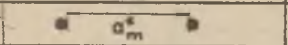
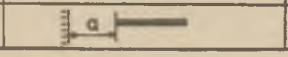
Załącznik 3

Zależności empiryczne do obliczania napięć przeskoku dla izolacyjnych odstępów powietrznych w liniach wysokiego napięcia [84,97,172].

Rodzaj napięcia	Minimalne 50 procentowe napięcie przeskoku U_{50}[kV] [1]	10 procentowe nap. wytrzymywane $U_{10}=U_{50}(1-1{,}36)$[kV]	Odchylenie standardowe σ/U_{50}
Przemienne 50 Hz (przep. wolnozmienne)	$k_r \frac{3400}{1+\frac{8}{a}}$ [2] $2<a<20$m	$0{,}935\,U_{50}$	0,05
Udarowe łączeniowe	$k_ł \frac{3400}{1+\frac{8}{a}}$ [3] $2<a<20$m	$0{,}896\,U_{50}$	0,08
Udarowe piorunowe	$k_{g,u}\,a$ [4] $a \gg 2$m	$0{,}922\,U_{50}$	0,06
	$(150\,k_ł+380)a$ [5] $a \gg 1{,}5$		

Uwagi: 1) Zależności empiryczne dla odstępów powietrznych o długości a [m]; wartości współczynników geometrycznych podane poniżej. 2) Wzór przybliżony [172]. 3) Wzór Galleta dla udarów o czasie trwania czoła kilkadziesiąt – kilkaset μs [97]. 4) Wg [172]. 5) Wg [84,97]. 6) Odchylenia standardowe napięcia przeskoku w warunkach rzeczywistych [10,168].

Wartości współczynników geometrycznych w zależności od rodzaju odstępu i napięcia

Rodzaj odstępu powietrznego		Rodzaj napięcia: Przemienne 50 Hz	Udarowe łączeniowe	Udarowe piorunowe	Uwagi
		Współczynnik geometryczny: k_r	$k_ł$	$k_{g,u}$	
Przewód - słup (fazy skrajne)		1,4	1,25	550	Do obliczenia napięcia przeskoku przyjąć najmniejszy z odstępów izolacyjnych
Przewód - słup (okna słupów)		1,3	1,2	550	
Przewód - ziemia		1,3	1,10	550	Napięcie przyłożone na przewód
Przewód - obiekt (pod linią)		1,45	1,35	550	
Przewód - przewód		—	1,50	550	Napięcie między elektrodami
Linka odgromowa - Linka odgromowa		—	1,60	550	
Sworzeń - ziemia		1,2	1,0	480	Napięcie na sworzniu

Załącznik 4

Zależności empiryczne określające 10 procentowe napięcie wytrzymywane na słupach linii w n na terenach przemysłowych w warunkach rzeczywistych układów izolacyjnych

Układ izolacyjny [1]	Stan zagrożenia ω [2]	10 procentowe napięcie wytrzymywane [3] $U_{10} = U_{50}(1 - 1{,}3\delta)$ Wartości szczytowe	Wyjaśnienia
—	—	kV	—
Łańcuch izolatorów	Napięcie przemienne robocze (przepięcia dorywcze) oraz zabrudzenia	$U_{Z10} = \sqrt{2}\, q\, \hat{U}_{Z10} \left(\frac{10}{\varkappa}\right)^{\delta}$ [4]	$q = 1; 1{,}2; 1{,}1$ – względny poziom wytrzymałościowy rzędu izolatorów zawieszonego w łańcuchu ŁP ; ŁPV ; ŁPY [44]
	1 (2)		
Odstęp powietrzny przewód – poprzecznik	Przepięcia łączeniowe (dodatnie)	$U_{ł10} = 0{,}896 \dfrac{3400 k_ł}{1 + \frac{8}{a_w}}$ [5]	$H_ł$ [m] – długość rzędu izolatorów w łańcuchu bez osprzętu łukochronnego $a_w \cong H_ł ; 0{,}8 H_ł ; 0{,}78 H_ł$ [m] – przybliżona długość odstępu powietrznego przewód – poprzecznik z uwzględnieniem osprzętu łukochronnego [18]
	3		
	Przepięcia piorunowe (dodatnie)	$U_{u10} = 0{,}922(150 k_ł + 380) a_w = 0{,}922 k_{g.u} a_w$ [5]	
	4		

Uwagi : 1) Wyszczególnienie układów na rys.1. 2) Oznaczenia z tab. 3. 3) Wg danych z zał. 3. 4) Z zał. 2 (rys).1 – Z.2. 5) Wg danych z zał. 3.

Załącznik 5

Najważniejsze parametry rozkładu wielowymiarowych zmiennych losowych [157]

Nazwa parametru	Zależności	Uwagi
Wartość oczekiwana	$E(\mathbf{z}) = \bar{\mathbf{z}} = \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{z} f(\mathbf{z}) d\mathbf{z}$ gdzie: $\mathbf{z}\{z_\omega\}$ – 4wymiarowa zmienna losowa $(\omega = 1,\ldots,4)$; $f(\mathbf{z})$-funkcja gęstości prawdopodobieństwa	Parametr położenia; wyznacza punkt w 4wymiarowej przestrzeni wokół którego grupują się wszystkie możliwe wartości zmiennej losowej
Odchylenie standardowe	$\delta(\mathbf{z}) = \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} (\mathbf{z}-\bar{\mathbf{z}})^2 f(\mathbf{z}) d\mathbf{z}}$	Parametr rozrzutu w rozkładzie zmiennej losowej.
Współczynnik korelacji	$r_{i,j} = \frac{cov(z_i,z_j)}{\delta(z_i,z_j)}$; $i \neq j \in \omega = 1,\ldots,4$ gdzie: $cov(z_i,z_j) = \int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} (z_i-\bar{z}_i)(z_j-\bar{z}_j) f(z_i,z_j)\, dz_i dz_j$ $f(z_i,z_j)$ – gęstość rozkładu prawdopodobieństwa 2wymiarowej zmiennej losowej	Parametr liniowej zależności korelacyjnej między składowymi zmiennymi losowymi z_i oraz z_j.

Załącznik 6

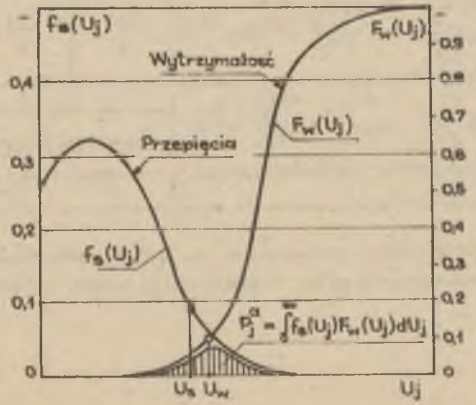
Ocena współzależności wytrzymałości układów izolacyjnych na słupach linii w n na terenach przemysłowych w warunkach rzeczywistych

Współzależne stany zagrożenia [1]		Współczynniki współzależności (5a) [2]	PARAMETRY OBLICZENIOWE k_{obl} [2]					
			Faza					
			Środkowa (okno słupa)			Skrajna		
			Rodzaj łańcucha					
i	j	$d_{i,j} = \frac{U_{i10}}{U_{j10}} = \frac{z_{i10}}{z_{j10}}$; $i \neq j \in \omega = 1,\ldots,4$	ŁP	ŁPV	ŁPY	ŁP	ŁPV	ŁPY
3 (3)	1 (2)	$d_{3,1} \cong d_{3,2} = \frac{U_{ł10}}{U_{Z10}} = \frac{k_{ł\,obl}}{(1-\frac{8}{a_w})\hat{U}_{Z10}(\frac{10}{\varkappa})^{\delta}}$	2593	2150	2343	2701	2240	2343
4 (4)	1 (2)	$d_{4,1} \cong d_{4,2} = \frac{U_{u10}}{U_{Z10}} = \frac{k_{u\,obl.}}{\hat{U}_{Z10}(\frac{10}{\varkappa})^{\delta}}$	336	304	331	371	308	335
4	3	$d_{4,3} = \frac{U_{u10}}{U_{ł10}} = k'_{u\,obl.}(a_w + 8)$	0,141			0,137		

Uwagi: 1) Oznaczenia z tab. 3 i zał. 4.2) Dane i oznaczenia z zał. 2 i 3.

Zasady obliczania ryzyka przeskoku przy przepięciach dla izolacji linii napowietrznych w n.

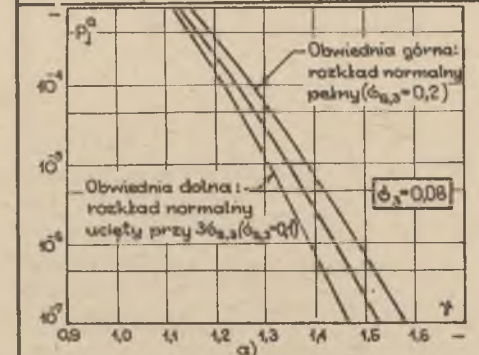
Układ izolacyjny	Pojedyńczy odstęp powietrzny	Izolacja linii (niezawodnościowy układ szeregowy $j = 1,\dots,n$ odstępów powietrznych)	Założenia i dane obliczeniowe	Uwagi
	R Y Z Y K O P R Z E S K O K U			
1	2	3	4	5
ZALEŻNOŚCI OGÓLNE	$P_j^a = \int_0^{\overline{U}} f_s(U_j) F_w(U_j) dU_j =$ $= \int_0^{\overline{k}} f_s(k_{sj}) F_w(k_{sj}) dk_{sj}$	$P^a = 1 - \int_0^{\overline{U}} \dots \int_0^{\overline{U}} f_s(U_1,\dots,U_n) \prod_{j=1} (1 - F_w(U_j))\, dU_1 \dots dU_n =$ $= 1 - \int_0^{\overline{k}} \dots \int_0^{\overline{k}} f_s(k_{s1},\dots,k_{sn}) \prod_{j=1} (1 - F_w(k_{sj}))\, dk_{s1} \dots dk_{sn}$	Nieskorelowane rozkłady prawdopodobieństwa przepięć i wytrzymałości udarowej izolacji [123, 168].	Dotyczy izolacji doziemnej oraz przepięć piorunowych i łączeniowych ($U_m \geq 420$ kV)

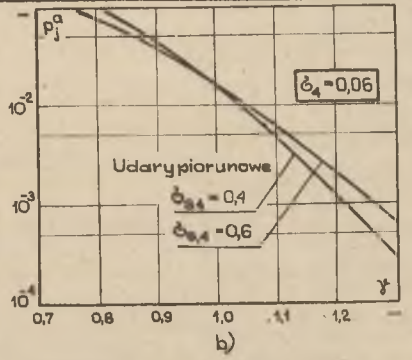


Rys. 1 - Z.7. Sposób obliczania ryzyka przeskoku przy przepięciach dla pojedyńczego odstępu powietrznego

Oznaczenia: U_j – wartość szczytowa przepięcia na j-tym odstępie izolacyjnym; $f_s(U_j), f_s(k_{sj})$ – gęstość prawdopodobieństwa wartości szczytowych lub krotności przepięć na j-tym odstępie izolacyjnym; $F_w(U_j), F_w(k_{sj})$ – dystrybuanta wytrzymałości udarowej j-tego odstępu izolacyjnego; $k_{sj} = \sqrt{3}\, U_j / \sqrt{2}\, U_m$ – krotność przepięcia dla j-tego odstępu izolacyjnego; $f_s(U_1,\dots,U_n), f_s(k_{s1},\dots,k_{sn})$ – wielowymiarowa gęstość prawdopodobieństwa wartości szczytowych lub krotności przepięć; U_w – statystyczne napięcie wytrzymywane przez odstęp izolacyjny przy udarach piorunowych lub łączeniowych z dopuszczalnym prawdopodobieństwem przeskoku nie większym od 10%; U_s – wartość szczytowa przepięcia statystycznego, która nie może być przekroczona z prawdopodobieństwem większym od 2%.

1	2	3	4	5
Ⓐ UPROSZCZONA METODA STATYSTYCZNA WG IEC [167,168]	$P_j^a = \Psi(k_s, \delta) = \Psi(U_w / U_s)$ W warunkach rzeczywistych (rys. 2-Z.7) dla określonych: -rozkładów prawdopodobieństwa przepięć i wytrzymałości udarowej -odchyleń standardowych udarowych napięć przeskoku i wartości szczytowych przepięć.	$P^a = 1 - \prod_{j=1}^{n}(1 - P_j^a) \cong 1 - (1 - P_j^a)^n \cong \sum_{j=1}^{n} P_j^a$ dla $P_j^a \leq 0{,}01$. Ograniczona przydatność praktycznego zastosowania metody dla znacznej liczby niejednakowych odstępów izolacyjnych oraz przy braku danych o rozkładzie krotności (wartości szczytowych) przepięć wzdłuż trasy linii	1. Normalny (ucięty) rozkład prawdopodobieństwa przepięć i wytrzymałości udarowej odstępu izolacyjnego. 2. Krzywe rozkładu zastąpione wybranymi wartościami statystycznymi: napięcia wytrzymywanego U_w i wartości szczytowej przepięcia U_s. 3. Względne odchylenie standardowe przepięć dla 1 odstępu: $\delta_{s,3} = 0{,}1 \ldots 0{,}2$ (p. łączen.), $\delta_{s,4} = 0{,}4 \ldots 0{,}6$ (p. piorun.). 4. Względne odchylenia udarowego napięcia przeskoku: $\delta_3 = 0{,}08$ (p. łączen.), $\delta_4 = 0{,}06$ (p. piorun.).	Dotyczy izolacji doziemnej przy przepięciach piorunowych i łączeniowych

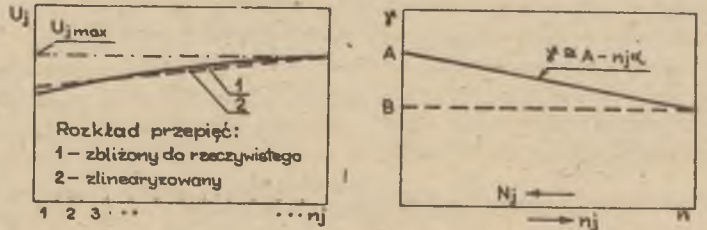




Oznaczenia: $\gamma = U_w / U_s = 1{,}15 \ldots 1{,}3$ - statystyczny współczynnik bezpieczeństwa; $k_s = \sqrt{3}\, U_s / \sqrt{2}\, U_m$ - krotność przepięcia statystycznego.

Rys. 2-Z.7. Zależność między ryzykiem przeskoku a statystycznym współczynnikiem bezpieczeństwa [168]: a) przepięcia łączeniowe, b) przepięcia piorunowe

1	2	3	4	5
(B) LINEARYZACYJNA UPROSZCZONA METODA STATYSTYCZNA WG IEC [170]	$p_j^a = p_1^a \cdot \exp(-\beta B + D)$ dla $\ln p_1^a \cong -\beta\gamma + D$ oraz $\gamma = U_w / U_s \cong$ $\cong A - n_j\alpha \cong B + N_j\alpha$	$p^a = p_1^a \frac{1-[\exp(-\beta\alpha)]^n}{1-\exp(-\beta\alpha)} \cong$ $\cong p_1^a \frac{1}{1-\exp(-\beta\alpha)} \cong p_1^a \frac{1}{\beta\alpha}$ dla $\exp(-\beta) \cong 1 - \beta\alpha$	1. Linearyzacja rozkładu wartości szczytowych przepięć wzdłuż trasy linii oraz statystycznego współczynnika bezpieczeństwa względem liczby odstępów izolacyjnych jak na rys. 3-Z.7 [109,147,172] 2. Linearyzacja zależności $p_j^a = \varphi(\gamma)$ w układzie półlogarytmicznym (rys. 2-Z.7) 3. Obliczeniowa wartość ryzyka przeskoku dotyczy odstępu „krytycznego" (zbliżona do wartości dla odstępu na końcu linii otwartej)	Dotyczy izolacji doziemnej przy przepięciach łączeniowych



Rys. 3-Z.7. Ilustracja linearyzacyjnych założeń upraszczających dotyczących:
a) rozkładu wartości szczytowych przepięć wzdłuż trasy linii,
b) statystycznego współczynnika bezpieczeństwa względem liczby odstępów.

Oznaczenia: P_i^a – obliczeniowe ryzyko przeskoku dla „krytycznego" odstępu izolacyjnego (na końcu linii otwartej); β, D – współczynnik linearyzacji ryzyka przeskoku względem statystycznego współczynnika bezpieczeństwa w układzie półlogarytmicznym; A, B, α – współczynniki linearyzacji statystycznego współczynnika bezpieczeństwa względem liczby odstępów izolacyjnych na trasie linii; n_j, N_j – numer porządkowy odstępu liczonego odpowiednio od początku i końca linii otwartej; n – liczba odstępów izolacyjnych na trasie linii

Załącznik 8

Średnie liczności łańcuchów i rzędów obliczeniowych w jednotorowych liniach 110 i 220 kV na terenie ZEOPd [44]

U_m [kV]	123					245				
Rodzaj 1) łańcucha ł	Przelotowe			Odciągowe		Przelotowe			Odciągowe	
	ŁP1	ŁPV1	ŁPY1	ŁO1	ŁO1	ŁP2	ŁP2	ŁPY2	ŁO2	ŁO3
	p	v	y	o		p	v	y	o	
Liczność łańcuchów $n_ł$ [1/km]	9			3		9			1,5	
Liczność rzędów obliczeniowych $m_ł$	1	2	2) 2;1,5	2	4	2	4	2) 4;2	3	6

Uwagi: 1) Łańcuchy specjalne ŁPV i ŁPY oraz przelotowe pionowe ŁP stosowane alternatywnie

2) Zastępcze liczby rzędów w specjalnych układach gwiazdowych przyjęte do obliczeń niezawodnościowych i rachunku kosztów

BIBLIOTEKA GŁÓWNA
Politechniki Śląskiej
P 3347/80/67

WYDAWNICTWA NAUKOWE I DYDAKTYCZNE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ MOŻNA NABYĆ W NASTĘPUJĄCYCH PLACÓWKACH:

44-100 Gliwice — Księgarnia nr 096, ul. Konstytucji 14 b
44-100 Gliwice — Spółdzielnia Studencka, ul. Wrocławska 4 a
40-950 Katowice — Księgarnia nr 015, ul. Żwirki i Wigury 33
40-096 Katowice — Księgarnia nr 005, ul. 3 Maja 12
41-900 Bytom — Księgarnia nr 048, Pl. Kościuszki 10
41-500 Chorzów — Księgarnia nr 063, ul. Wolności 22
41-300 Dąbrowa Górnicza — Księgarnia nr 081, ul. ZBoWiD-u 2
47-400 Racibórz — Księgarnia nr 148, ul. Odrzańska 1
44-200 Rybnik — Księgarnia nr 163, Rynek 1
41-200 Sosnowiec — Księgarnia nr 131, ul. Zwycięstwa 7
41-800 Zabrze — Księgarnia nr 230, ul. Wolności 288
00-901 Warszawa — Ośrodek Rozpowszechniania Wydawnictw Naukowych PAN — Pałac Kultury i Nauki

Wszystkie wydawnictwa naukowe i dydaktyczne zamawiać można poprzez Składnicę Księgarską w Warszawie, ul. Mazowiecka 9.