

**ZESZYTY
NAUKOWE
POLITECHNIKI
ŚLĄSKIEJ**



P. 3347 / 77

ELEKTRYKA

**Z. 56
GLIWICE
1977**

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

ZESZYTY NAUKOWE

Nr 513



P. 3347/77

ZBIGNIEW GACEK

**TECHNICZNE I EKONOMICZNE ASPEKTY ZAWODNOŚCI
ZABRUDZENIOWEJ IZOLACJI LINIOWEJ
WYSOKIEGO NAPIĘCIA**

PL ISSN 0072-4688

GLIWICE

1977

OPINIODAWCY

Doc. dr hab. inż. Zbigniew Pohl
Prof. mgr inż. Tadeusz Stępniewski
Prof. dr inż. Franciszek Szymik

REDAKTOR NACZELNY WYDAWNICTW UCZELNIANYCH
POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Jan Bandrowski

REDAKTOR DZIAŁU

Zofia Cichowska

SEKRETARZ REDAKCJI

Jan Znamirowski

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Śląskiej

Dział Wydawnictw Politechniki Śląskiej
Gliwice, ul. Kujawska 2

Nakł. 80+146 Ark. wyd. 5,57 Ark. druk 4,87 Papier offsetowy kl. III, 70x100, 70 g
Oddano do druku 15.2.1977 Podpis. do druku 18.4.1977 Druk ukończ. w maju 1977
Zam. 230/77 Cena zł 14,-

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

SPIS TREŚCI

	Str.
WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SYMBOLI I OZNACZEŃ	5
1. WPROWADZENIE	7
1.1. Wstęp	7
1.2. Cel i zakres pracy	9
1.3. Tezy pracy	10
2. WYTRZYMAŁOŚĆ I ZAWODNOŚĆ ZABRUDZENIOWA IZOLATORÓW	10
3. MATEMATYCZNE MODELOWANIE ZAWODNOŚCI ZABRUDZENIOWEJ IZOLACJI	15
3.1. Wpływ oddziaływań zewnętrznych	15
3.2. Matematyczne podstawy modelowania i obliczania zawodności..	17
3.3. Statystyczna weryfikacja modeli matematycznych	24
4. ANALIZA ZAWODNOŚCI IZOLATORÓW LINIOWYCH	28
4.1. Zawodność łańcuchów izolatorów w stacjach doświadczalnych..	28
4.2. Ocena zawodności izolatorów w warunkach zbliżonych do eksploatacyjnych	31
4.3. Efektywność wykorzystania różnych typów izolatorów	36
4.4. Ocena efektywności wykorzystania drogi upływu izolatorów ..	43
5. EKONOMICZNE ASPEKTY ZAWODNOŚCI ZABRUDZENIOWEJ IZOLACJI LINIOWEJ.	46
5.1. Zdyskontowane nakłady inwestycyjne	46
5.2. Koszty eksploatacji	48
5.3. Ocena rocznych kosztów zawodności zabrudzeniowej	51
6. TECHNICZNO-EKONOMICZNY SPOSÓB DOBORU IZOLATORÓW DO WARUNKÓW ZABRUDZENIOWYCH	56
6.1. Dopuszczalny poziom zawodności zabrudzeniowej	56
6.2. Proponowane ujęcie doboru izolatorów	60
7. ZARYS KIERUNKÓW DALSZYCH BADAŃ I TECHNICZNYCH ROZWIĄZAŃ IZOLACJI	65
8. WNIOSKI	67
LITERATURA	69
Streszczenia	73
Załączniki	76

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SYMBOLI I OZNACZEŃ

A, B	cm/kV	- parametry określające jednostkową drogę upływu dla założonej zawodności rocznej,
A_w	kWh	- energia niedostarczona odbiorcy wskutek wyłączenia zabrudzeniowego,
a_u	cm	- droga upływu izolatora,
a_{usk}	cm	- skorygowana droga upływu izolatora,
a_{ui}	cm	- droga upływu łańcucha izolatorów,
a_{ui}^*	cm/kV	- jednostkowa droga upływu odpowiadająca założonej zawodności rocznej,
$c_{\%}$	%	- względne odchylenie standardowe zabrudzeniowego napięcia przeskoku,
C_1	zł	- koszt inwestycyjny (cena) izolatora,
c_1	zł/cm	- cena 1 cm drogi upływu izolatora,
H	cm	- długość montażowa (skok) izolatora,
k	-	- indeks oznaczający sezonowy stan zawodnościowy w rocznym modelu obliczeniowym,
k_a	-	- współczynnik skuteczności wykorzystania drogi upływu,
k_o	-	- współczynnik skuteczności rezerwowania odbiorców,
k_z	zł/kWh	- równoważnik kosztu strat odbiorców na skutek niedostarczenia energii,
\bar{k}_r	zł	- średni koszt nieplanowanego remontu po zabrudzeniowym wyłączeniu linii,
k_u	-	- współczynnik uszkodzalności izolatorów,
K_I	zł	- zdyskontowany roczny nakład inwestycyjny na izolację liniową,
K_e	zł	- oczekiwany roczny koszt eksploatacji,
K_z	zł	- oczekiwany roczny koszt zawodności,
m	-	- liczba rzędów w złożonym łańcuchu izolatorów,
n	-	- liczba łańcuchów w 1 fazie linii,
n_k	-	- liczba zakłóceń zabrudzeniowych w stanie zawodnościowym k ,
N_p	-	- oczekiwana liczba przeskoków zabrudzeniowych,
p	cm	- podziałka kłoszowa izolatora,
$P_{1\%}$	%	- roczna zawodność zabrudzeniowa łańcucha izolatorów (wyrażona w procentach),
Q_{SPZ}	-	- prawdopodobieństwo nieudanego zadziałania SPZ,

T^*	doła, rok	- zredukowany rok obliczeniowy po transformacji czasu,
w	cm	- wyięg klosza izolatora,
$w_{\%}$	%	- miesięczna częstota zakłóceń zabrudzeniowych,
Z_i	-	- zabrudzeniowy zapas wytrzymałościowy łańcucha izolatorów,
$U_{50\%}$	kV	- 50-procentowe zabrudzeniowe napięcie przesoku,
α	-	- kąt nachylenia klosza izolatora,
β	-	- współczynnik poprawkowy uwzględniający koszt izolatorowego osprzętu ochronnego,
λ	1/h	- intensywność zakłóceń zabrudzeniowych,
τ	h, doła	- czas między kolejnymi zakłóceniami,

1. WPROWADZENIE

1.1. Wstęp

Wzrost zanieczyszczenia atmosfery - uboczny skutek dynamicznego rozwoju przemysłu - zwiększa zagrożenie izolacji napowietrznej, powodując trudności eksploatacyjne i znaczne straty gospodarcze na skutek przerw w zasilaniu odbiorców. Pomimo aktualności i dużego praktycznego znaczenia problemu, brak jest monograficznego opracowania, obejmującego techniczne i ekonomiczne aspekty zawodnego działania izolacji na terenach zabrudzonych. Przy wszystkich ograniczeniach i trudnościach związanych z dalszą rozbudową linii napowietrznych na terenach zurbanizowanych oraz o dużym zagęszczeniu zakładów przemysłowych, problematyka zabrudzeniowa jest ciągle aktualna. Linie kablowe wysokiego napięcia i nowe jakościowo techniki przesyłowe będą najprawdopodobniej opłacalne jedynie dla głównych magistrali lub też w przypadku przesyłu bardzo dużych mocy na niewielkie odległości, natomiast linie napowietrzne 110 i 220 kV będą w najbliższych dziesiątkach lat budowane i eksploatowane [49].

Wybór tematu wynika z rosnącego znaczenia gospodarczego ciągłości zasilania dużych odbiorców np. Huty Katowice, a także modernizowanych i rozbudowywanych zakładów przemysłowych na terenach zabrudzonych.

Izolacja liniowa, składająca się z łańcuchów izolatorów i izolacyjnych układów powietrznych, musi spełniać jednocześnie różne wymagania techniczne. W celu zapewnienia możliwie niezawodnego działania, sposoby jej wymiarowania i doboru zależą od wysokości napięcia sieci, zmieniając się z upływem czasu (przy tendencji do normalizacji słupów i zmniejszania szerokości trasy linii). Przy wyborze izolatorów i osprzętu należy dążyć do najszerszego stosowania układów typowych - w celu zmniejszenia liczby rozwiązań konstrukcyjnych i ułatwienia projektowania, montażu oraz wymiany uszkodzonych elementów. Układy izolacyjne muszą spełniać określone wymagania elektryczne, a łańcuchy izolatorów również wymagania dotyczące wytrzymałości mechanicznej. Wymagania elektryczne dotyczą:

- a) wytrzymałości przy napięciu roboczym i przepięciach (łańcuchy izolatorów i odstępy powietrzne),
- b) odporności izolatorów na działanie łuku zwarciovego,
- c) poprawnego działania osprzętu ochronnego (odstępy powietrzne dla łańcuchów wyposażonych w osprzęt).

Ogólne zasady wymiarowania i doboru określają krajowe normy [67 i 68]. Wymagania napięciowe zawarte w normie [69], związane są z napięciami probierczymi:

- przemiennym 50 Hz dla linii do 110 kV (dla linii 220 kV dopuszczone zamiast probierczych napięć łączeniowych; nie wymagane dla napięć wyższych),
- udarowym $1,2/50 \mu\text{s}$ dla obu biegunowości (tylko na sucho),
- udarowym łączeniowym $250/2500 \mu\text{s}$ dla obu biegunowości (dla napięć znamionowych powyżej 110 kV).

Wymagania związane z wytrzymałością powierzchniową izolatorów określone są obecnie w normie [70] nie przy pomocy napięć probierczych dla zadanych warunków próby, ale przez podanie minimalnych jednostkowych dróg upływu dla umownych stref zabrudzeniowych (sposób ujęcia nadal dyskutowany w kraju i za granicę). Nie omówiono pozostałych wymagań elektrycznych (istotnych głównie dla osprzętu ochronnego) oraz wymagań dotyczących mechanicznej wytrzymałości izolatorów - nie związanych z tematem pracy.

Poprawne wymiarowanie izolacji - spełniającej jednocześnie wszystkie wymagania techniczne - jest zagadnieniem szerokim, skomplikowanym i niecałkowicie dotąd rozwiązany (szczególnie w przypadku zagrożenia zabrudzeniowego i linii wysokich napięć). Z obszernej problematyki wybrano zagadnienia dotyczące łańcuchów izolatorów liniowych wysokiego napięcia w warunkach zwiększonej upływności powierzchniowej, a w szczególności:

- a) metod obliczania stopnia zagrożenia, oceny różnych rozwiązań i znaczenia parametrów konstrukcyjnych izolatorów w rzeczywistych warunkach zabrudzeniowych,
- b) oceny ekonomicznych skutków zawodnej pracy izolacji i możliwości wprowadzenia uzasadnionych wymagań niezawodnościowych,
- c) uzasadnienia zmian w sposobie doboru izolatorów ze względu na zagrożenie zabrudzeniowe przy uwzględnieniu techniczno-ekonomicznych aspektów zawodności.

Badania związane z wytrzymałością powierzchniową izolacji rozpoczęto w kraju w latach 50, mając na celu opanowanie ówczesnych trudności eksploatacyjnych. Prowadzone były głównie na Politechnice Śląskiej i Wrocławskiej przy współpracy z Instytutem Energetyki oraz energetyką zawodową i dotyczyły:

- oceny różnych układów izolacyjnych i zasad doboru izolacji,
- projektowania i konstruowania izolatorów specjalnych oraz wytycznych dla ich prawidłowej eksploatacji,
- mechanizmu przeskoku zabrudzeniowego i metodyki prób napięciowych.

Opracowano wytyczne doboru i szereg konstrukcji izolatorów (początkowo kołpakowych, później długopniowych), co znacznie poprawiło pewność ruchu linii.

Zagadnienia związane z fizykalną stroną mechanizmu przeskoku zabrudzeniowego, techniką probierczą i wytycznymi eksploatacyjnymi wykraczają poza zakres pracy, ale celowym jest przedstawienie dotychczasowych doświadczeń, związanych z oceną stopnia zagrożenia izolacji. Próbę taką - opartą

na zasadach probabilistycznych - podjął po raz pierwszy prof. F. Szymik i wykazał, że zabrudzeniowe napięcie przeskoku jest zmienną losową o rozkładzie normalnym. Zaproponował metodę obliczania prawdopodobieństwa przeskoku w zależności od nasilenia i czasu narastania zabrudzeń - sprawdzoną na podstawie wyników badań izolatorów kołpakowych z linii 110 kV - określając również wpływ sposobu uziemienia punktu zerowego sieci na zagrożenie izolacji [26, 58]. Pomimo zastosowania źródła probierczego o stosunkowo małej mocy i nie uwzględnienia zmienności zagrożenia w ciągu roku, posiada ona nadal znaczenie metodologiczne.

Próby wykorzystania tej metody dokonano m.in. w pracy [48], przyjmując za zmienną losową konduktywność powierzchniową powłoki i uwzględniając wyniki napięciowych prób laboratoryjnych. Probabilistyczny sposób ujęcia zagadnienia znaleźć można w pracach autorów radzieckich [2, 3]. Proponowana metoda uwzględnia tylko okres największego zagrożenia w ciągu roku, pozwalając jednak na dobór izolatorów również w oparciu o uzasadnienia ekonomiczne. Próby statystycznego ujęcia doboru i koordynacji izolacji z uwzględnieniem kosztów zawodnościowych podejmowane są od kilku lat również krajach Europy zachodniej, ale dotyczą one linii najwyższych napięć i nie obejmują terenów zabrudzeniowych [4, 9, 44, 47]. Wykorzystanie w tym celu wyników badań terenowych izolatorów w krajowych stacjach doświadczalnych możliwe jest od niedawna. Pierwsze ich zestawienie - bez próby oceny zawodności badanych układów - zawiera raport CIGRE [52].

Zainteresowania autora w zakresie problematyki zabrudzeniowej koncentrowały się na ocenie zagrożenia, pewności pracy i ekonomicznych aspektów doboru izolatorów. Prace te - pod kierunkiem prof. T. Stępniewskiego - prowadzone były od połowy lat 50 w Politechnice Śląskiej. Podsumowaniem pewnego ich etapu jest ze strony autora rozprawa [11], zawierająca techniczno-ekonomiczne uzasadnienia dla oceny i doboru izolatorów liniowych. Pomimo szeregu uproszczeń metodycznych i przybliżonej analizy kosztów, uzyskane wyniki są nadal przydatne w praktyce i znajdują zastosowanie na terenie GOP [38]. Dalszych prób oceny zawodności izolacji dokonał autor podczas stażu naukowego w 1974 roku w ośrodku badawczym w Clamart pod Paryżem [13 do 16].

1.2. Cel i zakres pracy

Rozprawa zawiera propozycje nowego sposobu ujęcia oceny zagrożenia i techniczno-ekonomicznych aspektów zawodności izolacji liniowej w warunkach eksploatacyjnych, stanowiąc tematyczną kontynuację wcześniejszych prac autora [11 do 18]. Proponowane metody obliczeniowe - sprawdzone na podstawie wyników badań terenowych w stacjach doświadczalnych i statystyk zakłóceńowych w liniach wysokiego napięcia - mogą być przydatne przy ustalaniu zasad doboru i konstruowania izolatorów.

Celem pracy jest opracowanie metod określania stopnia zagrożenia izolacji liniowej oraz wprowadzenie wymagań niezawodnościowych uzasadnionych

pod względem techniczno-ekonomicznym, zmierzających do ograniczenia trudności eksploatacyjnych i nieciągłości zasilania odbiorców.

Rozprawa zawiera takie oryginalne przyczynki jak:

- metoda obliczania zawodności przy uwzględnieniu zmienności zagrożenia zabrudzeniowego w czasie,
- ocena zawodności izolatorów w warunkach zbliżonych do eksploatacyjnych,
- weryfikacja znaczenia parametrów konstrukcyjnych izolatorów pod względem niezawodnościowym,
- ocena efektywności wykorzystania drogi upływu różnych typów izolatorów,
- analiza kosztów inwestycyjnych, eksploatacji i zawodności,
- wyznaczenie dopuszczalnej zawodności łańcucha izolatorów dla wieloletniego okresu eksploatacji,
- próba techniczno-ekonomicznego ujęcia doboru izolatorów ze względu na zagrożenie zabrudzeniowe.

Rozważania dotyczą izolacji linii 110 i 220 kV w warunkach zagrożenia zabrudzeniowego (nie uwzględnia się zjawisk starzeniowych). Rozpatruje się łańcuchy izolatorów, pomijając zagadnienia związane z wymiarowaniem i doborem izolacyjnych odstępów powietrznych oraz osprzętu ochronnego.

Zakres pracy nie obejmuje mechanicznych własności izolatorów. Dane dotyczą izolatorów kołpakowych i długopniowych z materiałów tradycyjnych (porcelana i szkło), wykazujących nierównomierny powierzchniowy rozkład napięcia w warunkach eksploatacyjnych.

1.3. Tezy pracy

1. Zawodność izolacji liniowej można wyznaczyć w oparciu o zasady statystycznego modelowania zmienności zagrożenia zabrudzeniowego w czasie i wyniki prób terenowych w stacjach doświadczalnych.
2. Ocena i dobór izolatorów dla terenów zabrudzeniowych wymaga uwzględnienia technicznych i ekonomicznych aspektów ich zawodności podczas eksploatacji. Decydującym czynnikiem ekonomicznym są w tym przypadku koszty strat na skutek wyłączeń linii.

2. WYTRZYMAŁOŚĆ I ZAWODNOŚĆ ZABRUDZENIOWA IZOLATORÓW

Wytrzymałość zabrudzeniową izolatorów ocenia się podczas badań laboratoryjnych na podstawie wartości napięcia, powodującego przeskok zabrudzeniowy w określonych warunkach próby z pewnym prawdopodobieństwem (równym najczęściej 50% lub umownie małej wartości, np. 1% w przypadku napięcia wytrzymywanego). Zawodność zabrudzeniową określa prawdopodobieństwo wystąpienia zakłócenia zabrudzeniowego na izolacji w danych warunkach i założonym czasie eksploatacji. Badania niezawodnościowe wykonywane są głównie w terenowych stacjach doświadczalnych. Możliwości oceny wytrzymałości i

zawodności są jednak obecnie w kraju ograniczone z braku odpowiednio wyposażonego laboratorium specjalistycznego i niewystarczającej liczby nowoczesnych stacji doświadczalnych, umożliwiających wykonywanie badań terenowych izolatorów w różnych warunkach środowiskowych. Losowy charakter przeskoków - wynikający z przypadkowości oddziaływań środowiskowych - nie pozwala na zdeterminowanie zakłóceń w czasie i wymaga stosowania metod statystycznych.

Badania laboratoryjne polegają na próbach izolatorów napięciem przemianym, pokrywanych powłokami sztucznymi. Metody wykonywania tych prób - zgodnie z zaleceniami IEC [63] - są w Polsce od niedawna znormalizowane [65]. Zalecane sposoby różnią się stopniem trudności przygotowania i wykonywania prób, wymagają stosowania różniących się urządzeń i dają różne efekty w postaci odtwarzalności warunków rzeczywistych i powtarzalności wyników (tab. 1). Z takiego porównania stosowanych metod wynika, że:

- metoda solnej mgły wymaga nietypowych i kosztownych urządzeń, zapewniając dobrą odtwarzalność warunków nadmorskich,
- metoda powłoki stałej wymaga stosunkowo drogich urządzeń i długiego czasu przygotowywania izolatorów do prób, ale odtwarzalność warunków przemysłowych uważana jest za dostateczną,
- metoda powłoki półpłynnej nie wymaga kosztownych urządzeń i może być stosowane prawie w każdym laboratorium, ale wątpliwa odtwarzalność i dość duże rozrzuty wyników sprawiają, że jest stosowana raczej do prób porównawczych.

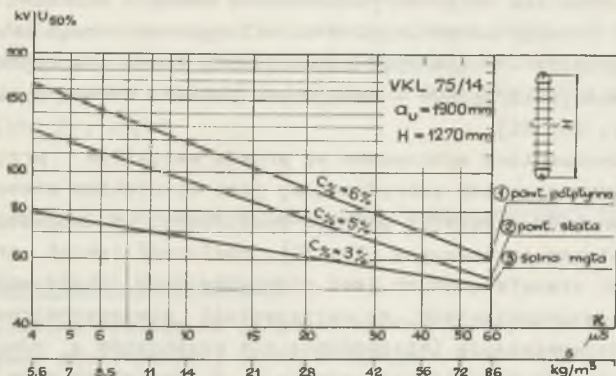
Napięciowe próby laboratoryjne nie pozwalają na określenie zawodności izolatorów w eksploatacji, lecz mogą być wykorzystywane przy porównywaniu różnych konstrukcji. Umożliwiają one wyznaczenie charakterystyk zabrudzeniowych, tj. zależności między napięciem przeskoku (lub wytrzymałym) a konduktywnością powierzchniową powłoki (lub stężeniem solanki) oraz oszacowanie rozrzutu tych napięć, co jest praktycznie niemożliwe podczas prób terenowych. Przy pomocy tych charakterystyk - dla zadanej wartości konduktywności - można określić również zapas wytrzymałościowy łańcucha z_1 , będący stosunkiem zabrudzeniowego napięcia przeskoku do roboczego napięcia fazowego. W ujęciu zaproponowanym przez autora w pracy [11], zapas wytrzymałościowy jest zmienną losową, określającą margines między napięciem przeskoku a najwyższym fazowym napięciem roboczym. Najwygodniejszą miarą liczbową tej zmiennej jest wartość średnia \bar{z}_1 dla 50-procentowego napięcia przeskoku (przy określonym odchyleniu standardowym). Przykładowe zestawienie charakterystyk zabrudzeniowych izolatora długopniowego VKL 75/14 - uzyskanych różnymi metodami - znajduje się na rys. 1 (50-procentowe napięcia przeskoku). Próby wykonywane były w laboratoriach zagranicznych (RFN, Francja, ČSSR) zgodnie z wymaganiami IEC [63]. Pomimo zbliżonego rozrzutu wartości napięć (względne odchylenia standardowe $c_{\%} = 3...6\%$), rozbieżności między charakterystykami są nie do pominięcia, toteż wyniki prób laboratoryjnych należy traktować obecnie jako znacznie przybliżone. Ko-

Tabela 1

Porównanie laboratoryjnych metod napięciowych prób zabrudzeniowych izolatorów [65]

Wyszczególnienie	M E T O D A		
	solnej mgły	powłoki stałej	powłoki półpłynnej
Urządzenie i aparatura	Specjalna komora antykorozyjna i układ do wytwarzania solnej mgły	Komora z urządzeniem do wytwarzania mgły z pary wodnej	Niewielka komora stabilizacyjna o regulowanej wilgotności
Przygotowanie izolatorów do badań	Prosta technologia przygotowywania obiektów	Trudności zapewnienia ciągłej powłoki o jednolitej grubości	Brak trudności wykonawczych, konieczność wielokrotnego nakładania powłok
Wykonywane próby napięciowe	Skomplikowany sposób postępowania podczas próby, konieczność kontroli stopnia zawilgocenia, długi czas próby		Proste procedury badań, krótki czas próby
Powtarzalność prób wielokrotnych	Małe rozrzuty wyników; różnice odniesione do 50-procentowego napięcia przeszkoku nie większe od $\pm 2,5\%$ [8, 24]		Rozrzuty większe; różnice między wynikami mogą przekraczać 10% [8]
Powtarzalność w różnych laboratoriach	Bardzo dobra powtarzalność, różnice nie większe od $\pm 5\%$ wartości średniej [8, 64]	Dobra powtarzalność; różnice nie większe od $\pm 10\%$ wartości średniej [63]	Znaczne rozrzuty; różnice od 10 do 30% wartości średniej [8, 54]
Odtwarzalność warunków rzeczywistych	Dobre odtwarzalność; szczególnie dla warunków nadmorskich [8]	Odtwarzalność wystarczająca dla terenów przemysłowych [24, 63]	Odtwarzalność wątpliwa; ryzyko przyjęcia zawyżonych wyników badań [8]

nieczne są dalsze badania w celu wytypowania metody, odtwarzającej najlepiej określone warunki rzeczywiste (prace w tym kierunku prowadzone są od kilku lat m.in. na Politechnice Wrocławskiej).



Rys. 1. Laboratoryjne charakterystyki zabrudzeniowe izolatora VKL 75/14 uzyskane metodami:

1) powłoki półpłynnej [30], 2) powłoki stałej [42], 3) solnej mgły [61]. Zależność między konduktywnością powłoki κ a stężeniem solanki s wg [28]

Badania terenowe izolacji w stacjach doświadczalnych nie są dotychczas znormalizowane i sprowadzają się do obserwacji zjawisk na powierzchniach izolacyjnych, rejestracji przeskoków, okresowych pomiarów rezystancji powierzchniowych, natężenia zabrudzeń i czynników meteorologicznych oraz niekiedy do rejestrowania prądów upływu. Stacje doświadczalne, znajdujące się w większości krajów Europy i w Japonii, są często zautomatyzowane i wyposażone w maszyny cyfrowe. Do zestawienia większych stacji - podanego w pracy [49] - można dodać nowoczesne obiekty w Brugherio [54] i Martigues-Ponteau [7]. Największa stacja krajowa znajduje się w Zabrze w pobliżu kopalni oraz zakładów przeróbki węgla, gdzie występują dodatkowo osady z elektrowni ciepłej (sieć 110 kV, transformator o mocy 600 kVA).

W stacjach doświadczalnych prowadzi się rejestrację czasów do przeskoku na łańcuchach izolatorów, która umożliwia obliczanie ich zawodności i pozwala na ocenę różnych rozwiązań w naturalnych warunkach zabrudzeniowych. Uzyskiwane wyniki mają niekiedy charakter porównawczy i ograniczają się do warunków lokalnych, ale są one najbardziej miarodajne, ponieważ próby wykonywane są:

- w rzeczywistych i zmiennych w czasie warunkach środowiskowych,
- w sieci rzeczywistej przy praktycznie stałej wartości napięcia roboczego.

Przydatność tych prób wynika też z bardzo ograniczonych możliwości wykonywania badań laboratoryjnych, małej liczby zakłóceń zabrudzeniowych w liniach i niejednorodności izolacji liniowej (na skutek często nieuzasadnio-

nego stosowania różnych typów izolatorów w strefach o podobnym zapyleniu).

Rejestracja prądów upływu na izolatorach w krajowych stacjach doświadczalnych nie pozwoliła dotąd na jednoznaczną ocenę stopnia zagrożenia i przydatności różnych konstrukcji w określonych warunkach zabrudzeniowych [48, 51]. Za granicę - dyaponując automatyczną aparaturą rejestrującą i laboratorium specjalistycznym - osiągnięto jednak dobre wyniki w tym zakresie [7, 39, 50, 62].

Badania zabrudzeniowe wykonywane są przede wszystkim przy napięciu przemiennym, gdyż przeskok zabrudzeniowy jest zjawiskiem stosunkowo powolnym, uzależnionym od wielkości energii wydzielonej w powłoce i mającym charakter termiczno-jonizacyjny [27, 49]. Możliwość takich przeskoków na skutek przepięć atmosferycznych jest niewielka (tab. 2), ale wpływ przepięć łączeniowych i wolnozmiennych na wytrzymałość powierzchniową izolatorów może być nie do pominięcia (szczególnie dla przebiegów o długich czasach trwania i nałożonych na napięcie robocze). W warunkach eksploatacyjnych jest on jednak ograniczony z powodu małego prawdopodobieństwa wystąpienia przepięcia dokładnie w momencie rozwoju wyładowań zabrudzeniowych [49]. Wyjątek mogą stanowić przepięcia łączeniowe na skutek kolejnych zdarzeń SPZ (cykl W-Z) w chwilach szczególnie dużego zagrożenia izolacji.

Tabela 2

Względna wytrzymałość izolatorów przy różnych rodzajach napięcia

Napięcie	Wytrzymałość względna %		Uwagi
	izolacja czysta i sucha	izolacja zabrudzona i zawilgocona	
Przemienne 50 Hz	100	10...20	Poziom odniesienia - wytrzymałość przy napięciu 50 Hz na sucho
Udarowe 1,2/50 μ s	150...160	130...140 140...150	łańcuchy dłuższe od 2 m [55] łańcuchy dłuższe od 3 m [22]
łączeniowe (szybkozmienne)	110...120	65... 75 50 45... 50 35... 65 30... 40 50	Udar 150...250/2500...3000 [22,55] " 300/3000 [41] " 350/3500 [54] " 350/3500 [43] " 200/16000 [29] " 85/1000 nałoż. na nap.50 Hz[46]
Wolnozmienne	100...110	15... 30 15... 35	Przebiegi oscylacyjne o częstości [54] tliwości zastępczej ok 50 Hz [40]

Dyskutowanym od dawna zagadnieniem jest nieliniowość zależności zabrudzeniowego napięcia przeskoku od długości łańcuchów. W wyniku prac w ra-

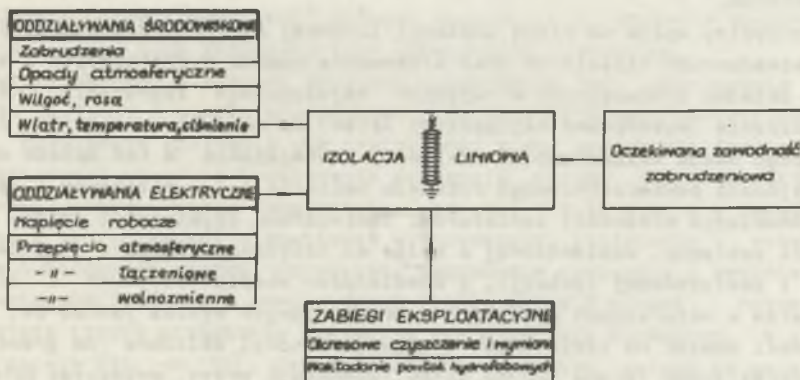
mach CIGRE panuje obecnie pogląd, że wytrzymałość zabrudzeniowa zarówno przy 50 Hz, jak i w przybliżeniu przy przepięciach łączeniowych rośnie praktycznie liniowo ze wzrostem drogi upływu łańcucha, jego długości lub liczby izolatorów dla wartości napięć do 400-500 kV [22, 28, 31]. Dla układów bardzo długich (powyżej 7 m) badania trwają nadal, ale należy oczekiwać w tym przypadku potwierdzenia nieliniowego wzrostu napięć przeskoku, który może znacznie utrudnić dobór izolatorów dla linii bardzo wysokich napięć [22, 29, 39].

3. MATEMATYCZNE MODELOWANIE ZAWODNOŚCI ZABRUDZENIOWEJ IZOLACJI

3.1. Wpływ oddziaływań zewnętrznych

Izolacja liniowa podlega na terenach zabrudzeniowych wpływom dużej liczby oddziaływań zewnętrznych, które decydują o stopniu jej zagrożenia i zawodności podczas eksploatacji (rys. 2). Są one różnorodne, mają w większości charakter losowy i mogą być podzielone na:

- elektryczne - związane z trwale przyłożonym napięciem roboczym oraz krótkotrwałymi przepięciami atmosferycznymi, łączeniowymi i wolnozmiennymi,
- środowiskowe - spowodowane zanieczyszczeniem atmosfery, opadami i wilgocią zawartą w powietrzu (przy współdziałaniu temperatury, wiatru i ciśnienia),
- eksploatacyjne - stanowiące czynności profilaktyczne w celu odnowienia własności powierzchniowych izolatorów i zmniejszenia liczby zakłóceń (okresowe czyszczenie, wymiana uszkodzonych elementów, nakładanie powłok hydrofobowych, stosowanie specjalnych układów izolacyjnych).



Rys. 2. Wpływ oddziaływań zewnętrznych na zawodność zabrudzeniową izolacji liniowej

Naprężenia elektryczne spowodowane napięciem roboczym i krótkotrwałymi przepięciami są bezpośrednią przyczyną przeskoków. Wpływ przepięć łączeniowych oraz wolnozmiennych na wytrzymałość powierzchniową nie jest całkowicie pomijalny i wymaga dalszych badań. Z dotychczasowych wyników prób [25, 28] i porównawczego zestawienia z tab. 2 wynika jednak, że przemienne napięcie robocze jest najważniejszym oddziaływaniem elektrycznym, decydującym o zawodności zabrudzeniowej izolacji liniowej 110 i 220 kV (możliwość znacznego obniżenia wytrzymałości przy napięciu przyłożonym trwale). Przepięcia łączeniowe i wolnozmienne - a szczególnie atmosferyczne - nie mają w tym przypadku istotnego wpływu (ewentualne przeskoki powinny być skutecznie likwidowane przez układy SPZ o czasach przerw beznapięciowych 0,4...2 s).

Z grupy oddziaływań środowiskowych najważniejszymi są wszelkiego rodzaju zanieczyszczenia atmosfery w postaci pyłów i gazów (głównie pochodzenia przemysłowego), tworzące elektrolityczne powłoki zabrudzeniowe na izolatorach. W połączeniu z parą wodną lub opadami obniżają one wytrzymałość powierzchniową i mogą spowodować przeskok już przy napięciu roboczym. Dane o właściwościach i szkodliwości różnych osadów dla izolacji napowietrznej można znaleźć w pracach [48 i 51]. Stopień zagrożenia zabrudzeniowego zależy od rodzaju, natężenia, przyczepności i rozkładu zanieczyszczeń na powierzchni izolatorów oraz od przypadkowości występowania różnych czynników meteorologicznych, a szczególnie opadów atmosferycznych i zawilgoceń. Największe zagrożenie powodują mżawki, mgły i mokry śnieg oraz lokalnie - pył słonej wody z chłodni kominowych. Niebezpieczne są również nagłe zmiany temperatury przy dużej wilgotności powietrza, powodujące zawilgocenia adsorpcyjne izolatorów i sprzyjające lokalnej koncentracji zanieczyszczeń [49, 51].

Opady deszczu o dużym natężeniu oraz wiatr są zjawiskami korzystnymi, zmniejszającymi zanieczyszczenie atmosfery i powodującymi samooczyszczanie się izolatorów.

Korzystny wpływ na pracę izolacji liniowej wywiera czyszczenie i wymiana uszkodzonych izolatorów oraz stosowanie powłok hydrofobowych i specjalnych układów izolacyjnych w rejonach największego zagrożenia. Okresowe czyszczenie (wykonywane najczęściej latem) ma na celu usunięcie powłoki trwałego osadu związanego ze szklivem, zmniejszenie w ten sposób niejednorodności powierzchniowego rozkładu napięcia i - w założeniu - całkowite odnowienie własności izolatorów. Skuteczność czyszczenia zależy od częstotliwości zabiegów, uzależnionej z kolei od natężenia, rodzaju zanieczyszczeń i zastosowanej izolacji. Z doświadczeń eksploatacyjnych i licznych pomiarów w naturalnych warunkach zabrudzeniowych wynika jednak że, konduktywności powłok na izolatorach osiągają wartości zbliżone do granicznych dla określonego terenu już po kilku tygodniach pracy, wykazując potem zmienność przypadkową - wynikającą z losowych zmian oddziaływań środowiskowych [34, 36]. Oznacza to, że czyszczenie nie ma charakteru losowego procesu

odnowy dla długiego czasu eksploatacji [5, 32]. Wymiana uszkodzonych izolatorów (przy okazji czyszczenia lub po wyłączeniach awaryjnych) nie ma istotnego wpływu na niezawodność izolacji liniowej, składającej się zawsze z dużej liczby elementów. Odnosi się to również do efektów wynikających z hydrofobizacji izolatorów przy pomocy past lub wazelin, ponieważ są to zabiegi wykonywane obecnie wyjątkowo - w przypadkach szczególnie silnego zagrożenia lokalnego (np. w strefie opadu z chłodni kominowych).

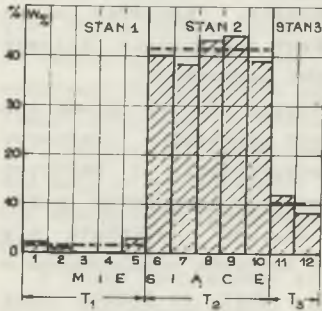
Do zabiegów eksploatacyjnych można umownie zaliczyć również celowe stosowanie układów specjalnych w strefach największych zabrudzeń (łańcuchy ŁPV i ŁPY). Ze względu na lepsze warunki do samooczyszczania i bardziej równomierny rozkład napięcia, izolatory zawieszane są w korzystnym położeniu ukośnym. Odchylając łańcuch od pionu o kąt $20...90^{\circ}$ uzyskuje się wzrost wytrzymałości o ok. $15...20\%$ w stosunku do łańcucha przelotowego w tych samych warunkach środowiskowych [10, 11, 59]. Jest to jednak rozwiązanie doraźne, ponieważ układy specjalne są drogie, ciężkie i niewygodne w eksploatacji.

3.2. Matematyczne podstawy modelowania i obliczania zawodności

Charakter oddziaływań zewnętrznych - zmieniających się w sposób przypadkowy sprawia, że ocena zawodności zabrudzeniowej izolacji liniowej jest zagadnieniem złożonym. Zdaniem autora, dobre wyniki uzyskuje się w tym przypadku przy pomocy statystycznego modelowania zmienności zagrożenia w czasie oraz zastosowania teorii strumieni zdarzeń losowych [19, 20, 23]. Strumień zakłóceń rozumiany jest dalej jako losowy proces występowania kolejnych przeskoków zabrudzeniowych na łańcuchach izolatorów, posiadający - w ujęciu teoretycznym - realizacje o przyrostach dodatnich i całkowitych w ciągłym czasie eksploatacji. Zakłócenia te mogą być powodem wyłączeń linii lub mieć charakter przemijający (przy skutecznym działaniu SPZ). Ze względu na bardzo małą częstość zakłóceń i ich nierównomierność występowania (niestacjonarność) podczas eksploatacji, dokładne odwzorowanie matematyczne tych strumieni jest praktycznie niemożliwe.

Niestacjonarność strumieni zakłóceń spowodowana jest zmiennością zagrożenia izolacji w wyniku przypadkowych zmian oddziaływań zewnętrznych w czasie. Największe znaczenie dla praktycznej oceny zawodności izolacji posiada zmienność sezonowa (zakłócenia występują bardzo nierównomiernie w ciągu roku). Opady, mgły, temperatura, kierunki i siła wiatru - decydujące razem z zabrudzeniami o chwilowej wytrzymałości izolatorów - wykazują wyraźną cykliczność roczną. Największe zagrożenie występuje w sezonie jesienno-zimowym (głównie z powodu dużej liczby mgieł i mżawek), natomiast najmniejszą liczbę przeskoków stwierdza się w okresie wiosennym, a szczególnie letnim [33, 48, 51]. Doświadczenia te skłoniły autora do określenia modeli obliczeniowych, odwzorowujących sezonową zmienność zagrożenia zabrudzeniowego w ciągu roku. Uzyskano je w oparciu o statystyczną anali-

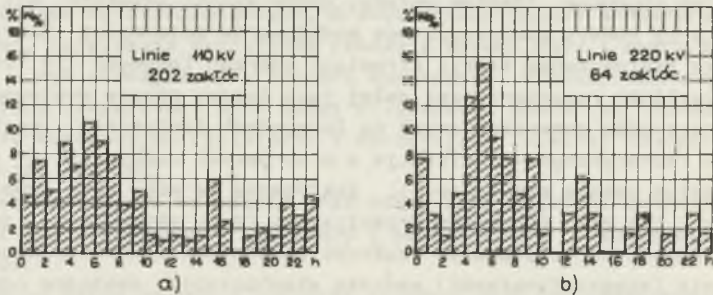
zę częstości zakłóceń, zarejestrowanych w 10 letnim okresie eksploatacji [17, 18]. Przykład takiego modelu, wykonanego na podstawie analizy częstości zakłóceń $w\%$ w poszczególnych miesiącach, pokazano na rys. 3. Jest on



Rys. 3. Przykład 3 stanowego modelu sezonowej zmienności zagrożenia zabrudzeniowego

3 stany i uwzględnia sezonową zmienność zagrożenia w sposób skokowy, ponieważ miesięczne częstości zakłóceń w okresach T_1 , T_2 i T_3 są praktycznie stałe (rzeczywiste postacie modeli w rozdziale 3.3).

Strumienie zakłóceń wykazują również zmienność dobową na skutek lokalnych mgieł, rosy i niższych temperatur - ułatwiających w określonych godzinach eskraplanie się pary wodnej na izolatorach. Przeskoki notuje się najczęściej w nocy i rano [48, 51]. Potwierdzają to również wyniki analizy godzinnych częstości zakłóceń zabrudzeniowych dla linii 110 i 220 kV z terenu ZEOPd w okresie 1965-1974, wykonanej przez autora (rys. 4). W praktycznych obliczeniach niezawodnościowych zmienność dobową może być jednak nie uwzględniana, a poza tym uzyskanie dokładności do jednego dnia kalendarzowego nie wydaje się obecnie możliwe.



Rys. 4. Dobowe częstości zakłóceń zabrudzeniowych na terenie ZEOPd w liniach:

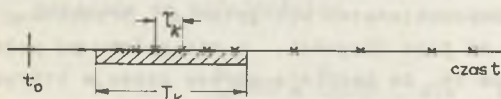
a) 110 kV, b) 220 kV

Po odwzorowaniu zmienności sezonowej za pomocą proponowanych modeli obliczeniowych i pominięciu zmienności dobowej zagrożenia zabrudzeniowego, należy oczekiwać, że niestacjonarny strumień zakłóceń wykazuje:

- 1) charakter pojedynczy, czyli praktyczną niemożliwość wystąpienia dwóch lub więcej przeskoków w krótkim okresie czasu (bardzo mała liczba zakłóceń w czasie eksploatacji),
- 2) brak następstw, tj. niezależność prawdopodobieństwa przeskoku w określonym przedziale czasu od zakłóceń wcześniejszych (możliwość pominięcia starzenia izolatorów ceramicznych i szklanych oraz kilkutygodnio-

wych okresów bezpośrednio po czyszczeniu izolacji dla długiego czasu eksploatacji).

Zakładanie braku następstw dla strumieni zakłóceń może wydawać się nieuzasadnione i w konkretnych przypadkach praktycznych wymaga sprawdzenia. Pierwsze pozytywne wyniki statystycznej weryfikacji tego założenia w odniesieniu do pojedynczych łańcuchów izolatorów w stacjach doświadczalnych oraz linii 110 i 220 kV na terenie ZEOPd, podano w rozdziale 3.3. Dalsze rozważania prowadzone są również najpierw dla 1 łańcucha a następnie rozszerzone na izolację liniową w postaci zbioru łańcuchów, decydujących o jej zawodności i zachowaniu się w eksploatacji.



Rys. 5. Przykład strumienia zakłóceń dla łańcucha izolatorów (zakłócenia oznaczone krzyżykami na osi czasu)

Zakłócenia spowodowane kolejnymi przeskokami na łańcuchu izolatorów tworzą niestacjonarny strumień zdarzeń losowych, pokazany przykładowo na rys. 5. Jest on określony jednoznacznie przy pomocy rozkładu:

- liczby przeskoków w przedziałach czasowych T_k dowolnej długości i dowolnie położonych względem chwili zerowej t_0 ,
- albo długości przedziałów T_k między kolejnymi przeskokami [19, 20].

Własności takiego strumienia można określić na podstawie wyników prób w stacjach doświadczalnych, gdzie bada się łańcuchy pojedyncze i nie wykonuje się czyszczenia po kolejnych przeskokach. Rejestrowany strumień (pojedynczy i praktycznie bez następstw) zbliżony jest do niestacjonarnego strumienia prostego (Poissona), czyli oczekiwana liczba przeskoków zależy od długości rozpatrywanego przedziału czasu oraz od jego położenia względem chwili zawieszenia łańcucha [19, 20].

Podstawowym parametrem strumienia jest intensywność zakłóceń $\lambda_1(t)$, tj. prawdopodobieństwo przeskoku w krótkim okresie czasu, pod warunkiem, że do rozpatrywanej chwili przeskoku na łańcuchu nie nastąpił (równa w przybliżeniu oczekiwanej liczbie przeskoków). W celu określenia intensywności przyjęto, że zagrożenie zabrudzeniowe łańcucha można opisać w przybliżeniu za pomocą jego zapasu wytrzymałościowego $z_1(t)$ - stosunku zabrudzeniowego napięcia przeskoku do napięcia roboczego - będącego syntetyczną miarą powierzchniowych własności izolatorów, podlegających wpływom oddziaływań zewnętrznych w czasie eksploatacji [11, 17]. Rolę tę mogą również spełniać inne zmienne losowe, np. odpowiednio rejestrowany prąd upływu [13, 14]. Proponowane ujęcie pozwala na wyrażenie intensywności $\lambda_1(t)$ jako funkcji losowej, uzależnionej od wartości chwilowych, tj. realizacji zmiennej $z_1(t)$.

Ze względu na nieznaną postać tej funkcji, zawodność łańcucha "i" wynika z następującej ogólnej zależności:

$$P_i(t_p) = 1 - \exp \left\{ - \int_{t_0}^{t_0+t_p} \lambda_i [z_i(t)] dt \right\}, \quad (1)$$

gdzie:

- t_0 - chwila zawieszenia (rozpoczęcia badania) łańcucha,
- t_p - okres pracy (badania) łańcucha,
- $z_i(t)$ - zapas wytrzymałościowy łańcucha (zmienna losowa),
- $\lambda_i [z_i(t)]$ - losowa intensywność zakłóceń.

Obliczenie zawadności (1) możliwe jest praktycznie przy założeniu, że proces zmian własności powierzchniowych łańcucha jest w określonych przedziałach czasu stacjonarny (prawdopodobieństwo wystąpienia przeskoku w danym okresie czasu zależy tylko od jego długości, a nie zależy od położenia względem chwili t_0). Oznacza to, że istnieją okresy czasu, w których wartości oczekiwane realizacji zapasu $z_i(t)$ i związanej z nim intensywności zakłóceń $\lambda_i(t)$ są w przybliżeniu stałe. Założenie to uzasadnione jest sezonowym i cyklicznym charakterem zmienności oddziaływań środowiskowych w ciągu roku oraz wynika z obserwowanego zjawiska, że konduktywności powierzchniowe i zapasy wytrzymałościowe izolatorów nie przekraczają statystycznie wartości granicznych w danych warunkach zabrudzeniowych [34, 36, 38]. Rok eksploatacji można podzielić więc na k przedziałów czasowych o stałych w przybliżeniu wartościach zapasów wytrzymałościowych i intensywności zakłóceń, zmieniającej się z założenia w sposób skokowy (przykład takiego modelu na rys. 3, wyniki weryfikacji statystycznej w rozdziale 3.3). W przedziałach tych występują określone stany zawadnościowe, odpowiadające sezonowym zawadnościom łańcucha. W każdym stanie zawadnościowym o czasie trwania T_k (rys. 5) otrzymuje się w przybliżeniu strumień prosty, opisany jednoznacznie przez intensywność zakłóceń λ_{ik} , zwaną dalej sezonową. Zawadność sezonowa łańcucha "i" jest prawdopodobieństwem spowodowania przez niego zakłócenia w stanie zawadnościowym k (prawdopodobieństwem, że przedział czasu między kolejnymi zakłóceniami τ_k jest krótszy od czasu T_k) i wynika z zależności:

$$P_{ik} = P_i(T_k) = F_i(T_k) = 1 - \exp(-\lambda_{ik}T_k), \quad (2)$$

gdzie:

- T_k - czas trwania stanu k w ciągu roku,
- λ_{ik} - sezonowa intensywność zakłóceń dla łańcucha izolatorów,
- $\lambda_{ik}T_k$ - oczekiwana liczba zakłóceń w stanie k ,
- $F_i(T_k)$ - sezonowa dystrybuanta czasu między kolejnymi zakłóceniami.

Roczna zawadność łańcucha związana jest ze zmieniającymi się z założenia skokowo zawadnościami (2) i wynosi:

$$P_i = P_i(T) = 1 - \prod_k (1 - P_{ik}) = 1 - \exp \left(- \sum_k \lambda_{ik} T_k \right), \quad (3)$$

przy czym

$$T = \sum_k T_k - \text{okres rocznej eksploatacji.}$$

Kilku stanowy model zmienności zagrożenia zabrudzeniowego w ciągu roku można zastąpić modelem jedno stanowym po dokonaniu takiej transformacji czasu trwania każdego z okresów T_k , która pozwala na uniezależnienie się od zmienności sezonowej i rozpatrywanie prostego strumienia zakłóceń w zredukowanym roku obliczeniowym. Zredukowane czasy T'_k oblicza się przy założeniu, że oczekiwane liczby zakłóceń przed i po transformacji nie ulegną zmianie. W przypadku strumienia prostego o parametrze stałym w danych przedziałach czasu, sezonową intensywności λ_{1k} i liczebności zakłóceń n_{1k} związane są zależnością:

$$\frac{\lambda_{1\max}}{\lambda_{1k}} = \frac{n_{1\max}}{n_{1k}} \quad \text{dla } k = 1, 2, 3, \dots, \quad (4)$$

gdzie:

- $\lambda_{1\max}$ - największa sezonowa intensywność zakłóceń dla łańcucha w ciągu roku,
- $n_{1\max}$ - liczba zakłóceń w okresie największego zagrożenia zabrudzeniowego.

Dla modelu np. 3 stanowego (rys. 3), w którym $\lambda_{12} = \lambda'_{12} = \text{const}$, okres największego zagrożenia w ciągu roku nie ulega zmianie ($T_2 = T'_2$), a zredukowane czasy trwania pozostałych są następujące:

$$T'_k = \frac{\lambda_{1k}}{\lambda_{12}} T_k = \frac{n_{1k}}{n_{12}} \quad \text{dla } k = 1, 3, \quad (5)$$

przy czym

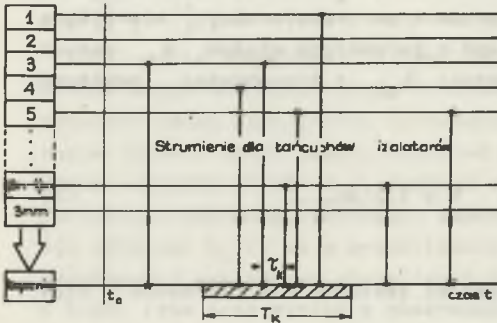
$$T' = \sum_k T'_k - \text{zredukowany rok obliczeniowy po transformacji czasu.}$$

Po dokonaniu transformacji czasu otrzymuje się prosty model dla największej sezonowej intensywności zakłóceń w zredukowanym roku obliczeniowym - będącym sumą zredukowanych czasów trwania wszystkich stanów zawodnościowych. Strumień zakłóceń staje się w tym przypadku strumieniem prostym i zależność (3) upraszcza się następująco:

$$P_1 = P_1(T') = 1 - \exp(-\lambda_{1\max} T'). \quad (6)$$

Izolacja liniowa składa się w rozpatrywanym przypadku z łańcuchów izolatorów (pominięto izolacyjne odstępy powietrzne) i tworzy w ujęciu niezawodnościowym układ szeregowy, ponieważ przeekok na jednym łańcuchu może spowodować wyłączenie linii. Obliczenie jej zawodności utrudnia - oprócz przypadkowości oddziaływań zewnętrznych - niejednorodność izolacji (różne typy, liczba i kąt położenia izolatorów) oraz wpływ okresowego oczyszczenia izolatorów.

Ogólny model strumienia zakłóceń dla izolacji linii wynika z superpozycji strumieni poszczególnych łańcuchów [19]. Zakłócenia spowodowane przez przeskokki na łańcuchach - rejestrowane na wspólnej osi czasu - tworzą łączny strumień zakłóceń. Przykład realizacji takiego strumienia dla wybranego odcinka 3 fazowej linii 1 torowej, zawierającego 3n łańcuchów m rzędowych (3nm elementów obliczeniowych), znajduje się na rys. 6.



Rys. 6. Przykład strumienia zakłóceń dla izolacji liniowej złożonej z 3nm łańcuchów obliczeniowych (oznaczenia jak na rys. 5)

Podstawowym elementem - zwanym dalej obliczeniowym - jest łańcuch równoważny jednorzędowemu łańcuchowi przelotowemu. Łańcuchy złożone traktowane są jako układy wielokrotne, składające się z określonej liczby łańcuchów obliczeniowych. Jest ona równa liczbie rzędów izolatorów (np. łańcuchy tP-2, tO-1 i tPV-1 składają się z 2 rzędów). Specjalnym układem gwiazdowym tPY-1 odpowiadają w przybliżeniu 2 łańcuchy obliczeniowe, ale ukośnie położone elementy tego układu wykazują większą odporność zabrudzeniową (rozdział 3.1).

Ocena wpływu czyszczenia na zawodność izolacji liniowej jest trudna do ujęcia analitycznego. Ze względu jednak na szybkie narastanie konduktywności powierzchniowej na wyczyszczonych uprzednio izolatorach (rozdział 3.1), przyjęto w uproszczeniu, że okresowe czyszczenie nie zmienia praktycznie stacjonarnego charakteru strumieni zakłóceń w kolejnych stanach zawodnościowych w ciągu roku. Pozytywne wyniki weryfikacji statystycznej dopuszczalności takiego uproszczenia dla linii 110 kV i 220 kV na terenie ZEOPd znajdują się w rozdziale 3.3. Modelowanie sezonowej zmienności zagrożenia i obliczanie zawodności izolacji liniowej umożliwia więc proponowany sposób postępowania, przy założeniu:

- znikomo małej liczby zakłóceń w ciągu roku w porównaniu z liczbą łańcuchów obliczeniowych w linii,
- przybliżonej jednorodności izolacji na rozpatrywanych odcinkach linii.

Oczekiwana liczba zakłóceń na izolacji odcinka linii w stanie zawodnościowym k związana jest z dystrybuantą czasu między kolejnymi zakłóceniami (2) na 1 łańcuchu obliczeniowym w sposób następujący:

$$E[N(T_k)] \approx \sum_{i=1}^{3nm} F_i(T_k) = \sum_{i=1}^{3nm} P_{ik}, \quad (7)$$

gdzie:

i=1,2,...,3nm - liczba łańcuchów obliczeniowych w 3 fazach linii; n - liczba łańcuchów złożonych, m - liczba rzędów izolatorów w łańcuchu.

Błąd tego oszacowania nie przekracza wg pracy [19] największej wartości wyrażenia $F_1(T_k) [1 - F_1(T_k)]^{-1}$.

Łączny strumień zakłóceń dla izolacji liniowej w stanie zawodnościowym k jest więc w przybliżeniu strumieniem prostym, co pozwala na określenie sezonowej wartości oczekiwanej:

- czasu między kolejnymi zakłóceniami

$$E(\tau_k) = \frac{1}{\sum_{i=1}^{3nm} \lambda_{ik}}, \quad (8)$$

- liczby zakłóceń

$$E[N(T_k)] = \sum_{i=1}^{3nm} [1 - \exp(-\lambda_{ik} T_k)] \cong 3nm \lambda_{ik} T_k, \quad (9)$$

gdy oczekiwana liczba zakłóceń w stanie zawodnościowym k nie przekracza dla 1 łańcucha obliczeniowego 0,01 (założenie praktycznie zawsze spełnione w eksploatacji).

Po uwzględnieniu wzorów od (2) do (9), sezonowa zawodność izolacji odcinka linii, tj. prawdopodobieństwo, że czas między zakłóceniami jest mniejszy od T_k , wynosi:

$$P_k = P(T_k) = 1 - \prod_{i=1}^{3nm} (1 - P_{ik}) \cong 1 - \exp(-\sum_{i=1}^{3nm} \lambda_{ik} T_k) \cong 1 - \exp(-\lambda_k T_k), \quad (10)$$

gdzie:

$$\lambda_k = \sum_{i=1}^{3nm} \lambda_{ik} \cong 3nm \lambda_{ik} - \text{sezonowa intensywność zakłóceń dla izolacji odcinka linii.}$$

Zawodność roczna izolacji odcinka linii, składającej się z 3nm jednorodnych łańcuchów obliczeniowych, wynika więc z zależności:

$$P = P(T) = 1 - \prod_k (1 - P_k) = 1 - \exp \sum_{i=1}^{3nm} \sum_k (-\lambda_{ik} T_k) \cong 1 - \exp \sum_k (-3nm \lambda_{ik} T_k). \quad (11)$$

Po wykonaniu transformacji czasu wg wzorów (4) i (5), otrzymuje się dla zredukowanego roku obliczeniowego zależność następującą:

$$P = P(T) = 1 - \exp \sum_{i=1}^{3nm} (-\lambda_{i \max} T) \cong 1 - \exp (-\lambda_{\max} T), \quad (12)$$

gdzie:

$$\lambda_{\max} \cong \sum_{i=1}^{3nm} \lambda_{i\max} - \text{najwi} \text{ksza sezonowa intensywno} \text{ść zakłóce} \text{ń dla izolacji odcinka linii w ci} \text{ągu roku.}$$

W przypadku niejednorodnej izolacji linii, zawadność roczną można obliczyć przy pomocy skokowo zmieniających się prawdopodobieństw (11) lub (12) dla poszczególnych jej odcinków. Zasada łączenia tych prawdopodobieństw jest taka sama jak dla zawadności sezonowych w ciągu roku.

3.3. Statystyczna weryfikacja modeli matematycznych

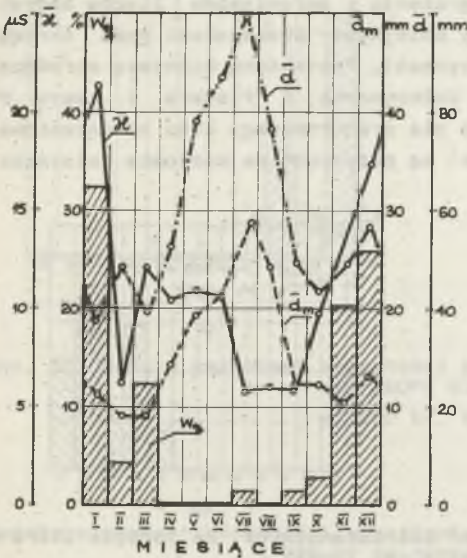
Proponowana metoda modelowania i obliczania zawadności została sprawdzona przez autora po raz pierwszy w oparciu o wyniki wieloletnich pomiarów maksymalnych wartości prądów upływu, wykonanych we francuskich stacjach doświadczalnych 120 kV (Martigues-Ponteau i Saint-Avoid). Uzyskane wyniki były zachęcające i potwierdziły przydatność proponowanej metodyki obliczeń [13 do 16]. Możliwości weryfikacji w warunkach krajowych są znacznie skromniejsze, ponieważ można opierać się jedynie na wynikach prób z nielicznych stacji doświadczalnych oraz własnej statystyce zakłóceń w liniach.

Poniżej przedstawiono wyniki weryfikacji modeli matematycznych dla łańcucha pojedynczego i izolacji liniowej - zaproponowanych w rozdziale 3.2. Materiał statystyczny pochodzi ze stacji doświadczalnych 110 kV oraz linii 110 i 220 kV na terenie ZEOPd. Szczegółowe wyniki testowania kolejnych hipotez znajdują się w pracy [18].

Dane ze stacji doświadczalnych 110 kV Zabrze i Bolesław, znajdujących się na terenach o dużym zanieczyszczeniu atmosfery, wykorzystano łącznie dla okresu analizy 1965-1974. Pomimo różnego położenia i składu zanieczyszczeń atmosferycznych, zagrożenie zabrudzeniowe na terenie obu stacji jest bardzo podobne i odpowiada warunkom na pograniczu obecnych stref III i IV. Świadczą o tym pomiary konduktywności powierzchniowej powłok i czasów do przeskoku dla tych samych typów izolatorów - wykonane przez Biuro Badań i Studiów ZE Gliwice [35, 36, 37].

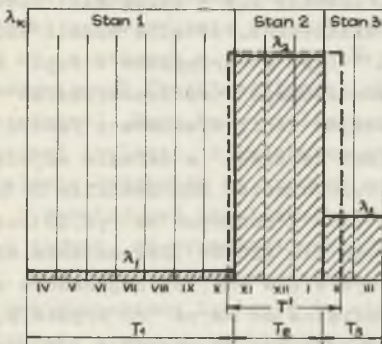
W rozpatrywanym okresie czasu zarejestrowane zostały w obu stacjach 74 przeskoki zabrudzeniowe na łańcuchach izolatorów liniowych (długopniowych o kłozach daszkowych, schodkowych i śrubowych oraz kołpakowych). Do sprawdzenia modelu sezonowej zmienności zagrożenia w ciągu roku wykorzystano częstość przeskoku oraz wyniki pomiarów konduktywności i poziomu opadów (średnie wartości miesięczne). Nie stwierdzono istotnego trendu rozpatrywanych wielkości w okresie analizy, ale ich zmienność sezonowa w ciągu roku jest nie do pominięcia (rys. 7). Postawiono hipotezę o trójstanowym modelu obliczeniowym, obejmującym:

- a) stan 1 ($T_1 = 214$ dni; kwiecień-październik) o najmniejszej liczbie przeskoku (duża liczba opadów o znacznym natężeniu, najmniejsze wartości konduktywności wskutek samooczyszczania się izolatorów),



Rys. 7. Zmienność zagrożenia zabrudzeniowego w stacjach doświadczalnych 110 kV Zabrze i Bolesław (1965-1974)

Oznaczenia: W_0 - miesięczna częstość przeskoków (74 przeskoki), χ - średnia miesięczna przewodność powierzchniowa 476 wyników), d_m - maksymalny poziom opadu dobowego (123 wyniki), d - średni poziom opadu miesięcznego (123 wyniki)



Rys. 8. Model sezonowej zmienności zagrożenia zabrudzeniowego dla stacji doświadczalnych 110 kV (rys. 7)

- b) stan 2 ($T_2 = 92$ dni; listopad-styczeń) o największym zagrożeniu zabrudzeniowym (duża ilość mgieł i mżawek, niewielkie natężenie opadów, znaczne wartości konduktywności),
- c) stan 3 ($T_3 = 59$ dni; luty-marzec), będący stanem pośrednim.

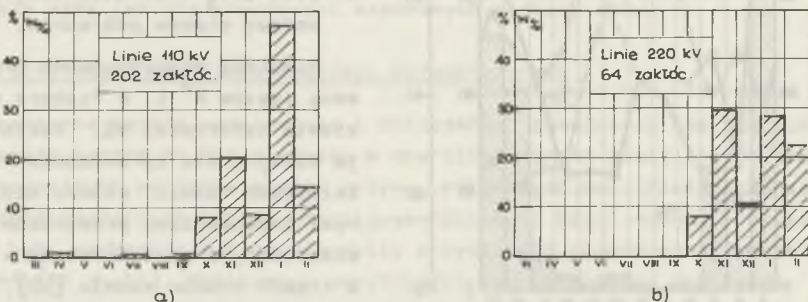
Hipotezę zweryfikowano przy pomocy testów χ^2 i F Fishera na poziomie istotności 5%. Zastosowano je kolejno dla sprawdzenia braku istotnych różnic między miesięcznymi częstościami przeskoków oraz miesięcznymi zawodnościami w każdym z trzech stanów modelu [19]. Wyniki testowania są pozytywne [18]. Model ten, znajdujący się na rys. 8, może być wykorzystany w postaci trójstanowej (pola zakreskowane) lub jednostanowej dla zredukowanego roku obliczeniowego T' - stanowiącego ok. 30% czasu trwania roku kalendarzowego, przy założeniu największego zagrożenia zabrudzeniowego (linie przerywane).

W celu sprawdzenia hipotezy o wykładniczym rozkładzie czasu między kolejnymi przeskokami w poszczególnych stanach zawodnościowych modelu, zestawiono dane dla zbliżonych do siebie konstrukcji izolatorów długopniowych. Przybliżony sposób postępowania wynika z małej liczby danych dla tych samych rozwiązań, ale wydaje się w tym przypadku dopuszczalny, ponieważ:

- izolatory badane w stacjach terenowych dobierane są tak, aby maksymalnie skrócić okres prób,
- roczne zawodności tych izolatorów są duże i znaczne różnice między

wartościami czasów do przeskoku występują jedynie w przypadku wyraźnego zróżnicowania ich parametrów konstrukcyjnych (droga upływu, długość itp.).

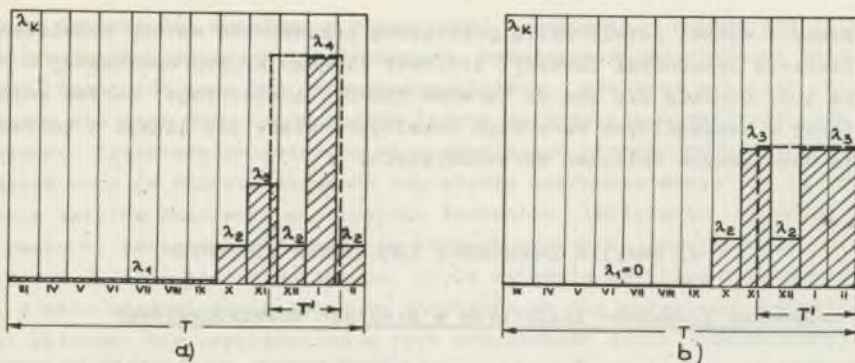
Ze względu na sezonową zmienność zagrożenia i ograniczoną liczbę danych, dokonano transformacji czasów między kolejnymi przeskokami poza okresem największego zagrożenia (listopad-styczeń). Postawioną hipotezę sprawdzono przy pomocy testów istotności λ Kołmogorowa, F Fishera i testu WE Shapiro [19, 21]. Wyniki weryfikacji dla zredukowanego roku obliczeniowego (kolejnych stanów zawodnościowych) są pozytywne na poziomie istotności 5% [18].



Rys. 9. Miesięczne częstości zakłóceń zabrudzeniowych na terenie ZEOPd w okresie 1965-1974 dla linii:

a) 110 kV, b) 220 kV

Materiał statystyczny dotyczący zawodności zabrudzeniowej izolacji linii 110 i 220 kV uzyskano z Banku Informacji ZEOPd w Katowicach oraz kart badania zakłóceń (okres 1965-1974). W analizowanym okresie czasu zarejestrowano łącznie 202 zakłócenia zabrudzeniowe w liniach 110 kV i 64 zakłócenia w liniach 220 kV. Zestawienie miesięcznych częstości zakłóceń znajduje się na rys. 9 (pominięto niepewne zaburzenia przemijające po udanym cyklu SPZ). Zakłócenia w obu zbiorach linii nie występowały praktycznie w okresie marzec-kwiecień, lecz grupowały się w pozostałej części roku, wykazując przy tym różne częstości miesięczne. Postacie modeli obliczeniowych sprawdzono przy pomocy testu χ^2 (jak w przypadku stacji doświadczalnych). Próba przyjęcia modelu dwustanowego (marzec-wrzesień i październik-luty) okazała się dla obu rodzajów linii nieudana z powodu dużych różnic między miesięcznymi częstościami zakłóceń w okresie największego zagrożenia. Wyniki testowania kolejnych hipotez doprowadziły do dość skomplikowanych modeli, opisanych w pracy [18] i podanych na rys.10 (czterostanowego dla linii 110 kV i trzystanowego dla 220 kV). Zestawienie wielkości określających uzyskane modele znajduje się w tab. 3. Zagrożenie zabrudzeniowe linii 110 kV i 220 kV jest pomijalne od marca do września, a okres największego nasilenia zakłóceń sprowadza się do ok. 20 i 30% czasu trwania roku kalendarzowego. Otrzymane modele różnią się w tym okresie z powodu innego układu przestrzennego i struktury rozpatrywanych sieci (linie 110 kV mając charakter rozdzielczy, wchodzą na ogół głębiej w strefy największych zabrudzeń).



Rys. 10. Modele sezonowej zmienności zagrożenia zabrudzeniowego na terenie ZEOPd dla linii:
a) 110 kV, b) 220 kV

Tabela 3

Modele sezonowej zmienności zagrożenia zabrudzeniowego dla linii 110 i 220 kV na terenie ZEOPd [18]

Napięcie linii	Liczba stanów	Czas trwania stanu zawadnościowego k				Zredukowany rok obliczeniowy T'	
		1	2	3	4		
		T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	doby	lata
kV	-	doby				doby	lata
110	4	214(III-IX)	90(X,XII,II)	30(XI)	31(I)	73	0,2
220	3	214(III-IX)	62(X,XII)	89(XI,I,II)	-	111	0,3

W celu sprawdzenia hipotezy o wykładniczym rozkładzie czasu między kolejnymi zakłóceniami, zdołano wybrać zaledwie 5 linii 110 kV i 3 linie 220 kV, w których w ciągu 10 lat wystąpiło co najmniej kilka zakłóceń zabrudzeniowych (brak możliwości określenia empirycznych rozkładów prawdopodobieństwa). Dane były nieliczne i odnosiły się do zbiorów nie zawsze jednorodnej izolacji. Z wyjątkiem wyłączeń linii z uszkodzeniami, możliwość ustalenia łańcuchów na których wystąpiły przeskoki praktycznie nie istnieje. Z doświadczeń eksploatacyjnych na terenie ZEOPd [33, 35, 38, 51] wynika jednak, że przeskoki zabrudzeniowe występują najczęściej w strefie III, a tylko niekiedy w strefie IV, gdzie stosuje się układy specjalne i celowo wzmocnioną izolację (w strefach I i II notowane sporadycznie). Weryfikację postawionej hipotezy - dla izolacji linii 110 i 220 kV w zredukowanym roku obliczeniowym - przeprowadzono przy pomocy testów istotności F Fishera i H Hartley'a [19]. Wyniki testowania na poziomie istotności 5% są pozytywne, z wyjątkiem testu Hartley'a dla jednej linii 110 kV (Jaworzno I - Dwory II), ze względu na 2 kolejne zakłócenia w ciągu kilku godzin - spowodowane ponownym załączeniem w niekorzystnych warunkach atmosferycznych [18].

Uzyskane wyniki potwierdzają praktyczną przydatność metody modelowania i obliczania zawodności izolacji liniowej 110-220 kV, zaproponowanej w rozdziale 3.2. Odnoszą się one do terenów ZEOPd i 10-letniego okresu analizy, toteż w szczególnych warunkach lokalnych należy się liczyć z koniecznością dodatkowych obliczeń sprawdzających.

4. ANALIZA ZAWODNOŚCI IZOLATORÓW LINIOWYCH

4.1. Zawodność łańcuchów izolatorów w stacjach doświadczalnych

Badania terenowe pozwalają na ocenę przydatności izolatorów w warunkach lokalnych o dużym zagrożeniu zabrudzeniowym. Wartości czasów do przeskoku, rejestrowane w stacjach doświadczalnych, mogą być również przydatne do obliczania ich zawodności. Dotychczasowe próby wykorzystania tych czasów w celu oceny różnych izolatorów nie dały jednak przekonujących rezultatów [35, 37, 62]. Wynika to - zdaniem autora - nie tylko z niewielkiej liczby badanych izolatorów, umieszczenia ich na stoiskach w różnych okresach roku i niekiedy zbyt krótkiego czasu prób, ale przede wszystkim z nieuwzględnienia sezonowej zmienności zagrożenia zabrudzeniowego. Zmienność ta powoduje, że zanotowany czas do przeskoku nie może być bezpośrednio wykorzystany do obliczeń niezawodnościowych. Konieczne jest jego przetworzenie, czyli podział na czasy - zwane dalej sezonowymi - nagromadzone podczas badania łańcucha w każdym ze stanów zawodnościowych rocznego modelu obliczeniowego dla terenu stacji. W przypadku kilku przeskoków należy określić ich wartości średnie. Ze względu na zmienność zagrożenia w ciągu roku, jedynie sezonowe intensywności przeskoków λ_{ik} są dla łańcucha stałe i równe w przybliżeniu odwrotności sezonowych czasów do przeskoku [19], czyli:

$$\lambda_{ik} = \frac{1}{T_{ik}} \quad \text{przy czym} \quad T_1 = \sum_k T_{ik} \quad \text{dla} \quad k=1,2,3,\dots, \quad (13)$$

gdzie:

T_1 - zarejestrowany czas do przeskoku dla łańcucha,

T_{ik} - sezonowy czas do przeskoku w stanie zawodnościowym k (w ciągu całego okresu próby).

Znając postać modelu sezonowej zmienności zagrożenia zabrudzeniowego dla terenu stacji i określając intensywność (13), można obliczyć zawodności sezonowe (2) i zawodność roczną (3) badanego łańcucha izolatorów.

Proponowany sposób postępowania zastosowano do obliczenia zawodności łańcuchów, badanych w krajowych stacjach doświadczalnych 110 kV Zabrze i Bolesław. Wykorzystano trójstanowy model sezonowej zmienności zagrożenia - opisany i zweryfikowany w rozdziale 3.3 (rys. 8). Zestawienie sezonowych czasów do przeskoku i wyników obliczeń niezawodnościowych znajduje się w

tab. 4 (zawodności wyrażone w procentach). Łańcuchy, składające się z izolatorów długopniowych i kołpakowych, uszeregowano wg rosnącej drogi u-
pływu. Ocena ich może być jedynie przybliżona, ponieważ materiał staty-
styczny nie jest duży (ograniczona liczba zarejestrowanych przeskoków), a
ponadto, izolatory umieszczano na stanowiskach probierczych w różnych o-
kresach roku (w różnych okresach zagrożenia zabrudzeniowego). Ma to szcze-
gólnie istotne znaczenie w przypadku łańcuchów izolatorów najmniej wy-
trzymałych, zawieszanych latem, na których przeskoki występowały w naj-
bliższym okresie jesienno-zimowym, czyli zaledwie po kilku miesiącach pró-
by. W celu ujednoczenia warunków probierczych dla wszystkich rozpatrywa-
nych układów, nie uwzględniono w tych przypadkach czasu początkowego na-
rastania konduktywności powierzchniowej w okresie pomijalnego zagrożenia
(w stanie 1 wg modelu z rys. 8).

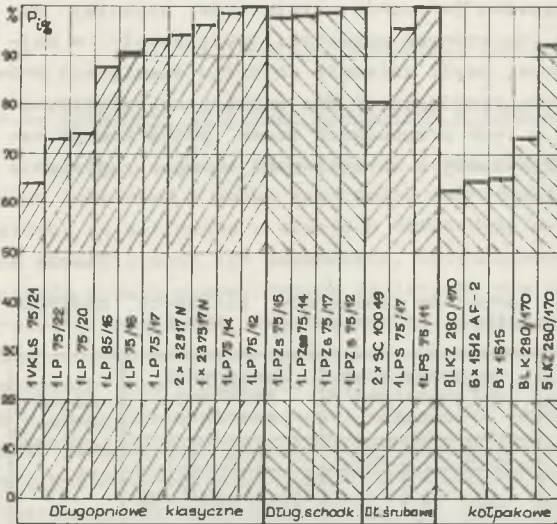
Tabela 4

Roczne zawodności zabrudzeniowe łańcuchów izolatorów liniowych badanych
w stacjach doświadczalnych 110 kV Zabrze i Bolesław

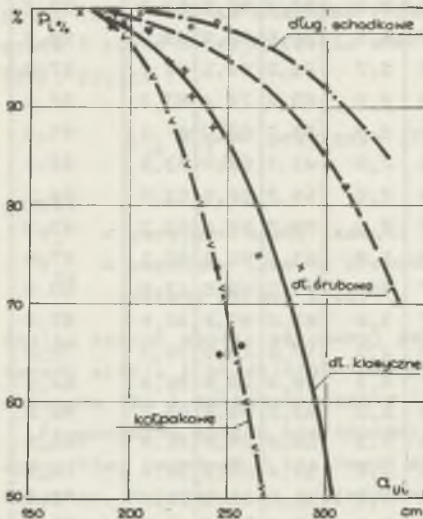
Lp.	łańcuch izolatorów	a _{ui}	Liczba prze- sko- ków	Sezonowe czasy do przeskoku w stanie			Zawodności sezonowe w stanie			Zawod- ności roczne P _i %
				1	2	3	1	2	3	
				T _{i1}	T _{i2}	T _{i3}	P _{i1} %	P _{i2} %	P _{i3} %	
-	-	cm	-	miesiące			%			%
1	1LPs 75/11	128	2	-	1,6	-	-	84,7	-	-
2	1LP 75/12	169	2	5,5	1,7	0,2	72,0	82,9	100	~100
3	1LPZs 75/12	184	2	3,9	1,5	2,0	83,4	86,5	63,2	99,2
4	1LP 75/14	197	3	6,5	1,7	1,5	65,9	82,9	63,7	98,5
5	1LPZss 75/14	204	5	7,0	1,8	1,7	63,2	81,1	69,2	97,9
6	1x237517 N	209	2	7,0	2,4	2,0	63,2	71,4	63,2	96,1
7	1LPS 75/17	210	3	7,0	3,1	1,8	63,2	62,0	67,1	95,4
8	5LKZ280/170	210	2	12,2	3,1	2,0	43,7	62,0	63,2	92,1
9	2x32517 N	220	2	7,0	3,6	2,0	63,2	56,6	63,2	94,1
10	1LP 75/17	225	4	7,8	3,7	2,0	59,2	55,6	63,2	93,3
11	1LPZs 75/15	230	3	7,0	1,8	1,9	63,2	81,1	65,1	97,6
12	1LP 75/16	230	2	7,0	3,7	3,6	63,2	55,6	42,6	90,6
13	1LP 85/16	240	1	7,0	5,7	3,6	63,2	40,1	42,6	87,6
14	8LK280/170	240	1	14,7	8,8	4,0	37,9	28,9	39,3	76,2
15	6x1512 AF-2	244	1	21,0	8,9	5,3	28,4	28,6	31,4	64,9
16	1LPZs 75/17	244	3	7,0	1,5	2,0	63,2	86,5	63,2	98,2
17	8x1515	256	1	21,0	8,8	5,3	28,4	28,9	31,4	65,1
18	1LP 75/20	264	1	14,0	8,6	4,0	39,4	29,5	39,4	74,1
19	1LP 75/22	286	2	15,9	7,4	4,0	35,6	31,6	39,4	73,3
20	2xSC10049	306	2	12,3	6,0	3,6	43,4	39,4	42,6	80,3
21	1VKLS 75/21	335	5	22,5	8,0	6,0	26,7	31,3	28,4	63,9
22	8xLKZ280/170	336	1	21,0	9,5	6,0	28,4	27,1	28,3	62,6

Obliczone zawodności roczne badanych łańcuchów przekraczają w rozpatrywanym przypadku 60%, a więc są wielokrotnie większe od wartości, które mogą być uznane za dopuszczalne dla 1 łańcucha izolatorów w eksploatacyjnej linii. Wśród badanych konstrukcji brak jest izolatora długopniowego 110 kV, przystosowanego do pracy na terenach o zagrożeniu zbliżonym do obecnej IV strefy zabrudzeniowej (skonstruowanie takiego izolatora nie wydaje się jednak możliwe). Wyniki obliczeń podane w tab. 4 i uporządkowane na rys.11 wskazują, że zawodność zabrudzeniowa zmniejsza się bardzo wyraźnie ze wzrostem drogi upływu łańcuchów, ale w niejednakowym stopniu dla różnych typów izolatorów. Kolejność uszeregowania łańcuchów wg drogi upływu (tab. 4) i zawodności rocznej (rys. 11) jest praktycznie jednakowa tylko w obrębie poszczególnych grup konstrukcyjnych izolatorów. Wiadać to również na rys. 12,

wykonywanym w celu określenia przybliżonych zależności między zawodnością roczną, a drogą upływu badanych łańcuchów izolatorów. Uporządkowane w ten sposób wyniki obliczeń tworzą przybliżone korelacje nieliniowe (z wyjątkiem danych dla izolatorów VKLS 75/21 i LKZ 280/170, które wyraźnie odbiegają od pozostałych wartości). W miarę dokładne wyznaczenie tych zależności nie jest jednak możliwe z powodu znacznych rozrzutów, niewielkiej liczby danych i dużych wartości zawodności.



Rys. 11. Zawodności roczne łańcuchów izolatorów badanych w stacjach doświadczalnych (tab. 4)



Rys. 12. Przybliżone zależności między zawodnością roczną a drogą upływu łańcuchów izolatorów (tab. 4)

W miarę dokładne wyznaczenie tych zależności nie jest jednak możliwe z powodu znacznych rozrzutów, niewielkiej liczby danych i dużych wartości zawodności.

Uzyskane rezultaty wynikają z charakteru badań terenowych, umożliwiających ocenę i porównanie różnych rozwiązań izolacyjnych w najcięższych z założenia warunkach zabrudzeniowych, spotykanych na określonym obszarze. Ze

względu na konieczność uzyskania przeskoków w skróconym czasie próby, można je nazwać przyspieszonymi.

Porównywane łańcuchy nie mogą być zastosowane w liniach 110 kV na terenach o rozpatrywanym zagrożeniu zabrudzeniowym ze względu na niedopuszczalnie duże zawodności roczne. Krzywe na rys. 12 mają więc jedynie charakter orientacyjny i nie stanowią podstawy do obiektywnej oceny izolatorów w warunkach zbliżonych do eksploatacyjnych, tj. dla wielokrotnie mniejszych zawodności (dłuższych łańcuchów o znacznie większych drogach wpływu). Wniosek o najlepszej przydatności izolatorów kołpakowych do warunków zabrudzeniowych i najgorszych efektach technicznych w przypadku zastosowania izolatorów długopniowych schodkowych - nasuwający się z rys. 12 - nie wydaje się uzasadniony. Przedstawione zależności są bowiem nie tylko nieliniowe dla dużych zawodności, ale określone są przy pomocy funkcji aproksymacyjnych, wykazujących różne stromości w kolejnych przedziałach wartości drogi wpływu. Najbardziej przekonującym i przydatnym dla celów praktycznych byłoby porównanie łańcuchów w rzeczywistych warunkach pracy, a więc dla rocznych zawodności zabrudzeniowych nie przekraczających np. 1%. Próby terenowa odtwarzająca takie warunki są wprawdzie niemożliwe ze względu na bardzo długi czas badań, ale nie podważa to celowości dalszego ich wykonywania na terenach o różnym stopniu zanieczyszczenia atmosfery. Dostarczają one bowiem danych, niezbędnych do oceny własności powierzchniowych i zawodności różnych izolatorów - również w warunkach zbliżonych do eksploatacyjnych - przy pomocy metody zaproponowanej przez autora [17].

4.2. Ocena zawodności izolatorów w warunkach zbliżonych do eksploatacyjnych

Ocena izolatorów tylko na podstawie wyników badań terenowych nie wydaje się całkowicie słuszna, ponieważ:

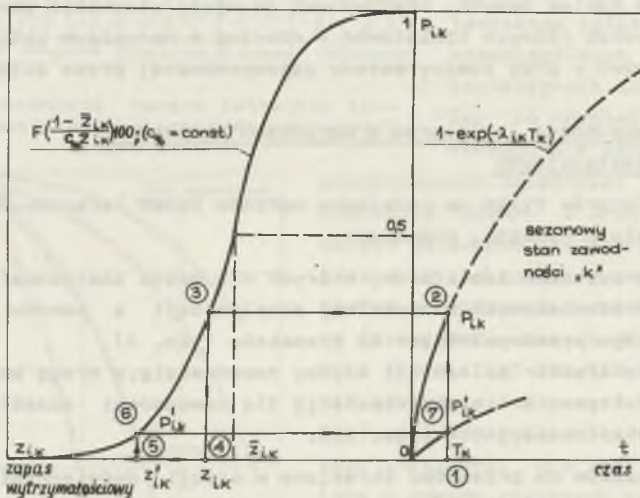
- dotyczą one zestawów izolatorów, których nie można zastosować w danych warunkach środowiskowych w normalnej eksploatacji z powodu niedopuszczalnie dużego prawdopodobieństwa przeskoku (tab. 4),
- nieliniowy charakter zależności między zawodnością, a drogą wpływu uniemożliwia praktycznie ich ekstrapolację dla zawodności oczekiwanych w warunkach eksploatacyjnych (rys. 12).

Wartości czasów do przeskoku określone w stacji doświadczalnej pozwalają jednak na obliczenie nie tylko prawdopodobieństw przeskoku dla badanego łańcucha (rozdział 4.1), ale umożliwiają także wyznaczenie zależności między zawodnością roczną, a zmieniającą się z założenia w sposób ciągły drogą wpływu łańcucha, złożonego z danego typu izolatorów (w rzeczywistości droga wpływu może się zmieniać skokowo za zmianą liczby izolatorów). Charakterystyka taka - nazywana dalej zawodnościową - stanowi propozycję autora i dostarcza informacji o zachowaniu się izolatorów w warunkach zbliżonych do eksploatacyjnych, ponieważ odnosi się również do wartości zawodności nie większych od 1% [13, 14, 15].

Proponowana metoda analitycznego określania charakterystyki zawodnościowej opiera się na następujących założeniach:

- zawodności sezonowe łańcucha izolatorów wyrażone są przy pomocy rozkładu wykładniczego (rozdział 3.2 i 3.3),
- zabrudzeniowe napięcie przeskoku w każdym stanie zawodnościowym posiada normalny rozkład prawdopodobieństwa [2, 11, 13, 26],
- zabrudzeniowe napięcie przeskoku - nie przekraczające 400 kV - rośnie praktycznie liniowo ze wzrostem drogi upływu (liczby) izolatorów [25, 28].

Proponowany sposób wyznaczania jednego punktu sezonowej charakterystyki zawodnościowej ilustruje poglądowy rys. 13, na którym zawodność sezonową wyrażono w postaci wykładniczej funkcji czasu (strona prawa) oraz dystrybucy rozkładu normalnego zabrudzeniowego zapasu wytrzymałościowego łańcucha (strona lewa). Zależności te odnoszą się do jednego ze stanów zawodnościowych wg modelu sezonowej zmienności zagrożenia w ciągu roku (np. rys. 8) i jednej wartości odchylenia standardowego zabrudzeniowego napięcia przeskoku. W celu wyznaczenia punktu sezonowej charakterystyki zawodnościowej należy przyjąć kolejność postępowania, określoną na rys. 13 przez liczby porządkowe od 1 do 7.



Rys. 13. Kolejność postępowania przy wyznaczaniu sezonowej charakterystyki zawodnościowej

- Określić z rocznego modelu obliczeniowego T_k - czas trwania stanu zawodnościowego k dla rozpatrywanego terenu (rozdział 3.2 i 3.3).
- Przyrównać zawodność (2) i sezonowe prawdopodobieństwo przeskoku, wyrażone w postaci dystrybucy rozkładu normalnego średniego zapasu wytrzymałościowego \bar{z}_{lk} łańcucha:

$$P_{ik} = 1 - \exp(-\lambda_{ik} T_k) = F\left(\frac{1 - \bar{z}_{ik}}{c_{\%} \bar{z}_{ik}} 100\right), \quad (14)$$

gdzie:

$F\left(\frac{1 - \bar{z}_{ik}}{c_{\%} \bar{z}_{ik}} 100\right)$ - dystrybuanta rozkładu normalnego zapasu wytrzymałościowego łańcucha,

$c_{\%} = \frac{\sigma}{U} 100$ - względne odchylenie standardowe zabrudzeniowego napięcia przeskoku, przyjmowane na ogół w szerokich granicach od 5 do 20%.

4. Określić zapas wytrzymałościowy z_{ik} przy pomocy tablic rozkładu normalnego, ponieważ:

$$P_{ik} = P(z \leq z_{ik}) = F\left(\frac{1 - \bar{z}_{ik}}{c_{\%} \bar{z}_{ik}} 100\right) = 0,5 + \Phi(\omega) \quad (15)$$

gdzie:

z_{ik} - zapas badanego łańcucha odpowiadający prawdopodobieństwu (14),

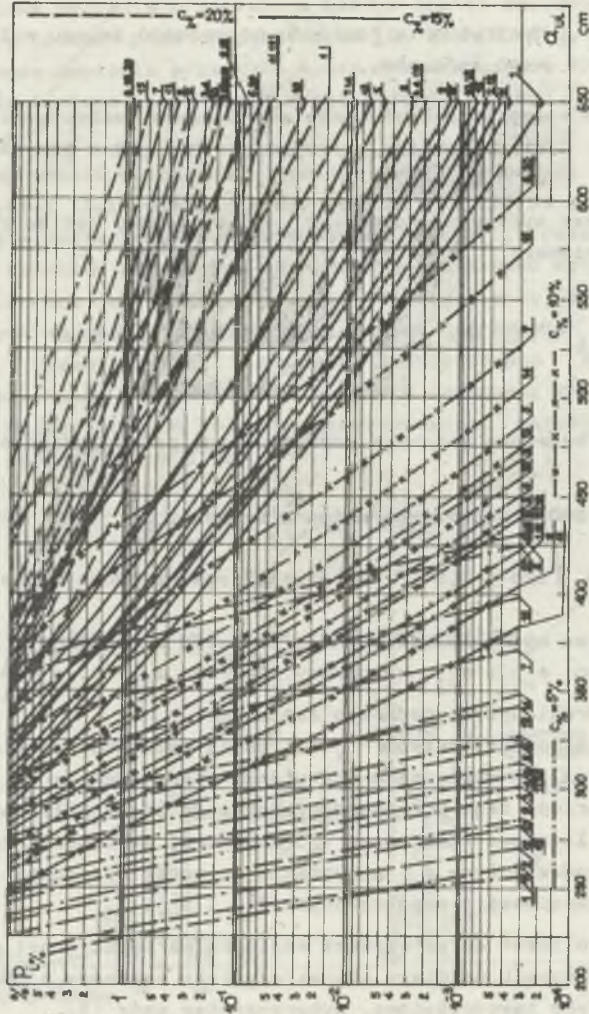
$\omega = \frac{1 - z_{ik}}{c_{\%} \bar{z}_{ik}} 100$ - unormowana zmienna zapasu z_{ik} ,

$\Phi(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\omega} \exp(-0,5 v^2) dv$ - stabilizowana funkcja Laplace'a [77].

- Obliczyć zapas wytrzymałościowy dla łańcucha o założonej, do obliczeń drodze upływu $a'_{ui} > a_{ui}$, wynoszący $z'_{ik} = \eta_1 z_{ik}$ ($\eta_1 = \frac{a'_{ui}}{a_{ui}} > 1$ jest krotnością drogi upływu badanego łańcucha).
- Odczytać prawdopodobieństwo P'_{ik} z tablic rozkładu normalnego dla wartości zapasu z'_{ik} i względnego odchylenia standardowego $c_{\%}$.
- Przenieść wartość tego prawdopodobieństwa na prawą półpłaszczyznę rys. 13, równego liczbowo (dla czasu T_k) sezonowej zawodności łańcucha izolatorów o drodze upływu a'_{ui} - wyznaczając punkt sezonowej charakterystyki zawodnościowej o współrzędnych P'_{ik} i a'_{ui} .

Zakładając do obliczeń coraz większe względne wartości drogi upływu można wyznaczyć w ten sposób najpierw charakterystyki sezonowe, a następnie roczną charakterystykę zawodnościową, wykorzystując wzór (3).

Proponowany sposób postępowania wykorzystano do określenia rocznych charakterystyk zawodnościowych izolatorów badanych w stacjach doświadczalnych 110 kV Zabrze i Bolesław. W celu uzyskania danych dla możliwie różnorodnych rozwiązań izolacyjnych, uwzględniono 20 typów izolatorów liniowych. Należy jednak podkreślić, że tylko niewielka część z izolatorów wymienionych w tab. 4 jest w kraju obecnie eksploatowana (np. LP 75/17, VKLS 75/21, LKZ 280/170 oraz w niewielkich ilościach LK 280/170). Zesta-



Rys. 14. Charakterystyki zawodnościowe izolatorów liniowych dla warunków zabrudzeniowych w stacjach doświadczalnych 110 kV Zabrze i Bolesław oraz względnego odchylenia standardowego $C_x = 5...20\%$ (parametry konstrukcyjne izolatorów w tab. 6)

Oznaczenia: 1-LP 75/12, 2-LP 75/14, 3-LP 75/17, 4-LP 75/16, 5-LP 75/20, 6-VKLS 75/21, 7-LP 75/22, 8-LP 85/16
9-32517N, 10-237517 N, 11-LPz 75/12, 12-LPz 75/14, 13-LPz 75/15, 14-LPz 75/17, 15-LPS 75/17, 16-SC 10049,
17-LK 280/170, 18-1512 AF-2, 19-1515, 20-LKZ 280/170

wienie tych charakterystyk znajduje się na rys. 14. Przyjęto półlogarytmiczny układ współrzędnych i ograniczono się do pokazania zależności dla zawodności rocznych nie przekraczających 10%. Obliczenia wykonano dla względnych odchyłeń standardowych zabrudzeniowego napięcia przeskoku 5, 10, 15 i 20%, ponieważ dokładne ich wartości dla warunków eksploatacyjnych nie są znane i mogą być jedynie oszacowane.

Podczas laboratoryjnych prób izolatorów z jednolitą sztuczną powłoką zabrudzeniową otrzymuje się wartości odchyłeń w granicach 3...10%, przy czym zmniejszają się one ze wzrostem konduktywności powierzchniowej powłoki [8, 24, 42, 61]. Brak jest obecnie udokumentowanego potwierdzenia zjawiska, że nierównomierny rozkład warstwy ma silny wpływ na rozrzut zabrudzeniowych napięć przeskoku. Z dotychczasowych wyników badań w Czechosłowacji wynika, że względne odchylenia standardowe w czasie prób izolatorów zabrudzonych w sposób naturalny są jedynie nieznacznie większe niż w przypadku powłoki sztucznej, ale nie przekraczają 12% [30, 31]. Wartości znacznie większe nie wydają się również w tym przypadku reprezentatywne, ponieważ otrzymuje się wtedy bardzo małe zapasy wytrzymałościowe - nie wynikające z doświadczeń eksploatacyjnych w krajowych i francuskich warunkach zabrudzeniowych [11, 15]. Wynika to również z przebiegu charakterystyk zawodnościowych dla $c_{\%} = 20\%$ (linie przerywane na rys. 14). Wg tych zależności, w celu nie przekroczenia poziomu zawodności rocznej 0,01% należałoby zastosować w linii 110 kV łańcuchy izolatorów o drodze upływu, wynoszącej średnio aż ponad 900 cm. Nie jest to uzasadnione i możliwe do zrealizowania nawet przy założeniu IV strefy zabrudzeniowej dla rozpatrywanych warunków środowiskowych.

Opierając się na dotychczasowych wynikach badań i obliczeń, względne odchylenie standardowe zabrudzeniowego napięcia przeskoku dla 1 łańcucha izolatorów w warunkach zbliżonych do eksploatacyjnych można oszacować na 10...15% (wartość mniejsza dla stref silnego zanieczyszczenia atmosfery).

Z analizy zależności podanych na rys. 14 wynika, że:

- charakterystyki zawodnościowe można aproksymować liniowo w półlogarytmicznym układzie współrzędnych, jeśli zawodności roczne nie przekraczają 1%; potwierdzają to również wyniki obliczeń autora dla izolacji we francuskich stacjach doświadczalnych [13, 14],
- zawodności zabrudzeniowe maleją wyraźnie ze wzrostem drogi upływu, zależnie jednak nie tylko od wartości odchylenia standardowego, ale również od typu izolatorów,
- różnice między zawodnościami analizowanych rozwiązań izolacyjnych są dla tych samych dróg upływu nie do pominięcia, świadcząc o znacznym różnicowaniu własności izolatorów,
- uzyskanie zawodności mniejszych od 1% wymaga w rozpatrywanych warunkach zabrudzeniowych znacznego wzmocnienia izolacji w porównaniu z łańcuchami badanymi w stacjach doświadczalnych (tab. 4); zwiększając liczbę izolatorów np. 2...3-krotnie uzyskuje się poziom zawodności ok. 0,01% (po-

dane krotności odpowiadają względnym odchyleniom standardowym z przedziału 10...15%).

Charakterystyki zawodnościowe można wykorzystywać do porównywania i oceny własności różnych łańcuchów izolatorów dla poziomów zawodności występujących w warunkach zbliżonych do eksploatacyjnych. W dalszych rozważaniach rozpatruje się przedział rocznej zawodności łańcucha 10^{-4} ...1%. Rozpatrywanie układów o zawodnościach większych od 1% nie jest interesujące z praktycznego punktu widzenia, ponieważ nie mogą być one zastosowane w eksploatacji (ze względu na niedopuszczalnie dużą liczbę wyłączeń linii).

4.3. Efektywność wykorzystania różnych typów izolatorów

Wytrzymałość i zawodność zabrudzeniowa izolatorów zależy w danych warunkach pracy od ich parametrów konstrukcyjnych [48, 49]. Zastosowanie różnych rozwiązań konstrukcyjnych daje w określonych warunkach zabrudzeniowych zróżnicowane efekty techniczne w postaci oczekiwanych poziomów zawodności w czasie eksploatacji (rozdział 4.2). Analizę efektywności wykorzystania różnych typów izolatorów liniowych wykonano w ujęciu niezawodnościowym, opierając się na charakterystykach z rys. 14, określonych dla warunków zabrudzeniowych w krajowych stacjach doświadczalnych 110 kV. W celu wyznaczenia statystycznych związków między zawodnością a drogą upływu, odczytano wartości drogi upływu a_{uip} rozpatrywanych łańcuchów dla różnych poziomów zawodności z przedziału 10^{-4} ...1%, obliczając następnie odpowiadające im jednostkowe drogi upływu:

$$a_{ui}^* = \frac{a_{uip}}{U_n} \quad \text{dla} \quad 10^{-4}\% \leq P_{1\%} \leq 1\%, \quad (16)$$

gdzie:

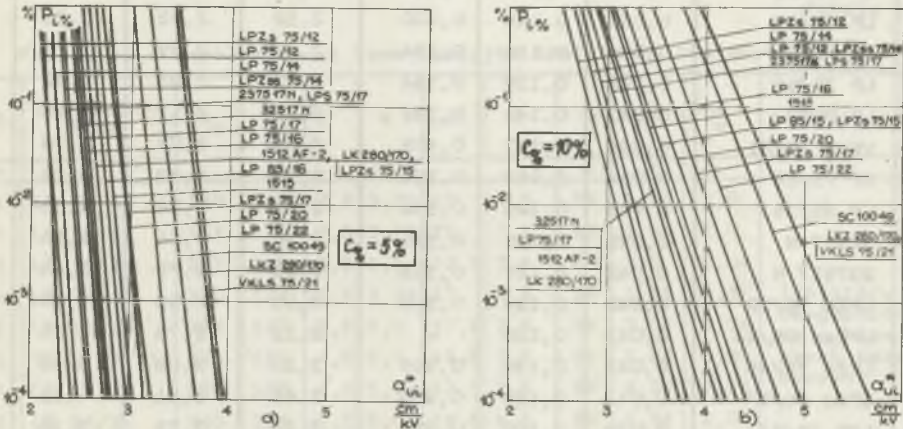
$U_n = 110 \text{ kV}$ - międzyprzewodowe napięcie znamionowe.

Zależności między zawodnością roczną a jednostkową drogą upływu (16) dla różnych izolatorów liniowych znajdują się na rys. 15. W półlogarytmicznym układzie współrzędnych i rozpatrywanym przedziale zawodności są one praktycznie liniowe i pozwalają na porównanie powierzchniowych własności izolatorów poprzez ocenę efektywności wykorzystania drogi upływu oraz wpływu innych parametrów konstrukcyjnych na ich zawodność w naturalnych warunkach zabrudzeniowych. Z zależności podanych na rys. 15 wynika, że:

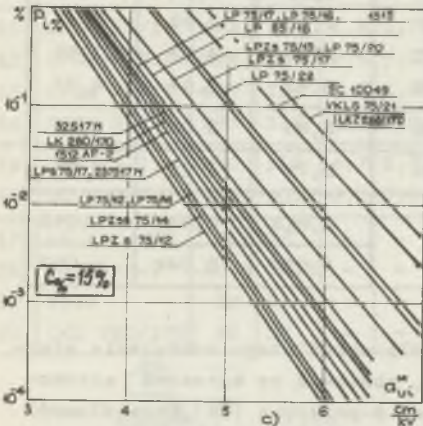
- efektywność wykorzystania drogi upływu zależy od typu izolatora; różnice między wartościami jednostkowej drogi upływu (16) dla tych samych zawodności mogą sięgać 50% ($c_{\%} = 10$...15%),
- najlepiej wykorzystana jest droga upływu izolatorów długopniowych o mniejszej liczbie kłoszy (z eksploatowanych obecnie w kraju - LP 75/17) oraz większości izolatorów kołpakowych (z wyjątkiem LKZ 280/170),

- najmniej efektywnie wykorzystana jest droga upływu izolatorów długopniowych VKLS 75/21 (produkcji NRD) oraz śrubowych SC 10049 (francuskie); wynika to z nieodpowiedniej koordynacji ich wymiarów w trudnych warunkach zabrudzeniowych.

Otrzymane rezultaty potwierdzają wyniki uzyskane przez Biuro Badań i Studiów ZE Gliwice, dotyczące zachowania się różnych typów izolatorów liniowych na terenie GOP [35, 37] oraz wyniki otrzymane przez autora dla francuskich warunków zabrudzeniowych [16].



Rys. 15a i b. Zależności między zawadnością roczną a jednostkową drogą upływu izolatorów (dane z rys. 14)



Rys. 15c. Zależności między zawadnością roczną a jednostkową drogą upływu izolatorów (dane z rys. 14)

Jednostkową drogę upływu (16) można wyrazić w zależności od rocznej zawadności zabrudzeniowej łańcucha $P_{i\%}$ w następującej postaci analitycznej:

$$\alpha_{ui}^* = -A \ln P_{i\%} + B \quad \text{dla} \quad 10^{-4}\% \leq P_{i\%} \leq 1\% \quad (17)$$

gdzie:

$A, B \frac{\text{cm}}{\text{kV}}$ - parametry obliczeniowe dla danego typu izolatora i określonych warunków zabrudzeniowych.

Mniejsze jednostkowe drogi upływu (17) dla założonego poziomu zawadności świadczą o lepszych własnościach powierzchniowych izolatorów w rozpatrywanych warunkach środowiskowych (lepszej efektywności ich wykorzystania). Określają je wartości parametrów obliczeniowych A i B, zestawione w

Tabela 5

Parametry określające jednostkową drogę upływu (17) dla różnych izolatorów liniowych (stacje doświadczalne Zabrze i Bolesław)

Lp.	Typ izolatora	Parametr A dla c%			Parametr B dla c%		
		5	10	15	5	10	15
-	-	cm/kV					
1	LP 75/12	0,031	0,123	0,270	2,08	2,72	3,41
2	LP 75/14	0,035	0,120	0,200	2,16	2,65	3,33
3	LP 75/17	0,044	0,131	0,334	2,38	2,89	3,58
4	LP 75/16	0,044	0,138	0,334	2,42	2,93	3,62
5	LP 75/20	0,043	0,149	0,339	2,75	3,17	3,86
6	VKLS 75/21	0,054	0,177	0,408	3,46	3,97	4,74
7	LP 75/22	0,054	0,158	0,356	2,97	3,47	4,18
8	LP 85/16	0,046	0,143	0,334	2,55	3,04	3,68
9	32517 N	0,029	0,131	0,319	2,34	2,86	3,55
10	237517 N	0,042	0,127	0,303	2,25	2,75	3,44
11	LPZs 75/12	0,042	0,114	0,300	2,05	2,55	3,20
12	LPZss 75/14	0,043	0,118	-	2,22	2,73	3,25
13	LPZs 75/15	0,047	0,139	0,369	2,50	3,08	3,82
14	LPZs 75/17	0,047	0,150	0,365	2,68	3,31	4,15
15	LPS 75/17	0,039	0,127	0,319	2,25	2,75	3,38
16	SC 10049	0,056	0,166	0,404	3,17	3,79	4,54
17	LK280/170	0,045	0,127	0,311	2,49	2,92	3,52
18	1512 AF-2	0,046	0,126	0,297	2,48	2,92	3,47
19	1515	0,045	0,140	0,321	2,62	3,02	3,59
20	LKZ 280/170	0,055	0,177	0,408	3,42	3,97	4,74
Długopniowe		0,045	0,139	0,345	2,54	3,08	3,77
Koźpakowe		0,048	0,143	0,334	2,75	3,21	3,83
Długopniowe		Stosunki wartości średnich A/B			0,018	0,045	0,092
Koźpakowe					0,017	0,044	0,087

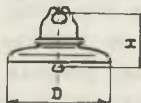
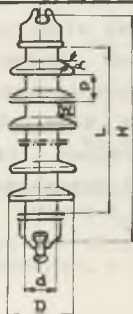
tab. 5. Stosunki wartości tych parametrów dla określonego odchylenia standardowego różnią się od siebie nieznacznie, ponieważ ze wzrostem stromości zwiększa się również przesunięcie każdej z prostych (17). Prawidłowość ta powinna również występować również w innych warunkach zabrudzeniowych, ale należy wtedy oczekiwać zmian wartości parametru B w stosunku do praktycznie nie zmienionego parametru A. Ze względu na brak danych, hipoteza o tendencji do równoległego przesuwania się charakterystyk (17) przy zmianach zagrożenia zabrudzeniowego nie może być jednak sprawdzona.

Parametry obliczeniowe określają pośrednio efektywność wykorzystania izolatorów i pozwalają na sprawdzenie istotności korelacji między jednostkową drogą upływu (16) a innymi współczynnikami konstrukcyjnymi (mniejsze wartości tych parametrów wskazują na lepsze własności izolatorów). Korelacje te umożliwiają określenie przedziałów wartości współczynników konstrukcyjnych dla najmniejszych wartości parametrów A i B, tzn. dla izolatorów, które można wykorzystać najlepiej w warunkach zabrudzeniowych. Naj-

Tabela 6

Parametry i współczynniki konstrukcyjne izolatorów liniowych [73]

Lp.	Typ izolatora	a_u	H	p	w	D	d	α	$\frac{a_u}{H}$	$\frac{p}{w}$	Uwagi
-	-	cm						o	-	-	-
1	LP 75/12	169	112	7,5	3,75	15	7,5	18	1,51	2,0	Izolatory długopniowe o kłoszach daszkowych
2	LP 75/14	197	127	7,5	3,75	15	7,5	18	1,55	2,0	
3	LP 75/17	225	112	5,2	5,0	17,5	7,5	18	2,0	1,04	
4	LP 75/16	230	127	6,5	4,74	17	7,5	25	1,81	1,37	
5	LP 75/20	264	127	5,2	5,0	17,5	7,5	18	2,08	1,04	
6	VKLS 75/21	335	127	4,8	6,0	19,5	7,5	37	2,64	0,80	
7	LP 75/22	286	127	4,8	5,0	17,5	7,5	18	2,25	0,96	
8	LP 85/16	240	112	5,2	5,0	18,5	8,5	18	2,14	1,04	
9	32517 N	110	45	6,0	8,7	27	7,5	12	2,44	0,62	
10	237517 N	209	127	6,0	3,75	15	7,5	18	1,65	1,60	
11	LPZs 75/12	184	112	7,5	3,75	15	7,5	12	1,64	2,0	Izolatory schodkowe
12	LPZss 75/14	204	127	7,5	5,0	17,5	7,5	12	1,61	1,5	
13	LPZs 75/15	230	127	7,0	5,0	17,5	7,5	15	1,81	1,4	
14	LPZs 75/17	240	112	5,2	5,0	17,5	7,5	12	2,18	1,04	
15	LPS 75/17	210	112	4,7	3,75	15	7,5	3	1,87	1,25	Izolatory śrubowe
16	SC 10049	153	60,8	2,6	2,8	15	9,4	3	2,52	0,92	
17	LK 280/170	30	17	-	-	28	-	25	1,76	1,21	Izolatory kołpakowe
18	1512 AF-2	40,6	16,8	-	-	25,4	-	25	2,42	1,32	
19	1515	32	14,5	-	-	28	-	25	2,21	1,04	
20	LKZ 280/170	42	17	-	-	28	-	5	2,47	-	



Oznaczenia:

- a_u - droga upływu
- H - długość montażowa (skok)
- L - odstęp między okuciami
- p - podziałka kłoszowa
- w - wysięg kłosza
- D - średnica kłosza
- d - średnica pnia
- α - kąt nachylenia kłosza

ważniejsze parametry i współczynniki konstrukcyjne izolatorów liniowych zestawiono w tab. 6 (objaśnienia oznaczeń na przykładowych szkicach wymiarowych). W dalszych rozważaniach uwzględnia się kolejno współczynniki konstrukcyjne a_u/H i p/w oraz kąt nachylenia kłosa α .

Silne związki korelacyjne stwierdził autor między parametrami obliczeniowymi a współczynnikiem konstrukcyjnym a_u/H (współczynnik korelacji nie mniejszy od 0,99). Dodatnie rezultaty testu Fishera [1] wskazują, że z prawdopodobieństwem błędu mniejszym od 1% można przyjąć hipotezę o liniowej korelacji między tymi zmiennymi. Równania linii regresji - podane na rys. 16 i określone metodą najmniejszych kwadratów [1] - mają dla różnych wartości $c_{\%}$ postać następującą:

$$A = a \frac{a_u}{H} + b \quad \text{oraz} \quad B = c \frac{a_u}{H} + d, \quad (18)$$

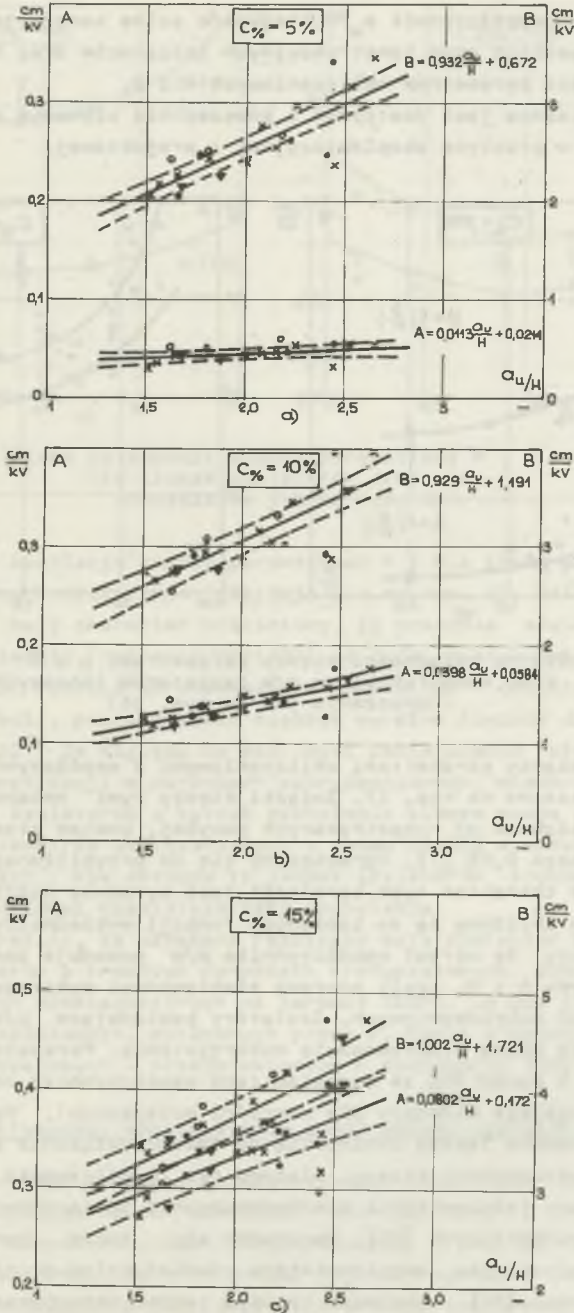
gdzie:

$a, b \frac{cm}{kV}$ - parametry określające linie regresji dla zmiennych A i B
 c, d względem a_u/H (wartości podane na rys. 16).

Ponieważ zaznaczone 95-procentowe dwustronne przedziały ufności nie są szerokie, więc zależności te pozwalają wystarczająco dokładnie ocenić wpływ współczynnika a_u/H na jednostkową drogę upływu (16), związaną bezpośrednio z zawodnością. Z podanych korelacji wynika, że w celu zapewnienia dobrej efektywności wykorzystania izolatorów liniowych w warunkach zabrudzeniowych, współczynnik konstrukcyjny a_u/H nie powinien przekraczać znacznie wartości 2. Wzrost tego współczynnika powoduje bowiem zwiększenie jednostkowej drogi upływu dla założonych poziomów zawodności (przy wzroście a_u/H od 1,5 do 2,5 parametry obliczeniowe rosną o ok. 30-35%).

Izolator przeznaczony do pracy w warunkach zabrudzeniowych musi mieć wprawdzie dostateczną drogę upływu, ale zbytne jej zwiększanie przy stałej długości montażowej powoduje niewspółmiernie mały przyrost wytrzymałości powierzchniowej, czyli znaczne zmniejszenie efektywności wykorzystania danej konstrukcji (nieodpowiednia koordynacja wymiarów). W skrajnych przypadkach może spowodować to przekroczenie naprężeń krytycznych na skutek zwierania odcinków drogi upływu przez lokalne wyładowania powierzchniowe [49].

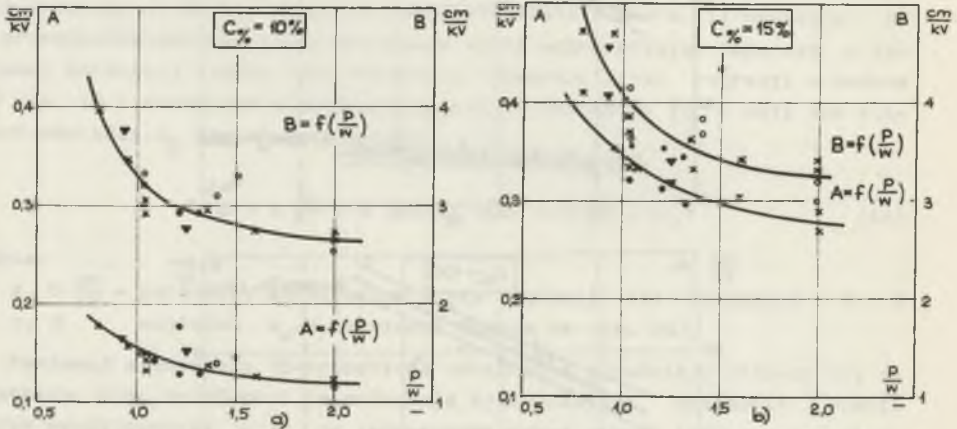
Należy podkreślić, że w przypadku wykonywanej analizy należało uwzględnić raczej nie długości montażowe, ale mniejsze o ok. kilkanaście procent długości części izolacyjnej, która wpływa na wytrzymałość elektryczną izolatora. Ten przybliżony sposób postępowania przyjęto na skutek braku szczegółowych danych liczbowych o długościach izolacyjnych większości rozpatrywanych izolatorów - podawanych zazwyczaj jedynie w konstrukcyjnych kartach katalogowych (nie znaleziono tych danych w dostępnej literaturze i krajowych katalogach izolatorów). Wydaje się on jednak dopuszczalny dla celów praktycznych, ponieważ:



Rys. 16. Zależności między parametrami A i B a współczynnikiem konstrukcyjnym $\alpha_{U/H}$ izolatorów liniowych (dane z tab. 5 i 6)

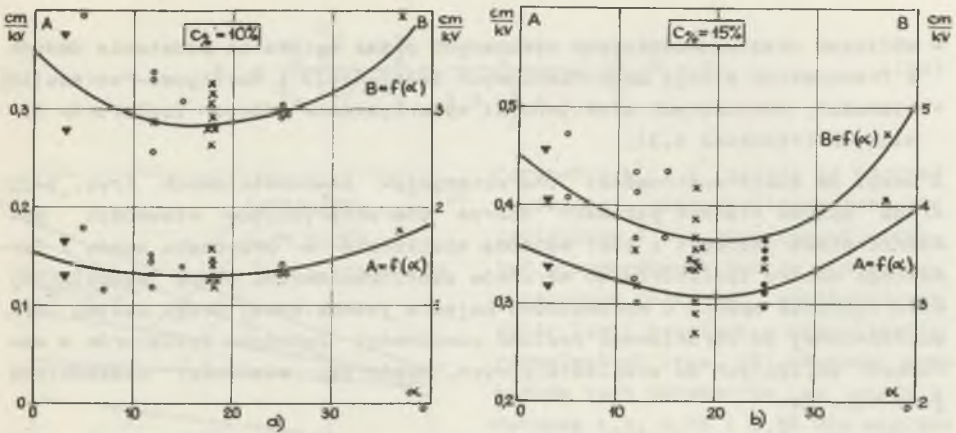
Izolatory: x - długopniowe o kłozach daszkowych, \blacktriangledown - długopniowe o kłozach śrubowych, o - długopniowe o kłozach schodkowych, ● - kołpakowe

- uwzględniając współczynnik a_u/H otrzymano silne korelacje liniowe (rys. 16) dla wszystkich grup konstrukcyjnych izolatorów oraz niewielkie rozrzuty wartości parametrów obliczeniowych A i B,
- długość montażowa jest dostępnym i powszechnie używanym parametrem konstrukcyjnym w praktyce eksploatacyjnej i projektowej.



Rys. 17. Przybliżone zależności między parametrami A i B a współczynnikiem konstrukcyjnym p/w izolatorów liniowych. (Oznaczenia jak na rys. 16)

Korelacje między parametrami obliczeniowymi a współczynnikami konstrukcyjnym p/w pokazano na rys. 17. Związki między tymi zmiennymi istnieją, ale są nieco słabsze od rozpatrywanych powyżej, bowiem stosunek korelacyjny nie przekracza 0,95 [1]. Ograniczono się do przybliżonej analizy danych, ponieważ charakter tych korelacji jest wyraźnie nieliniowy (krzywe aproksymacyjne zbliżone są do złożonych funkcji wykładniczych). Wykresy na rys. 17 wskazują, że wzrost współczynnika p/w powoduje zmniejszenie wartości parametrów A i B, czyli poprawę efektywności wykorzystania izolatorów w warunkach zabrudzeniowych. Izolatory posiadające $p/w = 1,5 \dots 2$ charakteryzują się dobrą efektywnością wykorzystania. Parametry obliczeniowe zmieniają się o ponad 30% ze wzrostem tego współczynnika od 0,8 do 2 (wpływ ten jest szczególnie widoczny dla wartości mniejszych). Wydaje się, że jest to spowodowane lepszą zdolnością do samooczyszczania się izolatorów o mniejszym zagęszczeniu klosza. Dlatego też, współczynnik p/w bywa niekiedy traktowany jako wskaźnik samooczyszczania izolatorów w naturalnych warunkach zabrudzeniowych [62]. Wprowadza się także bardziej złożone wskaźniki konstrukcyjne, uwzględniające również wpływ drogi upływu i kąta nachylenia klosza [60]. Wskaźniki te mają jednak dotychczas znaczenie prawie wyłącznie teoretyczne i ich przydatność do oceny stopnia samooczyszczalności nie została wystarczająco potwierdzona przez wyniki terenowych prób izolatorów.



Rys. 18. Przybliżone zależności między parametrami A i B a kątem nachylenia kłosa izolatorów liniowych. (Oznaczenia jak na rys. 16)

Przybliżone korelacje między parametrami A i B a kątem nachylenia kłosa dla różnych izolatorów, znajdują się na rys. 18. Zależności między tymi zmiennymi mają charakter nieliniowy, są znacznie słabsze od rozpatrywanych poprzednio, rozrzuty wartości są duże, a stosunek korelacyjny wynosi tylko 0,63. Funkcje aproksymacyjne parametrów obliczeniowych mają charakter paraboli, posiadających niezbyt wyraźne minimum dla kątów zbliżonych do ok. 20°. Ze względu na możliwość zmniejszenia efektywności wykorzystania konstrukcji w warunkach zabrudzeniowych, niekorzystne wydaje się stosowanie izolatorów o kątach nachylenia kłosa spoza przedziału 10... 30° (wzrost parametrów obliczeniowych o ponad 20-30% w stosunku do wartości najmniejszych). Nie dotyczy to jednak izolatorów śrubowych, których kłosa muszą posiadać niewielkie kąty nachylenia.

Należy podkreślić, że uzyskane rezultaty mają charakter przybliżony i dotyczą izolatorów w trudnych warunkach środowiskowych, panujących w wybranych stacjach doświadczalnych na terenie ZEOPd. Są one jednak zgodne z wynikami prób modelowych, wykonanych przez Z. Pohla w warunkach krajowych zabrudzeń przemysłowych - przedstawionych w monografii [49].

4.4. Ocena efektywności wykorzystania drogi upływu izolatorów

Droga upływu jest jednym z najważniejszych parametrów konstrukcyjnych izolatorów, wpływając na ich zawodność zabrudzeniową i naprężenia powierzchniowe w danych warunkach środowiskowych. Próby laboratoryjne i modelowe wskazują jednak, że efektywność jej wykorzystania zależy od rodzaju konstrukcji izolatorów [48, 49]. Potwierdzają to również wyniki:

- badań terenowych izolatorów w warunkach silnych zabrudzeń przemysłowych na terenie RFN [62],

- obliczeń niezawodnościowych wykonanych przez autora na podstawie danych z francuskich stacji zabrudzeniowych Saint-Avoid i Martigues-Ponteau [16]
- rozważań, dotyczących efektywności wykorzystania różnych izolatorów liniowych (rozdział 4.3).

Z uwagi na znaczne stromości charakterystyk zawodnościowych (rys. 14), droga upływu stanowi parametr dobrze charakteryzujący własności powierzchniowe izolacji i jest wygodną wielkością w przypadku oceny i formalnego doboru izolatorów do warunków zabrudzeniowych. Ocenę stopnia jej wykorzystania oparto o wprowadzone pojęcie jednostkowej drogi upływu (16), uzależnionej od określonego poziomu zawodności łańcucha izolatorów w warunkach zbliżonych do eksploatacyjnych. Wybór tej wielkości uzasadniony jest tym, że:

- parametry i współczynniki konstrukcyjne są nie tylko wzajemnie uzależnione, ale również związane z nią poprzez parametry obliczeniowe A i B dla założonych poziomów zawodności (rys. 16, 17, 18),
- jest ona najsilniej skorelowana ze współczynnikiem a_u/H , określającym drogę upływu przy zadanej długości montażowej izolatora (dobór innych parametrów konstrukcyjnych ograniczony jest przez ich wzajemne powiązania).

Po wprowadzeniu równań korelacyjnych (18) do zależności (17), jednostkowa droga upływu wyraża się następująco:

$$a_{u1}^* = \frac{a_u}{H} c \left(1 - \frac{a}{c} \ln P_{1\%}\right) + d \left(1 - \frac{b}{d} \ln P_{1\%}\right) = \frac{a_u}{H} k'_s + k''_s, \quad (19)$$

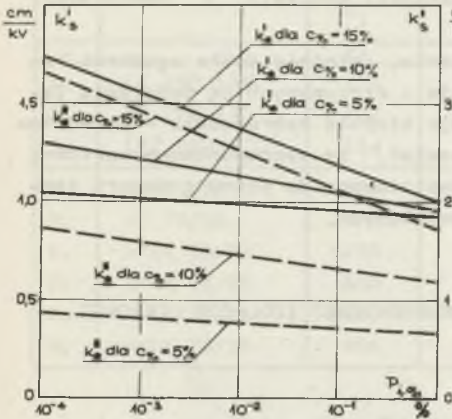
gdzie:

- $k'_s = c \left(1 - \frac{a}{c} \ln P_{1\%}\right) \frac{cm}{kV}$ - parametr nachylenia uzależniony od typu izolatorów i przyjętego poziomu zawodności,
- $k''_s = d \left(1 - \frac{b}{d} \ln P_{1\%}\right) \frac{cm}{kV}$ - parametr przesunięcia w określonych warunkach zabrudzeniowych dla zadanej zawodności rocznej łańcucha.

Wartości a, b, c, d są stałe dla rozpatrywanych warunków zabrudzeniowych i określonych odchyżeń standardowych $c_{\%}$ (rys. 16). Parametry k'_s i k''_s są również w tym przypadku wartościami stałymi dla zadanych zawodności $P_{1\%}$ i mogą być przydatne przy ocenie efektywności wykorzystania drogi upływu różnych typów izolatorów. Największa efektywność cechuje izolatory o niewielkich współczynnikach a_u/H (rys. 16). Ze względu na konieczność zapewnienia dostatecznej drogi upływu w warunkach zabrudzeniowych, nie mogą być one jednak praktycznie mniejsze od wartości 1,5 - przyjętej w dalszych obliczeniach za wartość odniesienia.

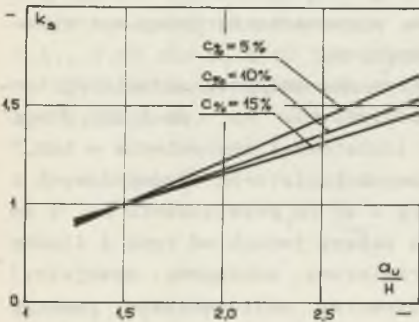
Po uwzględnieniu powyższych uwag, proponuje się wprowadzenie współczynnika, zwanego dalej współczynnikiem skuteczności wykorzystania drogi upływu. Stanowi on stosunek jednostkowych dróg upływu (19), określonych dla zadanej wartości a_u/H rozpatrywanego izolatora i przyjętej wartości odniesienia czyli:

$$k_s = \frac{k'_s \frac{a_u}{H} + k''_s}{k'_s 1,5 + k''_s} = \frac{1}{1,5 \frac{k'_s}{k''_s} + 1} \left(\frac{k'_s}{k''_s} \frac{a_u}{H} + 1 \right). \quad (20)$$



Rys. 19. Zależności parametrów k'_s i k''_s od rocznej zawodności łańcucha izolatorów (19)

Parametry k'_s i k''_s zależą od rocznej zawodności zabrudzeniowej łańcucha izolatorów i dla określonych odchyłek standardowych tworzą w półlogarytmicznym układzie współrzędnych zbiór linii prostych w przybliżeniu równoległych (rys. 19). Wartości stosunków tych parametrów są stałe i wynoszą 1,3, 0,75 i 0,55 dla względnych odchyłek 5, 10 i 15%. Pozwala to na przedstawienie wyrażenia (20) w postaci prostych zależności od a_u/H , podanych na rys. 20. Dla względnego odchylenia standardowego z przedziału 10...15% współczynnik skuteczności wykorzystania drogi wpływu izolatorów wynosi:



Rys. 20. Współczynnik skuteczności wykorzystania drogi wpływu izolatorów liniowych

$$k_s = (0,47 \dots 0,55) \left[(0,75 \dots 0,55) \frac{a_u}{H} + 1 \right], \quad (21)$$

natomiast w praktycznych obliczeniach można przyjąć, że:

$$k_s \approx 0,5 \left(0,6 \frac{a_u}{H} + 1 \right) = 0,3 \frac{a_u}{H} + 0,5 \quad (22)$$

Z przeprowadzonych rozważań wynika, że droga wpływu może być przydatna przy ocenie i doborze izolatorów liniowych dla warunków zabrudzeniowych, ale przy uwzględnieniu efektywności jej wykorzystania, co wymaga zmian obowiązujących wymagań [70]. Celowe jest posługiwanie się w tym przypadku skorygowaną drogą wpływu łańcucha - mniejszą na ogół od jej długości geometrycznej - która uwzględnia stopień wykorzystania konstrukcji izolatorów i wynosi:

$$a_{uisk} = \frac{a_u l}{k_s} \quad (23)$$

Łańcuchy złożone z różnych typów izolatorów liniowych wykazują bowiem znaczne zróżnicowanie stopnia wykorzystania drogi upływu w naturalnych warunkach zabrudzeniowych. Izolatory LP 75/17 posiadają przykładowo duży stopień wykorzystania, wynoszący 91%, izolatory LP 75/22 ok. 85%, natomiast izolatory VKLS 75/21 tylko 77% (podane wartości wynikają z odwrotności współczynnika skuteczności).

Pomimo różnego sposobu ujęcia zagadnienia, istnieje dobra zgodność rezultatów uzyskanych przez autora i wyników - otrzymanych na podstawie laboratoryjnych badań izolatorów dla różnego stopnia zabrudzenia - przedstawionych w pracy [45]. Pozwala to przypuszczać, że zaproponowane wartości współczynnika skuteczności k_g mogą być zastosowane do oceny i doboru izolacji w różnych warunkach zabrudzeń przemysłowych.

5. EKONOMICZNE ASPEKTY ZAWODNOŚCI ZABRUDZENIOWEJ IZOLACJI LINIOWEJ

5.1. Zdyskontowane nakłady inwestycyjne

Koszty izolacji nie przekraczają na ogół 10% całkowitych kosztów budowy linii wysokiego napięcia. Ze względu jednak na długi okres użytkowania, spotykane niekiedy tendencje do "oszczędnego" doboru izolacji mogą być powodem jej zwiększonej zawodności w czasie eksploatacji. Jednym z najskuteczniejszych sposobów zmniejszenia liczby wyłączeń zabrudzeniowych jest - poza zmniejszeniem zapylenia atmosfery - stosowanie bardziej wytrzymałych, ale na ogół droższych układów izolacyjnych.

Najprostszym, chociaż niepełnym miernikiem ekonomicznym określonej konstrukcji może być tzw. cena jednostkowa, odniesienia np. do 1 cm drogi upływu (lub rzadziej długości montażowej) izolatora. Z zestawienia w tab.7 wynika, że średnie ceny jednostkowe liniowych izolatorów długopniowych i kołpakowych wynoszą obecnie odpowiednio 3 i 4 zł w przeliczeniu na 1 cm ich drogi upływu. Cena łańcucha izolatorów zależy jednak od typu i liczby zastosowanych izolatorów, jego rodzaju (przelotowy, odciągowy, specjalny) i liczby rzędów izolatorów. Podstawowym elementem obliczeniowym jest w dalszych rozważaniach łańcuch równoważny jednorzędowemu przelotowemu (rozdział 3.2).

Łańcuchy izolatorów liniowych wysokiego napięcia wyposażone są w przeciwłukowy osprzęt ochronny, który powinien być uwzględniony w rachunku kosztów inwestycyjnych izolacji. Nie podano cen osprzętu ochronnego, ale na podstawie katalogów [75 i 76] można przyjąć w przybliżeniu, że stosunek ceny łańcucha w liniach 110 i 220 kV z osprzętem i bez osprzętu nie przekracza 1,1...1,2 (proporcje te utrzymują się praktycznie dla wszystkich rodzajów łańcuchów).

Obliczenia ekonomiczne dotyczące kosztów inwestycyjnych powinny być wykonywane w oparciu o rachunek dyskonta, zgodnie z wymogami wytycznych [74]

Tabela 7

Ceny izolatorów liniowych [73]; poziom cen z 1975 roku

Lp.	Typ izolatora	Cena C_1	Jednostkowa cena 1 cm		Uwagi
			drogi upływu	długości montażowej	
-	-	zł	zł/cm		-
1.	LK 250/145	108	4,5	7,4	Izolatory kołpakowe
2.	LK 280/170	127	4,2	7,5	
3.	LKZ 280/170	164	3,9	9,6	
4.	LP 75/17	500	2,2	2,0	Prototyp
5.	LP 75/22	975	3,4	2,3	
6.	LPZ ₆ 75/22	1230	4,0	9,7	Prototyp
7.	LPZ ₆ 75/15	500	2,1	3,9	Import z NRD
8.	VKLS 75/21	1080	3,2	8,5	
9.	VKLF 75/16	909	3,6	7,2	

Jest to równoznaczne z koniecznością posługiwania się zdyskontowanymi kosztami łańcuchów izolatorów, tj. sprowadzonymi do jednego roku ich użytkowania. Roczny koszt inwestycyjny określa się przy pomocy raty rozszerzonej reprodukcji, która uwzględnia dyrektywną wielkość akumulacji i amortyzacji dla założonego okresu eksploatacji. Rata rozszerzonej reprodukcji - dla wymaganej obecnie stopy akumulacji 8% - mieści się w przedziale 0,1...0,15 dla 20 i 10 lat użytkowania izolatorów.

Zdyskontowany roczny koszt inwestycyjny izolacji liniowej wynosi więc w przybliżeniu:

$$K_I \approx \sum_{i=1}^{3nm} \beta r C_1 = \sum_{i=1}^{3nm} \beta r c_1 a_{ui} \quad (24)$$

gdzie:

$\beta = 1,1 \dots 1,2$ - współczynnik uwzględniający koszt osprzętu ochronnego,

C_1 zł - cena łańcucha obliczeniowego bez osprzętu,

$r = 0,1 \dots 0,15$ - rata rozszerzonej reprodukcji,

$c_1 = 3 \dots 4 \frac{zł}{cm}$ - średnia cena 1 cm drogi upływu izolatora,

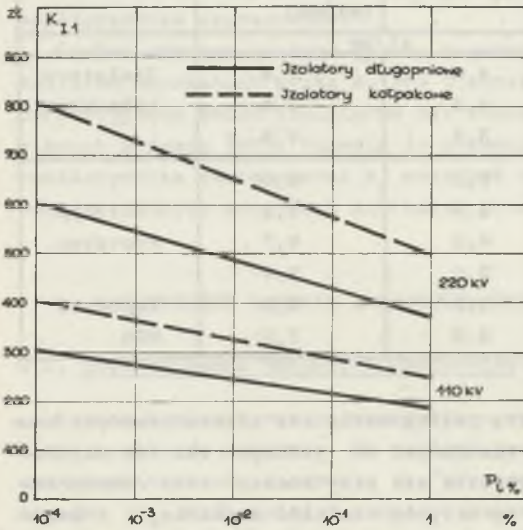
a_{ui} cm - droga upływu obliczeniowego łańcucha izolatorów.

Uwzględniając wzór (17), można powiązać koszty inwestycyjne z roczną zawadnością zabrudzeniową $P_{1\%}$ obliczeniowego łańcucha izolatorów, ponieważ:

$$K_I \approx \sum_{i=1}^{3nm} \beta r c_1 U_n(B-A \ln P_{1\%}) \quad \text{dla } 10^{-4}\% \leq P_{1\%} \leq 1\%, \quad (25)$$

a wynikający stąd roczny koszt inwestycyjny 1 łańcucha obliczeniowego wynosi:

$$K_{I1} = \beta r c_1 U_n B \left(1 - \frac{A}{B} \ln P_{1\%}\right). \quad (26)$$



Rys. 21. Zależności między rocznymi kosztami inwestycyjnymi a zawodnością łańcuchów obliczeniowych 110 i 220 kV (warunki zabrudzeniowe zbliżone do strefy IV)

nych warunkach zabrudzeniowych. W szerokim przedziale zawodności $10^{-4} \dots 1\%$ nie ulegają one dużym zmianom, czyli uzależnione są od zawodności tylko w niewielkim stopniu. W podanym przedziale zawodności, roczne koszty inwestycyjne łańcuchów 110 i 220 kV zwiększają się o 120 i 240 zł, tzn. rosną o ok. 60% w porównaniu z nakładami na łańcuchy o znacznej zawodności rocznej, wynoszącej 1%.

5.2. Koszty eksploatacji

Do profilaktycznych czynności eksploatacyjnych, mających na celu utrzymanie izolacji liniowej w stanie sprawności, należą czyszczenie izolatorów, pomiary rozkładu napięcia, obchody linii i hydrofobizacja izolatorów. W dalszych rozważaniach uwzględnia się tylko koszty czyszczenia, ponieważ:

- koszty obchodów, mających na celu sprawdzenie zewnętrznego stanu izolacji nie przekraczają 1% łącznych kosztów eksploatacji [33],
- pomiary rozkładu napięcia dotyczą tylko izolatorów kołpakowych, wycofywanych sukcesywnie z eksploatacji, a w związku z tym koszty tych zabiegów są pomijalne [11],

Wzór (26) pozwala ocenić związek między zdyskontowanym rocznym nakładem inwestycyjnym na łańcuch izolatorów a jego zawodnością zabrudzeniową podczas eksploatacji. Roczne koszty inwestycyjne łańcuchów obliczeniowych w liniach 110 i 220 kV - powiązane z określonymi poziomami zawodności - podano na rys. 21 (warunki zabrudzeniowe zbliżone do strefy IV). Obliczenia wykonano dla średnich wartości parametrów obliczeniowych z tab. 5, izolatorów długopniowych i kołpakowych ($c_1 = 3-4$ zł/cm), współczynnika poprawkowego $\beta = 1,1$ oraz $r = 0,15$. Koszty inwestycyjne są znaczne ze względu na duże zagrożenie izolacji w rozpatrywanych

- hydrofobizację izolatorów liniowych wykonuje się obecnie sporadycznie jedynie w strefach największych zabrudzeń.

Okresowe czyszczenie izolatorów - zaliczane do prac uciążliwych i niebezpiecznych - wykonywane jest po wyłączeniu linii. Zestawienie jednostkowych kosztów czyszczenia izolacji liniowej 110-220 kV na terenie ZEOPd znajduje się w zał. 1. Uwzględniono koszty transportu, stawki godzinowe przyjęto z narzutami (bez dodatków), ale pominięto amortyzację sprzętu używanego podczas czyszczenia. Określone średnie jednostkowe koszty czyszczenia w przeliczeniu na 1 słup, 1 km linii lub łańcuch, pomijając nieistotną zależność tych kosztów od drogi upływu czyszczonych łańcuchów izolatorów [11].

Częstość czyszczenia określa się obecnie na podstawie obserwacji zanieczyszczeń i długotrwałych doświadczeń eksploatacyjnych [33]. Próby jej wyznaczenia dla terenu GOP metodą zaproponowaną przez autora w pracy [11] znaleźć można w opracowaniu [38], ale wydaje się, że jest to sprawa wymagająca szerszego uzasadnienia w oparciu o wyniki badań terenowych.

Dla wykonywanej analizy wystarcza przybliżone określenie częstości czyszczenia w ciągu roku, powiązanej z zawodnością zabrudzeniową izolacji. Czyszczenie nie byłoby potrzebne w przypadku zastosowania łańcuchów o dostatecznie małej zawodności w określonych warunkach środowiskowych. Ponieważ konduktywności powłok zabrudzeniowych na izolatorach zbliżają się do wartości granicznych dla danego terenu po krótkim okresie czasu (rozdział 3.1), więc intensywność zakłóceń dąży szybko do wartości, które wystąpiłyby, gdyby izolacja nie była czyszczona. Czyszczenie nie ma charakteru losowego procesu odnowy i wpływa na zawodność izolacji w sposób ograniczony (przy okazji czyszczenia eliminuje się także izolatory uszkodzone). Może być ono rozpatrywane jako cykliczna odnowa uprzedzająca (profilaktyczna), która powinna być wykonywana wtedy, gdy przewidywana roczna zawodność zabrudzeniowa izolacji linii przekroczy poziom uznany za dopuszczalny. Należy uwzględnić w tym przypadku, że strumień zakłóceń w linii można sprowadzić do strumienia Poissona w zredukowanym roku obliczeniowym T' przyjmując największą sezonową intensywność zakłóceń λ_{imax} dla łańcucha obliczeniowego (rozdział 3.2) oraz pominąć wpływ wymiany nielicznych uszkodzonych izolatorów. Roczna częstość czyszczenia izolacji N_c dla takiego procesu odnowy nie powinna być mniejsza od oczekiwanej liczby wyłączeń linii [5, 32]. W praktycznych obliczeniach można przyjąć, że jest ona zbliżona do oczekiwanej liczby przeskoków zabrudzeniowych N_p w ciągu roku, czyli:

$$N_c \approx N_p = \sum_{i=1}^{3nm} \lambda_{imax} T' = - \sum_{i=1}^{3nm} \ln(1 - 0,01 P_{i\%}). \quad (27)$$

Roczna częstość czyszczenia określona jest w ten sposób z nadmiarem, ponieważ liczba przeskoków jest większa od liczby wyłączeń linii (działanie SPZ). Nie wydaje się ona jednak przesadnie wysoka, o czym świadczą wyniki przykładowych obliczeń dla 40 km linii 110 kV (jednostkowa liczebność łańcuchów wg danych z zał. 1). Przyjęto w uproszczeniu ten sam poziom zawodności dla każdego z 360 łańcuchów obliczeniowych, pomijając nieistotny wpływ łańcuchów odciągowych, których zawodność w porównaniu z analogicznymi łańcuchami przelotowymi jest wielokrotnie mniejsza w tych samych warunkach zabrudzeniowych (rozdział 3.1). W przypadku, gdy roczna zawodność 1 łańcucha wynosi 0,001...0,01%, izolacja linii nie wymaga praktycznie czyszczenia (raz na 27...28 lat). Dla zawodności 0,1% czyszczenie powinno być wykonywane co ok. 3 lata, a dopiero dla niedopuszczalnego poziomu 1% raz na 3 miesiące (co jest praktycznie niemożliwe).

Oczekiwany koszt czyszczenia izolacji linii w ciągu roku można oszacować następująco:

$$K_e \cong \sum_{i=1}^{3nm} k_{e1} N_c \cong - \sum_{i=1}^{3nm} k_{e1} \sum_{i=1}^{3nm} \ln(1 - 0,01 P_{1\%}), \quad (28)$$

natomiast odniesiony do 1 łańcucha obliczeniowego (przy uwzględnieniu przybliżonej jednorodności izolacji), jako:

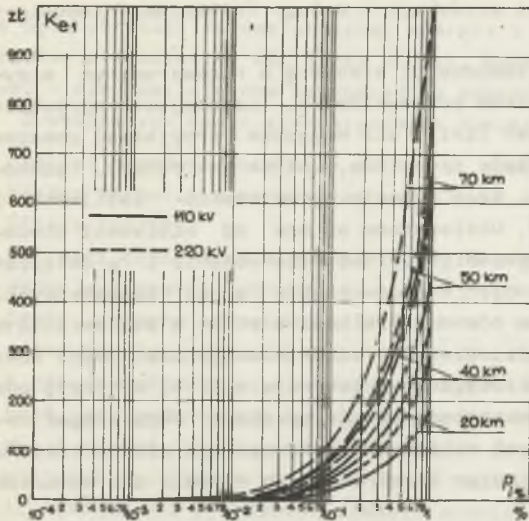
$$K_{e1} \cong - \sum_{i=1}^{3nm} k_{e1} \ln(1 - 0,01 P_{1\%}), \quad (29)$$

gdzie:

k_{e1} zł - średnie jednostkowe koszty czyszczenia w przeliczeniu na 1 łańcuch obliczeniowy 110 i 220 kV: 105 i 85 zł dla słupów przelotowych, 45 i 50 zł dla słupów mocnych.

W dalszych obliczeniach uwzględniono orientacyjne dane, pochodzące z Wydziału Eksploatacji ZEOPd w Katowicach i dotyczące długości linii oraz procentowych ich udziałów w różnych strefach zabrudzeniowych. Wg tych danych, średnia długość linii 110 kV wynosi na zabrudzeniowych terenach ZEOPd ok. 20...40 km, natomiast linii 220 kV dochodzi do 70 km. Na strefę I i II, jak również na strefę III, przypada po ok. 35 i 45%, natomiast na strefę IV 30 i 20% długości linii 110 i 220 kV (obserwuje się tendencję do powiększania się obszaru stref największych zabrudzeń).

Zależności między oczekiwanymi kosztami czyszczenia (29) a roczną zawodnością łańcuchów izolatorów obliczeniowych 110 i 220 kV określono na rys. 22 (dla kilku długości odcinków linii). Z uwagi na niewielkie częstości czyszczenia izolacji o znacznej wytrzymałości powierzchniowej, koszty te są pomijalne w przypadku, gdy zawodność 1 łańcucha obliczeniowego



Rys. 22. Zależności między średnimi kosztami czyszczenia łańcuchów obliczeniowych 110 i 220 kV a ich roczną zawadnością (dla różnych odcinków linii)

nie przekracza 0,01%, ale rosną bardzo szybko dla większych zawadności łańcuchów (co najmniej 10-krotnie, gdy zawadność zwiększa się o 1 rząd wielkości). Przykładowo, dla linii 110 i 220 kV o długościach 40 i 70 km, koszt czyszczenia i zdyskontowany nakład inwestycyjny - w przeliczeniu na 1 łańcuch obliczeniowy - wyrównują się w rozpatrywanych warunkach zabrudzeniowych dopiero dla rocznej zawadności łańcucha ok. 0,5%, ale przy założeniu poziomu np.

1%, koszty czyszczenia (29) są już 2...2,8-krotnie większe od nakładów (26).

5.3. Ocena rocznych kosztów zawadności zabrudzeniowej

Przeskoki zabrudzeniowe są przyczyną nieplanowych wyłączeń linii a w konsekwencji także strat gospodarczych, które w przybliżeniu można podzielić na:

- a) bezpośrednie straty odbiorców przemysłowych, spowodowane zakłóceniami procesów technologicznych i niewykonaniem planowanej produkcji na skutek przestoju,
- b) straty energetyki wynikające z kosztów usuwania awarii (wymiany uszkodzonych izolatorów i osprzętu) oraz postojów wyłączonych linii,
- c) pośrednie straty odbiorców na skutek ograniczenia produkcji i usług.

Określenie strat gospodarczych na skutek zawadności układów zasilających jest zagadnieniem skomplikowanym i tylko częściowo rozwiązany, pomimo dużej liczby publikacji, zawierających znacznie zróżnicowane metody obliczeniowe. Dla celów przeprowadzanej oceny wykorzystano propozycje metodyczne określania oczekiwanych wartości kosztów strat odbiorców i energetyki - podane w monografii [53]. Pominięto grupę kosztów związaną ze stratami odbiorców komunalnych, gdyż opracowanie nie dotyczy linii niskiego i średniego napięcia oraz nie analizowano pośrednich strat

odbiorców na skutek ograniczenia produkcji i usług (częściowa niewymierność i brak danych).

Najważniejszą grupę kosztów zawodności stanowią w rozpatrywanym przypadku bezpośrednie straty odbiorców przemysłowych, powstające wprawdzie tylko wskutek niektórych wyłączeń linii, ale mogących przyjmować znaczne rozmiary. Straty te zależą od wielu czynników, takich jak rodzaj, technologia i energochłonność procesu, czas trwania ograniczenia zasilania i chwila wyłączenia napięcia [53]. Uzależnione są one od wielkości niedostarczonej energii (przy uwzględnieniu systemu rezerwowania i przełączeń dyspozytorskich) oraz od ponoszonych z tego powodu strat jednostkowych. Straty te określa w przybliżeniu równoważnik kosztu strat w odniesieniu do jednostki niedostarczonej energii. Wartości oczekiwane jednostkowych kosztów strat krajowych odbiorców przemysłowych podano w tab. 8. Wynikają one z dotychczasowych badań, ale w ekstremalnych przypadkach mogą sięgać nawet do kilkuset zł/kWh. W dalszych obliczeniach rozpatruje się wartości z przedziału 10...50 zł/kWh, przyjmując 25 zł/kWh jako średnią dla warunków krajowych [53].

Tabela 8

Równoważnik kosztów strat zawodnościowych
w niektórych gałęziach przemysłu [53]

Lp.	Rodzaj gałęzi przemysłu	$E(k_z)$
-	-	zł/kWh
1	Górnictwo węgla kamiennego	24
2	Hutnictwo żelaza	9
3	Hutnictwo metali nieżelaznych	6
4	Przemysł elektrotechniczny	47
5	Przemysł maszynowy i konstrukcji metalowych	36
6	Przemysł materiałów budowlanych	8
7	Przemysł włókienniczy	56
Średnia krajowa		25

W celu określenia parametrów umożliwiających obliczenia kosztów zawodności zabrudzeniowej izolacji - szczególnie wartości niedostarczonej energii i czasów przerw w zasilaniu odbiorców - oparto się na wynikach własnych badań statystycznych, ponieważ brak jest na ten temat opracowań energetyki zawodowej. Analizę statystyczną wykonał autor przy pomocy dyplomantów w Instytucie Elektroenergetyki i Sterowania Układów Politechniki Śląskiej w 1975 r. Dane pochodziły bezpośrednio z kart badania zakłóceń, zapisów dyspozytorskich i protokołów poawaryjnych linii 110-220 kV na terenie ZEOPd z okresu 1965-1974. Pełniejsze informacje statystyczne uzyskano dla linii 110 kV. Ze względu na prawie całkowity brak danych nie moż-

na było określić niedostarczonej energii i liczby wyłączeń (powodujących przerwy w zasilaniu) dla linii 220 kV, ponieważ - poza nielicznymi wyjątkami - nie zasilają one bezpośrednio odbiorców.

Z wykonanych badań statystycznych wynika, że:

- rozkład prawdopodobieństwa wartości niedostarczonej energii jest rozkładem Weibulla o parametrze kształtu 0,42 i parametrze skali 2,1 MWh (linie 110 kV),
- wartości oczekiwane niedostarczonej energii i mocy w przeliczeniu na jedno wyłączenie zabrudzeniowe linii 110 kV, powodujące przerwę w zasilaniu, wynoszą odpowiednio 16,9 MWh i 4 MW,
- silna korelacja liniowa istnieje jedynie między niedostarczoną energią a czasem wyłączenia, powodującego ograniczeniem jej dostawy,
- brak jest praktycznie korelacji między wartością niedostarczonej energii a czasem trwania wyłączenia linii (z uszkodzeniami i bez uszkodzeń),
- wartości oczekiwane czasów trwania zakłócenia, rejestrowanych do chwili zakończenia przełączeń dyspozytorskich wynoszą 1,2 h dla linii 110 kV i 3,4 h dla linii 220 kV,
- stopień współzależności zakłóceń zabrudzeniowych w liniach dwutorowych oraz zbiegających się we wspólnych węzłach rozdzielczych nie przekracza kilku procent i może być w przybliżeniu pominięty.

Podana wartość niedostarczonej energii odnosi się tylko do takiego wyłączenia linii 110 kV, które powoduje przerwę w zasilaniu. Stosowanie wielokrotnego zasilania i dokonywanie przełączeń dyspozytorskich znacznie ogranicza straty odbiorców, ponieważ nie każde wyłączenie jest przyczyną nieciągłości ich zasilania. Stopień rezerwowania określono przy pomocy współczynnika, będącego stosunkiem oczekiwanej liczby wyłączeń powodujących ograniczenie w dostawie energii do łącznej liczby wyłączeń zabrudzeniowych. Oszacowany w ten sposób współczynnik skuteczności rezerwowania w sieci 110 kV na terenie ZEOPd wynosi 0,49 (przypadek zabrudzeniowego zagrożenia izolacji liniowej).

Iloczyn podanej wartości niedostarczonej energii i współczynnika rezerwowania określa energię, która nie została dostarczona odbiorcom z powodu jednego wyłączenia. W przypadku rozpatrywanych linii 110 kV, jej wartość oczekiwana wynosi 8,3 MWh, natomiast dla linii 220 kV wykonano obliczenia szacunkowe przy założeniu, że jest ona w przybliżeniu proporcjonalna do czasu trwania zakłócenia. Ponieważ oczekiwane wartości tych czasów dla rozpatrywanych linii 110 i 220 kV wynoszą odpowiednio 1,2 i 3,4 h więc wartość oczekiwana niedostarczonej energii na jedno wyłączenie zabrudzeniowe w linii 220 kV może być oceniona z proporcji na ok. 23,5 MWh.

Ze względu na zastosowanie SPZ, liczba wyłączeń jest na ogół znacznie mniejsza od liczby przeskoków, ale nieskuteczność samoczynnej likwidacji zwarć spowodowanych przeskokami zabrudzeniowymi jest znacznie większa niż w przypadku innych rodzajów zakłóceń i wynosi ona dla linii 110 i 220 kV odpowiednio 63 i 59%.

Uwzględniając wyniki dokonanej analizy, oczekiwane roczne koszty zawadności ponoszone przez odbiorców na skutek wyłączeń linii wysokiego napięcia mogą być określone następująco:

$$K_{\text{odb}} \cong E(k_z) k_o E(A_w) Q_{\text{SPZ}} N_p = -E(k_z) k_o E(A_w) Q_{\text{SPZ}} \sum_{i=1}^{3nm} \ln(1-0,01 P_{i\%}), \quad (30)$$

gdzie:

- N_p - - oczekiwana liczba przeskoków zabrudzeniowych (27) w ciągu roku,
- $E(k_z)$ $\frac{z\text{ł}}{\text{kWh}}$ - wartość oczekiwana równoważnika kosztu strat,
- k_o - - współczynnik skuteczności rezerwowania odbiorców,
- $E(A_w)$ kWh - wartość oczekiwana niedostarczonej energii podczas wyłączenia zabrudzeniowego, powodującego ograniczenie zasilania,
- $k_o E(A_w)$ kWh - wartość oczekiwana niedostarczonej energii wskutek 1 wyłączenia zabrudzeniowego,
- Q_{SPZ} - - prawdopodobieństwo nieudanego cyklu SPZ podczas zakłócenia zabrudzeniowego.

Koszty zawadności ponoszone przez energetykę związane są głównie z koniecznością możliwie najszybszego usunięcia skutków awarii, tj. wymiany uszkodzonych izolatorów i osprzętu sieciowego (w nomenklaturze używanej w energetyce zawodowej wymiana taka nazywana jest nieplanowym remontem). Ze statystycznej analizy autora obejmującej okres 10 lat eksploatacji - w ciągu którego zarejestrowano łącznie ponad 100 takich remontów na terenie ZEOPd - wynika, że:

- średni koszt nieplanowanego remontu w przeliczeniu na 1 wyłączenie powodujące uszkodzenie linii 110 i 220 kV można oszacować na 7,8 i 13 tys. zł,
- współczynnik uszkadzalności, będący stosunkiem oczekiwanej liczby wyłączeń z uszkodzeniami do łącznej liczby wyłączeń zabrudzeniowych, wynosi odpowiednio 0,54 i 0,44.

Straty wynikające z nieprzedanej energii nie przekraczają 1% całkowitych kosztów zawadności, a więc są do pominięcia [11, 53].

Oczekiwane roczne koszty strat energetyki, spowodowane zawadnością izolacji liniowej, określa w przybliżeniu zależność:

$$K_{\text{en}} \cong k_u \bar{k}_r Q_{\text{SZP}} N_p = -k_u \bar{k}_r Q_{\text{SZP}} \sum_{i=1}^{3nm} \ln(1-0,01 P_{i\%}), \quad (31)$$

gdzie:

- k_u - - współczynnik uszkadzalności izolacji,
- \bar{k}_r zł - średni koszt nieplanowanego remontu (usunięcia uszkodzenia linii spowodowanego 1 wyłączeniem zabrudzeniowym).

Zestawienie wartości parametrów i współczynników, potrzebnych do obliczenia kosztów zawodności izolacji linii 110 i 220 kV na terenie ZEOPd, znajduje się w zał. 2. Po uwzględnieniu wzorów (30) i (31), oczekiwane roczne koszty zawodności zabrudzeniowej izolacji linii wysokiego napięcia wynoszą:

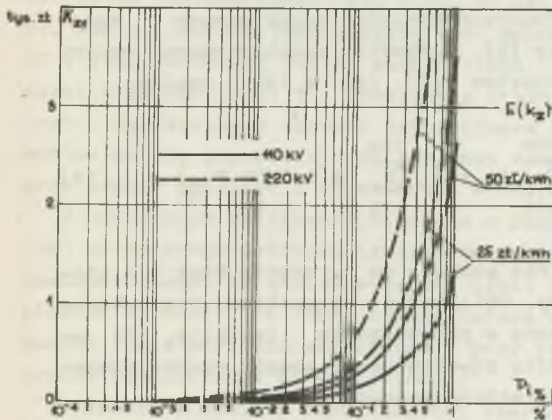
$$K_Z \cong -K_Z^* \sum_{i=1}^{3nm} \ln(1 - 0,01 P_{i\%}), \quad (32)$$

natomiast w odniesieniu do łańcucha obliczeniowego:

$$K_{Z1} \cong -K_Z^* \ln(1 - 0,01 P_{i\%}), \quad (33)$$

gdzie:

$K_Z^* = Q_{SPZ} [E(k_z) k_o E(A_w) + k_U \bar{k}_r] \cong (133...350) 10^3$ zł - średnie oczekiwane koszty zawodności odniesione do 1 wyłączenia zabrudzeniowego linii 110 i 220 kV.



Rys. 23. Roczne koszty zawodności zabrudzeniowej odniesione do 1 łańcucha obliczeniowego w liniach 110 i 220 kV

Zależności między oczekiwanymi rocznymi kosztami (33) a zawodnością zabrudzeniową 1 łańcucha obliczeniowego w liniach 110 i 220 kV określono na rys. 23 (przyjęto wartości równoważnika kosztu strat: 25 i 50 zł/kWh). Z obliczeń wynika, że rosną one bardzo wyraźnie, gdy roczna zawodność łańcucha przekracza 0,01% i są przy tym znacznie większe od kosztów eksploatacji (koszty zawodności na rys. 23 wyrażone są w tys. zł natomiast koszty eksploatacji na rys. 22 w zł). Przyjmując średnią wartość równoważnika kosztów

strat 25 zł/kWh dla linii 110 i 220 kV o długościach 40 i 70 km, koszty zawodności (33) są przykładowo ok. 3,5 krotnie większe od kosztów eksploatacji (29) (dane obliczeniowe z zał. 1 i 2).

Dla równoważnika kosztów strat z przedziału 25...50 zł/kWh, koszty zawodności (33) i zdyskontowane nakłady inwestycyjne (26) odniesione do 1 łańcucha 110 i 220 kV zbliżone są do siebie w rozpatrywanych warunkach zabrudzeniowych, gdy roczne zawodności łańcuchów wynoszą 0,02...0,07% (rys. 21 i 23). W przypadku znacznej zawodności, np. na poziomie 1%, koszty za-

wodności są już jednak 7...9 oraz 14...18 krotnie większe od zdyskontowanych nakładów inwestycyjnych.

6. TECHNICZNO-EKONOMICZNY SPOSÓB DOBORU IZOLATORÓW LINIOWYCH DO WARUNKÓW ZABRUDZENIOWYCH

6.1. Dopuszczalny poziom zawodności zabrudzeniowej

Ze wzrostem zawodności zabrudzeniowej - szczególnie po przekroczeniu określonych wartości - rosną koszty eksploatacji oraz koszty strat odbiorców i energetyki, a tylko nieznacznie zmniejszają się zdyskontowane nakłady inwestycyjne na izolację. Wynika stąd możliwość określenia poziomu zawodności, odpowiadającego najmniejszym całkowitym kosztom w całym okresie jej użytkowania. Ze względu na szybki wzrost kosztów strat i eksploatacji jest to jednoznaczne z zamierzeniem ograniczenia do uzasadnionego minimum liczby zabrudzeniowych wyłączeń linii. Wyznaczenie takiego poziomu zawodności - zwanego dalej dopuszczalnym - umożliwiałoby rachunek optymalizacyjny zdyskontowanych kosztów rocznych. Są one związane z zakupem izolacji, czynnościami eksploatacyjnymi oraz stratami odbiorców i energetyki i mogą być rozpatrywane w postaci rocznych wartości oczekiwanych - zgodnie z twierdzeniem odnowy Blackwella [5]. Całkowity zdyskontowany roczny koszt izolacji liniowej jest sumą kosztów (25), (28) i (32), czyli:

$$K \approx \sum_{i=1}^{3nm} \beta r c_1 U_n (B - A \ln P_{i\%}) - \left(\sum_{i=1}^{3nm} k_{e1} + K_z^* \right) \sum_{i=1}^{3nm} \ln(1 - 0,01 P_{i\%}). \quad (34)$$

Wzór (34) ma charakter ogólny, ale nie pozwala na wyrażenie kosztu w stosunkowo prostej postaci analitycznej. Obliczenia optymalizacyjne wykonano więc dla odcinka linii z jednorodną w przybliżeniu izolacją. Po uwzględnieniu tego założenia, całkowity zdyskontowany koszt roczny odniesiony do obliczeniowego łańcucha izolatorów wynosi:

$$K_1 \approx \beta r c_1 U_n (B - A \ln P_{i\%}) - (3nm k_{e1} + K_z^*) \ln(1 - 0,01 P_{i\%}). \quad (35)$$

Dopuszczalny poziom zawodności takiego łańcucha określają warunki:

$$\frac{dK_1}{dP_{i\%}} = 0 \quad \text{oraz} \quad \frac{d^2K_1}{dP_{i\%}^2} > 0, \quad (36)$$

po uwzględnieniu których otrzymuje się:

$$\frac{dK_1}{dP_{i\%}} = - \frac{1}{P_{i\%}} \beta r c_1 U_n A + \frac{1}{100 - P_{i\%}} (3nm k_{e1} + K_z^*) = 0 \quad (37)$$

oraz

$$\frac{d^2 K_1}{dP_{1\%}^2} = \frac{1}{P_{1\%}^2} \beta r c_1 U_n A + \frac{1}{(100 - P_{1\%})^2} (3nm k_{e1} + K_z^*) > 0, \quad (38)$$

ponieważ oba składniki są dodatnie.

Dopuszczalny poziom rocznej zawodności zabrudzeniowej łańcucha obliczeniowego stanowi rozwiązanie równania (37) i wyrażony jest następująco:

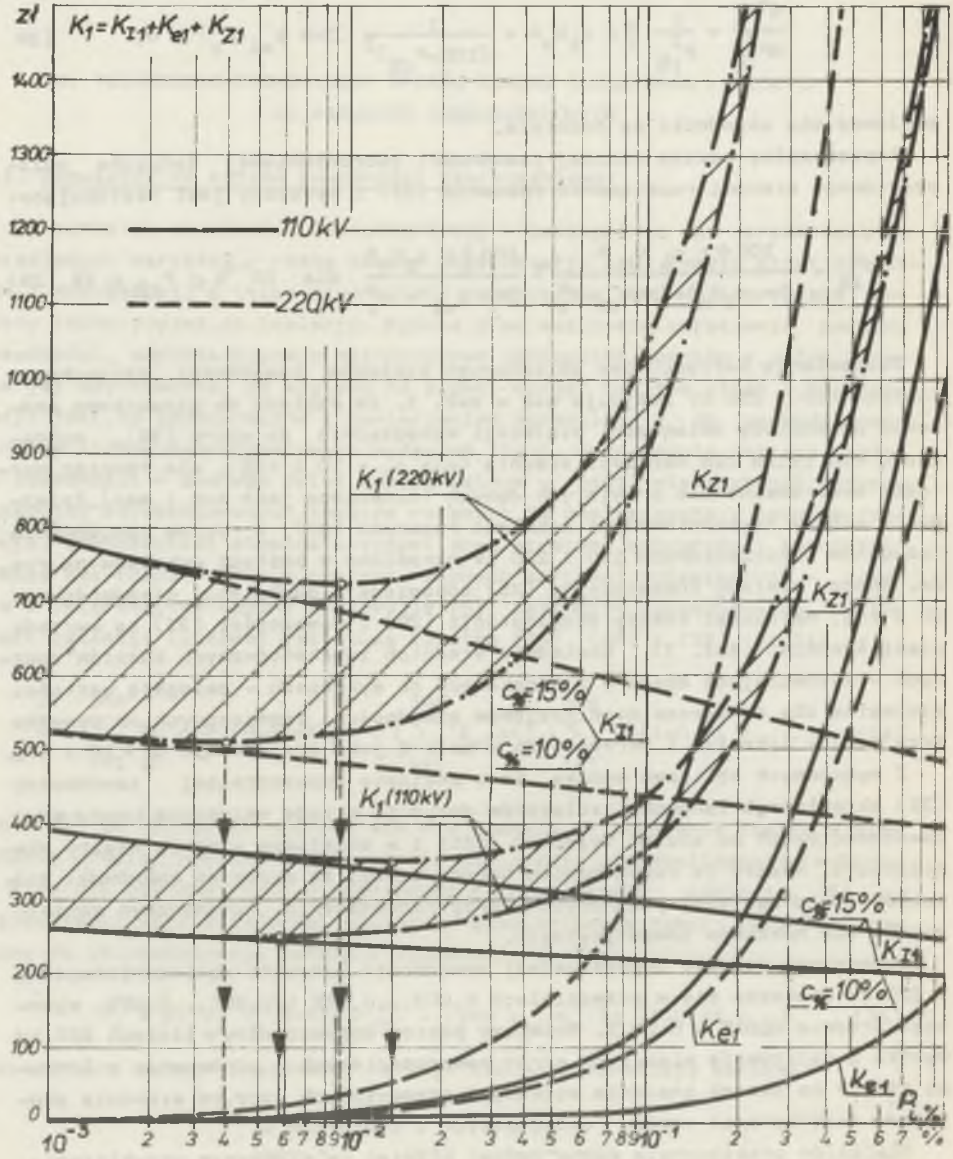
$$P_{1\%}^d = \frac{100 \beta r c_1 U_n A}{\beta r c_1 U_n A + 3nm k_{e1} + K_z^*} \approx \frac{100 \beta r c_1 U_n A}{3nm k_{e1} + K_z^*} \quad \text{dla } 10^{-4}\% \leq P_{1\%} \leq 1\%. \quad (39)$$

Zestawienie wartości tak obliczonych poziomów zawodności łańcuchów w liniach 110 i 220 kV znajduje się w zał. 3. Ze względu na stosunkowo szerokie przedziały zmienności wielkości wchodzących do wzoru (39), wyznaczono nie tylko ich wartości średnie (dla $c_{\%} = 10$ i 15%), ale również wartości ekstremalne dla przyjętych danych (oznaczone jako min i max). Zależności między zdyskontowanymi kosztami rocznymi (35) a roczną zawodnością łańcuchów obliczeniowych 110 i 220 kV określono w postaci wykresów na rys. 24. Roczne nakłady inwestycyjne (26) odpowiadają odchyleniu standardowemu 10 i 15%, natomiast koszty eksploatacji (29) i zawodności (33) są wartościami średnimi (zał. 3). Obwiednie średnich zdyskontowanych kosztów rocznych - wyznaczające obszary zakresowane na wykresach - osiągają wartości minimalne dla dopuszczalnych poziomów zawodności, zaznaczonych na rysunku przy pomocy strzałek i określonych w zał. 3 jako średnie dla $c_{\%} = 10$ i 15% .

Z wykonanych obliczeń wynika, że o poziomie dopuszczalnej zawodności (39) określonego łańcucha izolatorów decydują przede wszystkim koszty strat zawodnościowych na skutek wyłączeń linii i w mniejszym stopniu koszty eksploatacji. Koszty te rosną bowiem bardzo szybko ze wzrostem zawodności łańcuchów (duże wartości pochodnych), przy jednocześnie nieznacznym zmniejszaniu się nakładów inwestycyjnych.

Wyznaczone poziomy dopuszczalnej zawodności łańcucha obliczeniowego 110 i 220 kV mieszczą się w przedziałach 0,003...0,03% i 0,002...0,02%, wynosząc średnio 0,01% i 0,007%. Mniejszy poziom dopuszczalny w liniach 220 kV wynika z relatywnie większych strat zawodnościowych w porównaniu z liniami 110 kV na skutek znacznie większych przesyłanych mocy, co utrudnia skuteczne rezerwowanie węzłów rozdzielczych i odbiorców.

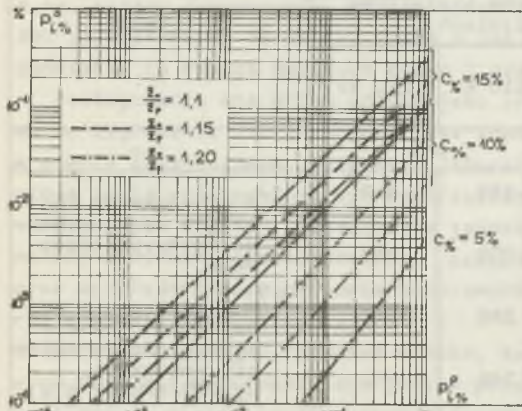
Dla celów praktycznych można jednak przyjąć w pierwszym przybliżeniu, że dopuszczalna zawodność łańcucha w obu przypadkach linii nie powinna przekraczać poziomu 0,01% w ciągu roku, gdyż dla wartości większych następuje gwałtowny wzrost kosztów zawodności i eksploatacji (rys. 24). Stosując takie łańcuchy można znacznie ograniczyć lub nawet wyeliminować okresowe czyszczenie izolatorów, ponieważ oczekiwana liczba przeskoków będzie wtedy bardzo mała (rozdział 5,2).



Rys. 24. Zależności między średnimi zdyskontowanymi kosztami rocznymi dla obliczeniowych łańcuchów 110 i 220 kV a ich roczną zawodnością zabrudzeniową (dane w zał. 3)

Oznaczenia: K_{I1} - nakład inwestycyjny (26), K_{e1} - koszt eksploatacji (29), K_{Z1} - koszt zawodności (33)

Ze wzoru (39) można określić dopuszczalny poziom zawodności dla różnych rodzajów łańcuchów, uwzględniając ich specyfikę zawieszenia na konstrukcjach wsporczych (ukośne położenie łańcuchów odciągowych i elementów układów specjalnych). Największą zawodność wykazują w czasie eksploatacji łańcuchy obliczeniowe, znajdujące się w niekorzystnym położeniu pionowym (rozdział 3.1). Łańcuch odciągowy o liczbnym składzie elementów łańcucha obliczeniowego, wykazującego dopuszczalny poziom zawodności, będzie posiadać zawodność znacznie mniejszą od 0,01% (wynika to z jego większego zabrudzeniowego zapasu wytrzymałościowego). Z dotychczasowych badań wynika, że stosunek zapasów wytrzymałościowych takich łańcuchów dla względnych odchyień zabrudzeniowego napięcia przeskoku $c_{\%} = 10...15\%$, wynosi średnio $\bar{z}_o/\bar{z}_p = 1,15$ [10, 11]. Pozwala to na wyznaczenie przybliżonej zależności między zawodnością łańcucha odciągowego i analogicznego łańcucha przelotowego w tych samych warunkach zabrudzeniowych - podanych na rys. 25.



Rys. 25. Zależności między zawodnościami łańcucha odciągowego i przelotowego dla różnych wartości stosunków ich zabrudzeniowych zapasów wytrzymałościowych \bar{z}_o/\bar{z}_p oraz odchyień standardowych $c_{\%}$

Obliczenia wykonano w oparciu o metodę zaproponowaną przez autora w pracy [11], przyjmując $c_{\%} = 5...15\%$ i $\bar{z}_o/\bar{z}_p = 1,1...1,2$. Z wykresów wynika, że zawodność łańcucha odciągowego jest znacznie mniejsza od analogicznego łańcucha przelotowego w tych samych warunkach środowiskowych (np. dla $\bar{z}_o/\bar{z}_p = 1,15$ i $c_{\%} = 10\%$ aż ok. 30 krotnie).

Ze względu na konieczność zachowania jednorodnego charakteru izolacji w podobnych warunkach zabrudzeniowych, należy dążyć jednak do stosowania takiego samego składu izolatorów w rzędach łańcuchów przelotowych i odciągowych.

Nieliczne układy specjalne ŁPY i ŁPV można traktować jako układy złożone z elementów obliczeniowych w łańcuchu przelotowym i odciągowym. Uproszczenie to wydaje się dopuszczalne ze względu na brak istotnej różnicy między wytrzymałością izolatorów odchylonych od pionu o kąt $20...90^{\circ}$ [10, 59]. Koszty czyszczenia układów specjalnych są przy tym praktycznie do pominięcia, ponieważ czyszczone są bardzo rzadko z powodu dużej wytrzymałości i dobrej samooczyszczalności izolatorów.

6.2. Proponowane ujęcie doboru izolatorów

Z wymagań omówionych w rozdziale 1.1 rozpatruje się dalej tylko wymagania elektryczne, dotyczące wytrzymałości izolatorów liniowych w warunkach zwiększonej upływności powierzchniowej. Są one obecnie sprecyzowane w normie [70] przez określenie minimalnych jednostkowych dróg upływu izolatorów dla 4 stref zabrudzeniowych. Wartości te, odniesione do znamionowego napięcia międzyprzewodowego (określone przez normę) i najwyższego dopuszczalnego fazowego napięcia roboczego (przeliczone przez autora) zawie-ra tab. 9. Obliczono również wymaganą drogę upływu łańcuchów 110 i 220 kV.

Tabela 9

Wymagane minimalne jednostkowe drogi upływu izolatorów liniowych na terenach zabrudzeniowych wg PN-68/E-06303 [70]

Strefa zabrudzenia	Wymagana minimalna jednostkowa droga upływu		Wymagana minimalna droga upływu łańcucha izolatorów w liniach		Uwagi
	$\frac{a_{umin}}{U_n}$ ¹⁾	$\frac{a_{umin}}{U_{fr}}$ ²⁾	110 kV	220 kV	
-	cm/kV		cm		-
I	1,5	2,3	165	330	1) W stosunku do napięcia znamionowego międzyprzewodowego 2) W przeliczeniu na najwyższe dopuszczalne fazowe napięcie robocze $U_{fr}=71-142$ kV dla sieci 110-220 kV [69]
II	1,9	2,9	209	418	
III	2,6	4,0	286	572	
IV	3,5	5,4	386	770	

Obecny sposób doboru - wygodny pod względem obliczeniowym - ma jednak charakter przybliżony, ponieważ nie uwzględnia wyraźnego zróżnicowania powierzchniowych własności izolatorów w warunkach eksploatacyjnych (rozdział 4.2 i 4.3). Norma [70] dopuszcza wprawdzie stosowanie łańcuchów, złożonych z izolatorów specjalnych o krótszych drogach upływu od podanych w tab. 9 pod warunkiem, że ich zabrudzeniowe napięcia wytrzymywane są nie mniejsze niż dla izolatorów typowych. Słuszne to postanowienie jest jednak trudne do praktycznego wykorzystania ze względu na znacznie ograniczone możliwości wykonywania w kraju prób laboratoryjnych. Obecny sposób doboru izolatorów nie jest ścisły, ponieważ:

- droga upływu nie jest jedynym oraz wystarczającym miernikiem wytrzymałości i zawodności zabrudzeniowej niezależnie od typu izolatorów,

- nie określa wyraźnie wymagań niezawodnościowych a opiera się jedynie na arbitralnych ustaleniach, wynikających z doświadczeń eksploatacyjnych,
- nie uwzględnia ekonomicznych aspektów zagadnienia, a szczególnie kosztów zawodności dla wieloletniego czasu eksploatacji.

Pomimo złożoności problemu, istnieje konieczność szerszego ujęcia sposobu doboru, opartego na przesłankach techniczno-ekonomicznych dla całego okresu użytkowania izolacji. Techniczno-ekonomiczne ujęcie doboru ma na celu wytypowanie rozwiązań, których zawodność zabrudzeniowa nie przekracza uzasadnionego poziomu w eksploatacji, przy jednoczesnym zmniejszeniu częstości lub nawet wyeliminowaniu czyszczenia izolatorów. Należy przy tym rozważyć potrzebę zróżnicowania wymagań niezawodnościowych stawianych izolacji linii 110...400 kV, ponieważ spełniają one różną rolę w układzie elektroenergetycznym. Linie 110 kV są coraz częściej liniami rozdzielczymi, natomiast linie 220 kV (a szczególnie 400 kV) przenoszą znaczne moce do dużych węzłów rozdzielczych. O celowości takiego zróżnicowania świadczy m.in. niższy dopuszczalny poziom zawodności dla łańcucha obliczeniowego 220 kV w stosunku do 110 kV (dane z zał. 3 i wykresy na rys. 24), ale zagadnienie to wymaga dalszych badań i uzasadnień.

Posługiwanie się drogą upływu jako kryterium doboru izolatorów ze względu na zagrożenie zabrudzeniowe jest zdaniem autora możliwe i uzasadnione w etapie przejściowym, natomiast laboratoryjne charakterystyki zabrudzeniowe izolatorów powinny być wykorzystane w tym celu w miarę uzyskiwania wiarygodnych wyników. Niezależnie jednak od przyjętego kryterium doboru należy w wyraźny sposób określić uzasadnione wymagania niezawodnościowe oraz uwzględnić różnice powierzchniowych własności różnych typów izolatorów w czasie eksploatacji.

Z dotychczasowych rozważań wynika, że kryterium minimalnych jednostkowych dróg upływu uzasadnione jest w przypadku, gdy wymagane wartości uzależnione są nie tylko od warunków środowiskowych, ale również od poziomu dopuszczalnej zawodności (przy uwzględnieniu własności różnych typów izolatorów). Stosując taki sposób doboru należy uwzględnić, że:

- 1) wymagana minimalna jednostkowa droga upływu $s_{\text{umín}}^*$ powinna zapewniać taką wytrzymałość łańcucha obliczeniowego, złożonego z izolatorów o dobrej efektywności wykorzystania własności powierzchniowych, aby jego roczna zawodność nie przekraczała 0,01%; powinna być ona odniesiona do największego fazowego napięcia roboczego,
- 2) przyjęcie łańcucha obliczeniowego do określonych warunków zabrudzeniowych powinno być uzależnione od wartości jego skorygowanej drogi upływu (23), a więc przy uwzględnieniu efektywności wykorzystania własności powierzchniowych izolatorów,
- 3) rzędy łańcuchów odciągowych i układów specjalnych oraz łańcuchów obliczeniowych o dopuszczalnym poziomie zawodności powinny posiadać w określonych warunkach zabrudzeniowych możliwie te same składy liczebne izolatorów,

4) podział terenu ze względu na zagrożenie zabrudzeniowe wymaga aktualizacji w oparciu o ujednoczone kryteria w skali międzynarodowej; celowym wydaje się przyjęcie podziału na 3 strefy zabrudzeniowe (po połączeniu obecnych stref I i II).

Warunkiem przyjęcia łańcucha izolatorów do określonych warunków zabrudzeniowych jest spełnienie zależności:

$$a_{uisk} = \frac{a_{ui}}{k_s} \geq a_{umin}^* U_{fr} = a_{uiw} \quad \text{albo} \quad \frac{a_{uisk}}{U_{fr}} = \frac{a_{ui}}{k_s U_{fr}} \geq a_{umin}^* \quad (40)$$

gdzie:

- a_{umin}^* $\frac{cm}{kV}$ - wymagana minimalna jednostkowa droga upływu dla określonych warunków zabrudzeniowych,
- a_{uiw} cm - wymagana minimalna droga upływu łańcucha,
- U_{fr} kV - najwyższe fazowe napięcie robocze linii.

Podobne ujęcie doboru znaleźć można w wytycznych, opracowanych niedawno w Związku Radzieckim [71]. Ze względu na inną specyfikę czynników środowiskowych i meteorologicznych oraz inne typy stosowanych izolatorów liniowych, dane radzieckie mogą być w kraju tylko częściowo przydatne. W przypadku modyfikacji podziału terenu na strefy i wyznaczania wymaganych minimalnych jednostkowych dróg upływu należy uwzględnić aktualne zalecenia IEC [72].

Brak danych dla warunków krajowych nie pozwolił na zaproponowanie jednoznacznych wartości a_{umin}^* - dla różnych stref zabrudzeniowych. Dla zilustrowania proponowanego sposobu doboru wykonano przykład obliczeniowy dla łańcuchów 110 i 220 kV w warunkach dużego zanieczyszczenia atmosfery (stacje doświadczalne 110 kV Zabrze i Bolesław). Rozpatrzono izolatory LP 75/17, LP 75/22 i VKLS 72/21, przyjmując dopuszczalną roczną zawodność łańcuchów na poziomie 0,01%. Wymagana minimalna jednostkowa droga upływu w rozpatrywanych warunkach środowiskowych wynika z rys.16 oraz wzoru (17) i wynosi $a_{umin}^* = 4,85 \text{ cm/kV}$ w odniesieniu do najwyższego fazowego napięcia roboczego (dla odchylenia standardowego 10% i współczynnika $a_u/H=1,5$). Z wyników obliczeń podanych w tab. 10 wynika, że:

- jeden (110 kV) lub dwa (220 kV) rozpatrywane izolatory mają zawodność zabrudzeniową większą od dopuszczalnej,
- najlepszymi rozwiązaniami wydają się łańcuchy przelotowe 2 LP 75/17 (110 kV) i 3 LP 75/22 (220 kV).

Zastosowanie takich łańcuchów może być jednak utrudnione z powodu ograniczonych gabarytów słupów, toteż rozpatrzono możliwość wykorzystania układów specjalnych łPV (w kształcie odwróconej litery V). Jeśli przyjęć, że stosunek zapasów wytrzymałościowych 1 rzędu w układzie łPV i łańcucha obliczeniowego o dopuszczalnym poziomie zawodności wynosi 1,15 dla $c_{\%} = 10\%$

Tabela 10

Przykład doboru łańcuchów izolatorów liniowych 110 i 220 kV wg kryterium (40)

Lp.	Typ izolatora	$\frac{a_u}{H}$ ¹⁾	a_u ¹⁾	k_s ²⁾	a_{usk} ³⁾	Linia o napięciu znamionowym						Uwagi	
						110 kV			220 kV				
						a_{iuw}	$n^4)$	a_{uisk}	a_{uiw}	$n^4)$	a_{uisk}		
-	-	-	em	-	cm	-	-	cm	cm	-	cm	-	-
1	LP 75/17	2,0	225	1,1	205	2	409	409	689	4	818	1) tab. 6 2) wzór (22)	
2	LP 75/22	2,25	286	1,17	244	2	489	489	689	3	733	3) wzór (23)	
3	VKLS 75/21	2,64	335	1,29	259	2	519	519	689	3	779	4) Liczba izolatorów w łańcuchu	

(rozdział 6.1), to roczna zawodność zabrudzeniowa całego układu specjalnego w tych samych warunkach środowiskowych jest na poziomie 0,0005% (rys. 25). W przypadku zastosowania łańcucha obliczeniowego, zawodności tej odpowiadałaby wymagana jednostkowa droga upływu 5,39 cm/kV. Zakładając, że charakterystyki (17) dla elementu układu specjalnego i łańcucha obliczeniowego są w tych samych warunkach środowiskowych przesunięte równolegle ($A = \text{const}$), wymagana minimalna jednostkowa droga upływu wynosi dla układu ŁPV tylko 4,17 cm/kV, zapewniając dotrzymanie dopuszczalnego poziomu zawodności 0,01%. Wymagane długości dróg upływu izolatorów 1 rzędu układów specjalnych 110 i 220 kV wynoszą więc odpowiednio 296 i 592 cm, co jednak nie pozwala na zmniejszenie liczby izolatorów w porównaniu z łańcuchami przelotowymi z tab. 10 (z wyjątkiem układu specjalnego 220 kV, złożonego z 3 izolatorów 17-kloszowych o skorygowanej drodze upływu 614 cm). W rozpatrywanych warunkach zabrudzeniowych należałoby więc zastosować w liniach 110 i 220 kV odpowiednio 2 i 3 izolatory LP 75/17 w każdym rzędzie układu specjalnego ŁPV (gdyby zawieszenie pionowe łańcuchów przelotowych okazało się niemożliwe).

Proponowany sposób doboru izolatorów - bardziej ścisły od obecnie obowiązującego - uwzględnia wymagania niezawodnościowe i częściowo wpływ kształtu izolatorów na ich wytrzymałość powierzchniową, ale dalszym krokiem w tym zakresie powinno być wykorzystanie laboratoryjnych charakterystyk zabrudzeniowych. Wynika to z potrzeby określenia w przyszłości napięć probierczych, uwzględniających również własności powierzchniowe różnych tworzyw izolacyjnych i zapewniających spełnienie uzasadnionych wymagań niezawodnościowych w czasie eksploatacji. W takim kierunku prowadzone są prace nad nowelizacją powszechnie krytykowanej normy [70]; założenia nowelizacyjne zostały zatwierdzone w grudniu 1976 r.

Praktyczne zastosowanie tego nowocześniejszego sposobu doboru wymaga:

- określenia laboratoryjnych charakterystyk zabrudzeniowych dla co najmniej typowych izolatorów (łańcuchów), odtwarzających naturalne warunki środowiskowe i umożliwiających wyznaczenie parametrów rozkładu prawdopodobieństwa napięcia przeskoku, tj. wartości średniej (50-procentowej) i odchylenia standardowego [8, 11, 49],
- opracowania metod pomiaru parametrów zapylenia oraz ustalenia kryteriów podziału terenu na strefy zabrudzeniowe, celem uzyskania aktualnych map rozkładu zapylenia [34, 36],
- granicznych wartości konduktywności powierzchniowej powłok naturalnie zabrudzonych izolatorów we wszystkich strefach zabrudzeniowych [31, 34].

Wymagania napięciowe powinny być tak ustalone, aby roczna zawodność obliczeniowego łańcucha izolatorów nie przekraczała uzasadnionego pod względem techniczno-ekonomicznym poziomu dopuszczalnego 0,01%. Można je wyrazić przy pomocy stosunku 50-procentowego napięcia przeskoku do najwyższego roboczego napięcia fazowego (średniego zapasu wytrzymałościowego łań-

cucha \bar{z}_1) - w ujęciu zaproponowanym przez autora w pracy [11]. Wartość tego zapasu powinna znajdować się dla łańcucha obliczeniowego w przedziale 1,7...1,75, który dla względnego odchylenia standardowego $c_{\%} = 10...15\%$ odpowiada w przybliżeniu dopuszczalnej zawodności rocznej 0,01% [11, 12]. Ze względu na konieczność zachowania jednorodności izolacji, należy dążyć do stosowania tych samych zestawów izolatorów również w łańcuchach odciągowych.

Dobór izolatorów ze względu na zagrożenie zabrudzeniowe sprowadza się więc w tym przypadku do:

- zakwalifikowania terenu do jednej ze stref zabrudzeniowych i przyjęcia granicznej wartości konduktywności powierzchniowej powłoki,
- odczytania z charakterystyki laboratoryjnej 50-procentowego napięcia przeskoku dla łańcucha złożonego z rozpatrywanych izolatorów; dla linii o napięciu znamionowym nie większym od 400 kV wystarcza znajomość wyników badania 1 izolatora (praktycznie liniowa zależność między napięciem przeskoku a liczbą elementów w łańcuchu),
- obliczenia średniego zapasu wytrzymałościowego łańcucha i porównania go z wartością dopuszczalną (łańcuch spełnia wymagania jeśli obliczona wartość jest nie mniejsza od wymaganej).

Ze względu na trudności odtworzenia naturalnych warunków zabrudzeniowych przy pomocy prób laboratoryjnych, można obniżyć odczytywane z charakterystyk wartości napięcia przeskoku o kilka-kilkanaście procent. Jest to sposób przybliżony i dyskusyjny, pozwalający jednak na zmniejszenie ryzyka zbyt optymistycznej oceny wytrzymałości izolatorów.

Problem doboru izolatorów ze względu na zagrożenie zabrudzeniowe stanowi zagadnienie skomplikowane, ciągle aktualne i niecałkowicie uzgodnione w skali międzynarodowej. Konieczność dalszej poprawy niezawodności linii powoduje, że w miarę poznawania zjawisk fizycznych związanych z przeskokiem zabrudzeniowym oraz postępem technicznym i technologicznym w produkcji izolatorów, poglądy na ten temat ulegają modyfikacji. Prace prowadzone są w ramach komisji IEC, a szczególnie Komitetu Technicznego TC 36 (Izolatory). Ze względu na obserwowany wzrost zanieczyszczenia atmosfery, zagadnienie to wymaga dalszej uwagi - szczególnie w zakresie izolacji linii bardzo wysokiego napięcia.

7. ZARYS KIERUNKÓW DALSZYCH BADAŃ I TECHNICZNYCH ROZWIĄZAŃ IZOLACJI

W pracy podkreślono techniczne i ekonomiczne znaczenie zawodności izolacji w warunkach zabrudzeniowych, jako czynnika decydującego o pracy linii wysokiego napięcia i ciągłości zasilania odbiorców. Ze względu na duże znaczenie problemu, dalsze badania zawodnościowe izolatorów wydają się konieczne zarówno dla potrzeb eksploatacyjnych jak i konstruktorskich. Ewentualne próby zastosowania techniki analogowej w celu modelowania za-

wodności w zadanych warunkach środowiskowych będą możliwe dopiero po uzyskaniu większej liczby wyników terenowych prób izolacji w stacjach doświadczalnych, a szczególnie po przeprowadzeniu badań w specjalistycznym laboratorium zabrudzeniowym. Istnieje potrzeba kontynuowania lub podjęcia następujących badań:

- dalszej rejestracji parametrów zapylenia, czynników meteorologicznych i czasów do przeskoiku dla różnych układów izolacyjnych w unowocześnionych stacjach doświadczalnych (na terenach o różnym stopniu i charakterze zanieczyszczenia atmosfery),
- rozszerzenia zakresu pomiarów, mających na celu eksploatacyjną ocenę rzeczywistego stopnia zagrożenia zabrudzeniowego i uaktualnienie podziału terenu na strefy zabrudzeniowe przy zastosowaniu możliwie jednolitych kryteriów w skali międzynarodowej,
- oceny efektywności samoczyszczania się różnych izolatorów w czasie eksploatacji,
- określenia korelacji między wynikami zabrudzeniowych prób terenowych a wynikami badań laboratoryjnych różnych izolatorów w krajowych warunkach środowiskowych (w celu uzyskania dostatecznej odtwarzalności warunków naturalnych).

Przeprowadzone rozważania dotyczą izolatorów liniowych, wykonanych z materiałów tradycyjnych, jakimi są porcelana elektrotechniczna i szkło izolatorowe. Ze względu na niekorzystne własności technologiczne tych materiałów, optymalizacja takich izolatorów poprzez odpowiedni dobór ich parametrów konstrukcyjnych jest już obecnie bardzo utrudniona. Pewne możliwości stwarzają w tym przypadku szkliwa półprzewodzące, przy pomocy których można uzyskać wyrównanie rozkładu napięcia na powierzchniach izolacyjnych, eliminację wyładowań niezupełnych i podwyższenie zabrudzeniowego napięcia przeskoiku oraz opanowanie zakłóceń radioelektrycznych. Zastosowanie szkliv półprzewodzących uzasadnione jest tylko dla izolatorów, przeznaczonych do stref o bardzo silnym zapyleniu, ze względu na stosunkowo duże prądy upływu i związane z tym straty energii. Wymagania dotyczące trwałości i odporności szkliv na wyładowania powierzchniowe nie zostały jeszcze całkowicie opanowane, ale zastosowanie tlenków tytanu i antymonu znacznie zwiększyło stabilność ich własności [28, 39, 57]. Pozwalają one na znaczne skrócenie długości montażowych łańcuchów izolatorów oraz usunięcie drogich i niewygodnych układów specjalnych [57]. Z tej też przyczyny, określenie skuteczności działania różnych rodzajów szkliv półprzewodzących w krajowych warunkach silnych zanieczyszczeń przemysłowych wydaje się celowe.

Osobnym i bardzo ważnym zagadnieniem jest zastosowanie tworzyw syntetycznych do budowy izolatorów, szczególnie dla linii bardzo wysokich napięć, co może dać istotne korzyści konstrukcyjne, wymiarowe i eksploatacyjne. Zakres stosowania tworzyw sztucznych w wysokonapięciowej technice izolacyjnej ograniczony był ich małą odpornością na działanie czynników

atmosferycznych i zabrudzeniowych, ale w ostatnim czasie daje się zauważyć wyraźny postęp w tej dziedzinie. Szczególnie dobre rezultaty uzyskuje się w przypadku niektórych odmian żywic epoksydowych i silikonowych, współpracujących z włóknem szklanym (przenoszącym obciążenia mechaniczne), co pozwala na konstruowanie nie tylko izolatorów, ale również poprzeczek konstrukcji wsporczych [6, 39, 49, 56]. Zastosowanie na szerszą skalę tworzyw syntetycznych w przypadku izolatorów liniowych wysokiego napięcia wydaje się być sprawą najbliższej przyszłości i wymaga znacznie większego zainteresowania ze strony konstruktorów i przemysłu krajowego.

8. WNIOSKI

1. Występowanie zakłóceń zabrudzeniowych cechuje znaczna nierównomierność w czasie eksploatacji. Z analiz statystycznych dla terenu ZEOPd wynika, że istotne zagrożenie izolacji liniowej 110 i 220 kV istnieje jedynie w okresie październik-luty (w pozostałych miesiącach może być pominięte).
2. Sezonową zmienność zagrożenia zabrudzeniowego w ciągu roku określają statystyczne modele obliczeniowe, sprawdzone na terenie ZEOPd dla wybranych stacji doświadczalnych i linii 110-220 kV (uzyskano modele 3 i 4 stanowe). Na podstawie dostępnych danych wykazano, że rozkład prawdopodobieństwa czasu między kolejnymi zakłóceniami dla skokowo zmieniających się stanów zagrożenia zbliżony jest do rozkładu wykładniczego.
3. W wyniku statystycznej analizy zakłóceń w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych zaproponowano metodę obliczania zawodności izolacji liniowej. Celowe jest wykorzystanie w tym przypadku wyników terenowych badań izolatorów (szczególnie czasów do przeskoku), umożliwiających obliczenia niezawodnościowe przy uwzględnieniu sezonowej zmienności zagrożenia.
4. Własności powierzchniowe różnych izolatorów w warunkach zbliżonych do eksploatacyjnych można określić na podstawie zależności między zawodnością zabrudzeniową a drogą upływu, uzyskanych przy pomocy proponowanej metody obliczeniowej i wyników prób terenowych. Charakterystyki te - zwane zawodnościowymi - umożliwiają porównywanie własności łańcuchów izolatorów również dla zawodności rocznych nie większych od 1%.
5. Wykonana analiza niezawodnościowa dla różnych izolatorów liniowych potwierdza znaczenie drogi upływu jako parametru konstrukcyjnego w naturalnych warunkach zabrudzeniowych, wykazując równocześnie, że:
 - różnice między wartościami drogi upływu łańcuchów dla tej samej niezawodności dochodzą do 50%, wskutek znacznego zróżnicowania ich własności powierzchniowych,

- izolatory wykazują dobrą efektywność wykorzystania drogi upływu, gdy stosunek jej do długości montażowej nie przekracza 2, stosunek podziałki do wysięgu klosza wynosi 1,5...2, a kąt nachylenia klosza nie przekracza znacznie 20° ,
 - miarę stopnia jej wykorzystania stanowi zaproponowany współczynnik skuteczności, uzależniony od stosunku drogi upływu do długości montażowej izolatora.
6. Wyniki rachunku ekonomicznego dla izolacji linii 110 i 220 kV wykazują, że trudności eksploatacyjne i straty spowodowane nieciągłością zasilania odbiorców - wyrażone przy pomocy kosztów eksploatacji i zawodności - powinny decydować o doborze izolatorów. Koszty te rosną gwałtownie ze wzrostem rocznej zawodności i mogą być pominięte w stosunku do nakładów inwestycyjnych tylko wtedy, gdy nie przekracza ona znacznie poziomu 0,01% dla 1 łańcucha izolatorów.
 7. Dobierając izolatory do warunków zabrudzeniowych należy dążyć do stosowania jednolitych rozwiązań typowych oraz uwzględniać kryteria techniczne i oczekiwane skutki ekonomiczne w całym okresie eksploatacji. Zawodność dopuszczalna obliczeniowego łańcucha izolatorów 110 i 220 kV - odpowiadająca najmniejszym całkowitym kosztom rocznym - nie powinna przekraczać poziomu 0,01% w ciągu roku. Proponowane wymaganie niezawodnościowe ma na celu ograniczenie do uzasadnionego minimum częstości czyszczenia izolacji i zabrudzeniowych wyłączników linii.
 8. Zaproponowane ujęcie doboru wprowadza wymierne i uzasadnione pod względem techniczno-ekonomicznym wymagania niezawodnościowe oraz uwzględnia wpływ kształtu geometrycznego izolatorów na ich wytrzymałość zabrudzeniową. Skorygowana droga upływu może być kryterium doboru w okresie przejściowym, natomiast w przyszłości należy zastosować w tym celu zapas wytrzymałościowy, wynikający z laboratoryjnych charakterystyk zabrudzeniowych (wymagane minimalne wartości tych parametrów powinny być uzależnione od dopuszczalnego poziomu zawodności łańcuchów obliczeniowych).
 9. W celu praktycznego zastosowania proponowanego sposobu doboru należy dokonać podziału terenu na strefy zabrudzeniowe i określić wymagane minimalne jednostkowe drogi upływu lub graniczne wartości konduktywności powierzchniowej w strefach oraz laboratoryjne charakterystyki zabrudzeniowe dla różnych izolatorów. Ciągłe aktualny problem wymiarowania i doboru izolacji liniowej powinien być rozwiązywany w oparciu o wyniki dalszych badań laboratoryjnych i terenowych, przy ściślejszej współpracy międzynarodowej.

LITERATURA

- [1] Aivazian S.: Etude statistique des dépendances. Ed. Mir, Moscou 1970.
- [2] Aleksandrov G.N. i inni: Električeskaja pročnost' naružnoj vysokowoltnoj izolacji. Energija. Leningrad.1969.
- [3] Artiemjev D.E. i inni: Koordinacja izolacji linii elektropieriedači. Energija. Moskwa-Leningrad, 1966.
- [4] Augé J. i inni: Risque de défaillance et planification des réseaux à très haute tension. CIGRE, 1972. Rap. 31-06.
- [5] Beichelt F.: Problemy niezawodności i odnowy urządzeń technicznych. WNT, Warszawa, 1974.
- [6] Cattaruzza M. i inni: Development' of fiberglasscore PTEE-covered insulators for H.V. Transmission systems. IEEE Conference Paper C74 338-0 Anaheim, Cal, July 1974.
- [7] Claverie P., Porcheron Y.: Les phénomènes de pollution des isolateurs et l'isolement des ouvrages en régions polluées. R.G.E, tom 82 n° 3, 1973.
- [8] Claverie P., Vignaud E.: Comparaison des principales méthodes d'essais d'isolateurs sous pollution artificielle. Note EDF, HM/72/2634, octobre 1974.
- [9] Eriksson R.: Statistical methods for insulation coordination. Dep. of Electr. Power Syst. Eng. Royal Inst. of Technology. Stockholm 1975.
- [10] Flugum R.W., Karcic A.J.: Effect of configuration on contaminated insulator string performance. IEEE, paper n° 71 CP 131, PWR.
- [11] Gacek Z.: Aspekty ekonomiczne doboru izolacji liniowej wysokiego napięcia na terenach o silnym zanieczyszczeniu atmosfery. Praca doktorska Pol. Śl. Gliwice 1972.
- [12] Gacek Z.: Dobór izolatorów liniowych wysokiego napięcia pod względem techniczno-ekonomicznym na terenach uprzemysłowionych. Zesz. Nauk. Pol. Śl. Elektryka n° 42, Gliwice 1974.
- [13] Gacek Z.: Défiabilité des isolateurs de lignes sous pollution naturelle à la station de Martigues-Ponteau. Note EDF, HM/72/2898. Clamart 1974.
- [14] Gacek Z.: Défiabilité des isolateurs des lignes sous pollution industrielle à la station Saint-Avoid. Note EDF, HM/72/2921. Clamart 1974.
- [15] 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.
- [16] Gacek Z.: Quelques paramètres d'isolation de lignes aériennes du point de vue de la défiabilité sous pollution naturelle. Note EDF, HM/72/2922. Clamart 1974.
- [17] Gacek Z., Kiś W.: Próba oceny zawodności zabrudzeniowej izolacji w. n. Zesz. Nauk. Pol. Śl. Elektryka, n° 52. Gliwice 1976.
- [18] Gacek Z., Kiś W.: Modele obliczeniowe zawodności zabrudzeniowej izolacji liniowej. Zesz. Nauk. Pol. Śl. Elektryka, n° 52. Gliwice 1976.
- [19] Gniedenko B.W.: Matematyczne metody w teorii niezawodności. WNT, Warszawa, 1968.
- [20] Gniedenko B.W., Kowalenko I.N.: Wstęp do teorii obsługi masowej. PWN, Warszawa 1971.
- [21] Hahn G., Shapiro S.S.: Statistical models in engineering. New York, 1967.

- [22] Havelka J. I inni: *Choix des chaînes d'isolateurs pour les lignes à très haute tension en Tchécoslovaquie*. CIGRE, 1974 Rap. 33-05.
- [23] Haviland R.P.: *Niezawodność urządzeń technicznych*. PWN, Warszawa 1968.
- [24] Heise W. i inni: *Estimation de la méthode d'essai sous pollution artificielle par couche solide*. CIGRE, 1972. Rap. 39-09.
- [25] Hirose Y., Seta T i inni: *Caractéristiques d'isolants aux surtensions de manoeuvre d'isolateurs dans des conditions de pollution*. CIGRE 1972 Rap. 33-02.
- [26] Jasicki Z., Szymik F. i inni: *Praca układów elektroenergetycznych*. WNT, Warszawa 1965.
- [27] Juchniewicz J.: *Przeskok zabrudzeniowy*. WNT, Warszawa 1966.
- [28] Kawai M., Sforzini M.: *Problèmes se rattachant au comportement des isolateurs à UHT des conditions de pollution*. CIGRE 1974. Rap. 33-19.
- [29] Kizewetter V.E. i inni: *Caractéristiques de l'isolement à très haute tension sous pollution et à l'humidité*. CIGRE, 1974 Rap. 33-16.
- [30] Kelnar O., Kohoutová D.: *Výzkum vztahu mezi provozním a laboratorním znečištěním izolátorů*. Výzkumny ustav energetický, Praha 1970.
- [31] Kelnar O. i inni: *Výzkum vlastnosti prostředí ve vybraných oblastech SCE a VSE z hlediska spolehlivosti provozu izolátorů*. Výzkumna zpráva o interni etapě 125 901102. Praha 1972.
- [32] Kopociński B.: *Zarys teorii odnowy*. WNT, Warszawa 1973.
- [33] Kucharski K. i inni: *Ekonomiczne i techniczne kryteria doboru izolacji na terenach uprzemysłowionych*. BBiST, ZE Gliwice 1967.
- [34] Kucharski K.: *Ocena terenu pod względem zagrożenia zabrudzeniowego izolacji*. Energetyka n° 10, 1976.
- [35] Kucharski K i inni: *Analiza pracy izolatorów długopniowych VKLS 75/21 w warunkach naturalnych zabrudzeń B.B. i St.* ZE Gliwice 1973.
- [36] Kucharski K. i inni: *Pomiary konduktywności powierzchniowej naturalnie zabrudzonych izolatorów B.B. i St.* ZE Gliwice 1974.
- [37] Kucharski K. i inni: *Ocena nowych konstrukcji liniowych izolatorów długopniowych B.B. i St.* ZE Gliwice 1975.
- [38] Kucharski K. i inni: *Częstość czyszczenia łańcuchów izolatorów długopniowych linii napowietrznych 110-220 kV pracujących na terenie GOP-u B.B i St.* ZE Gliwice 1975.
- [39] Lambeth P.J. i inni: *Essais de pollution naturelle d'isolateurs destinés à des réseaux de transport à ultra-haute tension*. CIGRE, 1974. Rap. 33-12.
- [40] Lievszunov R.T.: *O vyborie urovniej izolacji v zagriazniennych rajonach*. Električestvo, n°6, 1973.
- [41] Lushnicoff N.L., Parnel T.M.: *The effects of pollution and surface discharges on the impulse strength of insulation* IEEE, Trans. on Power App. and Syst. July/August 1971.
- [42] Luxa G.F. i inni: *Contribution of four laboratories to the determination of validity, repeatability and reproducibility of the dust deposit artificial pollution test*. 1970, 33-70/WGOU/15-IWD.
- [43] Macchiaroli B., Turner F.J.: *Switching surge performance of contaminated insulators*. IEEE, Trans. on Power App. and Syst., July/August 1971.
- [44] Mattson B., Nuder J.: *Emploi simplifié des statistiques de défauts pour l'optimisation de la conception des réseaux et de l'équipement*. CIGRE, 1971. Rap. 31-06.
- [45] Merchalov S.D.: *Zavisimost' razriadnych charakteristik zagriazniennych izolatorov v normalnom eksploatacijonnom režimie ot ich konfiguracii*. Izviestija NIIPT, 1968, n° 14.

- [46] Mosch W.: Über den Kriechüberschlag bei impulsepannungen. Pr. Nauk. Inst. Podst. Elektr. i Elektrotechnol. Pol. Wrocł. n° 4, Wrocław 1971
- [47] Paris L. i inni: Etude de la sécurité d'un réseau à très haute tension en fonction de la structure et des caractéristiques de ses composants, CIGRE, 1972. Rap. 31-14.
- [48] Pohl Z.: Izolatory wysokiego napięcia do warunków zabrudzeniowych. WNT Warszawa 1968.
- [49] Pohl Z.: Izolacja wysokonapięciowa w warunkach zwiększonej wpływności powierzchniowej. Pr. Nauk. Inst. Podst. Elektrot. i Elektrotechnol. n° 10/4. Pol. Wrocł. Wrocław 1975.
- [50] Rivière R., Parraud R.: Réflexion sur les mesures d'impulsion de courant de fuite effectuées en exploitation sur les chaînes d'isolateurs. RGE n° 3, mars 1973.
- [51] Saferna J.: Praca izolatorów liniowych i stacyjnych w warunkach zabrudzeniowych. WNT Warszawa 1968.
- [52] Saferna J., Kosztaluk R.: Essais d'isolateurs de ligne sur stands de pollution naturelle. CIGRE, 1972 Rap. 33-13.
- [53] Sozański J.: Niezawodność urządzeń i układów elektroenergetycznych. Komitet Energetyki PAN. Warszawa 1974.
- [54] Sforzini M.: L'isolamento in atmosfera contaminata. Electrotechnica, n° 3, mars 1972.
- [55] Stępniewski T.: Izolatory i osprzęt izolatorowy linii najwyższych napięć. Koref. na Konf. Energoproj. Kraków 1970.
- [56] Stępniewski T.: Tendencje i ograniczenia w zastosowaniu wysokonapięciowej izolacji napowietrznej. Konf. Izolat. Karpacz, czerwiec 1976.
- [57] Stępniewski T.: Zastosowanie szklów półprzewodzących dla opanowania wyładowań niezupełnych i sterowania rozkładu napięcia na izolatorach wysokonapięciowych. Konf. Izolat. Zakopane 1976.
- [58] Szymik F.: Zagrożenie awaryjne sieci napowietrznej w warunkach zabrudzeniowych. Biul. Inst. Energetyki, z. 1 i 2, 1959.
- [59] Streubel H.: Die Regenüberschlagwechselfspannung von Isolatoren bei hoher Regenwasserleitfähigkeit und unterschiedlicher Isolatorenlage. Hermsd. Techn. Mitt. 1968. Heft 22.
- [60] Trusova W.N., Żarnickij C.N.: Vlijanije konstruktivnych, osobiennostiej opornych izolatorov na ich zagriaznennost i samoočistku. Električeskije Stancji, n° 4, 1969.
- [61] Vignaud E.: Tenue sous pollution des isolateurs de lignes aériennes. Note EDF, HM/72/12751, Clamart 1974.
- [62] Verma M.: Isolierverhalten von Hochspannungs-Langstabisolatoren verschiedener Bauform unter natürlichen Freddschichtbedingungen. Elektrotech. Z. 1971, n° 7.
- [63] Rapport de la CEI: Essais de pollution artificielle des isolateurs pour haute tension destinés aux réseaux à courant alternatif. Proj. doc. IEC, Comité 36. Février 1971

Normy, katalogi i inne

- [64] PN-74/E-02051. Elektroenergetyczne izolatory w.n. Nazwy i określenia oraz podział i oznaczenia.
- [65] PN-74/E-04068. Pomiarы wysokonapięciowe. Próby zabrudzeniowe izolacji napowietrznej.
- [66] PN-74/N-01051. Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna. Terminy.
- [67] PN-66/E-06308. Elektroen. izol. w.n. Izolat. liniowe. Wymagania ogólne i metody badań.

- [68] PN-75/E-05100. Elektroenerg. linie napowietrzne. Ogólne przepisy budowy.
- [69] PN-76/E-05001. Urządzenia elektroenerg. w.n. Napięcia probiercze izolacji.
- [70] PN-68/E-06303. Elektroenerg. izol. w.n. Dobór izolatorów napowietrznych ze względu na zagrożenie zabrudzeniowe.
- [71] Rukowadiszčije ukazaniya po wyboru i eksploatacji izolacji v rajonach s zagriaznionnoj atmosferoj. Min. Energ. i Elektrifik. SSSR. Moskva 1975.
- [72] Recommendations pour la coordination de l'isolement. Guide d'application. Rev. de la publ. 71A de la CEI 28 (Bureau Central) 42. Rap. de la CEI, juin 1976.
- [73] Katalog izolacji liniowej. Opracowanie Biura Badań i Studiów ZE Gliwice, 1975.
- [74] Ramowe wytyczne w sprawie metodyki oceny ekonomicznej efektywności. Komitet Planow. przy Radzie Min. Lipiec 1974.
- [75] Katalog wyrobów, osprzęt ochronny. BELOS. Zjedn. Przem. Maszyn Górniczych 1974.
- [76] Maszyny i sprzęt górniczy, wiertniczy i energetyczny. Cennik 3-Z/70.
- [77] Bolszew L.N., Smirnov N.W.: Tablicy matematičeskoj statistiki AN SSSR. Moskva 1968.

TECHNICZNE I EKONOMICZNE ASPEKTY ZAWODNOŚCI ZABRUDZENIOWEJ
IZOLACJI LINIOWEJ WYSOKIEGO NAPIĘCIA

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

Przedmiotem rozprawy jest analiza zagrożenia zabrudzeniowego izolacji liniowej w ujęciu techniczno-ekonomicznym, pozwalającym na ocenę zawodności, porównywanie własności i uzasadniony dobór izolatorów. Opierając się na wynikach badań w stacjach doświadczalnych i statystykach zakłócenio-owych w liniach 110-220 kV na terenie ZEOPd, określono matematyczne modele sezonowej zmienności zagrożenia w czasie i przedstawiono sposób obliczania zawodności izolacji. Zaproponowano metodę określania charakterystyk zawodnościowych oraz oceny własności różnych izolatorów liniowych i znaczenia ich parametrów konstrukcyjnych (szczególnie drogi upływu). Przeanalizowano pod względem niezawodnościowym efektywność wykorzystania drogi upływu i niektórych wskaźników konstrukcyjnych izolatorów.

Wykonano analizę kosztów inwestycyjnych, eksploatacji i zawodności dla linii 110 i 220 kV, uzasadniając, że trudności eksploatacyjne i straty spowodowane nieciągłością zasilania odbiorców powinny być uwzględniane przy doborze izolacji. Określono dopuszczalny poziom zawodności łańcucha izolatorów, odpowiadający najmniejszym oczekiwanym kosztom rocznym. Zaproponowano ujęcie doboru przy pomocy skorygowanej drogi upływu oraz laboratoryjnych charakterystyk zabrudzeniowych, uwzględniając wpływ kształtu izolatorów i uzasadnione wymagania niezawodnościowe w czasie eksploatacji.

ТЕХНИЧЕСКИЕ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЗАГРЯЗНЕННОЙ НЕНАДЕЖНОСТИ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЙ

Р е з ю м е

Сутью диссертации является анализ угрозы от загрязнения линейной изоляции с технико-экономической точки зрения, позволяющий сделать оценку ненадёжности, сравнить свойства и обосновать выбор изоляторов. На основе результатов исследований в опытных стендах и на статистике повреждений в линиях 110-220 кВ Южного Энергетического Округа, определены математические модели сезонной изменчивости угрозы во времени и показан метод определения ненадёжности изоляции. Предложен метод определения характеристик ненадёжности и оценки свойств разных линейных изоляторов и значение их конструктивных параметров (особенно пути утечки).

С точки зрения ненадёжности сделан анализ эффективности использования пути утечки и некоторых конструктивных показателей изоляторов. Сделан анализ издержек на строительство, эксплуатацию и ненадёжность линий 110 и 220 кВ доказывая, что эксплуатационные осложнения и потери от перебоев питания потребителей должны быть учтены при выборе изоляции. Определён допустимый уровень ненадёжности гирлянды изоляторов, соответствующий малейшим ожидаемым годовым затратам. Предложен метод выбора изоляции с помощью скорректированного пути утечки и лабораторных характеристик загрязнения, с учётом влияния формы изоляторов и надёжностных требований во время эксплуатации.

TECHNICAL AND ECONOMICAL ASPECTS OF POLLUTION UNRELIABILITY
OF HIGH VOLTAGE LINE INSULATION

S u m m a r y

The subject of the dissertation is the analysis of line insulation pollution unreliability in the technical and economical aspects allowing to estimate the unreliability, to compare properties and to justify insulator choice. Basing on the results of investigations carried out in test stations and on pollution statistics from 110-220 kV lines in the area of Electric Power Plant for Southern District, there have been determined the mathematical seasonal models of hazard changeability in time and the way of calculating insulation unreliability has been presented. The method of unreliability characteristics determination has been suggested as well as the estimation of different insulator properties and the meaning of their constructional parameters (leakage distance in particular). The efficiency of utilizing leakage distance and some constructional indices of insulators have been analysed from the viewpoint of reliability.

There has also been made the analysis of investment costs, exploitation, and unreliability for 110 and 220 kV lines, which has proved that exploitational difficulties and losses caused by discontinuity in electricity supply should be considered in insulation choice. There has been determined the permissible unreliability level of an insulator string which corresponds to the lowest expected annual costs. There has been suggested the choice formulation by means of corrected leakage distance and laboratory pollution characteristics taking into consideration the influence of insulator shape and justified reliability requirements during exploitation.

Zestawienie jednostkowych nakładów i kosztów czyszczenia izolacji linii 110 i 220 kV na terenie ZEOPd [11, 33]

U _n	Liczba torów	Strefa zabrudzenia	Jednostkowe nakłady brygady ¹⁾						Masa fluorku amonu						Jednostkowe koszty czyszczenia izolacji w przeliczeniu na ²⁾					
			czyszczenie izolatorów		czystości pozostałe	łącznie		kg/słup	słup		km		łańcuch złożony		łańcuch obliczeniowy					
			P	M		P	M		P	M	P	M	P	M	P	M				
			roboczog./słup						zi											
kV	-	-																		
110	1	II III IV	1,6 2,0 2,5	3,6 4,8 6,4	3,1	4,7 5,1 5,6	6,7 7,9 9,5	0,4 0,5 0,7	1,4 1,7 2,2	267 291 325	406 480 582	802 873 975	406 480 582	89 97 108	135 160 194	89 97 108	34 40 49			
110	2	II III IV	3,2 4,0 5,0	7,2 9,6 12,8	7,7	10,9 11,7 12,7	14,9 17,3 20,5	0,9 1,0 1,3	2,9 3,4 4,3	619 665 729	897 1042 1243	1857 1995 2187	897 1042 1243	103 111 122	150 174 207	103 111 122	38 44 52			
220	1	II III IV	2,4 3,1 4,0	7,0 8,4 10,1	5,3	7,7 8,4 9,3	12,3 13,7 15,4	1,4 1,7 1,9	4,3 5,0 5,8	460 507 562	797 894 1011	1380 1521 1686	797 894 1011	153 169 187	266 298 337	153 169 187	44 50 56			

Uwagi: 1) Stawki godzinowe wg danych z księgowości ZE Gliwice (1975 r.): monter - 61 zł/h, kierowca-monter 65 zł/h, pomocnik montera - 39 zł/h. Brygada liniowa: 3 monterów, 2 pomocników montera, 1 kierowca. Cena fluorku amonu 30 zł/kg.

2) Średnie liczebności słupów i łańcuchów izolatorów:

U _n	Słupy ³⁾			łańcuchy złożone			łańcuchy obliczeniowe		
	P	M	M	P	M	M	P	M	M
kV	sł./km			łańc./km			łańc./km		
110	3	1		9(LP-1)	3(L0-2)		9	12	
220	3	0,5		9(LP-2)	1,5(L0-3)		18	9	

3) P - słupy przelotowe, M - słupy mocne

Zestawienie parametrów do obliczenia kosztów zawadności zabrudzeniowej izolacji linii 110 i 220 kV na terenie ZEOPd (wyniki analizy autora dla okresu 1965-1974)

U _n	Oczekiwane czasy przerw				Równoważnik kosztu strat E(k _z)	Współczynnik rezerwa na k _o	Niedostarczona energia w przeliczeniu na wyłączenie z ograniczeniem jej dostawy E(A _w)		Współczynnik nieskuteczności SPZ Q _{SPZ}	Współczynnik uszkodzeń k _u	Jednostkowy koszt nieplanowanego remontu K _r
	ograniczenia dostawy energii	wyłączenia bez uszkodzenia	wyłączenia z uszkodzeniami	wyłączenia z ograniczeniem jej dostawy			E(A _w)	k _o E(A _w)			
kV	zakłócenia	h	zł/kWh	MWh	tyś.zł.						
110	0,4	1,2	2,7	11,8	25	0,49	16,9	8,3	0,63	0,54	7,8
220	Brak danych	3,4	4,2	14,5	(10...50)	Brak danych	Brak danych	23,5 ²⁾	0,59	0,44	13,0

Uwagi: 1) Dane z tab. 8 i [53]

2) Wartość szacunkowa

Dopuszczalne poziomy rocznej zawodności zabrudzeniowej
łańcuchów obliczeniowych w liniach 110 i 220 kV

U _n		110 kV		220 kV		Uwagi
		10%	15%	10%	15%	
100βrc ₁ U _n A tys. zł	śr.	0,889	2,160	1,779	4,320	$c_1 = 3,5 \frac{zł}{cm}$; $A = (14-34)10^{-2} \frac{cm}{kV}$ $c_1 = 3 \frac{zł}{cm}$; $A = (12-29)10^{-2} \frac{cm}{kV}$ $c_1 = 4 \frac{zł}{cm}$; $A = (18-41)10^{-2} \frac{cm}{kV}$ (z tab. 5, 7; c _{0%} = 10-15%) β=1,1...1,2; r=0,1...0,15
	min	0,435	1,053	0,871	2,105	
	max	1,426	3,248	2,852	6,494	
3n _m k _{e1} tys. zł	śr.	18,9		107,1		k _{e1} = 105-85 zł k _{e1} = 90-77 zł (z zał. 1) k _{e1} = 120-94 zł linia 110 kV - 20 km, linia 220 kV - 70 km
	min	16,2		97,0		
	max	21,6		118,4		
K _Z * tys. zł	śr.	133,378		350		E(k _Z) = 25 $\frac{zł}{kWh}$ E(k _Z) = 10 $\frac{zł}{kWh}$ E(k _Z) = 50 $\frac{zł}{kWh}$ Inne dane z zał. 2
	min	54,944		142,025		
	max	264,104		696,625		
P _{1%} ^d %	śr.	0,0058	0,014	0,0039	0,0095	Wg zależności (39)
	min	0,0015	0,0037	0,0011	0,0029	
	max	0,01	0,045	0,012	0,027	
		0,0099 (0,0026...0,033)		0,0067 (0,0019...0,02)		Wartości średnie dla c _{0%} = 10...15% Wartości ekstremalne

P 3347 / 77 / 56

**WYDAWNICTWA NAUKOWE I DYDAKTYCZNE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ MOŻ-
NA NABYĆ W NASTĘPUJĄCYCH PLACÓWKACH:**

Głiwice — Księgarnia Techniczna, ul. M. Strzody 14b;

Głiwice — Punkt sprzedaży Studenckiej Spółdzielni Pracy, ul. Wrocławska 4/8;

Katowice — Księgarnia nr 004, ul. Warszawska 11;

Katowice — Księgarnia nr 015, ul. Żwirki i Wigury 33;

Bytom — Księgarnia nr 048, pl. Kościuszki 4;

Chorzów — Księgarnia nr 063, ul. Wolności 22;

Dąbrowa Górnicza — Księgarnia nr 081, ul. ZBoWiD-u 2;

Rybnik — Księgarnia nr 126, Rynek 1;

Sosnowiec — Księgarnia nr 181, ul. Zwycięstwa 7;

Zabrze — Księgarnia nr 230, ul. Wolności 288;

Zawlercie — Księgarnia nr 250, ul. 3 Maja 11;

Warszawa — Ośrodek Rozpowszechniania Wydawnictw PAN, Pałac Kultury i Nauki.

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