

Zbigniew Gacek

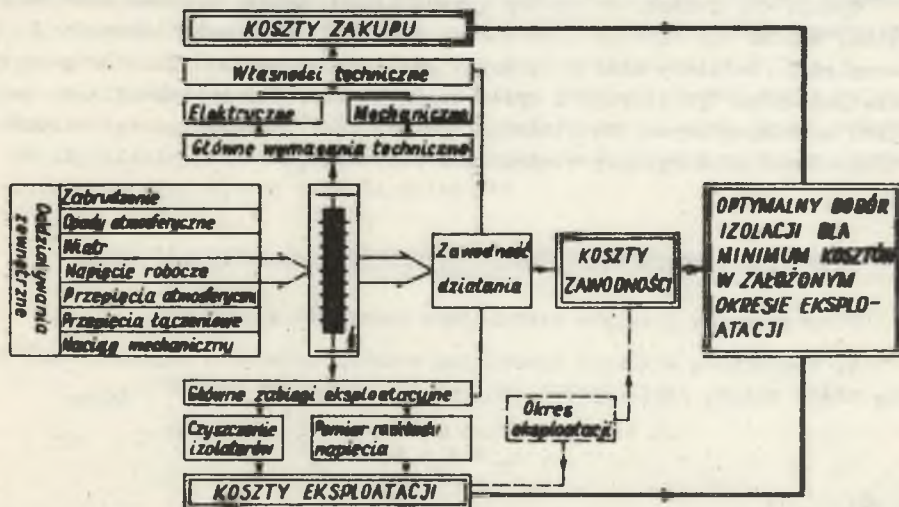
Instytut Elektroenergetyki
i Sterowania Układów

DOBÓR IZOLATORÓW LINIOWYCH WYSOKIEGO NAPIĘCIA
POD WZGLĘDEM TECHNICZNO-EKONOMICZNYM
NA TERENACH UPRZEMYSŁOWIONYCH

Streszczenie. Przedstawiono główne tezy i wnioski pracy, zawierającej propozycje kompleksowego rozważania doboru izolacji liniowej na terenach uprzemysłowionych. Uwzględniono ekonomiczne aspekty doboru, obejmujące koszty zakupu, eksploatacji i zawadności zabrudzeniowej w założonym okresie użytkowania izolacji linii 110-220 kV. Zestawiono wyniki obliczeń przykładowych, wykonanych w oparciu o dane eksploatacyjne.

1. Wstęp

Rosnące zanieczyszczenie atmosfery, związane z koncentracją przemysłu powoduje zmniejszanie się wytrzymałości powierzchniowej izolatorów liniowych, co stwarza możliwość powstawania przeskoków zabrudzeniowych przy napięciu roboczym oraz duże trudności eksploatacyjne. Zawadność zabrudzeniowa wynika z oddziaływań zewnętrznych, z których najważniejsze jest zabrudzenie połączone z zawilgoceniem powierzchniowym. Można temu przeciwdzia-



Rys. 1. Ekonomiczne aspekty optymalnego doboru izolacji liniowej w warunkach zabrudzeniowych

łać poprzez dobór układów izolacyjnych o odpowiedniej wytrzymałości powierzchniowej oraz wykonywanie profilaktycznych czynności eksploatacyjnych, a szczególnie okresowe czyszczenie izolacji. Oba wymienione sposoby związane są jednak z określonymi kosztami, co przedstawiono poglądowo na rys. 1.

Celem pracy jest zaproponowanie metodyki techniczno-ekonomicznego doboru izolacji w okresie jej wieloletniego użytkowania, uwzględniającej ekonomiczne aspekty zagadnienia, wynikające z kosztów zakupu układów izolacyjnych oraz oczekiwanych kosztów eksploatacji i zawodności zabrudzeniowej. Zakres opracowania obejmuje izolację linii 110-220 kV na terenach o silnym zanieczyszczeniu atmosfery, ze szczególnym uwzględnieniem izolatorów długopniowych. Wycinek zagadnienia obejmuje aspekty ekonomiczne, wynikające z zabrudzeniowego zagrożenia izolacji przy przemiennym napięciu roboczym.

2. Ocena obecnego sposobu doboru izolatorów liniowych

Obecny sposób doboru izolatorów liniowych wysokiego napięcia pod względem elektrycznym, opierający się na wytycznych ogólnych [5] oraz szczegółowych [6] i [7], obejmuje wytrzymałość elektryczną przy napięciu przemiennym pod deszczem i udarowym na sucho, przez podanie wymaganych napięć wytrzymałościowych. W warunkach zwiększonej upływności powierzchniowej określa się dodatkowo minimalne długości jednostkowych dróg upływu izolatorów w różnych strefach zabrudzeniowych.

Wydaje się jednak, że obecny sposób doboru wymaga wprowadzenia uzupełnień, bowiem nie określa ilościowo wymagań niezawodnościowych i nie uwzględnia ściśle z nimi związanych aspektów ekonomicznych. Droga upływu nie jest poza tym jedynym i wystarczającym miernikiem izolacji w warunkach zabrudzeniowych. Ostatecznym sprawdzianem powinny być wyniki prób wytrzymałości elektrycznej w warunkach odpowiadających eksploatacji.

3. Proponowana metodyka techniczno-ekonomicznego doboru izolacji

W opracowaniu przyjęto następujące założenia metodyczne.

1. Zasadniczą wielkość operacyjną stanowi całkowity zdyskontowany roczny koszt układu izolacyjnego K_r , określony przez

$$K_r = I r + E + Z,$$

gdzie

I - koszt zakupu,

r - rata rozszerzonej reprodukcji,

E - roczny koszt eksploatacji układu,

Z - oczekiwany roczny koszt zawadności zabrudzeniowej rozpatrywanego układu.

2. Podstawowym kryterium optymalnego doboru izolacji jest żądanie minimalizacji kosztu K_x dla założonego okresu użytkowania, co oznacza, że

$$K_x^{opt} = \text{MIN}(I r + E + Z). \quad (2)$$

3. Kryterium minimalizacji całkowitego zdyskontowanego rocznego kosztu układu izolacyjnego wykorzystuje się do rozwiązywania dwóch podstawowych zagadnień, związanych z doбором izolacji:

- techniczno-ekonomicznego doboru optymalnych aktualnie rozwiązań izolacyjnych,
- ustalania optymalnych parametrów wytrzymałości powierzchniowej.

Założenia upraszczające i niezbędne ograniczenia przyjęte w opracowaniu:

- a) oddziaływania środowiskowe obejmują zmieniające się warunki zabrudzeniowe przy najwyższym napięciu roboczym;
- b) koszty zakupu wynikają z aktualnych cen izolatorów;
- c) koszty eksploatacji obejmują koszty czyszczenia izolacji oraz koszty pomiaru rozkładu napięcia dla izolatorów kołpakowych;
- d) koszty zawadności składają się z oczekiwanych strat odbiorców przemysłowych, spowodowanych nie wykonaniem planów produkcyjnych i zakłóceniami technologicznymi oraz strat energetyki na skutek przerw w przesyłce energii i konieczności likwidacji skutków awarii zabrudzeniowych;
- e) rozpatruje się układy izolacyjne w liniach 110-220 kV, złożone głównie z izolatorów długopniowych, przy czym gabaryty izolacyjne narzucone są przez istniejące konstrukcje wsporcze i nie mogą ulec zmianie;
- f) optymalizowane parametry wytrzymałościowe obejmują średni zapas wytrzymałości powierzchniowej \bar{z} (parametr podstawowy) oraz drogę upływu układu izolacyjnego a_u (parametr pomocniczy). Średni zapas wytrzymałości powierzchniowej określa zależność

$$\bar{z} = \frac{U_{pz50\%}}{U_{fr}}, \quad (3)$$

gdzie

$U_{pz50\%}$ - 50%-we zabrudzeniowe napięcie przeskoku

U_{fr} - najwyższe douszczalne napięcie robocze.

3.1. Metodyka techniczno-ekonomicznego doboru optymalnych aktualnie rozwiązań

Proponowana metodyka doboru umożliwia porównywanie i ocenę przydatności techniczno-ekonomicznej rozwiązań oraz pozwala na dobór najlepszych aktualnie układów izolacyjnych, spełniających warunek (2), wynikający z podstawowego kryterium optymalizacyjnego. Oznacza to, że porównując różne warianty układów w określonych warunkach środowiskowych, można wybrać rozwiązanie optymalne (spośród rozwiązań porównywalnych), którego całkowity zdyskontowany koszt roczny będzie najmniejszy. Przybliżony zapis analityczny tego kosztu dla różnych układów izolacyjnych, określony przy pomocy ogólnej zależności (1), umożliwiające takie postępowanie, znajduje się w pracy [1].

3.2. Metodyka ustalania optymalnych parametrów wytrzymałości powierzchniowej

Ogólne kryterium minimalizacji kosztów, określone przy pomocy zależności (2), wykorzystano także do obliczania optymalnych wartości parametrów wytrzymałości powierzchniowej łańcuchów izolatorów, określających ich niezawodność zabrudzeniową (\bar{z} i a_u). Wykonana w pracy [1] analiza kosztów pozwoliła na uzależnienie kosztów zakupu, eksploatacji i zawodności izolacji od optymalizowanych parametrów. W celu otrzymania minimum warunkowego tak określonego całkowitego zdyskontowanego rocznego kosztu łańcucha K_T , zróżniczkowano otrzymane wyrażenie względem poszukiwanych parametrów. Zastosowano w tym celu metodę czynnika nieoznaczonego Lagrange'a, bowiem parametry są od siebie uzależnione.

Po wykonaniu uproszczeń otrzymano podstawową postać równania optymalizacyjnego, pozwalającego na obliczenie wymaganych i optymalnych zapasów wytrzymałości powierzchniowej układów izolacyjnych

$$\frac{1}{c(\bar{z})^2} \varphi_1\left(\frac{1-\bar{z}}{c\bar{z}}\right) S - T F_1\left(\frac{1-\bar{z}}{c\bar{z}}\right) = W, \quad (4)$$

gdzie

- \bar{z} - średni zapas wytrzymałości powierzchniowej określony zależnością (3),
- c - współczynnik zmienności zabrudzeniowego napięcia przeskołu,
- $\varphi_1\left(\frac{1-\bar{z}}{c\bar{z}}\right)$ - funkcja Gaussa,
- $F_1\left(\frac{1-\bar{z}}{c\bar{z}}\right)$ - dystrybuanta rozkładu normalnego zapasu wytrzymałości powierzchniowej izolacji,
- S, T, W - współczynniki obliczeniowe, zależne od napięcia linii, zastosowanej izolacji i warunków jej pracy w eksploatacji.

Równanie (4) pozwala na obliczenie optymalnych zapasów wytrzymałościowych metodą kolejnych przybliżeń. Wykorzystując określoną w pracy [1] zależność między rozpatrywanymi parametrami, można także określić długości dróg upływu, odpowiadające optymalnym zapasom wytrzymałościowym w różnych warunkach środowiskowych.

4. Celowość proponowanej metodyki

Celowość proponowanej metodyki wynika z konieczności uwzględnienia skutków technicznych i ekonomicznych przyjęcia określonego wariantu rozwiązania w kilkunastoletnim okresie eksploatacji. Dobór nieodpowiedniej izolacji powoduje bowiem wzrost zawadności zabrudzeniowej i trudności eksploatacyjne w całym okresie jej użytkowania.

Zasadniczym i spodziewanym efektem doboru optymalnej izolacji powinno być wprowadzenie do eksploatacji rozwiązań o dużej, ale uzasadnionej w sposób techniczno-ekonomiczny niezawadności zabrudzeniowej. Zmniejszy to koszty strat, wynikających z awaryjnych wyłączeń linii i umożliwi ograniczenie częstości czyszczenia izolacji. Pozwoli to także na ograniczenie liczby typów produkowanych izolatorów, co ma podstawowe znaczenie dla przemysłu elektroceramicznego i stwarza możliwość uniezależnienia się od importu.

5. Przykłady obliczeniowe

Proponowaną metodykę zilustrowano dwoma grupami przykładów obliczeniowych w oparciu o dane eksploatacyjne, zaczerpnięte z opracowań [2] i [3] oraz uzyskane z ZEOPd w Katowicach i ZE w Gliwicach. Należy jednak podkreślić, że istniejące obecnie dane, określające niezawadnościowe i powierzchniowe własności izolacji w warunkach zabrudzeniowych są niewystarczające, co zmusza do szacunkowej oceny parametrów obliczeniowych. Dopiero dalsze badania terenowe i laboratoryjne pozwolą na uściślenie wyników obliczeń.

5.1. Techniczno-ekonomiczny dobór optymalnej izolacji

Zakres obliczeń obejmuje łańcuchy przelotowe pojedyncze i układy specjalne w liniach 110-220 kV we wszystkich strefach zabrudzeniowych, złożone z izolatorów długopniowych eksploatowanych i nowo zaprojektowanych [4] oraz izolatorów kołpakowych.

Najważniejsze dane przyjęte do obliczeń przykładowych:

- okres użytkowania izolacji 10-25 lat,
- współczynnik zmienności zabrudzeniowego napięcia przeskoku $c\% = 10\%$,
- izolatory zawieszane ukośnie mają w eksploatacji wytrzymałość powierzchniową o 15% większą od izolatorów zawieszonych pionowo [1].

Wykorzystując uzyskane w [1] charakterystyki zabrudzeniowe, określono średnie zapasy wytrzymałościowe \bar{z} oraz dystrybuanty rozkładu normalnego, odpowiadające prawdopodobieństwu przeskoaku zabrudzeniowego na rozpatrywanych układach izolacyjnych. Następnie obliczono całkowite zdyskontowane roczne koszty porównywanych układów, zgodnie z ogólną zależnością (1), uwzględniając w każdej strefie zabrudzeniowej co najmniej 5-6 rozwiązań. Opierając się na kryterium minimalizacji kosztów (2), dokonano następnie oceny przydatności techniczno-ekonomicznej różnych układów i zaproponowano rozwiązania, które obecnie można uznać za optymalne. Zbiorcze zestawienie wyników obliczeń zawiera tabl. 1.

Tablica 1

Proponowane optymalne aktualnie przelotowe układy izolacyjne
w liniach 110-220 kV
na terenach uprzemysłowionych [1]

Konduktywność powłoki \bar{z} μS		2	5	10	15	20	30	40	50	60
U_n	LP 75/x	Objaśnienia: a) rozwiązanie optymalne c) odwrócony układ gniazdowy b) rozwiązanie dopuszczalne d) odwrócony układ "V"								
kV	x - liczba klaszy	Poniżej podano zdyskontowany całkowity roczny koszt układów wg zależności (1) - w złotych								
110	12	66	66							
	17	77	77	88			231	231	231	231
	22	91	91	123	126	173	255			
220	12	120	141							
	17	154	154							
	22	182	182	207	228	407	1357	455	458	460

5.2. Optymalne parametry wytrzymałości powierzchniowej

Zakres obliczeń obejmuje pojedyncze łańcuchy przelotowe w liniach 110-220 kV, złożone wyłącznie z izolatorów długopniowych. Ważniejsze przyjęte dane obliczeniowe - jak w przykładach z punktu 5.4.

Obliczenia optymalnych wartości zapasów wytrzymałościowych \bar{z} wykonano przy pomocy podstawowego równania optymalizacyjnego (4). Stosując metodę kolejnych przybliżeń poszukiwanego parametru \bar{z} , rozwiązano ok. 70 równań dla różnych wartości współczynników obliczeniowych S, T, W, a następnie obliczono długości dróg upływu, odpowiadające optymalnym zapasom wytrzymałościowym.

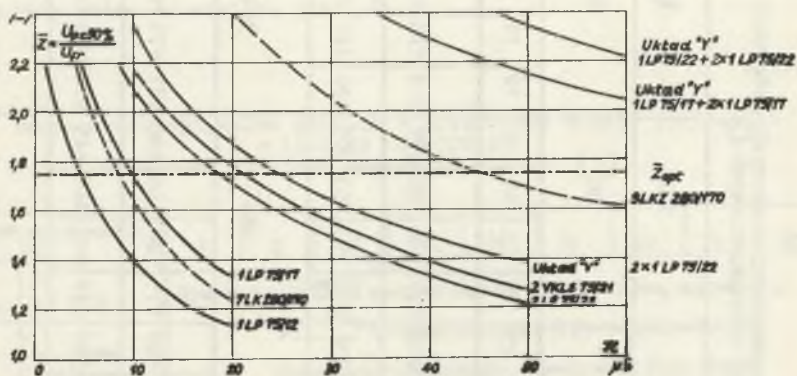
Zestawienie wyników obliczeń znajduje się w tabl. 2.

Tablica 2

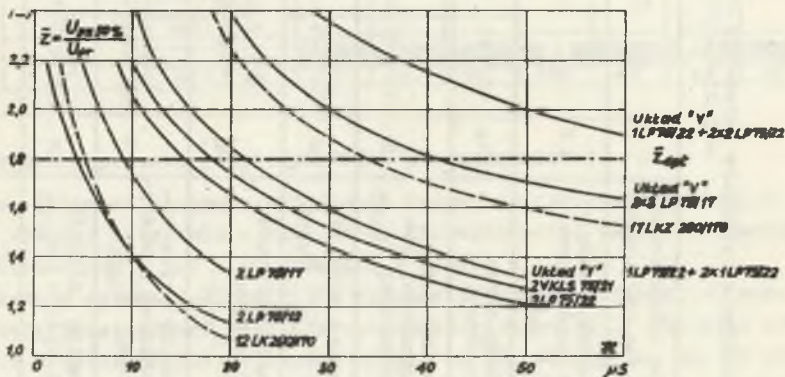
Proponowane optymalne parametry wytrzymałości powierzchniowej pionowych łańcuchów przelotowych w liniach 110-220 kV na terenach zabrudzeniowych [1]

U_n kV	Strefa zabrudzenia- wa wg PN-68/B-06303	-	I			II			III			IV			Uwagi							
			5	10	15	20	25	10	15	20	25	10	15	20		25	Wg [1]					
110	Proponowane maksymalne konduktywności k_{max}	μS	30												50			Średnio ok. 175%				
			Założony okres eksploatacji			10			20			30			40				Średnio ok. 175%			
			10	15	20	25	10	15	20	25	10	15	20	25	10	15	20			25		
110	Optymalny zapas wytrzymałości powierzchniowej Z_{opt}	%	177	178	178	179	176	177	177	178	175	176	176	177	174	175	176	176	łańcuchy pionowe			
			174	176	176	178	232	234	234	236	390	393	393	395	440	446	449	449				
			Optymalna długość drogi upływu a_{opt}			209			286			384			Wg [7]							
220	Minimalna długość drogi upływu wg PN a_{min}	cm	165												209			286			Średnio ok. 180%	
			Optymalny zapas wytrzymałości powierzchniowej Z_{opt}			182			183			184			184			184				Średnio ok. 180%
			182	183	184	184	180	182	182	182	182	179	180	180	180	177	179	179	180			
220	Optymalna długość drogi upływu a_{opt}	cm	426	428	430	430	550	557	557	560	846	845	845	845	988	993	993	995	łańcuchy pionowe			
			Minimalna długość drogi upływu wg PN a_{min}			418			572			768			Wg [7]							
			330	418	572	768	Wg [7]															

Porównanie rzeczywistych zapasów wytrzymałości powierzchniowej aktualnych zestawów łańcuchów przelotowych w liniach 110 i 220 kV w różnych warunkach środowiskowych z obliczonymi wartościami optymalnymi umożliwiającymi rysunki 2 i 3. Silna zależność rzeczywistych charakterystyk zabrudzeniowych od warunków środowiskowych powoduje konieczność stopniowania izolacji dla różnych przedziałów konduktywności powłoki zabrudzeniowej i stwarza trudności w praktycznym doborze izolacji, posiadającej optymalne zapasy wytrzymałościowe.



Rys. 2. Zestawienie zabrudzeniowych zapasów wytrzymałościowych przelotowych łańcuchów izolatorów w liniach 110 kV na terenach przemysłowych [1]



Rys. 3. Zestawienie zabrudzeniowych zapasów wytrzymałościowych przelotowych łańcuchów izolatorów w liniach 220 kV na terenach przemysłowych [1]

6. Wnioski

1. Zanieczyszczenie atmosfery wywołuje trudności eksploatacyjne i stwarza zagrożenie zabrudzeniowe dla izolacji liniowej, co pociąga za sobą określone skutki ekonomiczne. Przy obecnym sposobie doboru izolacji nie bierze się dostatecznie pod uwagę skutków ekonomicznych, wynikających z przyjętych rozwiązań technicznych. Uzasadnionym wydaje się jednak uwzględnienie aspektów ekonomicznych tego zagadnienia dla całego okresu użytkowania izolacji, wynikających z kosztów zakupu oraz oczekiwanych kosztów eksploatacji i zawadności.
2. Proponowany sposób doboru izolacji, obejmuje oprócz dotychczasowych wymagań technicznych także ekonomiczną stronę zagadnienia. Warunkiem techniczno-ekonomicznego doboru jest spełnienie kryterium minimalizacji całkowitych zdyskontowanych kosztów rocznych porównywanych układów izolacyjnych. Przy pomocy kryterium minimalizacji kosztów zaproponowano także metodykę obliczania optymalnych parametrów wytrzymałości powierzchniowej izolacji.
3. W strefach największych zabrudzeń potwierdza się celowość stosowania specjalnych układów izolacyjnych (typu odwrócone "Y" lub "V"), składających się ze znormalizowanych izolatorów długopniowych (tablica 1). Ze względu na ograniczone gabaryty słupów nie jest możliwe stosowanie w tym przypadku łańcuchów pionowych, zapewniających odpowiednio dużą wytrzymałość powierzchniową.
4. Krajowe izolatory długopniowe powinny zastąpić izolatory importowane oraz izolatory kołpakowe przeciwwzabrudzeniowe. Optymalną izolację można aktualnie zapewnić przy pomocy 3 typów izolatorów długopniowych (tablica 1).
W strefach dużych zabrudzeń celowym wydaje się zastosowanie oprócz eksploatowanych obecnie LP 75/17, także nowo zaprojektowanych izolatorów LP 75/22.
5. Ze względu na większe oczekiwane koszty zawadności zabrudzeniowej, optymalna izolacja linii 220 kV, złożona z aktualnych obecnie rozwiązań, posiada zapasy wytrzymałości powierzchniowej o ok. 10% większe niż w liniach 110 kV.
6. Czynnikiem wpływającym decydująco na dobór optymalnych parametrów wytrzymałości powierzchniowej izolacji są jej oczekiwane koszty zawadności. Wartości optymalnych zapasów wytrzymałościowych układów izolacyjnych nie zależą praktycznie od warunków środowiskowych oraz założonego okresu eksploatacji. Przyjęcie tych wartości pozwoliłoby na ok. 10-20 krotny wzrost niezawadności zabrudzeniowej w stosunku do istniejących obecnie rozwiązań w eksploatacji. W wyniku obliczeń dla linii 110-220 kV (tabl. 2) otrzymano:

U_n	Optymalny zapas wytrzymałości powierzchniowej $Z_{opt}\%$	Prawdopodobieństwo przeskoku zabrudzeniowego $P\%$	Uwagi
kV		%	
110	175	ok. $1 \cdot 10^{-3}$	Pojedynczy łańcuch przelotowy
220	180	ok. $5 \cdot 10^{-4}$	

7. Długości dróg upływu łańcuchów picowych, posiadających optymalne zapasy wytrzymałościowe są znacznie większe od obecnie wymaganych (tablica 2). Ze względu na ograniczone gabaryty izolacyjne nie jest to możliwe do zrealizowania w strefach dużych zabrudzeń i w tych przypadkach należy stosować układy specjalne.
8. Łańcuchy odciągowe, odpowiadające optymalnym zestawom łańcuchów przelotowych, posiadać będą zapasy wytrzymałości powierzchniowej co najmniej o ok. 20% większe i ze względu na znikomo małe prawdopodobieństwo przeskoku zabrudzeniowego ($p\% < 1 \cdot 10^{-5}\%$), można zupełnie wyeliminować ich czyszczenie w eksploatacji.

LITERATURA

1. Gacek Z.: Aspekty ekonomiczne doboru izolacji liniowej wysokiego napięcia na terenach o silnym zanieczyszczeniu atmosfery. Praca doktorska. Biblioteka Główna Politechniki Śląskiej Gliwice 1972. Str.129, rys.29, tabl. 42, zał. 4, lit. 54.
2. Stępniewski T., Gacek Z.: Analiza techniczno-ekonomiczna rocznych kosztów eksploatacji linii napowietrznych wysokiego napięcia przy zastosowaniu różnych typów izolatorów, ze szczególnym uwzględnieniem warunków zabrudzeniowych. Cz. I i II. NB-43. Politechnika Śląska Gliwice 1967-1968.
3. Saferna J., i inni: Ekonomiczne i techniczne kryteria doboru izolacji dla terenów uprzemysłowionych. Dok. Techn. Biura Badań i Studiów ZE Gliwice 1967.
4. Stępniewski T., Kałużny A.: Izolatory liniowe długopniowe przeciwzabrudzeniowe na napięcie znamionowe 110 kV. Cz. I-III. Dok.nauk-techn. dla ZEOPd. Politechnika Śląska Gliwice 1966-1968.
5. PN-67/E-05100. Elektroenergetyczne linie napowietrzne. Ogólne przepisy budowy.
6. PN-68/E-05001. Urządzenia elektroenergetyczne wysokiego napięcia. Napięcia probiercze izolacji.
7. PN-68/E-06303. Elektroenergetyczne izolatory wysokiego napięcia. Dobór izolatorów napowietrznych ze względu na zagrożenie zabrudzeniowe.

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ВЫБОР ЛИНЕЙНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ В ПРОМЫШЛЕННЫХ РАЙОНАХ

Р е з ю м е

Представлены основные тезисы и выводы диссертации содержащей предположения комплексного решения вопросы выбора линейной изоляции в промышленных районах.

Учтены экономические аспекты выбора, охватывающие стоимость закупки, эксплуатации и загрязненной надежности в иринатом периоде эксплуатации изоляции линии 110-220 кВ.

Представлены результаты примерных расчетов, выполненных на основе эксплуатационных данных.

THE ECONOMIC ASPECTS OF THE LINE-INSULATION SELECTION IN THE AREA HAVING HIGHLY POLLUTED AIR

S u m m a r y

The main thesis and conclusions of the elaboration dealing with complex solution of the selection of the line-insulation in the industrial area are presented. The economic aspects of the selection and exploitation of the line-insulation (110-220 kV line) and its unreliability caused by polluted air during given period are taken into consideration. The results of the example calculation based on the exploitaion data are compared.