

**ZESZYTY  
NAUKOWE  
POLITECHNIKI  
ŚLĄSKIEJ**

**ALFRED KAŁUŻNY**

**METODY MODELOWE OCENY  
WŁASNOŚCI IZOLATORÓW NAPOWIETRZNYCH W.N.  
W WARUNKACH ZABRUDZENIOWYCH**



P. 3347/88

**ELEKTRYKA**

**Z. 112  
GLIWICE  
1988**

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

ZESZYTY NAUKOWE

Nr 965

ALFRED KAŁUŻNY



P. 3347 / 88

METODY MODELOWE OCENY

WŁASNOŚCI IZOLATORÓW

NAPOWIETRZNYCH W.N.

W WARUNKACH ZABRUDZENIOWYCH

GLIWICE 1988



OPINIODAWCY

Prof. dr hab. inż. Romuald Kosztaluk

Doc. dr inż. Jerzy Saferna

KOLEGIUM REDAKCYJNE

REDAKTOR NACZELNY — Prof. dr hab. inż. Jan Węgrzyn

REDAKTOR DZIAŁU — Doc. dr inż. Zofia Cichowska

SEKRETARZ REDAKCJI — Mgr Elżbieta Stinzing

OPRACOWANIE REDAKCYJNE

Mgr Roma Łoś

Wydano za zgodą  
Rektora Politechniki Śląskiej

PL ISSN 0072-4688

Dział Wydawnictw Politechniki Śląskiej  
ul. Kujawska 3, 44-100 Gliwice

Nakł. 180+85 Ark. wyd. 9,6 Ark. druk. 8,875 Papier offsetowy kl. 70x100, 70g  
Oddano do druku 21.07.88 Podpis. do druku 5.09.88 Druk ukończ. we wrześniu 1988  
Zam. 556/88 C-24 Cena zł 192,-

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

P271/88

SPIS TREŚCI

	Str.
WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ .....	9
1. WSTĘP .....	11
1.1. Przedmiot i cel pracy .....	11
1.2. Przegląd literatury .....	13
1.3. Zakres i układ treści .....	15
2. ANALIZA ODDZIAŁYWANIA ZANIECZYSZCZONEJ ATMOSFERY NA PRACĘ NA- POWIETRZNYCH UKŁADÓW ELEKTROIZOLACYJNYCH W.N. ....	17
2.1. Napowietrzne układy elektroizolacyjne w.n. ....	17
2.2. Charakterystyka oddziaływań środowiskowych .....	23
2.2.1. Narażenia naturalne .....	23
2.2.2. Narażenia sztuczne .....	23
2.2.3. Warunki meteorologiczne .....	25
2.3. Warunki tworzenia się warstwy zabrudzeniowej .....	25
2.3.1. Mechanizm osadzania się pyłów .....	25
2.3.2. Wpływ wiatru na tworzenie się warstwy zabrudzenio- wej .....	27
2.3.3. Mechanizm czyszczącego działania wiatru i deszczu	34
2.3.4. Geometryczny współczynnik samooczyszczania .....	42
2.4. Wpływ własności powietrza otaczającego na konduktywność warstwy zabrudzeń przemysłowych .....	43
2.5. Teoria stanu zabrudzenia powierzchni izolatorów .....	46
2.5.1. Wybór parametru oceny stanu zabrudzenia .....	46
2.5.2. Model matematyczny stanu powierzchni izolatorów na- powietrznych wysokiego napięcia .....	48
2.5.3. Przykład wykorzystania praktycznego modelu matema- tycznego .....	59
2.5.4. Numeryczna analiza stanu zabrudzenia powierzchni izolatorów .....	61
2.6. Wnioski .....	64
3. WYTRZYMAŁOŚĆ ELEKTRYCZNA IZOLATORÓW W WARUNKACH ZABRUDZENIOWYCH	66
3.1. Wytrzymałość elektryczna izolatorów w warunkach równomier- nej warstwy zabrudzeń .....	66

	Str.
3.1.1. Wprowadzenie .....	66
3.1.2. Analiza modelu fizycznego wyładowania zabrudzeniowego .....	68
3.1.3. Założenia wstępne do opracowania modelu matematycznego wyładowania zabrudzeniowego .....	71
3.1.4. Model matematyczny wyładowania zabrudzeniowego ...	73
3.1.5. Weryfikacja modelu matematycznego wyładowania zabrudzeniowego .....	81
3.2. Wytrzymałość elektryczna izolatorów w warunkach nierównomiernej warstwy zabrudzeniowej .....	84
3.2.1. Wprowadzenie .....	84
3.2.2. Analiza modelu fizycznego wyładowania zabrudzeniowego w warunkach eksploatacyjnych .....	89
3.2.3. Model matematyczny wyładowania elektrycznego .....	94
3.2.4. Obliczenia przykładowe eksploatacyjnej charakterystyki zabrudzeniowej izolatorów .....	97
3.2.5. Ocena modelu matematycznego .....	97
3.2.6. Metoda numeryczna analizy wytrzymałości elektrycznej zabrudzeniowej izolatorów w.n. ....	104
3.3. Wnioski .....	106
4. ODPORNOŚĆ ZABRUDZENIOWA IZOLATORÓW W.N. W REJONIE O ZANIECZYSZCZONEJ ATMOSFERZE .....	108
4.1. Odporność zabrudzeniowa jako parametr oceny możliwości eksploatacyjnej .....	108
4.2. Metoda analityczno-wykreslna wyznaczania odporności zabrudzeniowej izolatorów .....	112
4.3. Przykład wykorzystania praktycznego .....	114
4.4. Metoda numeryczna oceny czasu bezzakłócenieniowej eksploatacji izolatorów .....	116
4.5. Wnioski .....	122
5. ZAKOŃCZENIE .....	123
5.1. Podsumowanie i wnioski ogólne .....	123
5.2. Kierunki dalszych badań .....	127
LITERATURA .....	129
STRESZCZENIA .....	136

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ПЕРЕЧЕНЬ ГЛАВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	9
1. ВВЕДЕНИЕ .....	11
1.1. Предмет и цель работы .....	11
1.2. Обзор литературы .....	13
1.3. Объём и распределение содержания работы .....	15
2. АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЗАГРЯЗНЕННОЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА РАБОТУ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ .....	17
2.1. Наружные электроизоляционные конструкции высокого напряжения .....	17
2.2. Характеристика воздействия окружающей среды .....	23
2.2.1. Природные факторы .....	23
2.2.2. Искусственные факторы .....	23
2.2.3. Метеорологические факторы .....	25
2.3. Условия образования слоя загрязнения .....	25
2.3.1. Механизм осаживания пыли .....	25
2.3.2. Влияние ветра на образование слоя загрязнения .....	27
2.3.3. Механизм очищающего действия ветра и дождя .....	34
2.3.4. Геометрический коэффициент самоочистки .....	42
2.4. Влияние свойств окружающего воздуха на проводимость слоя загрязнения .....	43
2.5. Теория состояния загрязнённости поверхности изоляторов ...	46
2.5.1. Выбор параметров оценки загрязнения .....	46
2.5.2. Математическая модель .....	48
2.5.3. Пример использования практической математической модели .....	59
2.5.4. Числовой анализ загрязнения поверхности изоляторов .....	61
2.6. Выводы .....	64
3. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ИЗОЛЯТОРОВ В УСЛОВИЯХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ .....	66
3.1. Электрическая прочность изоляторов в условиях равномерного загрязнения .....	66
3.1.1. Введение .....	66
3.1.2. Анализ физической модели загрязнённого разряда ....	68



	Стр.
3.1.3. Основные исходные данные для разработки математической модели разряда при загрязнении .....	71
3.1.4. Математическая модель разряда при загрязнении .....	73
3.1.5. Проверка математической модели .....	81
3.2. Электрическая прочность изоляторов в условиях неравномерного загрязнения .....	84
3.2.1. Введение .....	84
3.2.2. Анализ физической модели электрического разряда ...	89
3.2.3. Математическая модель электрического разряда .....	94
3.2.4. Примеры расчётов эксплуатационной характеристики при загрязнении изоляторов .....	97
3.2.5. Оценка математической модели .....	97
3.2.6. Метод числового анализа электрической прочности при загрязнении изоляторов высокого напряжения .....	104
3.3. Выводы .....	106
4. СТОЙКОСТЬ НА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ИЗОЛЯТОРОВ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ В РАЙОНЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ .....	108
4.1. Стойкость на загрязнения как параметр оценки эксплуатационных свойств .....	108
4.2. Аналитическо-графический метод определения стойкости изоляторов в условиях загрязнения .....	112
4.3. Пример практического применения .....	114
4.4. Числовой метод оценки времени бесперебойной эксплуатации изоляторов .....	116
4.5. Выводы .....	122
5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	123
5.1. Подведение итогов и общие выводы .....	123
5.2. Направление дальнейших исследований .....	127
ЛИТЕРАТУРА .....	129
РЕЗЮМЕ .....	136

CONTENTS

	Page
LIST OF MORE IMPORTANT DENOTATIONS .....	9
1. INTRODUCTION .....	11
1.1. Subject of monography and the purpose of the paper .....	11
1.2. Bibliography review .....	13
1.3. Range and content arrangement .....	15
2. ANALYSIS OF THE EFFECT OF THE POLLUTED ATMOSPHERE ON THE OPERATION OF OVERHEAD ELECTROINSULATING h.V. systems .....	17
2.1. Overhead electroinsulating h.V. systems .....	17
2.2. Characteristic of environmental effects .....	23
2.2.1. Natural hazards .....	23
2.2.2. Artificial hazards .....	23
2.2.3. Meteorological factors .....	25
2.3. Conditions of formation of the pollution layer .....	25
2.3.1. Mechanism of dust deposition .....	25
2.3.2. Influence of wind on the formation of the pollution layer .....	27
2.3.3. Mechanism of the cleaning effect of wind and rain .....	34
2.3.4. Geometrical coefficient of self-cleaning .....	42
2.4. Influence of the properties of ambient air on the conductivity of the pollution layer .....	43
2.5. Theory of the state of pollution of the insulator surface .....	46
2.5.1. Selection of the parameter of assessing the state of pollution .....	46
2.5.2. Mathematical model .....	48
2.5.3. Example of partial utilization of the mathematical model .....	59
2.5.4. Numerical analysis of the state of pollution of the insulator surface .....	61
2.6. Conclusions .....	64
3. ELECTRIC STRENGTH OF INSULATORS IN THE CONDITIONS OF POLLUTION .....	66
3.1. Electric strength of insulators in the conditions of a uniform layer of pollution .....	66



3.1.1. Introduction .....	66
3.1.2. Analysis of a physical model of pollution discharge .....	68
3.1.3. Preliminary assumptions for the elaboration of a mathematical model of pollution discharge .....	71
3.1.4. Mathematical model of pollution discharge .....	73
3.1.5. Verification of the mathematical model .....	81
3.2. Electric strength of insulators in the conditions of non-uniform pollution layer .....	84
3.2.1. Introduction .....	84
3.2.2. Analysis of a physical model of electric discharge .....	89
3.2.3. Mathematical model of electric discharge .....	94
3.2.4. Example of the calculation of the operating pollution characteristic of insulators .....	97
3.2.5. Assessment of the mathematical model .....	97
3.2.6. Numerical method of the analysis of the electric - pollution strength of h.v. insulators .....	104
3.3. Conclusions .....	106
4. POLLUTION RESISTANCE OF H.V. INSULATORS IN THE OPERATION REGIMION .....	108
4.1. Pollution resistance as a parameter of assessing operational possibilities .....	108
4.2. Analytical - diagrammatic method determining the pollution resistance of insulators .....	112
4.3. Example of practical application .....	114
4.4. Numerical method of assessing the time of no-interference operation of insulators .....	116
4.5. Conclusions .....	122
5. FINAL REMARKS .....	123
5.1. Summing up and general conclusions .....	123
5.2. Directions of further studies .....	127
REFERENCES .....	129
SUMMARY .....	136

$\delta$	- grubość warstwy osadu zabrudzeniowego,
D	- średnica klosza izolatora,
d	- średnica pnia izolatora,
$d_s$	- średnica zastępcza ziaren pyłu,
$\bar{E}(\%_{po}, d)$	- średnia wartość natężenia pola elektrycznego przy przeskoku zabrudzeniowym dla konduktywności powierzchniowej izolatora równej konduktywności początkowej ( $\%_{po}$ ) i średnicy pnia izolatora (d),
f	- współczynnik kształtu izolatora,
$f_1$	- współczynnik kształtu i-tego elementu jednostkowego izolatora,
g	- grubość klosza,
$I_u$	- prąd upływu po zabrudzonej powierzchni izolatora,
$k^*$	- współczynnik przepięć długotrwałych (łączeniowych i dorywczych),
L	- długość części izolacyjnej izolatora,
$L_u$	- długość drogi upływu izolatora,
$L_{ucz}$	- długość drogi upływu czyszczonej deszczem,
$l_{kr}$	- długość krytyczna łuku wędrującego (cząstkowego),
M	- własności meteorologiczne w rejonie eksploatacji izolacji,
n	- liczba kloszy izolatora,
p	- podziałka kloszowa izolatora,
$P_k$	- parametry konstrukcyjne izolatora,
$Q_c$	- opad pyłów w rejonie eksploatacji,
$Q_i$	- ciepło Joule'a wydzielone w warstwie zabrudzeń na jednostkowej części izolatora,
$R_p$	- rezystancja powierzchniowa izolatora,
$t_e$	- czas eksploatacji izolatora,
$t_e^*$	- czas eksploatacji do przeskoku zabrudzeniowego,
t(1)	- jednostkowy przedział czasu - cyklicznej zmiany warunków meteorologicznych,
U	- poziom napięcia podanego na układ elektroizolacyjny,



- $U_{fn}$  - napięcie robocze izolatora,
- $U_{frmax}$  - maksymalne napięcie robocze układu elektroizolacyjnego,
- $U_{frmax}^*$  - maksymalne napięcie robocze układu elektroizolacyjnego z uwzględnieniem przepięć długotrwałych,
- $U_{\lambda cz}$  - napięcie podtrzymujące wyładowanie łukowe pomiędzy brzegami sąsiednich kloszy izolatora,
- $U_{pzw}$  - maksymalne napięcie wytrzymywane w warunkach zabrudzeniowych,
- $U_{pz0,5}$  - napięcie przeskoku zabrudzeniowego 50% przy równomiernym rozkładzie warstwy zabrudzeniowej na powierzchni izolatora,
- $U_{pze0,5}$  - napięcie przeskoku zabrudzeniowego 50% przy nierównomiernym (eksploatacyjnym) rozkładzie warstwy zabrudzeń na powierzchni izolatora,
- $w$  - wilgotność powietrza otaczającego,
- $w_k$  - wysięg kloszy,
- $Z$  - narażenia zabrudzeniowe,
- $\alpha_{g,d}$  - kąt pochylenia powierzchni górnej i dolnej klosza,
- $\delta$  - gęstość masy zabrudzeń,
- $\delta_d$  - współczynnik opadów deszczu w rejonie eksploatacji izolatorów,
- $\kappa$  - konduktywność wodnego roztworu zabrudzeń,
- $\kappa_p$  - konduktywność powierzchniowa izolatora, wyrażona iloczynem konduktywności zabrudzeń i grubości warstwy zabrudzeń na powierzchni izolatora,
- $\kappa_{pgr}$  - wartość konduktywności powierzchniowej izolatora, przy której możliwe jest wyładowanie zabrudzeniowe dla zadanego narażenia napięciowego izolatora,
- $\varphi_d$  - współczynnik konduktywności wody deszczowej,
- $\kappa_{wn}$  - konduktywność normalna wody deszczowej,
- $\kappa_z$  - konduktywność wodnych roztworów zabrudzeń,
- $\varphi_d$  - współczynnik samooczyszczania deszczem,
- $\varphi_{nz}$  - współczynnik nierównomierności rozkładu zabrudzeń na powierzchni izolatorów wzdłuż drogi upływu w warunkach eksploatacyjnych,
- $\tau$  - temperatura powietrza otaczającego,
- $\gamma_{p,o}$  - współczynnik położenia pracy izolatora: p - pionowe, o - poziome.

## 1. WSTĘP

### 1.1. PRZEDMIOT I CEL PRACY

W monografii podjęto próbę opracowania uogólnionych metod analizy warunków pracy i możliwości eksploatacyjnej izolacji napowietrznej wysokiego napięcia oraz wykorzystania do celów modelowania praktycznego nowoczesnych maszyn cyfrowych.

Układy elektroizolacyjne napowietrznych linii i stacji elektroenergetycznych podlegają silnym oddziaływaniom:

- warunków otoczenia, a zwłaszcza zanieczyszczeniom atmosfery i czynnikom meteorologicznym,
- narażeń napięciowych, będących funkcją napięcia roboczego i poziomu przepięć długotrwałych (łączeniowych i dorywczych).

Zanieczyszczenia przemysłowe powietrza powodują zmianę stanu powierzchni izolatorów z czasem eksploatacji, co w określonych warunkach meteorologicznych prowadzi do obniżenia ich wytrzymałości elektrycznej. Obniżona wytrzymałość izolatorów w warunkach narażeń zabrudzeniowych powoduje wzrost zawodności układów przesyłowych wysokiego napięcia<sup>1)</sup>. Zagadnienia związane z badaniem zjawisk obniżenia się wytrzymałości elektrycznej i następstw wynikających z tego faktu są od kilkadziesiąt lat bardzo ważnym problemem techniki elektroizolacyjnej [4, 6, 8, 10, 11, 14, 39, 44, 50, 64, 80, 96, 106 i in.]. Mimo upływu tak znacznego czasu problem ten jest ciągle aktualny, a nawet nabiera coraz większego znaczenia ze względu na rosnące zanieczyszczenie atmosfery<sup>2)</sup> (co ilustruje tablica 1.1) oraz konieczność poprawy niezawodności pracy układów przesyłowych w.n. Wyrazem tego jest rosnąca liczba publikacji oraz prac organizacji międzynarodowych (CIGRE i IEC) poświęconych tym zagadnieniom.

1) Przeskok zabrudzeniowy na izolacji liniowej lub stacyjnej w.n. może spowodować krótkotrwałe zakłócenie lub poważną awarię w systemie elektroenergetycznym, których następstwem są znaczne straty gospodarcze wynikające z nie dostarczonej energii elektrycznej oraz uszkodzeń urządzeń elektrycznych.

2) Wzrost liczby źródeł, ich intensywności, zasięgu oraz rodzaju zanieczyszczeń (przemysłowe, komunikacyjne, morskie, słonych ziem i agrotechniczne).



Tablica 1.1

Zestawienie danych charakteryzujące stan zanieczyszczenia atmosfery na terenie GOP-u [136]

Źródło emisji	W roku 1980 tys. ton/rok			Stan przewidywany w 1990 r. tys. ton/rok		
	pył	SO <sub>2</sub>	N <sub>x</sub> O <sub>y</sub>	pył	SO <sub>2</sub>	N <sub>x</sub> O <sub>y</sub>
Energetyka	1020,7	779,9	189,1	1132,1	823,2	213,4
Przemysł	460,3	227,0	87,3	444,0	215,3	69,6
Diobni użytkownicy	145,4	232,7	21,8	197,6	316,2	29,7
Transport	0,3	0,6	4,4	0,7	1,3	9,9
Razem	1626,7	1240,2	302,6	1774,4	1356,0	322,6

Aktualność tematyki zabrudzeniowej w formułowaniu zadań dla izolacji wysokiego napięcia jest również uwarunkowana napowietrznym sposobem przesyłu mocy<sup>1)</sup>. Elektroenergetyczne układy napowietrzne, mimo trudności technicznych (wytrzymałość elektryczna, mechaniczna i zakłócenia radioelektryczne) oraz ograniczeń środowiskowych (ograniczone tereny pod budowę linii i stacji elektroenergetycznych w.n. i ochronę środowiska naturalnego), będą stanowić jeszcze przez wiele dziesiątków lat podstawowy sposób przesyłu mocy - przy rosnących poziomach napięcia roboczego sieci rozdzielczych.

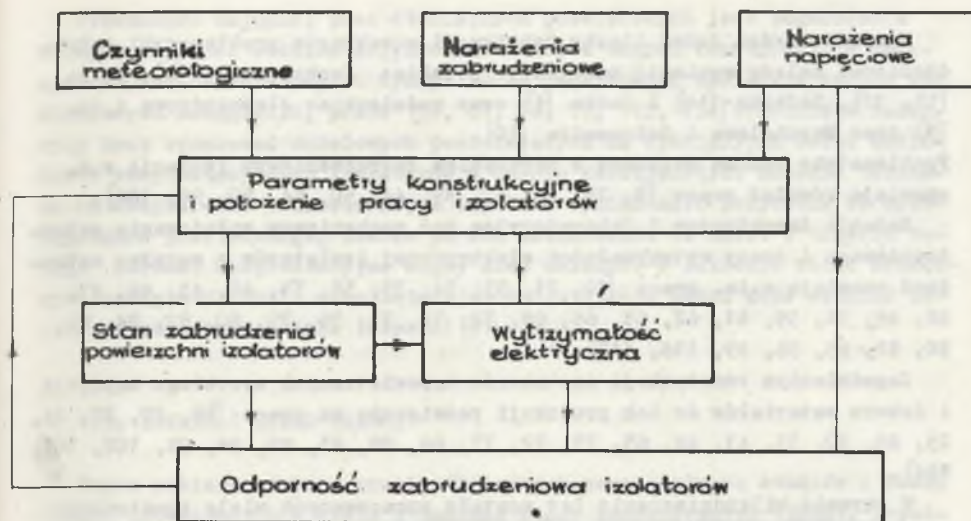
Problematyka zabrudzeniowa w technice elektroizolacyjnej obejmuje szeroki zakres zagadnień związanych z:

- oceną terenu eksploatacji pod względem narażenia zabrudzeniowego,
- konstruowaniem oraz badaniem izolatorów i łańcuchów elektroizolacyjnych,
- projektowaniem, doбором i oceną możliwości eksploatacyjnych izolacji napowietrznej w.n.,
- eksploatacją izolacji napowietrznej wysokiego napięcia na terenach o zanieczyszczonej atmosferze.

Zagadnienia związane z pracą izolacji napowietrznej wysokiego napięcia w rejonach o zanieczyszczonej atmosferze ilustruje schemat blokowy przedstawiony na rys. 1.1.

Rozwiązanie systemowe tych zagadnień i wdrażanie ich do praktyki inżynierskiej, w zakresie: prac projektowo-konstrukcyjnych, doboru i zasad

<sup>1)</sup> Wprowadzenie nowych sposobów przesyłu mocy przez kable nadprzewodzące i falowody mikrofalowe ze względów ekonomicznych i technicznych jest znacznie ograniczone.



Rys. 1.1. Schemat zagadnień zabrudzeniowych w ujęciu problemowym  
Fig. 1.1. Diagram of pollution matters in a problem approach

przewodzenia eksploatacji izolatorów w.n. w rejonach o zanieczyszczonej atmosferze, wymaga opracowania modeli fizycznych i analitycznych opisujących podstawowe zależności związane z obniżaniem się wytrzymałości elektrycznej i możliwości eksploatacyjnych izolatorów.

Z analizy aktualnego stanu badań wynika, że istnieje wystarczająco dużo danych - pomiarowych i wyników obliczeń - do podjęcia syntetycznej oceny odporności zabrudzeniowej izolatorów dla określonych warunków eksploatacyjnych.

Autor wysuwa tezę, iż przy obecnym stanie wiedzy istnieją możliwości opracowania modeli matematycznych opisujących własności izolatorów w rejonach zabrudzeniowych i na ich podstawie zaproponowano metody oceny odporności zabrudzeniowej izolatorów napowietrznych w.n. z praktycznym wykorzystaniem elektronicznych maszyn cyfrowych.

## 1.2. PRZEGLĄD LITERATURY

Nad rozwiązaniem zagadnień związanych z pracą izolacji napowietrznej w.n. w warunkach zabrudzeniowych pracuje wiele ośrodków naukowo-badawczych w CSRR, Francji, Japonii, NRD, RFN, USA, Wielkiej Brytanii, Włoszech, ZSRR i innych. W kraju prace te prowadzone są w: Warszawie - Instytut Elektrotechniki - Oddział Materiałoznawstwa Elektrycznego, Gliwicach - Politechnika Śląska i ZE Gliwice, Poznaniu - Energoprojekt i Szczecinie - Politechnika Szczecińska.



Spośród bardzo dużej liczby publikacji w zakresie problematyki zabrudzeniowej należy wymienić monografie polskie: Juchniewicz [6], Pohla [11, 12], Saferny [14] i Gacka [4] oraz radzieckie: Aleksandrowa i in. [1] oraz Merchalewa i Sołomonika [10].

Problematykę ogólną związaną z narażeniem zabrudzeniowym izolacji w.n. omawiają również prace [8, 23, 28, 32, 39, 44, 50, 64, 80, 96, 106].

Badania teoretyczne i laboratoryjne nad mechanizmem wyładowania zabrudzeniowego i oceny wytrzymałości elektrycznej izolatorów z warstwą zabrudzeń omawiają m.in. prace [19, 21, 33, 34, 35, 38, 39, 40, 45, 46, 47, 48, 49, 54, 59, 61, 62, 63, 65, 69, 72, 74, 75, 76, 79, 80, 82, 84, 85, 90, 91, 95, 96, 99, 116, 117].

Zagadnieniom konstrukcji izolatorów napowietrznych wysokiego napięcia i doboru materiałów do ich produkcji poświęcone są prace [18, 20, 22, 24, 25, 26, 30, 31, 41, 42, 63, 71, 72, 77, 86, 88, 93, 95, 96, 98, 102, 103, 104].

W okresie kilkudziesięciu lat zostało opracowanych wiele konstrukcji izolatorów kołpakowych i długopniowych, z których tylko niektóre potwierdziły przypisywane im własności przeciwzabrudzeniowe.

W trakcie prac autora nad zagadnieniami konstruowania izolatorów do warunków zabrudzeniowych, od połowy lat 60 pod kierunkiem profesora T. Stępniewskiego, zostało opracowanych szereg konstrukcji izolatorów długopniowych z kloszem daszkowym [101, 120, 134, 135] oraz oryginalne konstrukcje izolatorów z kloszem śrubowym [52, 53, 118, 119, 121]. Jednak, ze względu na brak zainteresowania krajowego przemysłu izolatorowego i energetyki nowymi rozwiązaniami (z wyjątkiem izolatora IP 75/17), nie podjęto dotychczas na szerszą skalę prac wdrożeniowych. Dodajmy, że przy opracowywaniu nowych konstrukcji izolatorów okazało się, że również w definiowaniu znaczenia parametrów oraz metod oceny własności przeciwzabrudzeniowych istnieje duża niejednoznaczność. Brak też uzasadnionych wymagań stawianych izolatorom przeznaczonym do pracy w rejonach o dużym zanieczyszczeniu atmosfery. Istniejące przepisy normatywne [124, 130] odnośnie do metod oceny parametrów terenu zabrudzeniowego oraz doboru izolatorów są dyskutowane w kraju i w organizacjach międzynarodowych.

Do analizy zagadnień związanych z oddziaływaniem czynników otoczenia (meteorologicznych) na warunki powierzchniowe izolatorów napowietrznych w.n. i ich wytrzymałość elektryczną autor wykorzystał wyniki następujących prac [2, 7, 9, 13, 27, 29, 36, 37, 43, 55, 57, 75, 81, 105, 107, 108, 112, 113, 131].

Bardzo wiele prac prowadzonych w ramach CIGRE i IEC oraz krajowych Komitetów Normalizacyjnych poświęconych jest metodyce badań zabrudzeniowych w warunkach laboratoryjnych i terenowych, z których autor wymienia tylko niektóre [8, 28, 46, 60, 69, 78, 88, 92, 109, 110, 111, 123, 124, 127, 128, 129, 130].

Stosunkowo najmniej prac studialnych poświęconych jest zagadnieniu oceny możliwości eksploatacyjnych izolatorów danych konstrukcji w zadanych warunkach terenowych. Wyniki badań cząstkowych zawierają, oprócz wymienionych monografii, prace [55, 67, 74, 75, 113, 132]. Istnieje całkowity brak opracowań modelowych pozwalających na symulacyjną ocenę możliwości eksploatacyjnych izolatorów w czasie rzeczywistym. Badania terenowe są długotrwałe i kosztowne, a uzyskane wyniki mało przydatne do wykorzystania praktycznego, bowiem po ich zakończeniu (a nawet w trakcie badań) warunki eksploatacyjne mogły ulec zmianie. W zakresie metod modelowych oceny możliwości eksploatacyjnych izolatorów autor może wskazać zaledwie jedno opracowanie (własne) [51].

### 1.3. ZAKRES I UKŁAD TREŚCI

Praca zawiera wyniki, prawie 15-letnich samodzielnych studiów i badań autora prowadzonych w kraju i podczas staży zagranicznych (ZSRR), przedstawione na tle osiągnięć światowych. Jest próbą usystematyzowania problematyki zabrudzeniowej oraz opracowania modeli fizykalnych i analitycznych opisujących zjawiska związane z oddziaływaniem czynników środowiskowych na pracę izolatorów napowietrznych w.n.

W rozdziale drugim zawarto analizę czynników i charakterystykę parametrów narażenia zabrudzeniowego - w rejonie przemysłowym - warunkujących tworzenie się warstwy zanieczyszczeń na powierzchni izolatorów. W analizie warunków tworzenia się warstwy zabrudzeniowej, jej intensywności i zmienności w czasie uwzględniono również oddziaływanie czynników meteorologicznych (czyszczące działanie wiatru i deszczu). Ta pogłębiona analiza czynników narażeń zabrudzeniowych oraz roli i znaczenia parametrów konstrukcyjnych i położenia pracy izolatorów pozwoliła na opracowanie modelu matematycznego zmiany stanu powierzchni izolatorów z czasem eksploatacji. Model ten po zaprogramowaniu na maszynie cyfrowej stwarza możliwości symulacyjnego badania rozwiązań konstrukcyjnych izolatorów napowietrznych w.n. i narażeń zabrudzeniowych.

W rozdziale trzecim przedstawiono interpretację fizyczną i zaproponowano model matematyczny zjawiska wyładowania elektrycznego zabrudzeniowego. Poprawność modelu zweryfikowano opierając się na istniejących danych prac eksperymentalnych. Zaprogramowana na emc metoda analitycznego wyznaczania wytrzymałości elektrycznej zabrudzeniowej izolatorów pozwala na symulacyjne badanie wpływu parametrów konstrukcyjnych oraz czynników samooczyszczania w mechanizmie wyładowania zabrudzeniowego. W opracowanych modelach analitycznego wyznaczania charakterystyk zabrudzeniowych izolatorów z równomierną i nierównomierną (w warunkach eksploatacyjnych) warstwą zabrudzeniową zwrócono uwagę na zależność standardowego odchylenia poziomu napięcia przeskoku 50% i wytrzymywanego od wartości konduktywności powierzchniowej.



Rozdział czwarty zawiera syntetyczne ujęcie wyników badań analitycznych zawartych w monografii. Korzystając z modeli matematycznych stanu powierzchni i wytrzymałości elektrycznej zabrudzeniowej izolatorów opracowanych w rozdziałach 2 i 3, autor zaproponował dwie oryginalne metody: graficzną i numeryczną oceny możliwości eksploatacyjnych izolatorów w rejonach o zanieczyszczonej atmosferze. W rozdziale tym wskazano na istotne znaczenie zmiany poziomu narażenia napięciowego w ocenie możliwości eksploatacyjnych izolatorów. Napięcie to jest równe sumie napięcia roboczego i przepięć długotrwałych (o częstotliwości zbliżonej do roboczej).

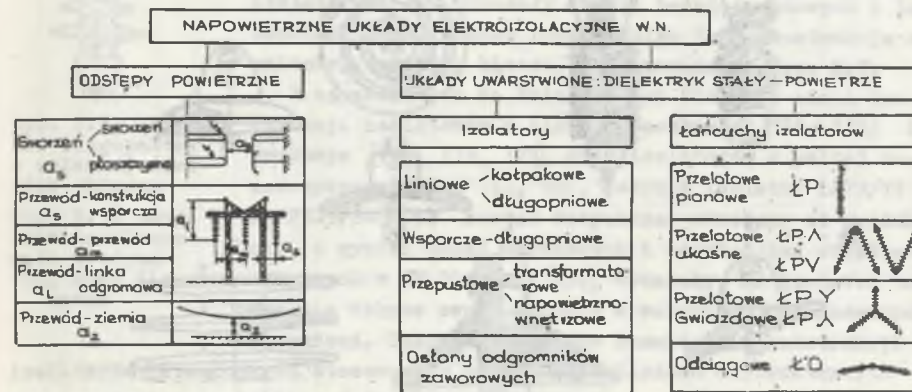
Końcowe podsumowanie i wnioski wynikające z badań analitycznych oraz kierunki dalszych prac nad uściśleniem i rozwinięciem zaproponowanego modelowego ujęcia zagadnień pracy izolacji napowietrznej na terenach uprzemysłowionych zawarto w rozdziale piątym.

## 2. ANALIZA ODDZIAŁYWANIA ZANIECZYSZCZONEJ ATMOSFERY NA PRACĘ NAWIETRZNYCH UKŁADÓW ELEKTROIZOLACYJNYCH W.N.

### 2.1. NAWIETRZNE UKŁADY ELEKTROIZOLACYJNE W.N.

Napowietrznymi układami elektroizolacyjnymi są odstępy powietrzne i izolatory. Odstępy powietrzne w.n. są układami elektroizolacyjnymi o polu niejednorodnym i stanowią naturalne odstępy pomiędzy elementami linii lub stacji elektroenergetycznej o wysokim potencjale względem elementów o innym potencjale lub innej biegunowości oraz pomiędzy elektrodami ochronnymi (iskierniki i pierścienie ochronne).

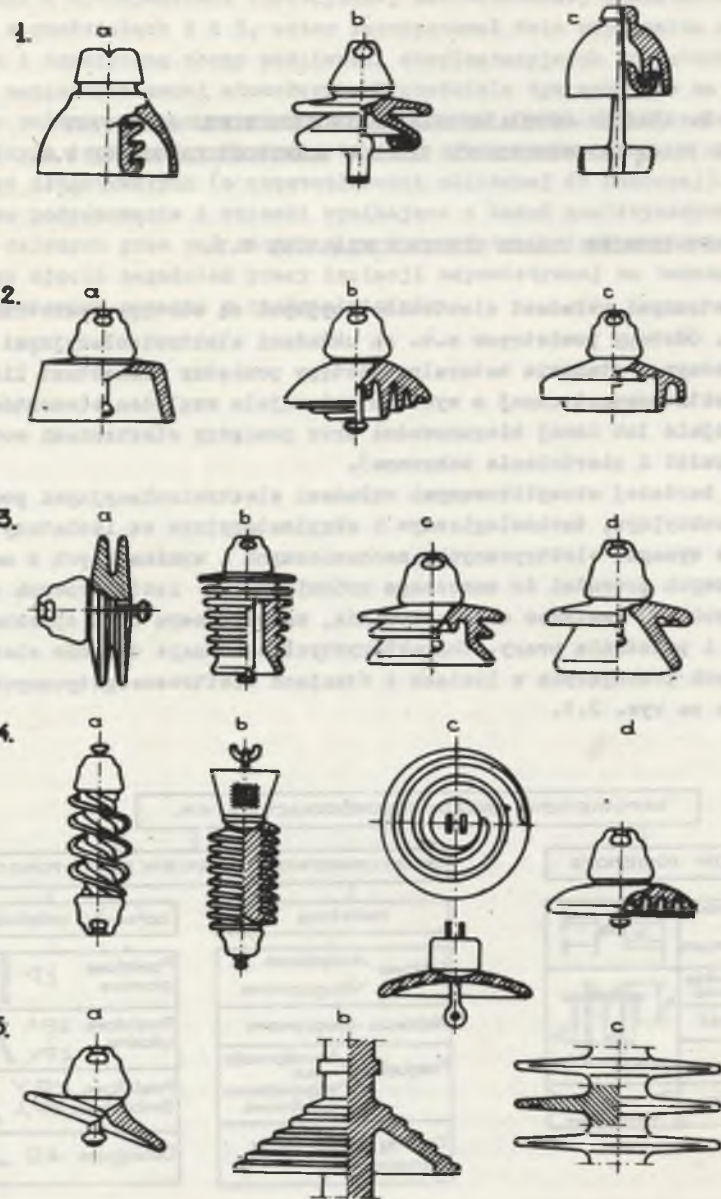
Daleko bardziej skomplikowanymi układami elektroizolacyjnymi pod względem konstrukcyjnym, technologicznym i eksploatacyjnym są izolatory w.n. Spełnienie wymagań elektrycznych, mechanicznych i wynikających z narażeń środowiskowych prowadzi do znacznego zróżnicowania izolatorowych układów izolacyjnych pod względem ukształtowania, materiałowym oraz sposobu zawieszenia i położenia pracy. Charakterystyczne rodzaje układów elektroizolacyjnych pracujących w liniach i stacjach elektroenergetycznych w.n. zestawiono na rys. 2.1.



Rys. 2.1. Podstawowe rodzaje napowietrznych układów elektroizolacyjnych w.n.

Fig. 2.1. Fundamental kinds of overhead insulating h.v. systems.





Rys. 2.2. Przeglądowy zestaw konstrukcji izolatorów napowietrznych przeznaczonych do pracy w warunkach zanieczyszczonej atmosfery  
 Fig. 2.2. Review specification of the constructions of overhead insulators

Niezakłócone wypełnianie zadań eksploatacyjnych różnych rodzajów układów elektroizolacyjnych, związanych z oddziaływaniami narażeń mechanicznych, elektrycznych i środowiskowych, wymaga właściwego określenia warunków technicznych i ich wymiarowania.

W analizie oceny możliwości eksploatacyjnych linii i stacji w.n. nie mogą być pominięte zagadnienia wpływu narażeń zabrudzeniowych środowiska na wytrzymałość elektryczną odstępów powietrznych: iskierników i współpracujących równoległe z dielektrykiem stałym.

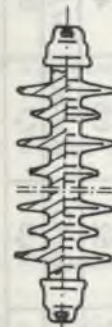
Izolatory napowietrzne wysokiego napięcia dzielą się zasadniczo na kołpakowe i długopniowe. Ze względu na istniejące narażenia zabrudzeniowe opracowano w ostatnich kilkudziesięciu latach wiele konstrukcji, których idee przedstawiono na rys. 2.2. Konstrukcje 1a, b, c posiadają baseny olejowe wzdłuż drogi upływu. Dążenie do maksymalnego wydłużenia drogi upływu cechowało konstrukcje 2a, b, c i 3a, b, c, d. Konstrukcje ze sterowanym rozkładem napięcia przedstawia rys. 4c i d. Konstrukcje 4a i b przedstawiają izolatory długopniowe z kłosem śrubowym [24, 42, 52, 120], a 5b z powierzchnią schodkową [96].

W krajowych ośrodkach naukowo-badawczych<sup>1)</sup> opracowano: szereg konstrukcji izolatorów z kłosem daszkowym gładkim [134], izolatory z kłosem daszkowym o powierzchni schodkowej [96] i izolatory o przemiennym wysięgu kłosa [94] z przeznaczeniem do pracy w rejonach zabrudzeń przemysłowych.

Wieloletnie prace teoretyczne i badania modelowe w naturalnych warunkach eksploatacyjnych zmierzały do określenia optymalnych parametrów konstrukcyjnych ww. izolatorów. Jak pokazały wyniki badań terenowych i laboratoryjnych, udanym rozwiązaniem jest konstrukcja o zmiennej średnicy kłosa, zobrażowana na rys. 2.3.

Z opracowanych na Politechnice Śląskiej wielu konstrukcji izolatorów z kłosem daszkowym [134, 135] i śrubowym [118, 119, 121] oraz izolatorów o pełnej samooczyszczalności [53, 56], jedynie izolator LP75/17 wg PN-1/S-91058 został dotychczas wdrożony do produkcji, a wyniki badań terenowych i doświadczeń eksploatacyjnych w ZE Gliwice [132] wykazały, że izolator ten spełnia dobrze swoje zadania w warunkach umiarkowanych zabrudzeń. Charakterystyczne rozwiązania konstrukcji

izolatorów ceramicznych stosowanych w krajowych liniach napowietrznych w.n. zestawiono w tabelicy 2.1.



Rys. 2.3. Izolator długopniowy o zmiennej średnicy kłosa  
 Fig. 2.3. Long-rod insulator with alternating shed diameter

<sup>1)</sup> Politechnika Wrocławska, Politechnika Śląska, Energoprojekt Poznań, OBR "CEREL" w Boguchwale i Instytut Elektrotechniki Oddz. Wrocław.

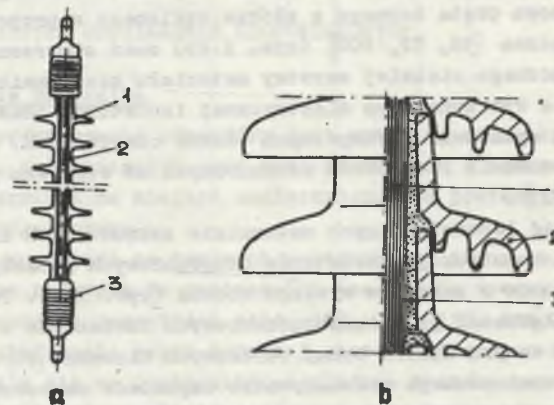


Tablica 2.1

Zestawienie przykładowych konstrukcji izolatorów stosowanych w krajowych liniach elektroenergetycznych w.n. (110-400 kV)

Typ izolatora	LP75/44	LP75/47	VKLF75/6	VKLS75/24	2375-17N	LK-280/170	LKZ280/170	ITC5-16
Producent-kraj	PRL	PRL	NRD	Dania	PRL	ZSRR	ZSRR	ZSRR
Materiał izolacyjny	porcelana elektrotechniczna							
Szkic konstrukcyjny								
Długość montażowa H mm	1270	1120	1270	1270	1270	170	170	170
Droga upływu L <sub>0</sub> mm	1970	2100	2500	3350	2090	300	420	387
Średnica klasza D mm	150	175	170	195	150	280	280	280
Średnica pnia d mm	75	75	75	75	75	—	—	—
Podziałka klaszowa p mm	75	52	65	48	60	—	—	—
Pochylenie klasza $\alpha/\alpha_d$ -	18/10	18/10	40/30	37/28	18/10	—	—	—
Współczynnik kształtu f -	6,8	6,9	7,7	9,2	7,1	0,65	1,04	0,86

Równoległe z rozwojem konstrukcji izolatorów porcelanowych i szklanych prowadzi się prace konstrukcyjne i badawcze (laboratoryjne i eksploatacyjne) nad układami izolacyjnymi kompozytowymi<sup>1)</sup> z zastosowaniem włókna szklanego i tworzyw sztucznych (rys. 2.4), których problematyka została opisana w wielu publikacjach, m.in. [22, 25, 30, 89, 93, 111, 112].



Rys. 2.4. Izolatory z tworzyw sztucznych  
a - Izolator z włókna szklanego i żywicy

1 - osłona z żywicy syntetycznej, 2 - pręt nośny z włókna szklanego, 3 - okucie

b - Izolator z włókna szklanego i osłony ceramicznej

1 - pręt nośny z włókna szklanego, 2 - osłona ceramiczna, 3 - materiał wypełniający

Fig. 2.4. Plastics insulators

a - Insulators made of glass fibre and resin

1 - synthetic resin sheathing, 2 - carrier rod of glass fibre, 3 - end cap

b - Insulator made of glass fibre and ceramic sheathing

1 - carrier rod of glass fibre, 2 - ceramic sheathing, 3 - filling material

Korzystne własności włókna szklanego i tworzyw syntetycznych znacznie poszerzają możliwości konstrukcyjne, technologiczne i eksploatacyjne izolatorów. Do głównych zalet izolatorów kompozytowych należą: bardzo duża wytrzymałość mechaniczna prętów szklano-epoksydowych, łatwiejsze i dokładniejsze kształtowanie powierzchni warstwy osłonowej, mała masa w stosunku do izolatorów ceramicznych, większa elastyczność i odporność na uderzenia, większa odporność na łuk elektryczny i możliwość automatyzacji linii

<sup>1)</sup> Układy izolacyjne kompozytowe stanowią konstrukcje izolatorów liniowych wsporczych, rozpórki izolacyjne oraz poprzeczники elementów nośnych elektroenergetycznych linii i stacji w.n.



technologicznych. Pomimo tych zalet izolatory kompozytowe ze względu na mniejszą odporność na prądy pełzające oraz zjawiska erozyjne i starzeniowe - dotychczas znanych materiałów syntetycznych - nie znalazły szerokiego zastosowania, zwłaszcza w warunkach zabrudzeniowych. Dla zwiększenia odporności izolatorów na działanie narażeń środowiskowych (promieniowania ultrafioletowego i wilgotności) oraz wyładowań niezupełnych jako warstwę osłonową pręta nośnego z włókna szklanego zaproponowano porcelanę elektrotechniczną [56, 72, 100] (rys. 2.4b) oraz utworzenie na powierzchni tworzywa sztucznego cienkiej warstwy materiału nieorganicznego [120].

Zwiększenie wytrzymałości elektrycznej izolatorów oraz zmniejszenie intensywności wyładowań niezupełnych (łuków cząstkowych) można uzyskać poprzez zastosowanie izolatorów ceramicznych ze szklivem półprzewodzącym [31, 41, 70, 71].

Wyniki badań laboratoryjnych naturalnie zabrudzonych izolatorów [112, 113], różnych konstrukcji izolatorów długopniowych wskazują na dobre właściwości izolatorów o zmiennym wysięgu klosza (rys. 2.3). Pewne wątpliwości co do oceny własności przeciwzabrudzeniowych izolatorów o zmiennych średnicach kloszy wnoszą wyniki badań terenowych Hirscha [46]. Zmniejszone możliwości bezpośredniego oddziaływania czynników czyszczących wzdłuż drogi upływu może spowodować zmniejszenie się czasu eksploatacji do przekroku zabrudzeniowego.

Bezzakłócenkowa praca układów elektroenergetycznych jest uwarunkowana również poprawną pracą w warunkach zabrudzeniowych układów izolacyjnych stacyjnych w.n. Rosnące zanieczyszczenie atmosfery jest często przyczyną awarii napowietrznych osłon izolatorów przepustowych, wyłączników i odgromników zaworowych. Zanieczyszczenie powierzchni osłony izolacyjnej odgromnika może być przyczyną nie tylko wyładowania powierzchniowego, ale również nieprawidłowej pracy odgromnika (w czasie gaszenia prądu następczego). Ze względu na znaczenie osiowego rozkładu napięcia odgromnika zaworowego najodpowiedniejsze, zdaniem autora, byłyby osłony z kloszem śrubowym. Dotychczasowe rozwiązania konstrukcyjne osłon izolacyjnych izolatorów przepustowych, wyłączników i odgromników posiadają klosze daszkowe o różnym ukształtowaniu powierzchni dolnej klosza, co ma zapewnić wymaganą przepisami PN drogę upływu.

Małe wykorzystanie krajowych opracowań konstrukcyjno-technologicznych izolatorów napowietrznych w.n. przeznaczonych do pracy w rejonach o przemysłowym zanieczyszczeniu atmosfery jest wynikiem małego zainteresowania przemysłu izolatorowego i energetyki. Zmianę tej sytuacji wymusić mogą narastające wymagania izolacyjne oraz warunki ekonomiczne.

Łańcuchy izolacyjne wykonane z różnych typów izolatorów kołpakowych i długopniowych w układzie przelotowym (pionowe) półodciągowym typu V, Y i  $\wedge$  oraz odciągowym (poziome) pracują aktualnie w liniach w.n. na terenach zabrudzeniowych. Konstrukcje te wymiarowane i budowane są nie tylko ze względu na istniejące wymagania techniczne, lecz przede wszystkim dla

zmniejszenia awaryjności zabrudzeniowej, którą osiąga się drogą znacznego przewymiarowania izolacji (układ  $\wedge$  w linii 110 kV). Zastosowanie układu: V,  $\wedge$ ,  $\wedge$  i Y powoduje zmianę warunków tworzenia się warstwy zabrudzeniowej na powierzchni izolatorów z kloszem daszkowym przez zwiększenie oddziaływania naturalnych czynników czyszczących (wiatr i deszcz).

## 2.2. CHARAKTERYSTYKA ODDZIAŁYWAŃ ŚRODOWISKOWYCH

### 2.2.1. Narażenia naturalne

Naturalne zanieczyszczenie atmosfery jest wynikiem oddziaływania: pyłów kosmicznych, wulkanicznych oraz burz piaskowych i słonych ziem. Wzdłuż wybrzeży morskich ma miejsce zanieczyszczenie powietrza cząstkami wody morskiej - bryza morska.

Pyły słonej gleby występują na terenach pustynnych o znacznym zasoleniu gleby. Podczas burz pyłowych na powierzchni izolatorów tworzy się warstwa pyłu ilastego o znacznej zawartości soli [107, 108, 110, 111].

W strefach oddziaływania bryzy morskiej cząsteczki wody o dużej konduktywności osadzają się na powierzchni izolatora tworząc prawie równomierną warstwę zabrudzeniową. Wiatr sztormowy może przenosić cząsteczki wody morskiej na odległość rzędu kilku a nawet kilkunastu kilometrów. Cząsteczki wody morskiej wprowadzone w obszar pola elektrycznego mogą spowodować również znaczne zmiany wytrzymałości elektrycznej powietrznych przerw iskrowych.

### 2.2.2. Narażenia sztuczne

Procesy przemysłowe oraz zabiegi agrotechniczne są przyczyną znacznego zanieczyszczenia atmosfery pyłami i gazami.

Pyły przemysłowe są produktami ubocznymi procesów technologicznych, głównie w energetyce, hutnictwie, górnictwie, chemii oraz przemyśle wyrobów materiałów budowlanych i transportu. Dla przykładu, emisja pyłów w 1980 r. przez elektrownie krajowe wynosiła 1.020,7 tys. ton i wykazuje stałą tendencję wzrostu w związku z rozwojem energetyki i spalaniem w elektrowniach coraz gorszych gatunków węgla. Wybrane właściwości fizyczne i chemiczne przykładowego pyłu elektrownianego i hutniczego zestawiono w tablicy 2.1. Zanieczyszczenie powietrza pyłami przemysłowymi powoduje tworzenie się na powierzchni izolatorów nierównomiernej warstwy zabrudzeniowej oraz zmianę wytrzymałości elektrycznej przerw iskrowych [58].

Gazy przemysłowe, łącząc się z cząsteczkami wody, dają związki aktywne chemicznie o dużej konduktywności. Skuteczność oddziaływania zanieczyszczeń gazowych uzależniona jest od warunków meteorologicznych. Cechą charakterystyczną oddziaływania narażenia gazowego jest duża zmienność w czasie eksploatacji.



Tablica 2.2

Wybrane własności fizyczne i chemiczne pyłów elektromnianych i hutniczych [136]

Rodzaj pyłu	Własności fizyczne				Główne związki chemiczne w %					
	$d_z$ $\mu m$	$\rho$ $kg/m^3$	$\mu$ $\mu S/m$	$Zr$ %	$SiO_2$	$Fe_2O_3$	$Al_2O_3$	$CaO$	$MgO$	$SO_3$
Elektromniany	40,6	2260	180000	13,74	46,5	11,0	17,2	7,4	4,3	3,3
Hutniczy	29,3	4330	117000	4,53	3,9	74,5	9,3	1,7	4,6	1,3

1) Procentowa zawartość cząstek rozpuszczalnych w wodzie.

### 2.2.3. Warunki meteorologiczne

Wytrzymałość elektryczną układów elektroizolacyjnych napowietrznych determinują w mniejszym lub większym stopniu następujące stany pogodowe:

- wzrost wilgotności powietrza i mgła,
- mżawka i deszcz o małej intensywności,
- deszcz,
- śnieg z deszczem i odwilż,
- temperatura,
- wiatr.

Zmiana podanych warunków meteorologicznych w postaci czystej nie stanowi poważnego zagrożenia dla pracy układów izolacyjnych napowietrznych. Dopiero oddziaływanie łączne narażeń zabrudzeniowych i ww. stanów pogodowych, powodujących wzrost wilgotności powietrza i powierzchni izolatorów, prowadzi do poważnego obniżenia wytrzymałości elektrycznej układów izolacyjnych. W rejonach narażeń przemysłowych niebezpieczne dla pracy układów elektroizolacyjnych są: mgła, mżawka, deszcz o małej intensywności, śnieg z deszczem i oblodzenia. W tych warunkach ze względu na długi czas oddziaływania wody i rozkład znacznej ilości cząstek rozpuszczalnych następuje wzrost konduktywności powierzchniowej izolatorów. Szczególnie trudne warunki pracy izolatorów występują podczas opadu mokrego śniegu, który nawilża warstwę zabrudzeniową nierównomiernie wzdłuż drogi upływu. Również zmiany temperatury otoczenia mogą spowodować adsorpcyjne zwilżenie powierzchni izolatorów i wzrost konduktywności powierzchniowej. Natomiast wiatr i deszcz (intensywny  $> 0,1$  mm/min) są czynnikami korzystnie wpływającymi na pracę izolacji napowietrznej w.n. w rejonach zabrudzeń przemysłowych.

Techniczne znaczenie narażenia pracy układów elektroizolacyjnych w.n. spowodowane zanieczyszczeniem atmosfery na terenie Polski posiadają zanieczyszczenia sztuczne - głównie przemysłowe. Jedynie na wybrzeżu możliwe jest narażenie bryzą morską.

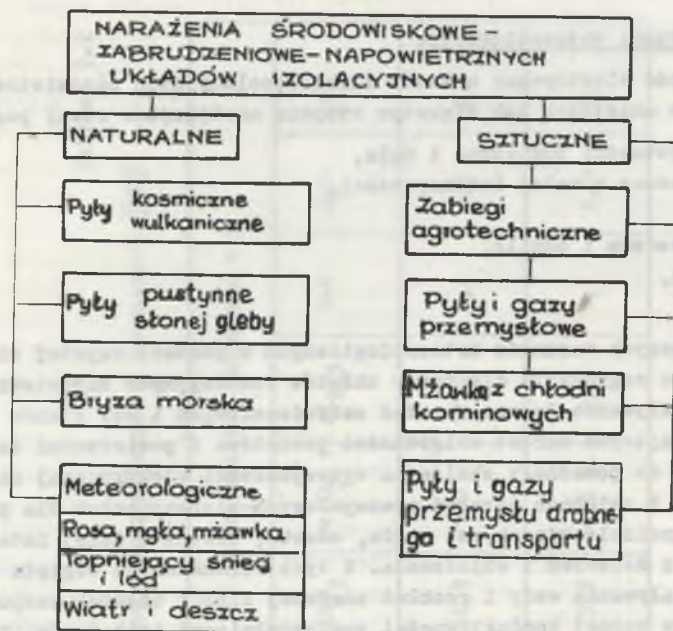
Stopień narażenia zabrudzeniowego wynikający z przemysłowego zanieczyszczenia atmosfery jest również uwarunkowany parametrami konstrukcyjnymi i położeniem pracy izolatorów (zawieszenie przelotowe i odciągowe). Zestawienie narażeń pracy izolacji napowietrznej w.n. podano na rys. 2.5.

## 2.3. WARUNKI TWORZENIA SIĘ WARSTWY ZABRUDZENIOWEJ

### 2.3.1. Mechanizm osadzania się pyłów

Zakładamy, że w powietrzu zawarta jest określona ilość ziaren pyłu pochodzenia przemysłowego. Na ziarna pyłu oddziałuje pole grawitacyjne, ruch cieplny mas powietrza oraz wiatr. Czynniki te określają trajektorię toru ziaren pyłu. Ziarna pyłu w zależności od średnicy i gęstości mogą

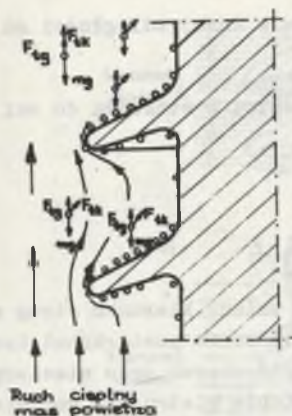




Rys. 2.5. Narażenia zabrudzeniowe i środowiskowe napowietrznych układów elektroizolacyjnych  
 Fig. 2.5. Pollution and environment hazards of the overhead electroinsulating systems

poruszać się również w kierunku od powierzchni ziemi ku górze. Im większa gęstość i masa ziaren, tym mniejsza zdolność osadzania się ziaren pyłów na pniu i dolnej powierzchni kłosa izolatora. Osadzanie się ziaren pyłu na powierzchni izolatorów jest uzależnione od jej gładkości, -ukształtowania, zwilżenia oraz rodzaju pyłu i wielkości ziaren. Dla izolatora o powierzchni gładkiej i suchej z klasycznym kłosem daszkowym, takim jak pokazano na rys. 2.6, w warunkach pogody bezwietrznej ziarna pyłu osadzają się na górnej powierzchni kłosa, a tylko niewielka ich część osadza się na pniu i dolnej powierzchni kłosa. Po zwilżeniu powierzchni izolatora, uwzględniając oddziaływanie pola grawitacji i konwekcji w długim przedziale czasu, osadzanie się ziaren pyłu będzie prawie równomierne na całej powierzchni izolatora.

Wpływ oddziaływania pola elektrycznego na mechanizm tworzenia się warstwy zabrudzeniowej zilustrowano na rys. 2.7. W obszarach wyładowań niezupełnych - świetlających - występuje intensywne osadzanie się ziaren pyłu na zewnątrz punktów 2-2. Wielokrotne powtórzenie tego procesu - pod wpływem mgły, rosy i mżawki - prowadzi do równomiernego osadzania się pyłów na całej powierzchni izolatora.



Rys. 2.6. Osadzanie się ziaren pyłów na powierzchni izolatorów w warunkach pogody suchej i bezwietrznej

$\vec{F}_g$  - siła tarcia grawitacyjnego  
 $\vec{F}_{tk}$  - siła tarcia konwekcyjnego  
 Fig. 2.6. Deposition of dust on insulator surface in the conditions of dry and calm weather  
 $\vec{F}_g$  - force of gravitational friction  
 $\vec{F}_{tk}$  - force of convectional friction



Rys. 2.7. Wpływ pola elektrycznego na tworzenie się warstwy zabrudzeniowej na izolatorach napowietrznych w.n. [14]

Fig. 2.7. Effect of an electric field on the formation of a pollution layer on overhead h.v. insulators [14]

W rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych pogoda bezwietrzna występuje w bardzo małym zakresie czasu, prawie zawsze występuje wiatr o zmieniającym się kierunku i intensywności.

2.3.2. Wpływ wiatru na tworzenie się warstwy zabrudzeniowej

Pyły o znacznym rozdrobnieniu poddane działaniu sił ciężkości i strug wiatru poruszają się w kierunku zgodnym z kierunkiem wiatru. Zawieszenie izolatora w powietrzu, o laminarnym ruchu strug wiatru, powoduje zmianę prędkości i kierunku strug wiatru oraz ciśnienia w otoczeniu jego powierzchni. Izolator dźgopniowy z kłosem daszkowym stanowi przegrodę walcową o zmieniającej się średnicy wzdłuż jego osi. Na rys. 2.8 pokazano opływ walca w ruchu bezcyrkulacyjnym strug wiatru. Według pracy [2] zmianę ciśnienia i prędkości przepływu strug wiatru w otoczeniu powierzchni walca opisują równania:

$$V_p = 2 V_\infty \sin \beta \tag{2.1}$$

oraz

$$P_p = P_\infty + \frac{\rho V_\infty^2}{2} - \frac{\rho V_p^2}{2} \tag{2.2}$$



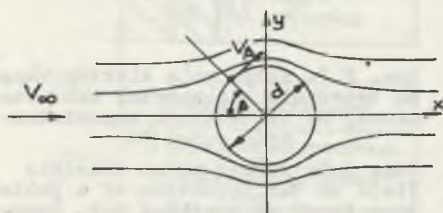
gdzie:

$p_\infty, V_\infty$  - ciśnienie i prędkość strug wiatru w dużej odległości od izolatora ( $x \rightarrow \infty$ ),

$\beta$  - kąt przesunięcia na powierzchni walca w stosunku do osi zgodnej z kierunkiem wiatru,

$\frac{\mu V_\infty^2}{2}, \frac{\mu V_\beta^2}{2}$  - oznacza ciśnienie dynamiczne,

$\mu$  - współczynnik lepkości dynamicznej.



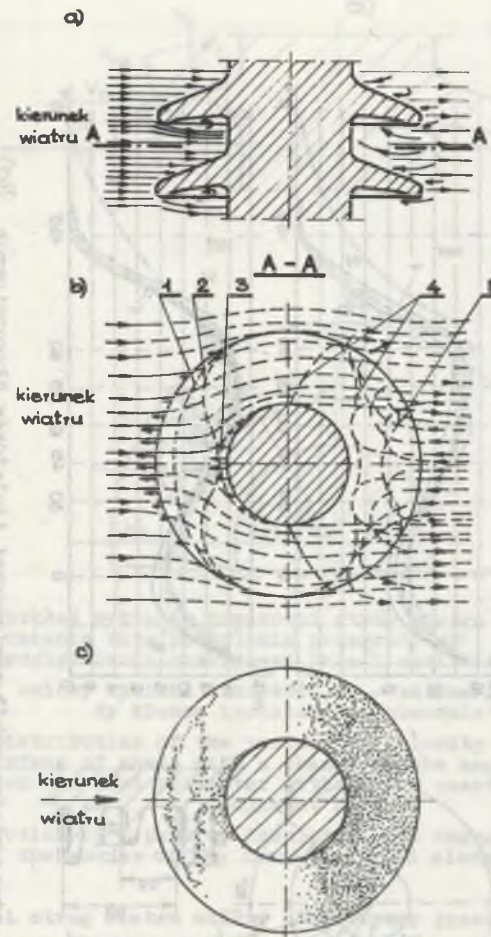
Rys. 2.8. Rozkład strug wiatru opływających walec w ruchu bezcyrkulacyjnym [2]

Fig. 2.8. Distribution of wind streams surrounding the cylinder in a non-rotational motion [2]

danej prędkości wiatru  $V$  rozkład linii strug wiatru w otoczeniu powierzchni izolatora jest uzależniony od ukształtowania jego klosza i położenia pracy (poziome, pionowe).

Wykorzystując modele Kirchhoffa [7, 13] przegrody prostopadłej i ukośnej w stosunku do kierunku wiatru, wyznaczono rozkład strug wiatru oraz obszary przepływu i zastoju izolatorów z kloszem daszkowym, które przedstawiono na rys. 2.9. W obszarze przepływu powierzchnia izolatora poddana jest bezpośredniemu oddziaływaniu strug wiatru. Pozostała część powierzchni izolatora znajduje się w obszarze zastoju, w którym ma miejsce burzliwy ruch powietrza. Wyniki pomiarów [98] prędkości strug wiatru w otoczeniu powierzchni izolatorów długopniowych różnych konstrukcji, przedstawione na rys. 2.10, wskazują na mały wpływ wysięgu i podziałki kloszowej oraz płaszczyzny pomiarowej I, II, III na prędkość strug wiatru. Istotne znaczenie na rozkład prędkości strug wiatru ma kąt przesunięcia punktu pomiarowego na powierzchni izolatora względem płaszczyzny przechodzącej przez oś izolatora równoległą do wektora prędkości  $V$ .

Rozkład prędkości strug wiatru umożliwia wyznaczenie obszaru przepływu ( $0-90^\circ-135^\circ$ ) i zastoju ( $135^\circ-180^\circ$ ) na powierzchni izolatora. Zmniejszenie



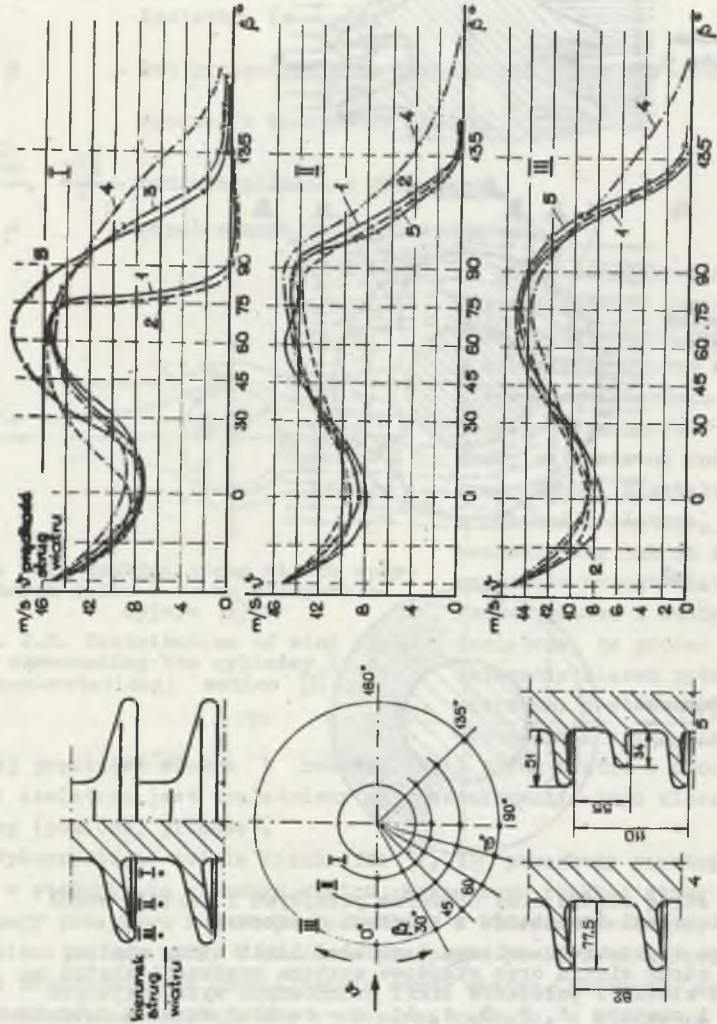
Rys. 2.9. Rozkład strug wiatru oraz obszarów przepływu i zastoju wokół powierzchni izolatorów z kloszami daszkowymi

a - model izolatora w przekroju osiowym i rozkład linii strug wiatru; b - rozkład linii strug wiatru oraz składowe wektora prędkości wiatru na górnej powierzchni klosza i położenie linii granicznych wyznaczających obszary przepływu i zastoju 1, 2, 3, 4, 5; c - rozkład warstwy zabrudzeń na suchej i gładkiej powierzchni klosza przy zadanym kierunku wiatru

Fig. 2.9. Distribution of wind streams as well as flow and stagnation areas round insulator surfaces with hood sheds

a - insulator model cross-section and wind stream distribution; b - distribution of the lines of wind streams and vector components of the wind rate on the upper surface of the shed, as well as the position of the boundary lines determining the areas of flow and stagnation 1, 2, 3, 4, 5; c - distribution of the pollution layer on the dry and smooth shed surface at the assigned wind direction



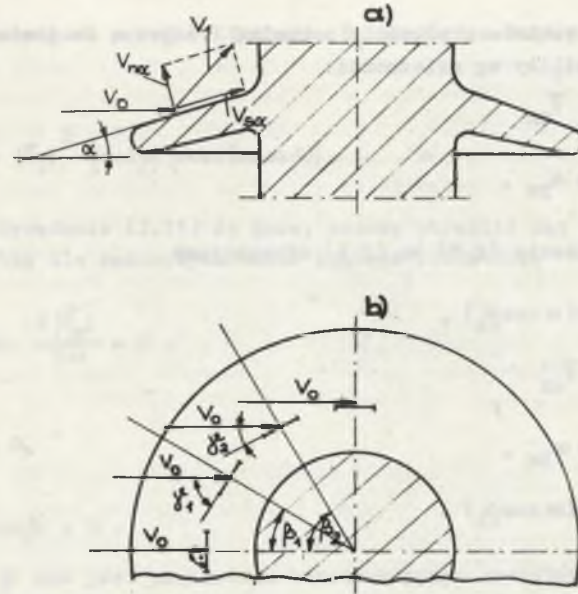


Rys. 2.10. Krzywe zmian prędkości strug wiatru wokół powierzchni izolatorów długopniowych [97]

I, II, III - linie, wzdłuż których wykonano pomiary dla izolatorów: 1-KO-400C, 2-KO-400, 3-T-35, 4-CO-400, 5-CO-350

Fig. 2.10. Curves of the changes in wind stream velocities round the surface of long-rod insulators [97]

I, II, III - lines along which the measurements were made, for the insulators: 1-KO-400C, 2-KO-400, 3-T-35, 4-CO-400, 5-CO-350



Rys. 2.11. Rozkład wektorów prędkości strug wiatru na górnej powierzchni klosza przy zmianie kąta pochylenia przegrody po obwodzie klosza bez uwzględnienia reakcji od pnia i sąsiednich kloszy

a - przekrój osiowy wycinka izolatora, b - zmiana kąta pochylenia przegrody klosza izolatora po obwodzie klosza

Fig. 2.11. Distribution of the vectors of velocity of the wind streams on the upper surface of sheds with a change of the angle of inclination of the barrier on the shed perimeter without the reaction from the rod and adjacent sheds

a - cross-section of a part of insulator, b - change of the angle of inclination of the barrier of the insulator shed along the perimeter of the shed

się prędkości strug wiatru wzdłuż płaszczyzny przechodzącej przez oś izolatora równoległą do strug wiatru oraz w obszarze kąta 0°-25° potwierdza istnienie utajonych obszarów zastoju.

Zależności analityczne rozkładu wektorów prędkości strug wiatru na powierzchni górnej klosza izolatora wyznaczono na podstawie modelu fizycznego pokazanego na rys. 2.11. Idąc po obwodzie klosza zmienia się kąt pochylenia przeszkody dla strumienia wiatru (którą stanowi powierzchnia górna klosza) wg relacji:

$$\alpha_{px} = \alpha \cos \beta_x \quad (2.3)$$



Wartości składowe wektora prędkości: normalną i styczną do powierzchni górnej klosza określimy wg zależności:

składowa normalna  $\vec{v}_{nx}$

$$\vec{v}_{nx} = \vec{v}_0 \sin \alpha_{px}, \quad (2.4)$$

a wstawiając wyrażenie (2.3) do (2.4) otrzymujemy

$$\vec{v}_{nx} = \vec{v}_0 \sin(\alpha \cos \beta_x), \quad (2.5)$$

składowa styczna  $\vec{v}_{sx}$

$$\vec{v}_{sx} = \vec{v}_0 \cos \alpha_{px}, \quad (2.6)$$

$$\vec{v}_{sx} = \vec{v}_0 \cos(\alpha \cos \beta_x). \quad (2.7)$$

gdzie:

$\vec{v}_0$  - wektor prędkości strug wiatru.

Efektom działania strug wiatru na zanieczyszczoną powierzchnię izolatora jest odrywanie i przemieszczanie ziaren pyłu z obszaru przepływu do obszaru zastoju oraz odprowadzenie ich do otoczenia. Są to działania prowadzące do częściowego oczyszczania powierzchni izolatora objętej obszarem przepływu. Pomijając wzajemne oddziaływanie kloszy sąsiednich na rozkład wektorów składowych prędkości strug wiatru, samooczyszczalność od wiatru  $S_w$  wyznacza iloczyn wektorowy składowej normalnej  $\vec{v}_{nx}$  i stycznej  $\vec{v}_{sx}$

$$\vec{S}_w = \vec{v}_{nx} \times \vec{v}_{sx}. \quad (2.8)$$

Długość tego wektora, wyrażająca zdolność samooczyszczania powierzchni górnej izolatora wynosi:

$$|\vec{S}_w| = |\vec{v}_{nx}| |\vec{v}_{sx}| \sin \varphi. \quad (2.9)$$

Podstawiając wartości wektorów składowych oraz wartość kąta  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ , otrzymujemy:

$$|\vec{S}_w| = |\vec{v}_0|^2 [\sin(\alpha \cos \beta)] [\cos(\alpha \cos \beta)]. \quad (2.10)$$

Pochodna cząstkowa z modułu funkcji  $S_w$  względem kąta pochylenia klosza wynosi

$$\frac{\partial |\vec{S}_w|}{\partial \alpha} = |\vec{v}_0|^2 [\cos \beta] [\cos 2(\alpha \cos \beta)]. \quad (2.11)$$

Przyrównując wyrażenie (2.11) do zera, możemy określić kąt pochylenia klosza optymalny dla samooczyszczania wiatrem izolatora.

$$\text{Pochodna } \frac{\partial |\vec{S}_w|}{\partial \alpha} = 0,$$

jeśli:

$$1. \cos \beta = 0,$$

lub

$$2. \cos 2(\alpha \cos \beta) = 0.$$

Ponieważ kąt  $\beta$  nie jest parametrem konstrukcyjnym izolatorów, dlatego informację dotyczącą kąta pochylenia klosza, przy którym występują optymalne warunki skuteczności czyszczącego działania strug wiatru na powierzchnię izolatora, uzyskujemy z warunku drugiego.

$$\alpha = \frac{\pi}{2} + k\pi. \quad (2.12)$$

Zakładając kierunek padania strug wiatru w płaszczyźnie osiowej izolatora, czyli  $\beta = 0$  oraz ze względów praktycznych  $k = 0$ , otrzymujemy optymalny kąt pochylenia klosza ze względu na czyszczenie strugami wiatru powierzchni izolatora  $\alpha = 45^\circ$ .

W mechanizmie oddziaływania strug wiatru na osadzanie się zabrudzeń na powierzchni izolatora istotną rolę odgrywa składowa reakcji wektora prędkości:  $\vec{v}_k$  - na powierzchni klosza i  $\vec{v}_p$  - na powierzchni pnia, które są wynikiem wzrostu ciśnienia w warstwie przyściennej. Składowe  $\vec{v}_k$  i  $\vec{v}_p$  powodują zmniejszenie prędkości strug wiatru w warstwie przyściennej i zmianę ich kierunku przepływu. W granicznym przypadku (zmniejszenie się prędkości przepływu w warstwie przyściennej do zera) następuje "oderwanie" przepływu od powierzchni klosza i powstanie utajonego obszaru zastoju - w teoretycznym obszarze przepływu. Na rys. 2.9a i b przedstawiono rozkład linii strug wiatru wokół powierzchni izolatora z kloszem daszkowym w przekroju osiowym (a) i poprzecznym (b). Na rys. 2.9b zaznaczono również oddziaływanie składowych reakcji wektora prędkości strug wiatru  $\vec{v}_k$  i  $\vec{v}_p$  oraz rozkład linii 1, 2, 3, 4 i 5 wyznaczających obszary przepływu i zastoju. Utajone obszary zastoju na górnej powierzchni klosza w teore-



tycznym obszarze przepływu wyznaczają linie 1, 2, 3. Obszar zastoju na górnej powierzchni klosza określa linia 4. W teoretycznym obszarze zastoju istnieją również utajone obszary przepływu, związane ze zmianą ciśnienia za pnem izolatora, wyznaczone linią 5.

Rozkład warstwy zabrudzeniowej na suchej i gładkiej powierzchni górnej klosza pokazuje rys. 2.9c. W warunkach eksploatacyjnych przy zmieniających się warunkach pogodowych (rosa, mgła) i kierunku wiatru warstwa zabrudzeniowa pokrywa całą powierzchnię izolatora tak w położeniu pionowym, jak i poziomym.

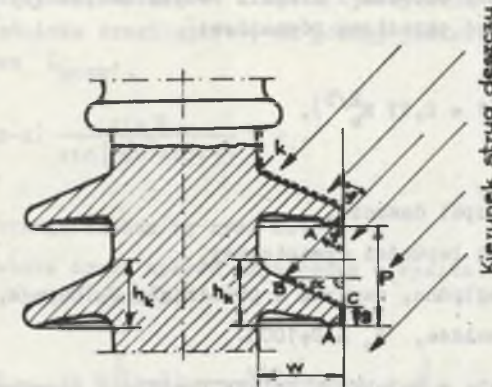
Wyniki analizy teoretycznej wpływu wiatru na mechanizm tworzenia się warstwy zabrudzeniowej na powierzchni izolatorów potwierdzają rezultaty badań eksperymentalnych [27, 131].

### 2.3.3. Mechanizm czyszczącego działania wiatru i deszczu

Kropki deszczu uderzając o powierzchnię izolatora powodują zmywanie osiadłych ziaren pyłu z powierzchni izolatora oraz wymywanie elektrolitu z warstwy zabrudzeń. Powoduje to znaczną nierównomierność rozkładu warstwy zabrudzeniowej wzdłuż drogi upływu izolatora.

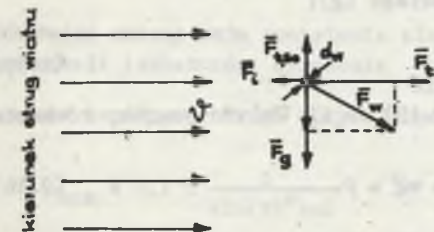


Rys. 2.12. Widok zabrudzonego izolatora w warunkach eksploatacyjnych  
Fig. 2.12. View of a polluted insulator in operational conditions



Rys. 2.13. Warunki geometryczne czyszczącego działania deszczu na powierzchni izolatora długopniowego w położeniu pionowym

Fig. 2.13. Geometrical conditions of the cleaning effect of rain on the surface of a long-rod insulator in vertical position



Rys. 2.14. Rozkład sił działających na kropelkę wody o średnicy  $d_w$  w strumieniu wiatru

$\vec{F}_{t,so}$  - siła tarcia swobodnego spadku kropli wody,  $\vec{F}_{t,v}$  - siła tarcia strug wiatru o prędkości  $V$ ,  $\vec{F}_g$  - siła grawitacji,  $\vec{F}_i$  - siła inercji

Fig. 2.14. Distribution of the forces operating on a water drop of  $d_w$  diameter in a wind stream

$\vec{F}_{t,so}$  - force of free friction on the fall of a drop of water,  $\vec{F}_{t,v}$  - force of friction of wind streams of the velocity  $V$ ,  $\vec{F}_g$  - force of gravitation,  $\vec{F}_i$  - force of inertia

Z obserwacji izolatorów zabrudzonych w naturalnych warunkach eksploatacyjnych, przykładowo pokazanych na rys. 2.12, wynika, że wielkość powierzchni objętej czyszczącym działaniem deszczu jest wynikiem bezpośredniego oraz wtórnego (po odbiciu) oddziaływaniu kropli deszczu. Analizę warunków technicznych czyszczącego działania deszczu rozpatrywane w oparciu o model izolatora długopniowego pokazanego na rys. 2.13. Jak wynika z rysunku długość drogi upływu poddana bezpośredniemu uderzeniu kropli deszczu o powierzchnię górną klosza jest uzależniona od trajektorii ruchu kropli deszczu, parametrów konstrukcyjnych i położenia pracy izolatora. Zgodnie z rys. 2.14 trajektoria ruchu kropli deszczu jest wynikiem równowagi dynamicznej siły: ciężenia grawitacyjnego  $\vec{F}_g$ , tarcia  $\vec{F}_t$  i inercji  $\vec{F}_i$ , czyli  $\vec{F}_t + \vec{F}_i + \vec{F}_g = 0$ . (2.12a)



Siła tarcia działająca na kropelkę wody w powietrzu jest zależna od różnicy wektora prędkości ośrodka i kropli. Według Mazina [9] siła tarcia kropelki wody może być określona równaniem:

$$\vec{F}_t = 6\pi r\mu\Delta\vec{V}(1 + 0,17 R_e^{2/3}), \quad (2.13)$$

gdzie:

- $r$  - średnica kropeł deszczu,
- $\mu$  - współczynnik lepkości dynamicznej,
- $\Delta\vec{V}$  - prędkość względna, zawarta w przedziale 0-100 m/s,
- $R_e$  - liczba Reynoldsa,  $R_e = 0 \div 1000$ .

Siła inercji występuje w warunkach zmiany prędkości ośrodka i określa ją równanie:

$$\vec{F}_i = m \frac{d\vec{v}}{dt}. \quad (2.14)$$

Siła ciężenia grawitacyjnego kropli wody jest funkcją masy, czyli promienia kropli ( $r^3$ ) i przyspieszenia ziemskiego ( $g$ ):

$$\vec{F}_g = m\vec{g}. \quad (2.15)$$

Po podstawieniu (2.13), (2.14) i (2.15) do (2.12a) otrzymujemy równanie:

$$6\pi r\mu\Delta\vec{V}(1 + 0,17 R_e^{2/3}) + m \frac{d\vec{v}}{dt} + m\vec{g} = 0. \quad (2.16)$$

W laminarnym ruchu wiatru w dostatecznej odległości od izolatora ( $x \rightarrow \infty$ ) kropelki wody poruszają się zgodnie z kierunkiem działania siły wypadkowej  $\vec{F}_w$ . Z analizy równania (2.16) wynika, że kąt padania kropeł deszczu w stosunku do płaszczyzny pionowej jest funkcją zmiennych losowych, takich jak: prędkość strug wiatru i ich kierunek oraz promienia kropeł ( $r$ ).

Według prac [9, 43] promień kropeł deszczu zmienia się w bardzo szerokich granicach. Dla małych kropeł promień minimalny  $r_{\min} = 250 \mu\text{m}$ , średni  $r_{\text{sr}} = 500 \mu\text{m}$  i maksymalny  $r_{\max} = 800 \mu\text{m}$ , a dla deszczu o średnich i dużych kroplach promień ich zmienia się od 500-6000  $\mu\text{m}$ .

Prędkość strug wiatru zmienia się w szerokich granicach, od zera do 25 m/s i więcej. Z obliczeń stanu równowagi dynamicznej kropli deszczu dla wartości przeciętnych prędkości strug wiatru i średnicy kropeł deszczu, kąt podania strug deszczu  $\varphi$  wynosi około  $45^\circ$  i zgodny jest z wymaganiami PN i IEC - dla deszczu normalnego. Również doświadczenia terenowe pokazują, że do analizy zdolności samooczyszczania się izolatorów deszczem można przyjąć kąt padania kropeł  $\varphi = 45^\circ$ .

Z geometrii linii kropeł deszczu (kąt  $\varphi$ ) i parametrów konstrukcyjnych izolatora: podziałka  $p$ , wysięg  $w$  i kąt  $\alpha$  pochylenia klosza wg rys. 2.13 wynika długość odcinka drogi upływu, na górnej powierzchni klosza, czyszczonej deszczem  $L_{\text{ucz}}$ .

$$L_{\text{ucz}} = (p-g) \frac{\sin \varphi}{\sin [(90^\circ + \alpha) - \varphi]} + g. \quad (2.17)$$

gdzie:

$g$  - grubość brzegu klosza wg rys. 2.13.

Dla całego izolatora droga upływu czyszczona w wyniku oddziaływania kropeł deszczu i strug wiatru wynosi:

$$L_{\text{ucz}} = n L_{\text{ucz}} = n \left\{ (p-g) \frac{\sin \varphi}{\sin [(90^\circ + \alpha) - \varphi]} + g \right\}. \quad (2.18)$$

Przyjmując do obliczeń praktycznych  $\varphi = 45^\circ$  otrzymujemy:

$$L_{\text{ucz}} = 0,7n \left[ \frac{p-g}{\sin(45^\circ + \alpha)} + g \right]. \quad (2.19)$$

Zakładając zmianę kąta pochylenia klosza  $0 < \alpha < 45^\circ$ , dla praktycznych konstrukcji izolatorów, wyrażenie  $\frac{g}{\sin(45^\circ + \alpha)} \cong g$ , wówczas przybliżone równanie na długość drogi upływu czyszczony deszczem ma postać:

$$L_{\text{ucz}} \cong 0,7 n \frac{p}{\sin(45^\circ + \alpha)}. \quad (2.20)$$

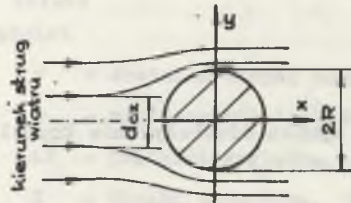
W rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych długość drogi upływu czyszczonej wiatrem i deszczem będzie nieco większa ze względu na przyjęte założenia upraszczające oraz czyszczące działanie kropeł odbitych (wtórnych) i większy kąt pochylenia linii padania kropeł deszczu  $\varphi$ . Intensywność czyszczenia deszczem zabrudzonej powierzchni izolatora jest również uwarunkowana zmianą prędkości i rozkładu linii strug wiatru wokół powierzchni izolatora. Z analizy ruchu kropli wody w strumieniu wiatru [81] wynika, że szerokość obszaru, z którego wszystkie krople deszczu osiadą na powierzchni izolatora, zgodnie z rys. 2.15, może być opisana funkcją:

$$d_{\text{cz}} = 2R \left\{ 1 - \frac{1}{\frac{6\pi\mu R}{m} (\bar{v}_x - v_\infty)^2 + 1} \right\}, \quad (2.21)$$



gdzie:

- R - promień brzegu klosza,
- $V_x$  - prędkość strug wiatru w dowolnym punkcie x wokół powierzchni izolatora,
- m - masa kropli deszczu.



Rys. 2.15. Sposób wyznaczenia obszaru zbierania  $d_{cz}$  kropli deszczu niesionych w strugach wiatru [81]

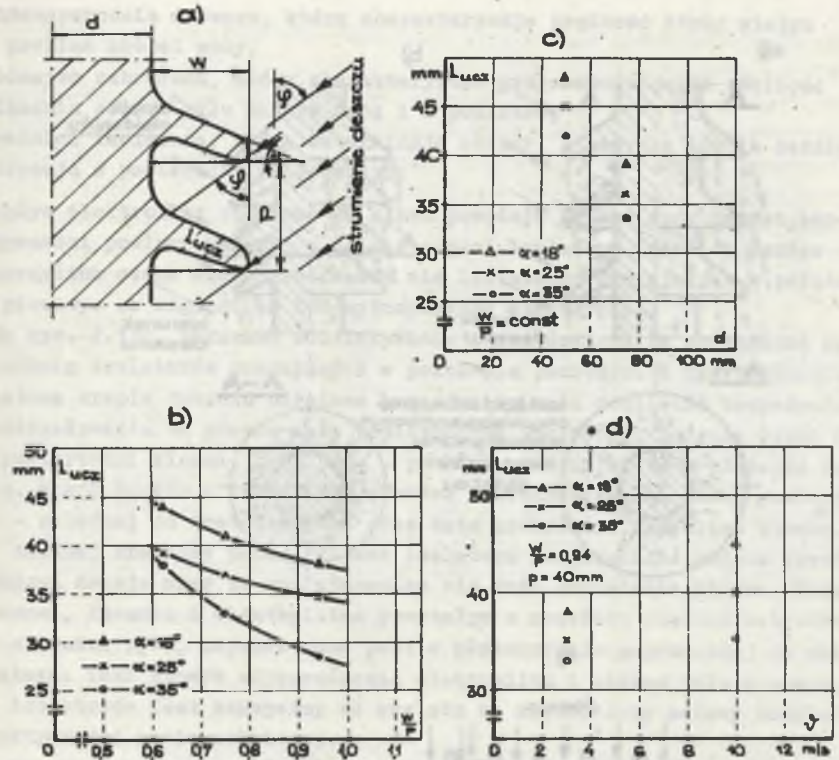
Fig. 2.15. Method of determining the area of collecting  $d_{cz}$  of rain drops carried in the streams of wind [81]

Z wyrażenia (2.21) wynika, że szerokość pasma zbierania kropli deszczu, które uderzają w powierzchnię izolatora, jest funkcją masy kropli deszczu, zmiany prędkości strug wiatru wokół jego powierzchni oraz promienia klosza. Im większa jest średnica klosza (izolatora), tym obszar, z którego krople uderzają w powierzchnię izolatora, a tym samym czyszczą ją z zabrudzeń, jest mniejszy. W praktyce eksploatacyjnej różna intensywność czyszczenia może wystąpić przykładowo dla izolatorów liniowych i przepustowych, dla tych samych parametrów klosza ( $p, w, \alpha$ ).

Zmiana intensywności samooczyszczania różnych konstrukcji izolatorów jednego rodzaju (liniowe-długopniowe, przepustowe), ze względu na zaburzenia strug wiatru, nie ma większego praktycznego znaczenia.

Badania eksperymentalne [131] mechanizmu osadzania ziaren pyłu oraz samooczyszczania wiatrem i deszczem wykonane w tunelu aerodynamicznym w pełni potwierdziły wyniki analiz teoretycznych w zakresie: oddziaływania strug wiatru - obszary przepływu i zastoju - oraz czyszczącego działania deszczu. Wyniki tych badań zestawione są na rys. 2.16. Długość drogi upływu czyszczonej deszczem przy równoczesnym działaniu wiatru o prędkości  $V = 3$  m/s rośnie ze wzrostem podziałki kloszowej  $p$  i zmniejszaniem się kąta pochylenia klosza  $\alpha$ . Zwiększenie prędkości strug wiatru powoduje wzrost drogi upływu czyszczonej deszczem - rys. 2.16d. Zmiana średnicy pnia izolatora powoduje zmianę rozkładu linii i prędkości strug wiatru wokół powierzchni izolatora. Z badań tych wynika również (rys. 2.16c), że zwiększenie średnicy pnia izolatora  $d$  powoduje zmniejszenie się odcinka drogi upływu czyszczonej strugami wiatru i deszczu.

Mechanizm czyszczącego oddziaływania strug wiatru i deszczu na zabrudzoną powierzchnię izolatorów przedstawiono na rys. 2.17. Krople deszczu uderzając o powierzchnię izolatorów o różnej podziałce klasowej, pracujących w położeniu pionowym (a) i (b), powodują częściowe lub całkowite



Rys. 2.16. Wyniki badań modelowych tworzenia się warstwy zabrudzeniowej na powierzchni izolatorów [131]

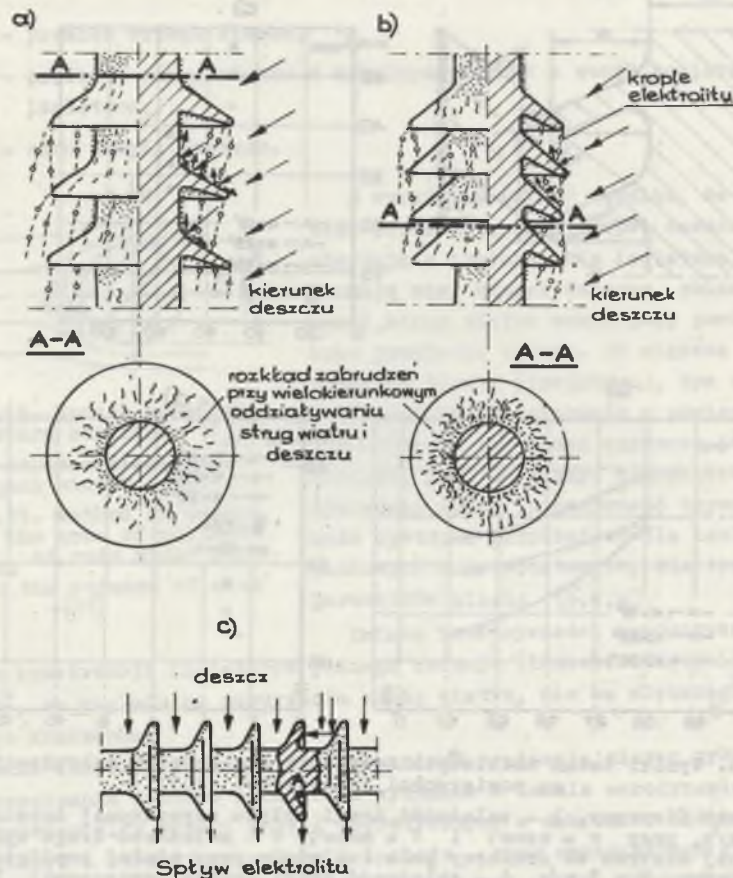
a - schemat fizyczny, b - zależność drogi upływu czyszczonej deszczem od ilorazu  $w/p$ , przy  $w = \text{const}$  i  $V = \text{const}$ , c - zależność drogi upływu czyszczonej wiatrem od średnicy pnia izolatora przy stałej prędkości strumienia wiatru  $V = 3$  m/s, d - zależność drogi upływu czyszczonej  $L_{ucz}$  od prędkości strug wiatru

Fig. 2.16. Results of model studies of the formation of a pollution layer on insulator surface [131]

a - physical diagram, b - dependence of the leakage path cleaned by rain on the quotient  $w/p$ , at  $w = \text{const}$  and  $V = \text{const}$ , c - dependence of the leakage path cleaned by wind the insulator rod diameter at constant rate of the wind stream  $V = 3$  m/s, d - dependence of the leakage path cleaned  $L_{ucz}$  on the rate of the wind stream

oderwanie ziaren pyłu i odprowadzenie ich do otoczenia wraz z elektrolitem powstałym z rozkładu cząstek rozpuszczalnych w wodzie. W wyniku uderzenia i rozbicia kropli deszczu powstają kropelki wtórne, które powodują nawilżanie warstwy zabrudzeniowej na częściach powierzchni nie objętej bezpośrednim oddziaływaniem strug wiatru i deszczu. Wtórne kropelki wody powodują również wymywanie cząstek rozpuszczalnych z warstwy zabrudzeń oraz





Rys. 2.17. Mechanizm czyszczącego oddziaływania strug wiatru i deszczu na zabrudzoną powierzchnię izolatora z kloszem daszkowym

a, b - w położeniu pionowym przy różnej podziółce p, wysięgu w i kącie pochylenia klosza  $\alpha$ ; c - w położeniu poziomym

Fig. 2.17. Mechanism of the cleaning effect of wind streams and rain on the polluted surface of an insulator with hood shed

a, b - in vertical position at different scale p, projection w and angle of inclination of the shed  $\alpha$ ; c - in horizontal position

podczas intensywnego deszczu mogą zmywać ziarna pyłu z powierzchni izolatora.

W obszarze oddziaływania kropeł wtórnych warstwa zabrudzeniowa jest nierównomierna - w postaci nieregularnych pasemek mocno zagęszczonych.

Skuteczność zmywania zabrudzeń z powierzchni izolatora jest uwarunkowana:

- intensywnością deszczu, którą charakteryzuje prędkość strug wiatru i promień kropeł wody,
- rodzajem zabrudzeń, który charakteryzuje przyczepność oraz zdolność wiązania ziaren pyłu między sobą i z podłożem,
- średnicą izolatora, która determinuje obszar, z którego krople deszczu uderzają w powierzchnię izolatora.

Spływ elektrolitu z klosza na klosz powoduje bardzo duży wzrost konduktywności powierzchniowej w dolnej części izolatora. Jest to bardzo niekorzystna cecha samooczyszczania się izolatorów pracujących w położeniu pionowym ze względu na ich wytrzymałość elektryczną.

Na rys. 2.17c pokazano oddziaływanie strug deszczu na zabrudzoną powierzchnię izolatorów pracujących w położeniu poziomym. W tym położeniu izolatora krople deszczu niesione przez wiatr mają możliwość bezpośredniego oddziaływania na prawie całą powierzchnię izolatora. Jedynie część dolnej powierzchni klosza, przy pniu - punkt A, znajduje się w obszarze zastoju. Wokół punktu A tworzy się warstwa zabrudzeniowa na małej powierzchni - zależnej od średnicy pnia oraz kąta pochylenia i wysięgu klosza. Przy zadanej średnicy pnia i klosza izolatora powierzchnia objęta warstwą zabrudzeń maleje wraz ze zmniejszaniem się kąta pochylenia klosza. Woda deszczowa, łącznie z elektrolitem powstałym z rozkładu cząstek zabrudzeń oraz ziarnami pyłu, odprowadzana jest w płaszczyźnie poprzecznej do osi izolatora. Taki sposób odprowadzenia elektrolitu i ziaren pyłu z powierzchni izolatorów jest korzystny ze względu na równomierny osiowy rozkład konduktywności powierzchniowej.

W wyniku czyszczącego działania wiatru i deszczu warstwa zabrudzeniowa, która tworzy się na powierzchni izolatorów z kloszem daszkowym, jest silnie nierównomierna w położeniu pionowym i prawie równomierna w położeniu poziomym pracy izolatorów.

Z przedstawionych wyników badań eksperymentalnych i analiz teoretycznych mechanizmu tworzenia się warstwy zabrudzeniowej na powierzchni izolatorów napowietrznych (liniowych i stacyjnych) wynikają następujące wnioski:

- W warunkach pogody bezwietrznej, przy oddziaływaniu ruchów cieplnych mas powietrza, intensywność osadzania się ziaren pyłu na powierzchni izolatorów jest odwrotnie proporcjonalna do masy ziaren pyłu (gęstości i objętości zastępczej  $\phi_z$ ).
- Podczas wiatru wokół powierzchni izolatorów tworzą się obszary przepływu i zastoju, w których występuje znaczne zróżnicowanie prędkości i kierunku strug wiatru, powodujące nierównomierne osadzanie się ziaren pyłu w zależności od stanu zwilżenia powierzchni izolatora. Przy suchej powierzchni izolatora ziarna pyłu są wytrącane ze strug wiatru - w wyniku lokalnych (obszary zastoju) zawirowań - i osadzają się w tych obszarach (żebra, garby itp.). Natomiast przy zwilżonej powierzchni ziarna pyłu osadzają się przede wszystkim w obszarze przepływu. Wówczas tyl-



ko niewielka część ziaren pyłu niesiona w strugach wiatru przedostaje się do obszaru zastoju [131].

- Największe znaczenie w mechanizmie tworzenia się warstwy zabrudzeniowej odgrywa deszcz z równoczesnym oddziaływaniem wiatru. Z przedstawionych rozważań wynika, że możliwości oczyszczania i wymywania<sup>1)</sup> powierzchni izolatorów, przy zadanych zmiennych losowych wiatru i deszczu, są również funkcją parametrów konstrukcyjnych i położenia pracy izolatora.

#### 2.3.4. Geometryczny współczynnik samooczyszczania

Parametry konstrukcyjne izolatorów determinują warunki tworzenia się warstwy zabrudzeniowej na ich powierzchni, w tym samych losowo zmieniających się w czasie warunkach narażeniowych i atmosferycznych. Jak wynika z punktu 2.2 pracy, możliwość wykorzystania wiatru i deszczu do oczyszczenia powierzchni izolatora z osadzających się cząstek zabrudzeń determinuje długość czyszczonej drogi upływu  $L_{ucz}$ . Porównanie różnych konstrukcji izolatorów w zadanym położeniu pracy ze względu na zdolność do samooczyszczania się wyraża iloraz drogi upływu czyszczonej  $L_{ucz}$  i całkowitej drogi upływu  $L_u$  i nazwany został geometrycznym współczynnikiem samooczyszczania się izolatorów  $\varphi_g$ ,

$$\varphi_g = \frac{L_{ucz}}{L_u} \quad (2.22)$$

Wprowadzając wyrażenie (2.20) do (2.22) otrzymuje się

$$\varphi_g \approx \frac{0.7(p-g)}{\sin(45^\circ + \alpha)} + g \quad (2.23)$$

gdzie:

$l_k$  - długość drogi upływu klosza,

$h_k$  - wysokość konstrukcyjna klosza.

Współczynnik samooczyszczania się izolatora w położeniu pionowym zapisany w formie uproszczonej może być wyznaczony z podstawowych danych katalogowych za pomocą równania:

$$\varphi_g \approx \frac{0.7 np}{L_u \sin(45^\circ + \alpha)} \quad (2.24)$$

<sup>1)</sup> Wymywanie elektrolitów z warstwy zabrudzeniowej, powstałych z rozkładu cząstek rozpuszczalnych tworzących warstwę zabrudzeniową.

Na podstawie rysunków konstrukcyjnych izolatorów, zakładając kąt padania strug deszczu  $\varphi = 45^\circ$ , można również wyznaczyć graficznie długość drogi upływu czyszczonej wiatrem i deszczem  $L_{ucz}$ . Wówczas geometryczny współczynnik samooczyszczania się izolatorów można wyznaczyć wprost z równania (2.22).

#### 2.4. WPŁYW WŁASNOŚCI POWIETRZA OTACZAJĄCEGO NA KONDUKTYWNOŚĆ WARSTWY ZABRUDZEŃ PRZEMYSŁOWYCH

Przepływ prądu w warstwie zabrudzeniowej, uwarunkowany jej konduktywnością powierzchniową, jest funkcją stanu zabrudzeń, a szczególnie zawartością elektrolitów. Wyniki badań eksperymentalnych oddziaływania parametrów powietrza otaczającego, definiowanych przez: ciśnienie, wilgotność i temperaturę, na konduktywność warstwy zabrudzeń oraz mechanizm wyładowania zabrudzeniowego omówiono w pracach [1, 33, 57, 106, 108].

Wpływ ciśnienia powietrza na pracę izolacji napowietrznej w.n. w warunkach zabrudzeniowych związany jest przede wszystkim z mechanizmem zapłonu i rozwoju wyładowania powierzchniowego. Zagadnienie to nabiera istotnego znaczenia praktycznego w warunkach wysokogórskich<sup>1)</sup>.

Wyniki badań laboratoryjnych [57] zależności konduktywności warstwy zabrudzeń od temperatury powietrza otaczającego, przy określonej stałej wilgotności powietrza i grubości zabrudzeń, przedstawiono na rys. 2.18. Zmiana temperatury powietrza w przedziale od 15 do 35°C powoduje tylko niewielki przyrost konduktywności powierzchniowej izolatora - zależnie od rodzaju pyłu i grubości warstwy.

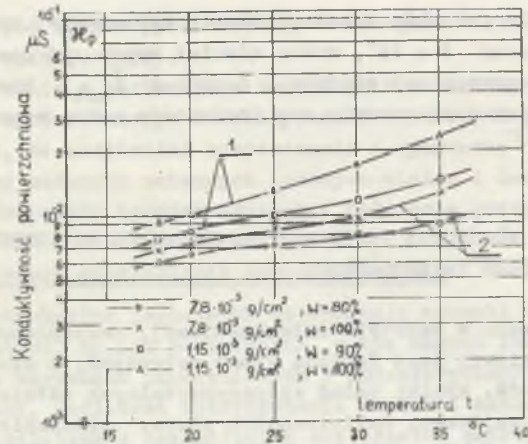
Zależność konduktywności warstwy zabrudzeń przemysłowych od stopnia zawilgocenia powietrza otaczającego przedstawiono na rys. 2.19. Wyniki tych badań pozwalają na podanie wniosków praktycznych istotnych szczególnie dla obsługi i czyszczenia pod napięciem urządzeń elektrycznych w.n.

Wzrost wilgotności powietrza do poziomu 70-75% (zależnie od rodzaju i grubości warstwy) powoduje przyrost konduktywności powierzchniowej izolacji do poziomu ustalonego, który nie ulega zmianie przy dalszym wzroście wilgotności powietrza do wartości ok. 85%. Dalszy wzrost wilgotności powietrza otaczającego powoduje przyrost konduktywności warstwy zabrudzeń.

Wyniki badania wpływu czasu oddziaływania powietrza zawilgoconego na zabrudzoną powierzchnię izolatora, przedstawione na rys. 2.20, pokazują, że konduktywność warstwy zabrudzeń przemysłowych zmienia się wykładniczo. Czas, po którym konduktywność warstwy zabrudzeń uzyskuje stan ustalony,

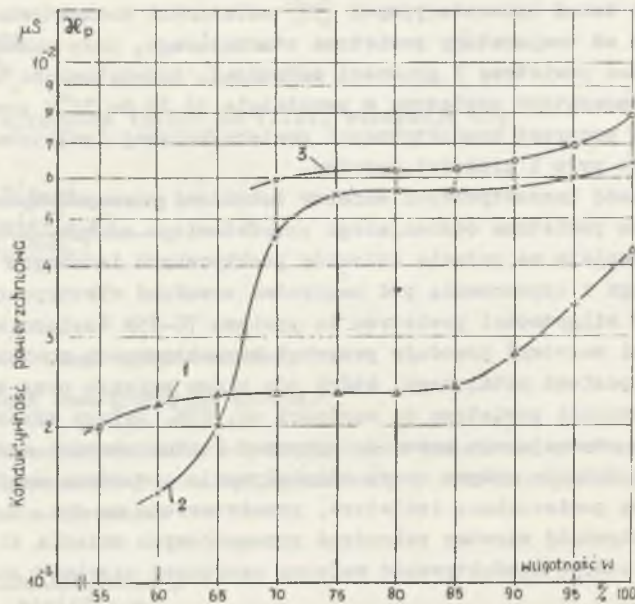
<sup>1)</sup> W azjatyckiej części ZSRR prowadzone są badania zabrudzeniowe układów elektroizolacyjnych w.n. w stacjach probierczych położonych na wysokości ok. 3000 m n.p.m.





Rys. 2.18. Zależność konduktywności powierzchniowej warstwy zabrudzeń przemysłowych od zmian temperatury przy zadanej stałej wilgotności powietrza otaczającego [57]

Fig. 2.18. Dependence of the surface conductivity of the layer of industrial pollutions on temperature changes at assigned constant of ambient air humidity [57]

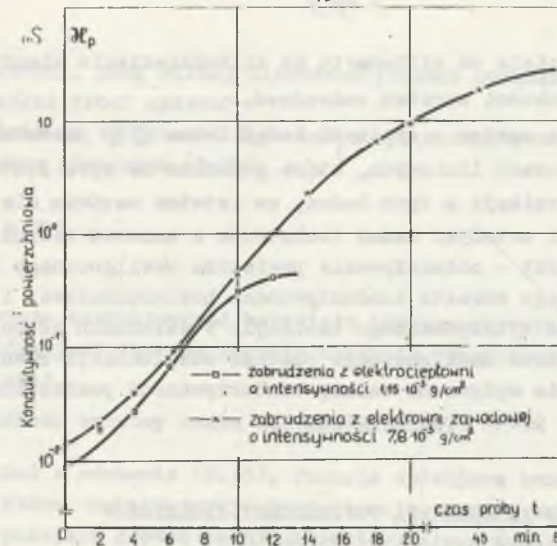


Rys. 2.19. Wpływ wilgotności powietrza otaczającego na zmianę konduktywności powierzchniowej warstwy zabrudzeń o różnych parametrach

1-5,  $2 \cdot 10^{-3}$  g/cm<sup>2</sup>; 2-4,  $3 \cdot 10^{-3}$  g/cm<sup>2</sup>; 3-7,  $8 \cdot 10^{-3}$  g/cm<sup>2</sup> [57]

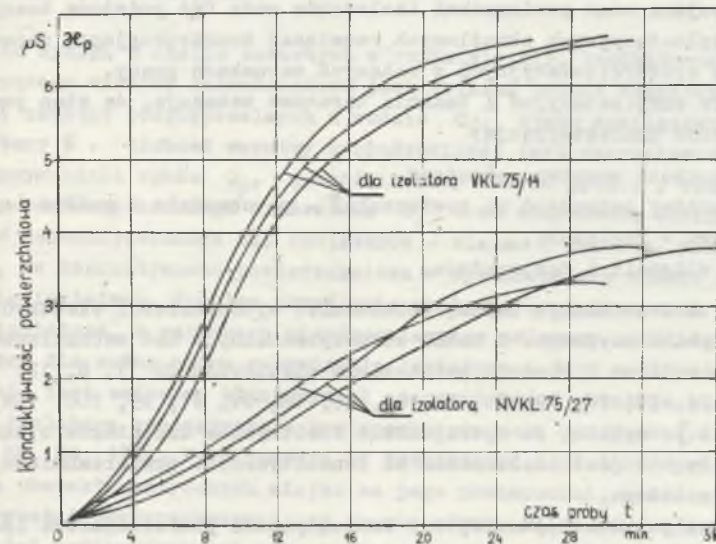
Fig. 2.19. Dependence of ambient air humidity on the change in the conductivity of the surface pollution layer of different parameters

1-5,  $2 \cdot 10^{-3}$  g/cm<sup>2</sup>; 2-4,  $3 \cdot 10^{-3}$  g/cm<sup>2</sup>; 3-7,  $8 \cdot 10^{-3}$  g/cm<sup>2</sup> [57]



Rys. 2.20. Wpływ czasu oddziaływania powietrza otaczającego - zawilgoconego na wartość konduktywności powierzchniowej izolatora zabrudzonego pyłami przemysłowymi [57]

Fig. 2.20. Effect of the time of operation of ambient moist air on the value of surface conductivity of an insulator polluted by industrial dusts [57]



Rys. 2.21. Wyniki badań Crona [35] zmiany konduktywności powierzchniowej izolatorów zabrudzonych z czasem oddziaływania powietrza zawilgoconego

Fig. 2.21. Results of Crona's studies [35] on the change of surface conductivity of polluted insulators with the time of operation of moist air



zawiera się w przedziale od kilkunastu do kilkudziesięciu minut - zależnie od rodzaju i grubości warstwy zabrudzeń.

Uogólnienia te są zgodne z wynikami badań Crona [33], prowadzonych na zabrudzonych izolatorach liniowych, które pokazano na rys. 2.21.

Wnioski, które wynikają z tych badań, są istotne zarówno dla prac eksploatacyjnych, jak i metodyki badań izolatorów z warstwą zabrudzeń. Krótkotrwałe - rzędu minut - oddziaływanie powietrza zawilgoconego nie stwarza warunków istotnego wzrostu konduktywności powierzchniowej i obniżenia się poziomu napięcia wytrzymawanego izolacji. W warunkach długotrwałego oddziaływania powietrza zawilgoconego podczas eksploatacji również zmiana temperatury otoczenia wpływa na zmianę konduktywności powierzchniowej izolatora zabrudzonego pyłem przemysłowym.

## 2.5. TEORIA STANU ZABRUDZENIA POWIERZCHNI IZOLATORÓW

### 2.5.1. Wybór parametru oceny stanu zabrudzenia

Jak wynika z rozważań przedstawionych w poprzednich podrozdziałach, stan powierzchni izolatorów jest wypadkową oddziaływania narażeń środowiskowych oraz parametrów konstrukcyjnych i położenia pracy izolatora. Funkcja opisująca stan powierzchni izolatorów może być podstawą oceny możliwości eksploatacyjnych określonych rozwiązań konstrukcyjnych napowietrzonych układów elektroizolacyjnych w zadanych warunkach pracy.

Obserwacje eksploatacyjne i badania terenowe wskazują, że stan powierzchni izolatorów charakteryzuja:

- rodzaj i grubość warstwy zabrudzeń,
- rozkład warstwy zabrudzeń na powierzchni - po obwodzie i wzdłuż osiowej drogi upływu - izolatora,
- nasycenie wilgocią i temperatura.

Czynniki te determinują zmianę (obniżenie) wytrzymałości elektrycznej układu elektroizolacyjnego. Z badań eksperymentalnych nad mechanizmem zabrudzeniowym zapłonu i rozwoju wyładowania elektrycznego [1, 6, 12, 19, 21, 28, 33, 34, 38, 76, 79, 80, 83, 84, 85, 88, 90, 97, 99, 106, 109, 110, 111, 112 i in.] wynika, że wytrzymałość elektryczna izolatorów o zabrudzonej powierzchni jest uzależniona od konduktywności powierzchniowej zabrudzonego izolatora.

Można zatem postawić pytanie, czy konduktywność powierzchniowa izolatora wyrażająca zdolność przewodzenia prądu elektrycznego w warstwie osadu jest parametrem wystarczającym do opisanego stanu zabrudzenia jego powierzchni?

Równocześnie, uwzględniając oddziaływania czynników samooczyszczania w czasie eksploatacji, należy postawić pytanie, która to ma być wartość

konduktywności, przy silnej nierównomierności rozkładu warstwy zabrudzeniowej wzdłuż drogi upływu?

Odpowiedź na te pytania daje definicja konduktywności powierzchniowej  $\kappa_p$ , opisana równaniem (2.25)

$$\kappa_p = \kappa a, \tag{2.25}$$

gdzie:

$\kappa$  - wyraża konduktywność materiału tworzącego warstwę zabrudzeniową, która jest funkcją rodzaju i składu chemicznego warstwy zabrudzeniowej,

$a$  - grubość warstwy osadu zabrudzeniowego.

Jak widać z równania (2.25), funkcja opisująca konduktywność powierzchniową, która charakteryzuje konduktancję warstwy zabrudzeń, zawiera parametry opisujące główne cechy charakteryzujące zanieczyszczenie powierzchni izolatorów. Po uwzględnieniu wpływu czynników otoczenia (temperatury i wilgotności) na wartość konduktywności powierzchniowej izolatora równanie (2.25) przyjmie postać:

$$\kappa_p(\tau, w) = \kappa(\tau, w)a \tag{2.26}$$

Jak wynika z analiz zawartych w rozdziale 2,3, konduktywność materiału tworzącego warstwę zabrudzeniową jest zależna przede wszystkim od zawartości cząstek rozpuszczalnych w wodzie  $Q_r$ , stanu zawilgocenia  $w$  i temperatury  $\tau$ . Grubość warstwy zabrudzeniowej jest uwarunkowana głównie intensywnością opadu  $Q_c$ , gęstością masy ziaren pyłu  $\rho$ , czasem oddziaływania zanieczyszczonego środowiska  $t_e$  oraz zdolnością oddziaływania czynników samooczyszczania się izolatorów - wiatru i deszczu. Można więc stwierdzić, że konduktywność powierzchniowa w wystarczający sposób opisuje zabrudzenie izolatora. Problem określenia wartości konduktywności powierzchniowej izolatora, w warunkach nierównomiernego osiowego rozkładu warstwy zabrudzeń dla oceny stanu zabrudzenia izolatora i jego możliwości eksploatacyjnej, jest zadaniem kluczowym. W rzeczywistości w każdym punkcie powierzchni izolatora konduktywność powierzchniowa może przyjmować inne wartości [52, 68, 86, 108]. W zależności od konstrukcji izolatora wyróżnić można kilka charakterystycznych miejsc na jego powierzchni, gdzie wartości konduktywności powierzchniowej są prawie równe. Można więc mówić o konduktywności powierzchniowej pnia izolatora, górnej lub dolnej powierzchni klosza i brzozy klosza.

Parametrem stanu powierzchni izolatorów charakteryzującym stopień narażenia zabrudzeniowego jest konduktywność powierzchniowa tych części powierzchni izolatora, które determinują warunki zapłonu i rozwoju wyładowania zabrudzeniowego. W warunkach nierównomiernego zabrudzenia powierz-



chni izolatorów jest to konduktywność powierzchniowa obszarów zastoju (nie objętych bezpośrednim czyszczącym działaniem strug deszczu). Do oceny stopnia narażenia zabrudzeniowego izolatorów proponuje się przyjęcie maksymalnych wartości konduktywności powierzchniowej  $\alpha_{pm}$ . Funkcją opisującą stopień narażenia zabrudzeniowego izolatorów w czasie eksploatacji  $\alpha_{pm} = f(t_e)$  stanowi charakterystykę stanu powierzchni izolatorów.

2.5.2. Model matematyczny stanu powierzchni izolatorów napowietrznych wysokiego napięcia

Model matematyczny opracowano przy założeniu, że izolatory są pod napięciem<sup>1)</sup>.

Badania eksperymentalne [37, 52, 64, 68, 107, 108, 132] zmian konduktywności powierzchniowej izolatorów pracujących w warunkach zabrudzeń przemysłowych, cementowych i słonych ziem, których wybrane wyniki przedstawiono na rys. 2.22, 2.2, 2.24, 2.25, 2.26, wskazują na dużą prawidłowość zmian wartości konduktywności powierzchniowej z czasem eksploatacji.

Mimo istotnych różnic wartości konduktywności powierzchniowej w różnych punktach powierzchni izolatora wzdłuż drogi upływu, to jednak krzywa opisująca możliwe graniczne stany zanieczyszczenia izolatora podczas eksploatacji posiada charakter funkcji wykładniczej.

W modelu matematycznym zakłada się istnienie funkcji, która jest obwiednią możliwych stanów zanieczyszczenia powierzchni izolatora w zależności od czasu oddziaływania czynników narażeń terenowych.

Na podstawie analizy ww. wyników badań przyjęto, że jest to funkcja wykładnicza opisana równaniem (2.27).

$$\alpha_p(\bar{v}, w, t_e) = A(\bar{v}, w) \left( 1 - e^{-\frac{t_e}{T}} \right). \quad (2.27)$$

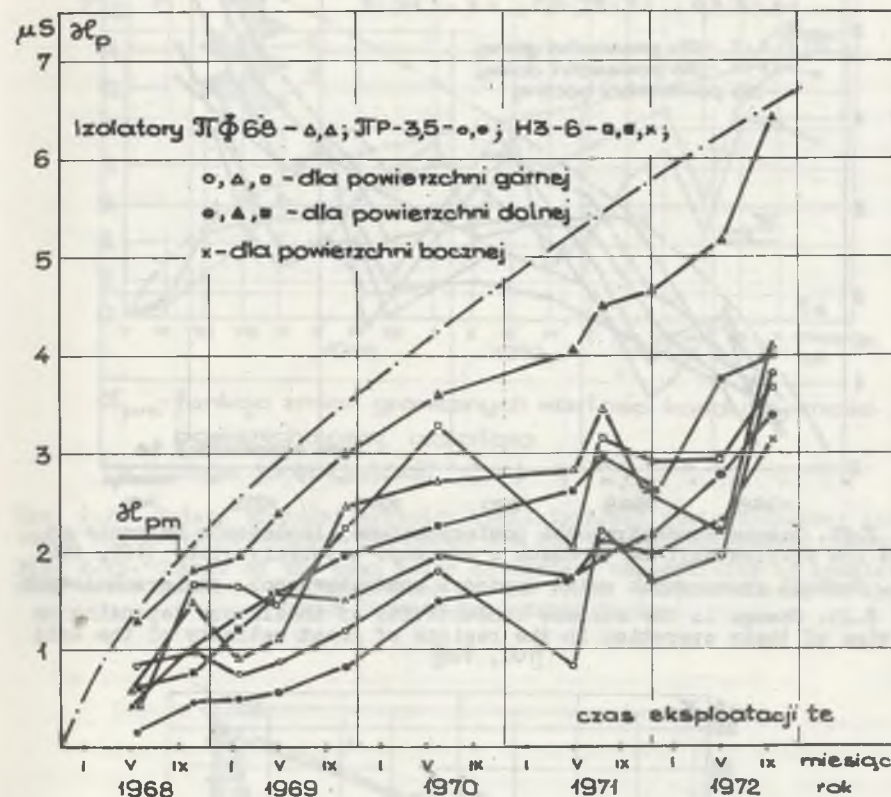
Parametry równania (2.27) są funkcjami wielu zmiennych losowych, które charakteryzują czynniki oddziaływań środowiskowych na stan powierzchni izolatorów. Analiza zmienności i metodyka określania czynników losowych rejonu eksploatacji izolacji napowietrznej wykracza poza ramy niniejszej pracy, tym bardziej że w wielu publikacjach problemy te są w wystarczający sposób zdefiniowane oraz opisane [14, 67, 68, 124, 132, 133].

Parametr  $A(\bar{v}, w)$  opisuje wartość konduktywności powierzchniowej izolatora dla stanu ustalonego (asymptota) i przy całkowitym nasyceniu warstwy zabrudzeniowej.

Wartość parametru  $A(\bar{v}, w)$  jest funkcją:

- intensywności oddziaływania narażeń pyłowych  $A'(\bar{v}, w)$ ,

<sup>1)</sup> Jak wynika z prac [107, 108], ilość osadów pyłu na powierzchni izolatorów w stanie napięciowym i beznapięciowym wykazuje różnice dopiero dla czasu eksploatacji większego od 5 miesięcy.



Rys. 2.22. Zmiana konduktywności powierzchniowej izolatorów podczas eksploatacji na terenach o znacznym zasoleniu gleby [107, 108]:

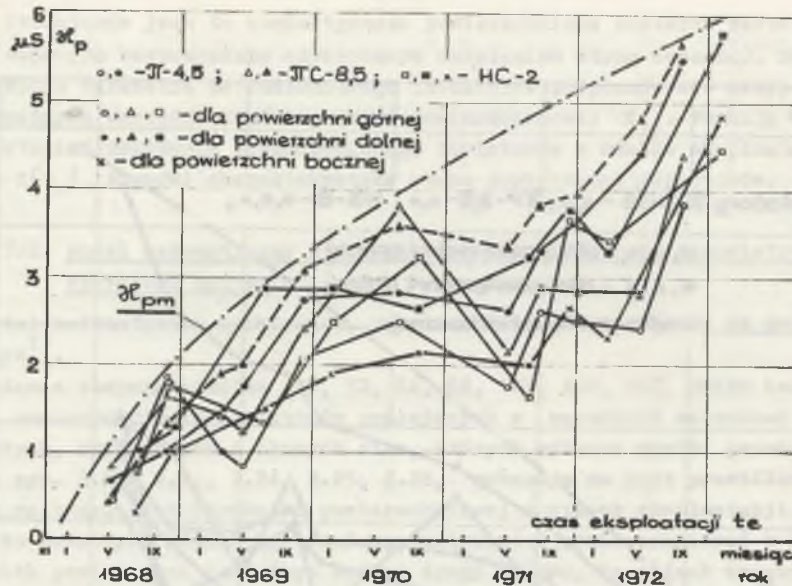
$\alpha_{pm}$  - funkcja granicznych zmian wartości konduktywności powierzchniowej  
 Fig. 2.22. Change in surface conductivity of insulators with exploitation for the pollution of salty soils [107, 108]:

$\alpha_{pm}$  - function of the boundary changes of the surface conductivity

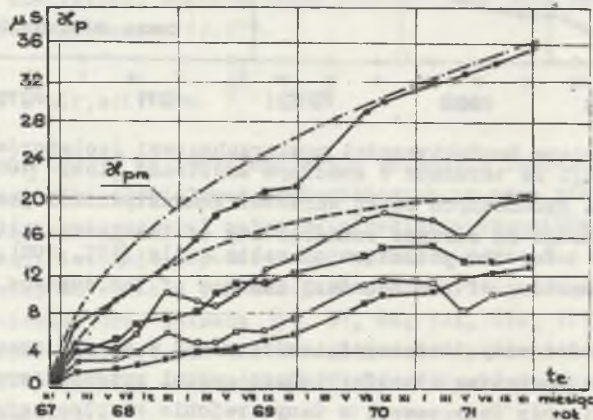
- konduktywności wody deszczowej, zwiększonej w wyniku znacznego zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego gazami przemysłowymi (wzrost konduktywności wody deszczowej, w danym rejonie eksploatacji, w stosunku do konduktywności normalnej wody deszczowej określa współczynnik  $\varphi_d$ ),
- zdolności konstrukcji układu elektroizolacyjnego do samooczyszczania opisaną współczynnikiem  $\eta_d$ .

Asymptota zmian konduktywności powierzchniowej izolatorów podczas eksploatacji w zadanym terenie jest iloczynem wyżej określonych zależności funkcyjnych i opisana jest równaniem (2.28).



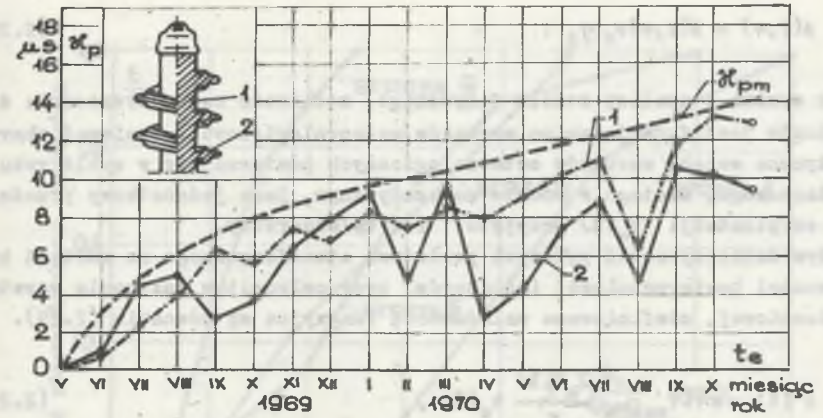


Rys. 2.23. Zmiana kondukcyjności powierzchniowej izolatorów zależnie od czasu ich eksploatacji na terenach o znacznym zasoleniu gleby [107, 108]  
 $\alpha_{pm}$  - funkcja granicznych zmian wartości kondukcyjności powierzchniowych  
 Fig. 2.23. Change in the surface conductivity of insulators depending on the time of their operation in the regions of great salinity of the soil [107, 108]



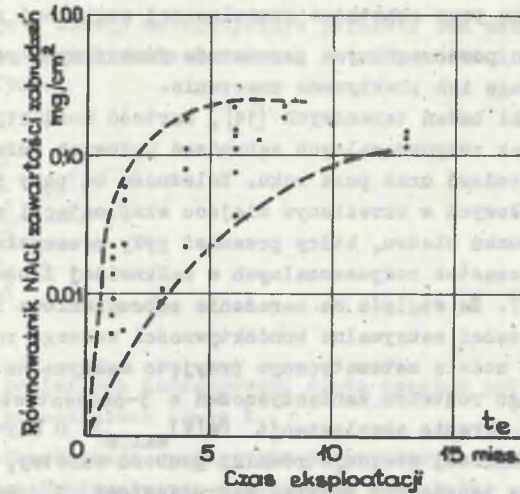
izolator: ○, ● - II-7; □, ■ - HS-6  
 ○, □ dla górnych powierzchni  
 ●, ■ dla dolnych powierzchni  
 □ dla bocznych powierzchni  
 $\alpha_{pm}$  - funkcja zmian granicznych wartości kondukcyjności powierzchniowej izolatora  
 te - czas eksploatacji

Rys. 2.24. Zmiana kondukcyjności powierzchniowej izolatorów zależnie od czasu ich eksploatacji dla zabrudzeń cementowych [107, 108]  
 Fig. 2.24. Change in the surface conductivity of insulators depending on the time of their operation for cement pollutions [107, 108]



$\alpha_{pm}$  - funkcja zmian granicznych wartości kondukcyjności powierzchniowej izolatora  
 te - czas eksploatacji

Rys. 2.25. Zmiana średniej wartości kondukcyjności powierzchniowej izolatorów z kloszem śrubowym w warunkach III strefy zabrudzeniowej GOP-u  
 Fig. 2.25. Change of the mean value of surface conductivity of insulators with screw sheds in the conditions of the IIIrd pollution zone of the Upper Silesia Industrial Region



Rys. 2.26. Zmiana stanu zabrudzenia powierzchni izolatorów zależnie od czasu ich eksploatacji [37]  
 Fig. 2.26. Change in the state of pollution of insulator surface with NaCl depending on exploitation time [37]



$$A(\tau, w) = A'(\tau, w) \varphi_d \tau_d \quad (2.28)$$

Jak wynika z analizy modelu fizycznego, możliwość samooczyszczania się izolatorów jest funkcją zmian warunków meteorologicznych. Ponieważ charakterystyczna zmiana warunków meteorologicznych powtarza się w cyklu roku kalendarzowego, dlatego w modelu matematycznym, jako jednostkowy przedział czasu eksploatacji  $t_e(1)$  przyjęto 1 rok kalendarzowy.

Wpływ zanieczyszczeń pyłowych powietrza atmosferycznego na wartość konduktywności powierzchniowej izolatorów, przy całkowitym nasyceniu warstwy zabrudzeniowej, zdefiniowano zależnością funkcyjną wg równania (2.29).

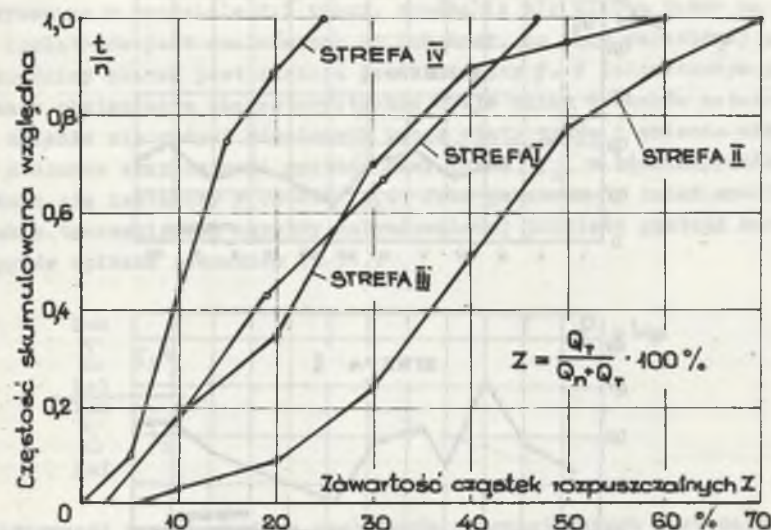
$$A'(\tau) = \kappa(\tau)_{\max 5\%} \frac{Q'_c Z(1)}{\gamma'} t_e(1), \quad (2.29)$$

gdzie:

- $\kappa(\tau)_{\max 5\%}$  - maksymalna wartość konduktywności wodnego roztworu zabrudzeń w danej temperaturze  $\tau$ , dla  $\tau = 20^\circ\text{C}$ ,  $\kappa(20) \approx \kappa_{20}$ ,
- $Q_c$  - masa cząstek pyłu opadająca na  $\text{m}^2$  w ciągu doby,
- $\gamma'$  - gęstość masy zabrudzeń,
- $t(1)$  - jednostkowy przedział czasu eksploatacji, określony cyklem zmian warunków meteorologicznych, równy 365 dób (jeden rok),
- $Z(1)$  - zawartość cząstek rozpuszczalnych w całkowitej ilości zapylenia przy częstotliwości skumulowanej względnej równej 1.

W uzasadnieniu wyboru poszczególnych parametrów funkcyjnych równania (2.29) wzięto pod uwagę ich praktyczne znaczenie.

Jak pokazują wyniki badań terenowych [14], wartość konduktywności wodnych roztworów cząstek rozpuszczalnych zabrudzeń pyłowych zmienia się z rejonem (strefą) zabrudzeń oraz porą roku. Zależność od pory roku pobrania próbek pyłów przemysłowych w określonym miejscu eksploatacji można wyjaśnić zmiennością kierunku wiatru, który przynosi pyły przemysłowe. Wyniki pomiarów zawartości cząstek rozpuszczalnych w całkowitej ilości zapylenia pokazano na rys. 2.27. Ze względu na narażenie zabrudzeniowe istotne znaczenie posiadają wartości maksymalne konduktywności wodnego roztworu zabrudzeń. W budowanym modelu matematycznym przyjęto maksymalne wartości konduktywności wodnego roztworu zanieczyszczeń o 5-procentowej częstotliwości występowania w danym terenie eksploatacji ( $\kappa(\tau)_{\max 5\%}$ ). O wartości konduktywności powierzchniowej decyduje również grubość warstwy, wyrażona całkowitą masą osadów tworzących warstwę zabrudzeniową  $Q'_c$ . Również ta wielkość jest parametrem losowym, w danym miejscu eksploatacji, w warunkach różnorodnego zanieczyszczenia atmosfery i zmieniającego się kierunku wiatru. Ponieważ opad cząstek zanieczyszczeń (pyłów) charakteryzuje również grubość warstwy zabrudzeniowej utworzonej w danym przedziale



Rys. 2.27. Wieloboki częstości skumulowanych procentowej zawartości cząstek rozpuszczalnych w całkowitej ilości zapylenia w różnych strefach zabrudzeniowych [14]

Fig. 2.27. Polygons of frequency of the accumulated percent contents of soluble particles in the total quantity of dustiness in different pollution zones [14]

czasu, dlatego w modelu matematycznym parametr ten uwzględnia również czynnik czasu oddziaływania o zadanej intensywności i zdefiniowany został równaniem (2.30).

$$Q'_c = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} Q_{ci} t_i}{\sum_{i=1}^{i=n} t_i}, \quad (2.30)$$

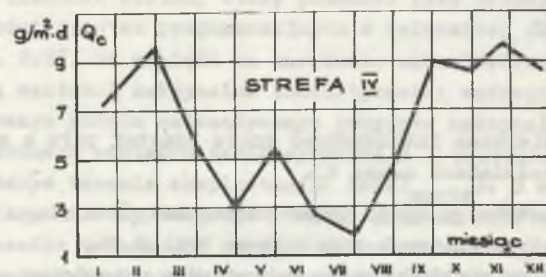
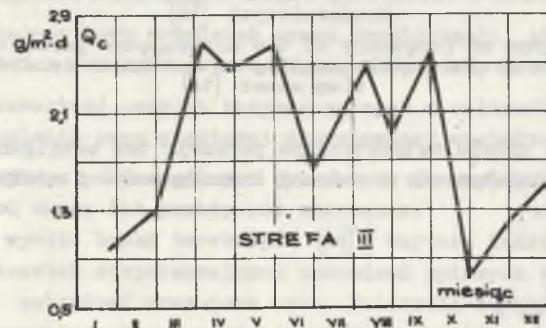
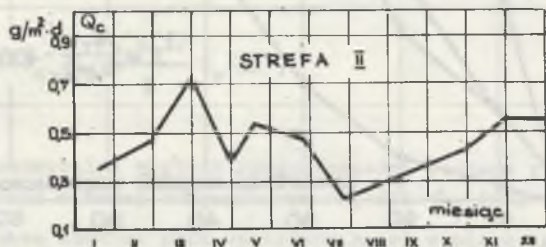
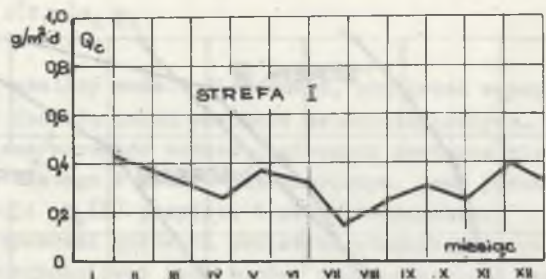
gdzie:

- $Q_{ci}, t_i$  - pomierzona intensywność opadu cząstek pyłu w określonych przedziałach czasu  $t_i$ .

Rozkład jednostkowego opadu pyłów przemysłowych w ciągu roku w określonych rejonach zabrudzeniowych pokazano na rys. 2.28.

Pomiary terenowe rozkładu opadu zabrudzeń o określonej zawartości cząstek rozpuszczalnych w wodzie w określonym przedziale czasu powinny być wykonane na wysokościach zbliżonych do tych, na których pracują układy izolacyjne (liniowe i stacyjne) [10].





Rys. 2.28. Rozkład jednostkowego opadu pyłów przemysłowych w ciągu roku w określonych rejonach zabrudzeniowych [14]

Fig. 2.28. Distribution of unitary industrial dustfall during one year in the particular regions of pollution [14]

Jak wykazano w rozdziale 2.3 pracy, osadzanie się ziaren pyłów na powierzchni izolatorów jest uzależnione od ich masy, co przy określonej populacji średnicy ziaren jest funkcją gęstości masy  $\gamma'_1$ . W jednostkowym przedziale czasu obejmującym charakterystyczne cykle zmian warunków meteorologicznych zmienia się rodzaj niesionych przez wiatr pyłów i zmienia się również z czasem eksploatacji gęstość masy pyłów  $\gamma'_1$ , w oddziaływaniu których znajdują się izolatory w czasie  $t_1$ . Jako parametr do badań modelowych warunków tworzenia się warstwy zabrudzeniowej przyjęto gęstość masy ziaren pyłów opisana równaniem (2.31).

$$\gamma'_1 = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \gamma'_1 t_1}{\sum_{i=1}^{i=n} t_1} \quad (2.31)$$

Konduktywność powierzchniowa izolatorów napowietrzanych jest zależna również od stężenia gazów przemysłowych, które reagując z kropelkami wody unoszonymi w powietrzu powodują wzrost konduktywności wody deszczowej i mżawki [14]. Tym samym wzrasta również konduktywność warstwy zabrudzeniowej, której wymiar ilościowy wyraża współczynnik  $\varphi_d$  opisany zależnością (2.32):

$$\varphi_d = 1 + 0,1 \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\kappa_{rzi} - \kappa_{wn}}{\kappa_{wn}} Z(\kappa_{rzi}), \quad (2.32)$$

gdzie:

- $\kappa_{wn}$  - konduktywność wody deszczu normalnego  $\kappa_{wn} = 10000 \mu S/m$ ,
- $\kappa_{rzi}$  - konduktywność rzeczywista wody deszczowej w danym rejonie eksploatacji,
- $Z(\kappa_{rzi})$  - częstość deszczu o określonej konduktywności.

Na podstawie danych pomiarowych wg pracy [14] wyznaczono przykładowo wartości współczynnika  $\varphi_d$  dla poszczególnych stref zabrudzeniowych i zestawiono w tabelicy 2.3. Wpływ rodzaju i intensywności zanieczyszczenia atmosfery (strefy zabrudzeniowej) na konduktywność wody deszczowej ilustruje rys. 2.29.

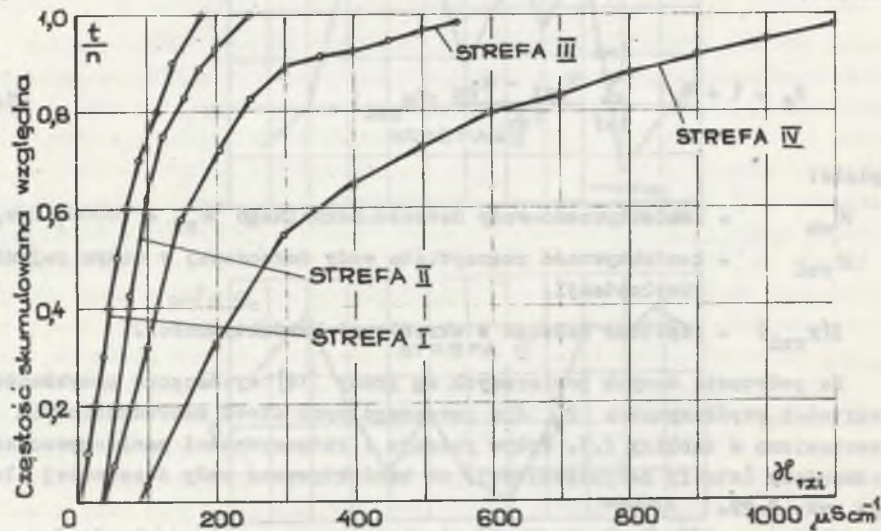
Właściwe odwzorowanie warunków tworzenia się warstwy zabrudzeń w modelu stanu zabrudzenia powierzchni izolatorów wymaga zdefiniowania oddziaływania czynników samooczyszczania. Zadanie to, jak to już wykazano w poprzednim rozdziale, wypełniają deszcz i wiatr w zależności od rozwiązania



Tablica 2.3

Przykładowe obliczenia współczynnika zmian konduktywności wody deszczowej  $\varphi_d$  na podstawie danych pomiarowych [14]

Strefa zabrudzeniowa	$\%_{wn}$ $\mu S/m$	$\%_{rzi}$ $\mu S/m$	$Z(\%_{rzi})$	$\varphi_d$
I	10000	13000	0,15	1,012
II	10000	15000 20000 24000	0,21 0,11 0,09	1,034
III	10000	15000 25000 30000 55000	0,26 0,23 0,08 0,09	1,104
IV	10000	20000 30000 50000 70000 90000 110000	0,28 0,23 0,17 0,12 0,08 0,08	1,36



Rys. 2.29. Wieloboki częstości występowania opadów deszczowych o określonej konduktywności w różnych strefach zabrudzeniowych [14]

Fig. 2.29. Polygons of the frequency of occurrence of rain falls of definite conductivity in different pollution zones [14]

i parametrów konstrukcyjnych układu izolacyjnego. Skuteczność czyszczącego działania deszczu na zabrudzoną powierzchnię związana jest ze zmywaniem ziaren pyłu z powierzchni izolatorów i wymywaniem elektrolitów, powstałych z rozkładu cząstek rozpuszczalnych w wodzie, z warstwy zabrudzeniowej. Realizację procesu samooczyszczania deszczem determinują następujące parametry charakteryzujące opady deszczu w jednostkowym przedziale czasu zmian cykli warunków meteorologicznych:

$m$  - średnia liczba dni w roku z opadami o intensywności większej lub równej 0,1 mm/min,

$w_d$  - okres opadów w miesiącach letnich,

$u$  - udział opadów deszczu okresu letniego w rocznej sumie opadów,

$\zeta$  - częstość deszczu o intensywności większej lub równej 0,1 mm/min.

Ujmując cechy konstrukcji układu izolacyjnego umożliwiające czyszczące działanie deszczu, jak i cechy mówiące o istotności czynnika czyszczącego, zdefiniowano współczynnik samooczyszczania deszczem w relacji:

$$\varphi_d = (1 - \zeta \frac{L_{ucz}}{L_u}) \delta_d, \quad (2.33)$$

gdzie:

$L_{ucz}$  - droga upływu poddana bezpośredniemu działaniu strug deszczu,

$\delta_d$  - współczynnik opadów deszczu charakteryzujący rejon eksploatacji

$$\text{wyrażony równaniem: } \delta_d = e^{-\frac{mu}{w_d}}. \quad (2.34)$$

Przykładowo, wykorzystując dane meteorologiczne wg pracy [17] dla terenów GOP-u:  $m = 95$ ,  $w_d = 210$  i  $u = 0,7$ , współczynnik  $\delta_d = 0,73$ . Istotnym problemem dla służb eksploatacji linii i stacji w.n. jest nie tylko wartość graniczna konduktywności powierzchniowej, ale również szybkość tworzenia się warstwy zabrudzeniowej - wzrostu konduktywności powierzchniowej - w czasie eksploatacji izolatora, którą w modelu matematycznym określa stała czasowa  $T$  (równanie 2.27). Szybkość wzrostu konduktywności powierzchniowej jest wynikiem intensywności czynników narażenia zabrudzeniowego, którą wyraża całkowita ilość opadów o częstości równej 5% -  $Q_{cmax}(5\%)$  i zawartość cząstek rozpuszczalnych w całkowitej ilości zapyleń przy częstości skumulowanej względnej równej jedności -  $Z(1)$  oraz zdolności konstrukcji do przeciwdziałania narastaniu konduktywności warstwy zabrudzeniowej, którą charakteryzują: możliwość oddziaływania czynników samooczyszczania, sposób odprowadzania elektrolitów i własności aerodynamiczne klosza izolatora.



Wpływ wiatru i deszczu na szybkość przyrostu konduktywności warstwy zabrudzeniowej izolatora wyraża współczynnik  $\lambda_d$ , wyrażony równaniem:

$$\lambda_d = e^{-\delta_d \frac{I_{ucz}}{I_u}} \quad (2.35)$$

Natomiast własności aerodynamiczne klosza izolatora, które charakteryzują wielkość obszarów przepływu i zastoju strug wiatru, jak pokazują wyniki badań [52, 105, 108], jest głównie funkcją kąta pochylenia górnej powierzchni klosza, bowiem dolna powierzchnia kloszy daszkowych w położeniu pionowym izolatora znajduje się w obszarze zastoju. Współczynnik uwzględniający własności aerodynamiczne kloszy daszkowych dla kąta pochylenia powierzchni górnej klosza  $\alpha$ , zawartego w przedziale  $0 < \alpha < 45^\circ$  opisuje równanie

$$\eta_a = 1 + \sin(45^\circ - \alpha) \quad (2.36)$$

Analityczna postać stałej czasowej zmian konduktywności powierzchniowej jest iloczynem funkcji opisujących wpływ czynników narażenia zabrudzeniowego oraz oddziaływania wiatru i deszczu.

$$T = \frac{10^{-3}}{Q_{cmax(5\%)Z(1)}} e^{-\delta_d \frac{I_{ucz}}{I_u}} [1 + \sin(45^\circ - \alpha)] \quad (2.37)$$

gdzie:

$Q_{cmax(5\%)}$  - oznacza pięcioprocentową częstość występowania całkowitej ilości wagowej cząstek rozpuszczalnych i nierozpuszczalnych zapylenia w kg, opadająca na metr kwadratowy w ciągu doby,

$Z(1)$  - wyraża zawartość cząstek rozpuszczalnych w całkowitej ilości zanieczyszczenia przy częstości skumulowanej względnej równej jedności.

Wstawiając zależności funkcyjne (2.29), (2.32) i (2.33) opisujące parametry wyrażenia (2.27) otrzymujemy równanie charakterystyki stanu powierzchni izolatorów w postaci ogólnej:

$$x_p(\tau) = x(\tau)_{max(5\%)} \frac{Q_c Z(1)}{I_u} \delta_d \left(1 - \frac{I_{ucz}}{I_u}\right) \eta_a t_e (1) \left[1 - e^{-\frac{\tau}{t_e}}\right] \quad (2.38)$$

Funkcja ta pozwala na modelowanie stanu zabrudzenia powierzchni izolatorów i narażenia zabrudzeniowego układów izolacyjnych w zależności od parametrów konstrukcyjnych i położenia pracy oraz czynników narażenia zabrudzeniowego, meteorologicznych i czasu eksploatacji.

### 2.5.3. Przykład wykorzystania praktycznego modelu matematycznego

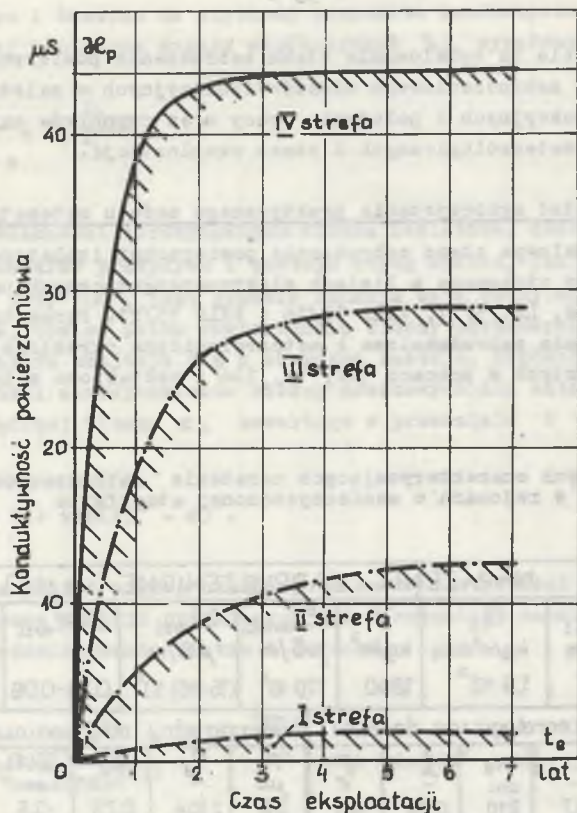
Badaniom modelowym stanu zabrudzenia powierzchni izolatorów poddano typowe izolatory stosowane w liniach elektroenergetycznych na terenie GOP-u: LP 75/14, LP 75/17, VKLF 75/16 i VKLS 75/21. Parametry charakteryzujące narażenia zabrudzeniowe i meteorologiczne określono na podstawie danych zawartych w pracach [14, 17, 124] i zestawiono w tablicy 2.4.

Tablica 2.

Zestawienie danych charakteryzujących narażenia zabrudzeniowe izolatorów w rejonach o zanieczyszczonej atmosferze

NARAŻENIA ZABRUDZENIOWE [14,123]								
$Q_{cmax(5\%)}$ kg/m <sup>2</sup> dobę	$Q_c$ kg/m <sup>2</sup> dobę	$\gamma'$ kg/m <sup>3</sup>	$\partial \mathcal{E}_{max(5\%)}$ μS/m	$\partial \mathcal{E}_{wrzi}$ μS/m	$Z(\partial \mathcal{E}_{wrzi})$	$\partial \mathcal{E}_{wn}$ μS/m		
$2,25 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	1860	$170 \cdot 10^3$	$(15-55) \cdot 10^3$	0,26-0,08	10000		
Dane meteorologiczne deszczu				Parametry obliczeniowe				
$m_{oi}$ dni	$U$	$W_d$ dni	$\xi$	$\varphi$	$A$ μS	$\gamma_d$	$\delta_d$	$Z(1)$
95	0,7	210	0,26	45	38	1,104	0,73	0,6
Typ izolatora	LP75/12	LP75/14	LP75/17	VKLF 75/16	VKLS 75/21			
Dane konstrukcyjne	$L_u$ mm	1690	1970	2250	2500	3350		
	$L_{ucz}$ mm	820	950	800	850	950		
	$\frac{L_{ucz}}{L_u}$	-	0,48	0,48	0,355	0,34		
	$\alpha$	-	18	18	18	40		
	lat	0,75	0,75	0,83	0,63	0,69		
Charakterystyka stanu powierzchni izolatorów $\partial \mathcal{E} = \lambda \gamma' (1 - e^{-\frac{\tau}{t_e}})$	$t_e$ 0,23	7,0	7,0	6,7	8,6	8,1		
	0,46	12,3	12,3	11,9	14,5	13,9		
	0,7	16,3	16,3	15,8	18,7	18,2		
	1,4	22,6	22,6	22,4	24,5	24,8		
	2,1	25,1	25,1	25,5	26,7	27,1		



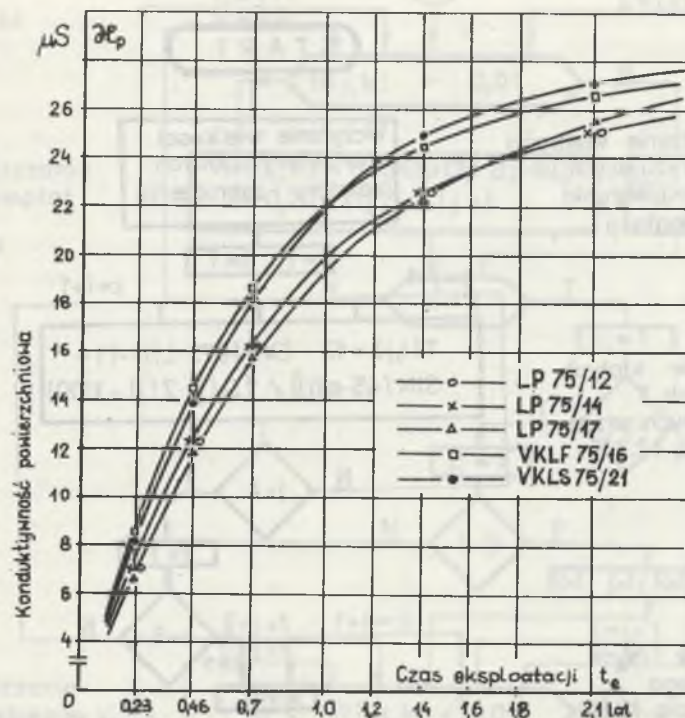


Rys. 2.30. Charakterystyki stanu zabrudzenia izolatora LP 75/17 w różnych warunkach eksploatacji

Fig. 2.30. Characteristics of the state of pollution of LP 75/17 insulator in various conditions of operation

Zmienność zabrudzeniowej charakterystyki stanu powierzchni w różnych warunkach eksploatacji - strefach zabrudzeniowych - przedstawiono w przykładzie obliczeniowym dla izolatora LP 75/17 na rys. 2.30. Wyniki obliczeń zabrudzeniowej charakterystyki stanu powierzchni izolatorów w warunkach III strefy zabrudzeniowej zestawiono w tabelicy 2.4 i przedstawiono wykreślnie na rys. 2.31.

Opracowany model matematyczny zmiany stanu zabrudzenia powierzchni izolatorów napowietrznych w zadanych warunkach eksploatacyjnych (zabrudzeniowych i meteorologicznych) w funkcji czasu eksploatacji pozwala na porównawczą ocenę różnych rozwiązań konstrukcyjnych izolatorów i łańcuchów elektroizolacyjnych. Na podstawie pomiarów parametrów charakteryzujących narażenia zabrudzeniowe i warunki meteorologiczne w określonym rejonie lub miejscu eksploatacji możliwa jest okresowa lub ciągła - przy



Rys. 2.31. Charakterystyki stanu powierzchni izolatorów różnych konstrukcji w warunkach III strefy zabrudzeniowej

Fig. 2.31. Characteristics of the surface state of insulators of various constructions in the conditions of the IIIrd pollution zone

wykorzystaniu elektronicznych maszyn cyfrowych (p. 2.5.4 pracy) - kontrola stanu zabrudzenia izolatorów. Umożliwić to może opracowanie merytorycznie uzasadnionych harmonogramów czyszczenia lub wymiany izolatorów oraz może się przyczynić do usprawnienia pracy dyspozycji mocy przez właściwe (wcześniejsze) przygotowanie rezerwowego zasilania odbiorców energii elektrycznej.

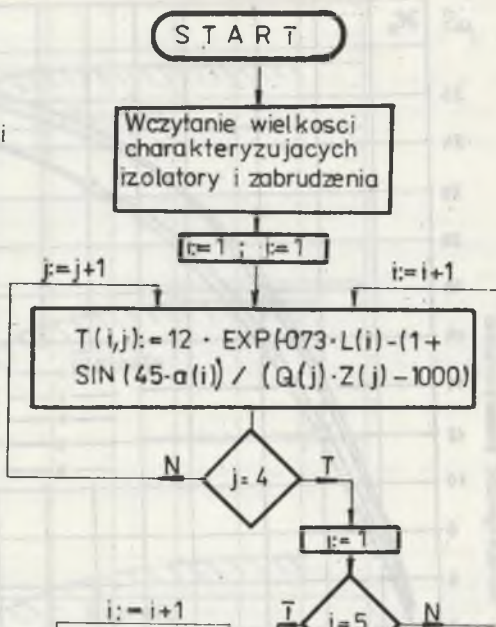
#### 2.5.4. Numeryczna analiza stanu zabrudzenia powierzchni izolatorów

Opracowany w punkcie 2.5.2 model matematyczny opisujący zmianę stanu powierzchni izolatora z czasem eksploatacji (zależność (2.37)) można wykorzystać do porównania różnych rozwiązań konstrukcyjnych oraz badania symulacyjnego zachowania się zadanych konstrukcji izolatorów w różnych warunkach narażeń zabrudzeniowych i meteorologicznych (strefach zabrudzeniowych). Model ten może być wykorzystany również, o czym będzie mowa w rozdziale 4.4, do symulowania rozkładów losowych parametrów narażeń zabrudzeniowych i meteorologicznych.



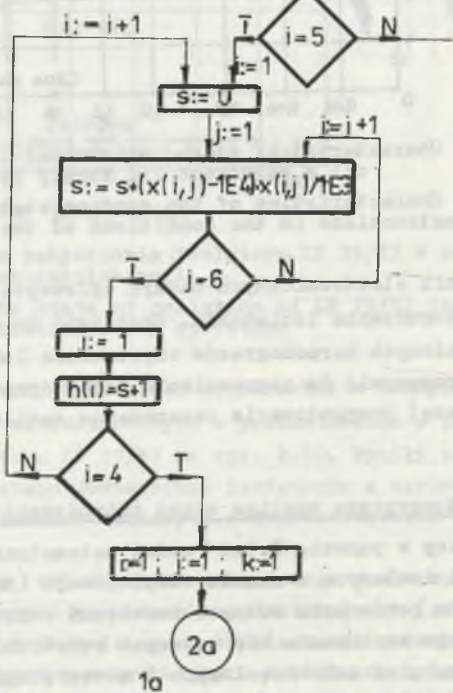
a)

Wprowadzenie wielkości charakteryzujących izolatory i warunki ich eksploatacji



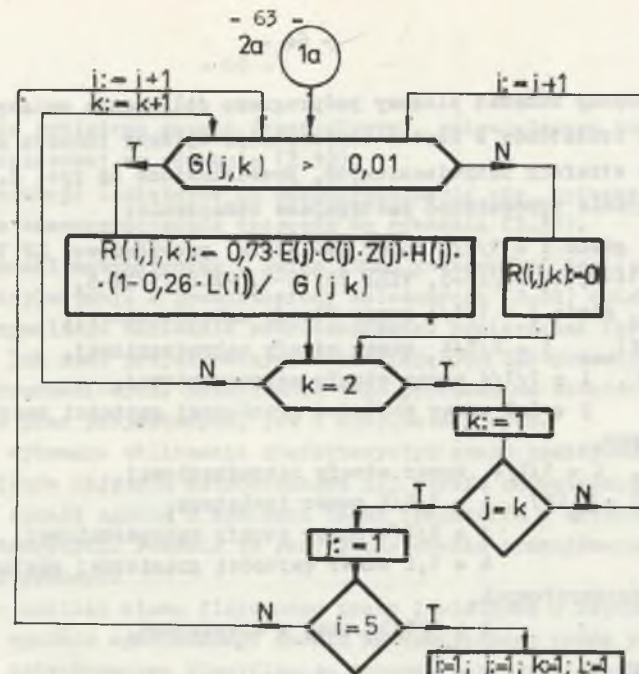
Obliczenie stałych czasowych T określonych przez zależność (2.37)

Obliczenie określonego  $\gamma_d$  zależnością (2.32)

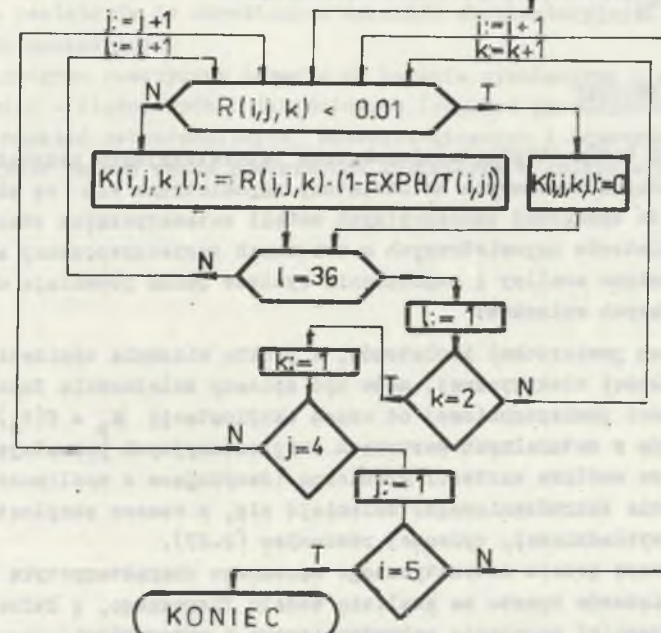


b)

Obliczanie asymptot  $\mathcal{R}_p$



Obliczanie przebiegów czasowych  $\mathcal{R}_p$  określonych zależnością (2.38)



Rys. 2.32. Schemat blokowy podprogramu wyznaczenia charakterystyk stanu powierzchni izolatorów w warunkach eksploatacyjnych

Fig. 2.32. Block diagram of the sub-program of determining the characteristics of the surface state of insulators in operational conditions



Uproszczony schemat blokowy podprogramu obliczania zmiany stanu powierzchni izolatorów z czasem eksploatacji opisany funkcją  $\alpha_p = f(t_e)$ , w różnych strefach zabrudzeniowych, przedstawiono na rys. 2.32.

W programie wprowadzono następujące oznaczenia:

$A(i) = \alpha$ , gdzie  $i = 1/1/5$  numer izolatora, przykładowo: LP 75/12-1, LP 75/14-2, LP 75/17-3, VKLF 75/16-4, VKLS 75/21-5,

$C(j) = Q_c$ , gdzie  $j = 1/1/4$  numer strefy zabrudzeniowej,

$E(j) = \alpha(\tau)_{\max}$   $j = 1/1/4$  numer strefy zabrudzeniowej,

$G(i, j) = \alpha'$ ,  $i = 1/1/4$  numer strefy zabrudzeniowej,  $j = 1, 2$  numer wartości granicznej gęstości masy pyłów przemysłowych,

$H(i) = \alpha_d$ ,  $i = 1/1/4$  numer strefy zabrudzeniowej,

$K(i, j, k, l) = \alpha_p(\tau)$ ,  $i = 1/1/5$  numer izolatora,  $j = 1/1/4$  numer strefy zabrudzeniowej,  $k = 1, 2$  numer wartości granicznej gęstości masy pyłów przemysłowych,

$l = 1/1/36$  czas w miesiącach,

$L(i) = \frac{L_{ucz}}{L_u}$ ,  $i = 1/1/5$  numer izolatora.

## 2.6. WNIOSKI

Wyniki badań eksploatacyjnych oraz laboratoryjnych oddziaływania czynników narażeń terenowych na izolatory napowietrzne w.n są obecnie wystarczające do opracowań koncepcyjnych modeli matematycznych stanu powierzchni izolatorów napowietrznych w warunkach zanieczyszczonej atmosfery. Przedstawione analizy i uogólnienia wyników badań pozwalają na wysunięcie następujących wniosków:

1. Stan powierzchni izolatorów, z punktu widzenia obniżenia się ich wytrzymałości elektrycznej, może być opisany zależnością funkcyjną konduktywności powierzchniowej od czasu eksploatacji  $\alpha_p = f(t_e)$ . Badania izolatorów w naturalnych warunkach eksploatacyjnych pozwalają na stwierdzenie, że możliwe wartości graniczne (decydujące o możliwości zapłonu wyładowania zabrudzeniowego) zmieniają się, z czasem eksploatacji, wg funkcji wykładniczej, opisanej równaniem (2.27).

2. Budowę modelu matematycznego nazwanego charakterystyka stanu powierzchni izolatorów oparto na analizie modelu fizycznego, z którego wynikają **główne** czynniki narażenia zabrudzeniowego i meteorologicznego, będące **funkcjami**:

a) stopnia oddziaływania narażeń pyłowych (całkowitego opadu i zawartości cząstek rozpuszczalnych), ujętego zależnością (2.29),

- b) zanieczyszczenia powietrza gazami przemysłowymi, zmieniającego konduktywność wody deszczowej wg równania (2.32),
- c) zdolności konstrukcji izolatorów do samooczyszczania się, opisanej współczynnikiem samooczyszczania deszczem wg równania (2.33).

3. Opracowany model matematyczny - zmian stanu powierzchni izolatorów w funkcji czasu eksploatacji - przedstawiony zależnością (2.38) opisuje możliwe stany maksymalnego narażenia zabrudzeniowego powierzchni izolatorów pracujących lub nowo projektowanych w istniejących lub przewidywanych warunkach zabrudzeniowych. Rozwiązanie tego problemu ma istotne znaczenie zarówno dla prac projektowych, jak i eksploatacyjnych.

4. Przykładowo wykonane obliczenia charakterystyk stanu powierzchni izolatorów dla rejonów objętych dotychczasową III strefą zabrudzeniową są w zadowalający sposób zgodne z wynikami badań izolatorów w naturalnych warunkach eksploatacyjnych. Pozwala to pozytywnie ocenić prawidłowość budowy modelu matematycznego.

5. Na podstawie analizy stanu fizycznego pracy izolatorów w rejonach zabrudzeniowych i wyników opracowanego modelu matematycznego można powiedzieć, że zarówno dotychczasowa klasyfikacja terenów zabrudzeniowych, jak i kryteria doboru izolatorów do określonych warunków eksploatacyjnych są merytorycznie mało uzasadnione.

6. Opracowany program numeryczny pozwala na badania symulacyjne - w szerokim zakresie zmian - ilościowych i jakościowych (rozkład prawdopodobieństwa) parametrów narażeń zabrudzeniowych, meteorologicznych i konstrukcyjnych w mechanizmie zmiany stanu powierzchni izolatorów w czasie eksploatacji.



### 3. WYTRZYMAŁOŚĆ ELEKTRYCZNA IZOLATORÓW W WARUNKACH ZABRUDZENIOWYCH

#### 3.1. WYTRZYMAŁOŚĆ ELEKTRYCZNA IZOLATORÓW W WARUNKACH RÓWNOMIERNEJ WARSTWY ZABRUDZEŃ

##### 3.1.1. Wprowadzenie

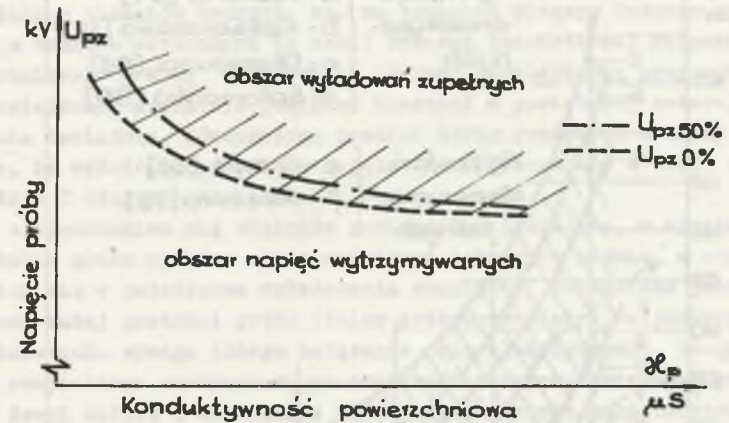
Wytrzymałość elektryczna izolatorów napowietrznych w wyniku osadzania się na ich powierzchni zanieczyszczeń atmosfery obniża się.

Wpływ zanieczyszczeń atmosferycznych na pracę izolacji napowietrznych uwidocznił się wraz z rozwojem układów przesyłowych (wzrost poziomu napięcia roboczego) oraz ze wzrostem stopnia zanieczyszczenia atmosfery<sup>1)</sup>.

Interpretacja fizyczna zjawiska wyładowania zabrudzeniowego przeszła w ciągu dziesiątków lat interesującą ewolucję. Początkowo obniżenie wytrzymałości elektrycznej tłumaczono elektrostatycznym wpływem na zmianę rozkładu pola elektrycznego, co nie zostało potwierdzone wynikami badań laboratoryjnych. Dopiero prace Obenausa [83], Crona i Estorffa [38] oraz Frischmana [40] pozwoliły na pełniejsze poznanie mechanizmu wyładowania zabrudzeniowego, który jest wynikiem procesów termicznych zachodzących w warstwie zabrudzeniowej i przemieszczenia się podstawy łuków cząstkowych<sup>2)</sup>. W pracach tych scharakteryzowano zależności wyładowania zabrudzeniowego od konduktywności powierzchniowej warstwy zabrudzeniowej, rozkładu pola elektrycznego i gęstości prądu upływu. W wyniku badań modelowych [33, 34] określono zależność poziomu napięcia przeskoku powierzchniowego w funkcji konduktywności powierzchniowej  $\alpha_p$  (rys. 3.1). Dalsze prace badawcze [23, 28, 62, 69, 74, 78, 85, 97, 99] na izolatorach zabrudzonych sztucznie i w warunkach naturalnych pozwalają na wyjaśnienie wpływu czynników otoczenia, takich jak: wilgoć, temperatura, ciśnienie oraz rodzaju i rozkładu warstwy zabrudzeniowej, rozkładu napięcia wzdłuż osi izolatora oraz mocy i parametrów obwodu probierczego. Wyniki tych prac przyczyniły się do ujednoczenia metod badań izolatorów przeznaczonych do pracy w warunkach zabrudzeniowych.

<sup>1)</sup> Już w końcu lat 20 zostały zapoczątkowane przez Mitforda i Godleta badania nad istotą wyładowania elektrycznego po zabrudzonej powierzchni izolatora.

<sup>2)</sup> Łuki cząstkowe - nazwane tak ze względu na bocznikujący charakter części drogi upływu izolatora - nazywane są często łukami wędrującymi. Ze względu na poruszanie się łuku w kierunku po obwodzie i wzdłuż osi izolatora.

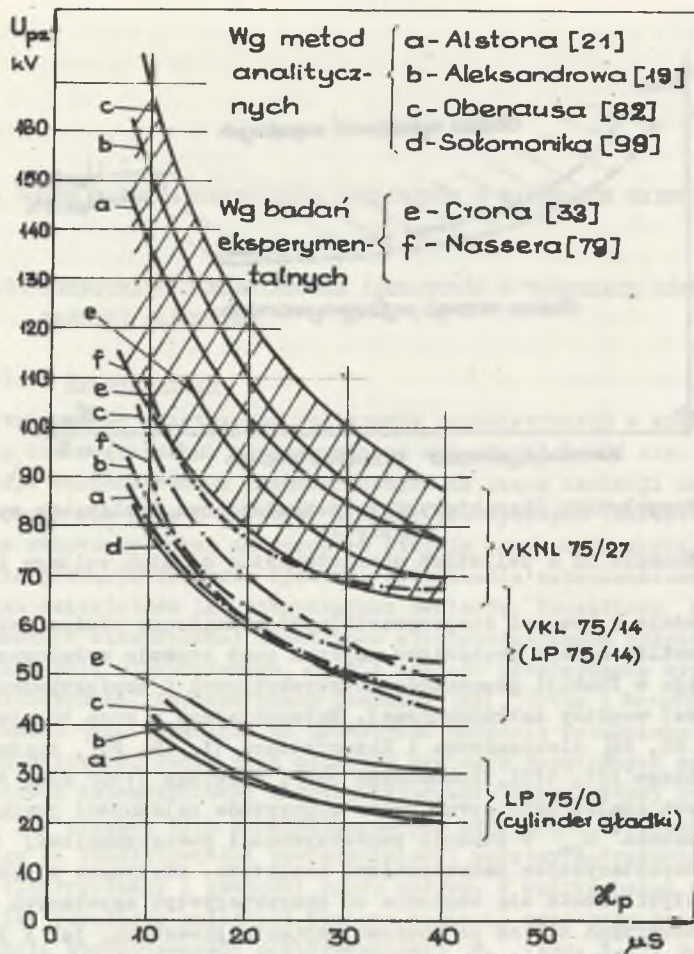


Rys. 3.1. Przykładowa charakterystyka zabrudzeniowa izolatorów wysokiego napięcia

Fig. 3.1. Example of a pollution characteristic of high voltage insulators

Równocześnie z pracami eksperymentalnymi prowadzono studia teoretyczne nad opracowaniem modelu mechanizmu zapłonu oraz rozwoju wyładowania zabrudzeniowego w funkcji parametrów konstrukcyjnych i konduktywności powierzchniowej warstwy zabrudzeniowej. Najważniejsze z nich to prace Obenausa [28, 83, 84] Aleksandrowa i Kizewiettera [1, 19, 20], Alstona i Żołądziowskiego [21, 117], Sołomonika [99], Wilkina [116] oraz Rizka [91]. Wynikiem tych analiz było opracowanie algorytmów zależności poziomu napięcia przeskoku  $U_{pz}$  w funkcji konduktywności powierzchniowej  $\alpha_p$ , zwane dalej charakterystyką zabrudzeniową izolatora. Otrzymane w ten sposób charakterystyki różnią się znacznie od charakterystyk uzyskanych z pomiarów laboratoryjnych tak co do poziomu napięcia przeskoku, jak i jego zmiany w funkcji konduktywności powierzchniowej izolatorów (rys. 3.2). Równocześnie widać, że różnice pomiędzy charakterystykami analitycznymi i doświadczalnymi są zależne od parametrów konstrukcyjnych badanych izolatorów. Wnioski te uniemożliwiają wykorzystanie dotychczasowych metod teoretycznej analizy wyładowania zabrudzeniowego do określenia roli i znaczenia parametrów konstrukcyjnych izolatorów w mechanizmie wyładowania oraz wykorzystania ich do oceny wytrzymałości zabrudzeniowej izolatorów. Ponieważ badania laboratoryjne i terenowe są kosztowne i długotrwałe, dlatego konieczne są dalsze prace nad opracowaniem modelu matematycznego wyładowania zabrudzeniowego w oparciu o podstawowe parametry konstrukcyjne izolatorów i konduktywność warstwy zabrudzeniowej. Rozwiązanie tego zadania umożliwi porównanie różnych rozwiązań konstrukcyjnych i stworzy podstawę do opracowania metody oceny możliwości eksploatacyjnych izolatorów przeznaczonych do pracy w warunkach zabrudzeniowych.





Rys. 3.2. Porównanie charakterystyk zabrudzeniowych wyznaczonych metodami analitycznymi i doświadczalnymi

Fig. 3.2. Comparison of the pollution characteristics determined by analytical and experimental methods

### 3.1.2. Analiza modelu fizycznego wyładowania zabrudzeniowego

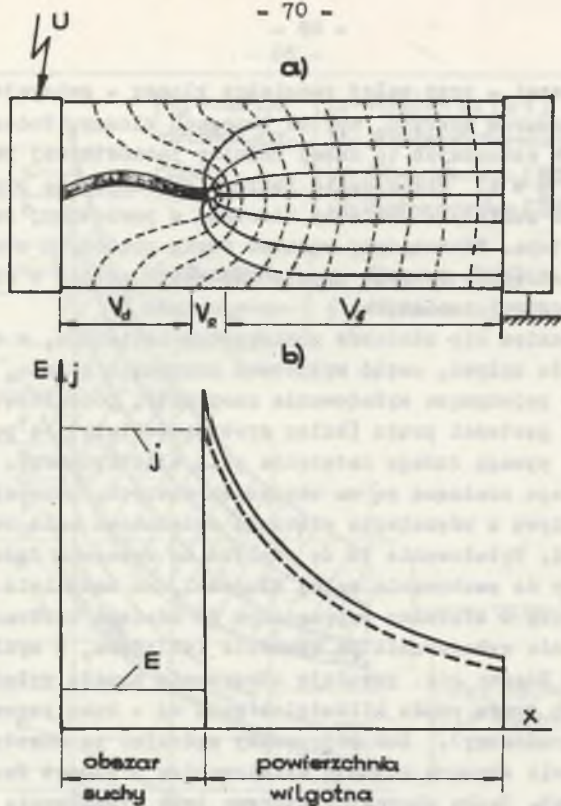
Obserwacja mechanizmu zapłonu wyładowania elektrycznego na zabrudzonej powierzchni izolatora pozwala na wyodrębnienie następujących faz charakterystycznych. Przy małym zabrudzeniu lub niewielkim zwilżeniu warstwy zabrudzeń mogą wystąpić niewielkie iskrzące kanaliki, które stanowią pierwszą fazę wyładowania i nie stanowią praktycznie zagrożenia dla izolacji, oprócz stosunkowo znacznych zakłóceń radioelektrycznych. Drugą fazę wyładowania stanowią krótkie wyładowania iskrowe koloru niebiesko-fioletowego, które zapalają się równoległe na powierzchni kloszy lub w powie-

trzu między kloszami - przy małej podziałce kloszy - zwierając krawędzie sąsiadujących obszarów mokrych, np. na brzegach kloszy. Podczas prób izolatorów z tworzyw sztucznych (o dużej różnicy jednostkowej rezystancji powierzchniowej  $\frac{D}{d} \approx 4$ ) wyładowania iskrowe zapalają się przy mokrej całej powierzchni izolatora pomiędzy kloszami w powietrzu, zwierając odcinki pnia izolatora. Równomierny rozkład strug prądowych o małej gęstości powoduje, że wyładowanie iskrowe zapala się równocześnie w wielu miejscach po obwodzie i długości izolatora.

Wraz z wysuszeniem się odcinków powierzchni izolatora, w wyniku cieplnego działania prądu upływu, część wyładowań iskrowych gaśnie, a część z nich łączy się w pojedyncze wyładowania snopiaste, początkowo jeszcze o stosunkowo małej gęstości prądu (kolor srebrzystobiały), a podtrzymanie tego wyładowania wymaga dużego natężenia pola elektrycznego. Stopy wyładowania snopiastego osadzane są na obszarach mokrych, zwierając krótkie odcinki drogi upływu z równoległą włączoną stosunkowo małą rezystancją warstwy zabrudzeń. Wyładowanie to ze względu na wymaganą dużą wartość natężenia pola dąży do zachowania małej długości, co umożliwi przemieszczanie się stopy iskry w kierunku poprzecznym do odcinka zwieranego. Obserwuje się wędrowanie wyładowania po obwodzie izolatora, w wyniku którego pojedyncze iskry łącząc się powodują utworzenie kanału wyładowania o znacznej gęstości prądu rzędu kilkudziesięciu mA - łuku poprzecznego - (kolor żółtopomarańczowy). Łuk poprzeczny wędrując po obwodzie izolatora powoduje wysuszenie obszaru objętego wyładowaniem i wzrost rezystancji odcinków wysuszonych. Cechą charakterystyczną tego wyładowania jest duża prędkość poruszania się łuków poprzecznych.

Utworzenie się obszarów o dużej rezystancji powoduje gwałtowną zmianę osiowego rozkładu napięcia. Na odcinkach wysuszonych, bocznikowany łukiem wędrującym, pojawia się nadmiar napięcia ponad wartość konieczną dla jego podtrzymania, a równocześnie następuje nagły wzrost prądu upływu. Czas trwania przetężeń spowodowanych paleniem się łuków wędrujących zawiera się w granicach (0,02-5)s. Wzrost gęstości prądu kanału łukowego sprawia, że stopa łuku posiada wysoką temperaturę. W wyniku termicznego działania następuje odparowanie wilgoci zawartej w warstwie zabrudzeń pod stopą łuku wędrującego i z jej najbliższego otoczenia. Dynamiczne działanie zjonizowanej pary wydobywającej się spod stopy łuku i gorących warstw powietrza powodują unoszenie stopy łuku (składowa normalna siła działająca na stopę łuku). Natomiast siły elektrodynamiczne działające zgodnie z kierunkiem pola elektrycznego stanowią składową styczną siłę działającą na stopę łuku. Wypadkowa siła powoduje przesuwanie stopy łuku w kierunku linii sił pola elektrycznego w miejsca o dużej konduktywności (zawilgocone), co powoduje wydłużanie się łuku cząstkowego i bocznikowanie kanałem plazmowym kolejnych odcinków wzdłuż drogi upływu izolatora. Dalszy rozwój wyładowania zabrudzeniowego uzależniony jest od: konduktywności powierzchniowej warstwy zabrudzeniowej - powierzchni nie bocznikowanej





Rys. 3.3. Model wyładowania zabrudzeniowego w warunkach zapłonu łuków wędrujących

a - układ fizyczny:  $V_d$  - strefa łuku,  $V_R$  - strefa stopy łuku,  $V_f$  - strefa nie objęta wyładowaniem cząstkowym [117], b - rozkład natężenia pola E i gęstości prądu wyładowania [38]

Fig. 3.3. Model of pollution discharge in the conditions of ignition of erratic arcs

a - physical system:  $V_d$  - arc zone,  $V_R$  - zone of the arc sole,  $V_f$  - the zone excluded from partial discharge [117], b - distribution of the intensity of the field E and density of the discharge current [38]

łukiem wędrującym - oraz poziomu napięcia zasilania i mocy źródła zasilającego wyładowanie. Przy dostatecznie wysokim napięciu zasilania i mocy źródła zasilającego ( $I_z > 10$  A) łuki wędrujące mogą palić się równocześnie na kilku odcinkach powierzchni izolatora. Wydłużenie się łuków wędrujących może doprowadzić do połączenia się ich w łuk kaskadowy, bocznikujący kanałem plazmowym znaczną część odstępu izolacyjnego pomiędzy okuciami w powietrzu, i obniżenia tym samym wytrzymałości elektrycznej izolatora. Oddziaływanie termiczne kanału łukowego i zjonizowanych warstw powietrza stanowią dodatkowe czynniki ułatwiające przebicie elektryczne warstwy

powietrza - pomiędzy okuciami izolatora - nie zbocznikowanej wyładowaniem łukowym (kaskadowym). Podczas zapłonu łuków wędrujących, w wyniku nierównomiernego osiowego rozkładu napięcia, następuje znaczne zróżnicowanie rozkładu powierzchniowej gęstości prądu upływu oraz natężenia pola elektrycznego, co ilustruje rys. 3.3.

Zapłon i rozwój wyładowania zabrudzeniowego dobrze odzwierciedlają zdjęcia wykonane przez J. Skowrońskiego, a przedstawione w pracach [6, 12, 97] oraz przez S. Żołądziewskiego [117]. Z badań laboratoryjnych wynika, że warunkiem koniecznym zapłonu wyładowania zabrudzeniowego jest istnienie na powierzchni izolatora warstwy zabrudzeniowej oraz nieliniowego rozkładu napięcia wzdłuż drogi upływu. Rozwój wyładowania uzależniony jest od: rodzaju warstwy zabrudzeniowej, wartości jej konduktywności powierzchniowej oraz procesów energetycznych zachodzących na powierzchni izolatorów i w warstwie zabrudzeń.

Należy zaznaczyć, że w mechanizmie rozwoju wyładowania zabrudzeniowego nie jest wystarczająco rozpoznany ostatni etap, który stanowi przeskok iskrowy w warstwie powietrza nie objętej łukami wędrującymi podłużnymi. Pozostaje do wyjaśnienia oddziaływanie łuków wędrujących na wytrzymałość elektryczną przerwy powietrznej oraz wpływ zanieczyszczenia pyłami przemysłowymi na wytrzymałość elektryczną przerw iskrowych.

### 3.1.3. Założenia wstępne do opracowania modelu matematycznego wyładowania zabrudzeniowego

Do opracowania modelu matematycznego wyładowania zabrudzeniowego przyjęto jednorodną<sup>1)</sup> warstwę zabrudzeniową na powierzchni izolatorów z kłosem daszkowym<sup>2)</sup> o uproszczonym kształcie prostokątnym. Przyjmuje się moc źródła zasilającego jak dla sieci elektrycznej sztywnej ( $P \rightarrow \infty$ ). Zapłon i rozwój wyładowania zabrudzeniowego jest procesem długotrwałym w stosunku do czasu trwania przebiccia elektrycznego powietrza.

Badania laboratoryjne wytrzymałości elektrycznej izolatorów długopniowych [32] i kołpakowych [62, 66] w funkcji czasu oddziaływania napięcia i konduktywności powierzchniowej wykazały, że ze wzrostem czasu oddziaływania pola elektrycznego wytrzymałość elektryczna zabrudzeniowa maleje. Minimalny poziom napięcia wytrzymywanego izolatora z równomierną warstwą zabrudzeniową jest również funkcją konduktywności powierzchniowej (Rys. 3.4) Dla konduktywności powierzchniowej  $\chi_p > 10 \mu S$  ustabilizowany minimalny poziom napięcia przeskoku izolatora uzyskuje się po czasie oddziaływania

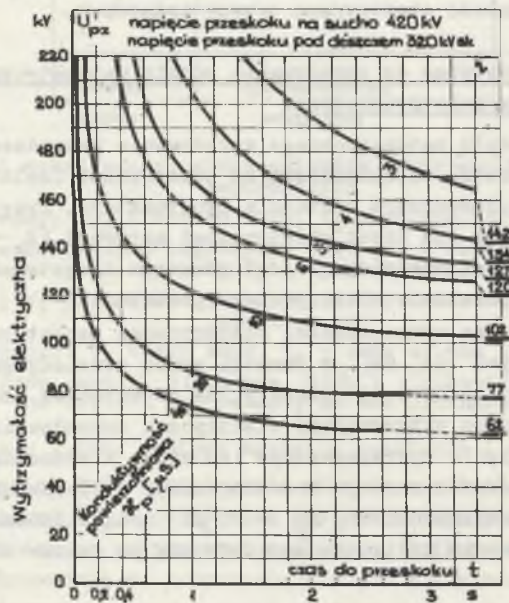
<sup>1)</sup> Warstwa zabrudzeniowa jednorodna wzdłuż drogi upływu utworzona jest z tego samego materiału i o stałej grubości. Założenie to umożliwia weryfikację wyników metod analitycznych wynikami badań laboratoryjnych.

<sup>2)</sup> Kłose daszkowe stosowane są prawie we wszystkich (oprócz kłosey śrubowych) rozwiązaniach konstrukcyjnych napowietrznych układów elektroizolacyjnych.



pola elektrycznego, do przeskoku,  $t \approx 3$  s. Natomiast przy obniżaniu konduktywności powierzchniowej izolatora  $\kappa_p \leq 10 \mu S$ , czas do przeskoku jest znacznie większy od 3s. Z rys. 3.4 wynika, że im większy stopień zanieczyszczenia powierzchni izolatora, tym szybszy rozwój wyładowania zabrudzeniowego. Można więc przyjąć, że minimalną wytrzymałość elektryczną układ izolacyjny posiada w warunkach pola elektrycznego stałego i przemienneo o częstotliwości energetycznej 50 Hz. Pole elektryczne udarowe może mieć wpływ na obniżenie wytrzymałości elektrycznej zabrudzeniowej jedynie przy impulsach napięciowych długotrwałych (przebiegi łączeniowe i dorywcze), szczególnie przy równoczesnym oddziaływaniu pola przemienneo i udarowego (po zapłonie wyładowania łukowego) [95]. Z analizy modelu fizycznego wynikają następujące założenia kryterialne:

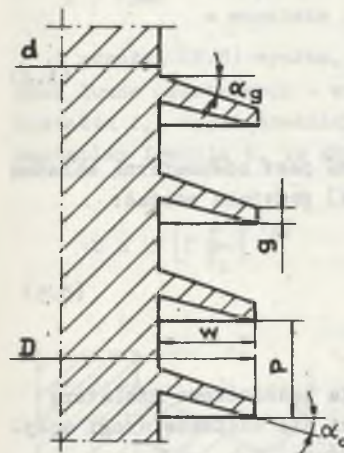
1. Zapłon łuków cząstkowych jest wynikiem procesów energetycznych w warstwie zabrudzeniowej.
2. Wyładowanie zupełne uwarunkowane jest rozwojem łuków cząstkowych i możliwością łączenia się ich w łuki kaskadowe.



Rys. 3.4. Zależność wytrzymałości elektrycznej zabrudzeniowej izolatora LP 75/14 od czasu oddziaływania pola elektrycznego [32]  
 Fig. 3.4. Dependence of the electric pollution strength of the insulator LP 75/14 on the time of operation of the electric field [32]

### 3.1.4. Model matematyczny wyładowania zabrudzeniowego

Analizę mechanizmu zapłonu i rozwoju wyładowania zabrudzeniowego wykonano dla izolatora długopniowego, którego podstawowe parametry konstrukcyjne pokazano na rys. 3.5. Zasadnicze tezy i wyniki opracowania modelu



matematycznego wyładowania zabrudzeniowego przedstawiono w pracach [54, 59]. Łuk wędrujący - poprzeczny - może zapłonąć na dowolnej części drogi upływu izolatora, gdy na zabrudzonej powierzchni izolatora wzdłuż drogi przepływu prądu upływu wystąpi obszary o dużej rezystancji, w których warstwa zabrudzeniowa będzie intensywniej wysuszona. Odparowanie wody zawartej w warstwie zabrudzeniowej powoduje ciepło wydzielone w wyniku przepływu prądu upływu  $I_u$ . Ilość ciepła Joule'a wydzielona w warstwie zabrudzeniowej na powierzchni izolatora o jednostkowej drodze upływu  $i$ -tego elementu izolatora,  $i = 1, 2, \dots, n$ , wynosi:

$$Q_i = I_u^2 R_{pi} t, \quad (3.1)$$

Rys. 3.5. Uproszczony model izolatora długopniowego z kloszem daszkowym

Fig. 3.5. Simplified model of long-rod insulator with hood shed

gdzie:

$I_u$  - prąd upływu po zabrudzonej powierzchni izolatora,

$R_{pi}$  - rezystancja powierzchniowa jednostki długości drogi upływu izolatora,

$t$  - czas oddziaływania pola elektrycznego.

Z równania widać, że ilość ciepła wydzielona w warstwie zabrudzeniowej na powierzchni izolatora zmienia się wraz ze zmianą rezystancji powierzchniowej wzdłuż drogi upływu. Zmiany te są wynikiem zmian rezystancji jednostkowej  $R_{pi}$  wzdłuż drogi upływu, którą określa funkcja:

$$R_{pi} = \frac{f_i}{\kappa_p}, \quad (3.2)$$

gdzie:

$f_i$  - jednostkowy współczynnik kształtu po drodze upływu izolatora,

$$f_i = \frac{1}{\pi} \int_{U_{ui}}^{U_{ui+1}} \frac{dL_{ui}}{U_{ui}} \quad (3.3)$$



$\kappa_p$  - konduktywność powierzchniowa,  
 $D(L_u)$  - wyraża zmianę średnicy izolatora idąc wzdłuż drogi upływu.

Rezystancja powierzchniowa izolatora jest sumą rezystancji jednostkowych:

$$R_p = \sum_{i=1}^{i=m} R_{pi} = \sum_{i=1}^{i=m} \frac{f_i}{\kappa_p} \quad (3.4)$$

Zakładając, że powierzchnia izolatora pokryta jest równomierną warstwą zabrudzeń, czyli  $\kappa_p = \text{const}$ , to wyrażenie (3.4) przyjmie postać:

$$R_p = \frac{1}{\kappa_p} \sum_{i=1}^{i=m} f_i \quad (3.5)$$

Z równań (3.2) i (3.3) wynika, że rezystancja jednostkowa izolatora z kloszami daszkowymi osiąga największe wartości dla odcinków drogi upływu o najmniejszej średnicy, czyli na pnium izolatora.

Przekształcając wyrażenie (3.1) i wprowadzając do niego równania (3.4) i (3.5) otrzymujemy wyrażenie opisujące ciepło wydzielone w warstwie zabrudzeniowej i-tego elementu izolatora o jednostkowej długości drogi upływu.

$$Q_i = U^2 + \kappa_p \frac{f_i}{\sum_{i=1}^{i=m} f_i^2} \quad (3.6)$$

Ponieważ wyrażenie  $\sum_{i=1}^{i=m} f_i = f$ , jest równe całkowitemu współczynnikowi

kształtu izolatora, dlatego możemy napisać, że:

$$Q_i = U^2 + \kappa_p \cdot \frac{f_i}{f^2} \quad (3.7)$$

Z równania (3.7) możemy wyznaczyć poziom napięcia, przy którym na równomiernie zabrudzonej powierzchni izolatora utworzą się pierścieniowe suche obszary, które warunkują zapłon łuków wędrownych (cząstkowych). Po przekształceniu wzoru (3.7) otrzymujemy:

$$U = \left[ \frac{Q_i f^2}{\kappa_p \cdot t \cdot f_i} \right]^{1/2} \quad (3.8)$$

gdzie:

$Q_i = Q_{\text{par}}$  - określa ilość ciepła konieczną do odparowania wody zawartej w warstwie zabrudzeniowej wzdłuż jednostki drogi upływu.

Z wyrażen (3.8) wynika, że wartość napięcia, przy którym nastąpi zapłon łuków cząstkowych - wędrownych, jest funkcją wartości współczynnika kształtu  $f_i$ , czyli średnicy pnia izolatora  $d$ . Jeśli iloraz  $(Q_i/\kappa_p t)^{1/2}$  zastąpimy funkcją  $k'$ , to wyrażenie (3.8) przyjmie postać:

$$U = k' \left[ f \frac{f}{f_i} \right]^{1/2} \quad (3.9)$$

Współczynnik kształtu izolatora  $f$ , jak wynika z rys. 3.6, jest uzależniony od liczby kloszy  $n$ , można zatem napisać równanie:

$$f = n(f_p + f_k) \quad (3.10)$$

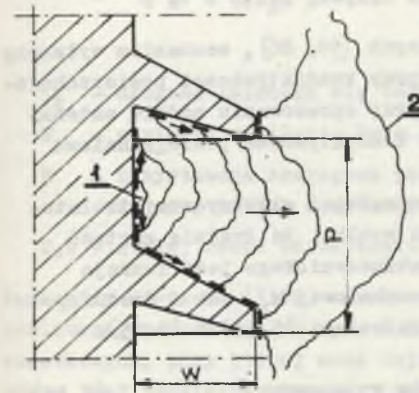
gdzie:

$f_p$  - współczynnik kształtu pnia izolatora,

$f_k$  - współczynnik kształtu klosza izolatora.

Czyli poziom napięcia zapłonu łuków cząstkowych na pnium izolatora<sup>1)</sup>, przyjmując  $f_i = f_p$ , opisuje równanie:

$$U = k' \left[ n \frac{(f_p + f_k)}{f_p} \right]^{1/2} \quad (3.11)$$



Rys. 3.6. Schemat rozwoju łuku wędrującego - cząstkowego na pnium izolatora 1 i łączenia się kilku łuków wędrujących w łuk kaskadowy 2

Fig. 3.6. Diagram of the development of the erratic - partial arc on the rod of insulator 1 and joining of a few erratic arcs into a cascade arc 2

Zakładając określone parametry konstrukcyjne izolatora zgodnie z rys. 3.6 i przekształcając iloraz  $\frac{f_p + f_k}{f_p}$ , otrzymujemy wyrażenie:

<sup>1)</sup> Obserwacje badań laboratoryjnych potwierdzają, że zapłon łuków cząstkowych w warunkach równomiernie zabrudzonej warstwy zabrudzeniowej występuje na pnium izolatora z kloszami daszkowymi.



$$U = k' \left\{ \operatorname{fn} \left[ 1 + \frac{d}{p} \frac{\ln(1 + \frac{2w}{d})}{\cos \alpha_e} \right] \right\}^{1/2} \quad (3.12)$$

Współczynnik  $k'$  wyrażający ilość ciepła potrzebną do odparowania wody zawartej w warstwie zabrudzeniowej na jednostkowej drodze upływu  $L_u(1)$  przy określonej konduktywności  $\kappa_p$  i parametrze czasowym  $t$  oraz dla zadanej średnicy  $d$  powierzchni jednostkowej jest proporcjonalny do wartości natężenia pola elektrycznego i może być opisany zależnością

$$k' = \bar{E}(\kappa_{po}, d) L_u(1), \quad (3.13)$$

gdzie:

$\bar{E}(\kappa_{po}, d)$  - średnia wartość natężenia pola przeskoku zabrudzeniowego przy konduktywności warstwy zabrudzeniowej  $\kappa_{po}$  i średnicy izolatora równej  $d$ ,

$L_u(1)$  - elementarna jednostkowa droga upływu,  $L_u(1) = 1$ .

Jak pokazują wyniki badań eksperymentalnych [10, 86], mechanizm wyładowania zabrudzeniowego może mieć miejsce przy konduktywności powierzchniowej  $\kappa_p > 1 \mu S$ . W dalszej części analizy, przy opracowaniu modelu matematycznego wyładowania zabrudzeniowego, jako konduktywność powierzchniowa początkową przyjęto  $\kappa_{po} = 1 \mu S$ .

Z badań eksperymentalnych [22, 66] wytrzymałości elektrycznej izolatorów długopniowych o zabrudzonej powierzchni wynika, że średnia wartość natężenia pola elektrycznego wyładowania zabrudzeniowego jest funkcją logarymiczną zarówno konduktywności powierzchniowej  $\kappa_p$ , jak i średnicy pnia izolatora  $d$ . Zależności te opisano wyrażeniami (3.14) i (3.15).

$$\bar{E}(d, \kappa_p) \log d = \bar{E}(d, \kappa_p) \log d_x, \quad \text{dla } \kappa_p = \text{const} \quad (3.14)$$

$$\bar{E}(d, \kappa_p) = \bar{E}(d, \kappa_{po}) \cdot \frac{1}{\log \frac{\kappa_p}{\kappa_{po}}}, \quad \text{dla } d = \text{const} \quad (3.15)$$

gdzie:

- $d$  - średnica pnia izolatora standardowego,
- $d_x$  - średnica pnia dowolnego izolatora,
- $\kappa_{po}$  - konduktywność powierzchniowa początkowa (odniesienia),
- $\kappa_p$  - zadana konduktywność powierzchniowa izolatora.

Przykładowo wg prac [1, 10], dla  $d = 7,5 \cdot 10^{-2}$  m i  $\kappa_{po} = 1 \mu S$ , średnia wartość natężenia pola przeskoku zabrudzeniowego wynosi  $\bar{E}(d, \kappa_{po}) = \bar{E}(7,5; 1) \approx 2 \cdot 10^2$  kV/m.

Analiza kryterium rozwoju łuku cząstkowego, zgodnie z założeniem drugim, pozwoli na dalsze uściślenie analizy zjawiska wyładowania i poszerzenie roli oraz znaczenia parametrów konstrukcyjnych izolatorów w mechanizmie wyładowania zabrudzeniowego. Rozwój łuków, po ich zapłonie na odcinkach drogi upływu o największej rezystancji powierzchniowej - pniu izolatora, jest uwarunkowany poziomem napięcia przyłożonego do okuć izolatora oraz rozkładu osiowego napięcia. Możliwość wydłużenia się łuku cząstkowego do długości równej podziałce kłoszowej  $p$ , a tym samym stworzenia warunków umożliwiających łączenie się łuków cząstkowych w łuk kaskadowy, jak pokazano na rys. 3.6, opisuje równanie wg pracy [15]:

$$l_2 = \frac{U^{k+1}}{C R^k} \cdot \frac{k^k}{(1+k)^{1+k}}, \quad (3.16)$$

gdzie:

$l_2$  - długość palącego się łuku cząstkowego,

$U$  - napięcie zasilania łuku cząstkowego, oznaczone  $U_{kcz}$ ,

$R$  - rezystancja szeregową powierzchni izolatora-klosza nie zbocznikowanej łukiem cząstkowym,  $R = R_p(L_u)$ ,

$C, k$  - stałe, równe odpowiednio 100 [15, 84] i 0,76 [21].

Parametry równania (3.16) wyznaczono na podstawie uproszczonego modelu izolatora, pokazanego na rys. 3.5. Minimalna (krytyczna) długość łuków cząstkowych, przy której może dojść do połączenia się ich w łuk kaskadowy, równa jest podziałce kłoszowej izolatora  $l_{kkr} = p$ .

Z równania (3.16) otrzymujemy wyrażenie opisujące poziom napięcia konieczny dla podtrzymania palącego się łuku cząstkowego o długości równej podziałce kłoszowej  $p$

$$U_{kcz} = C^{\frac{1}{1+k}} \left[ \frac{(1+k)^{1+k}}{k^k} \right]^{\frac{1}{1+k}} [R_p(L_u)]^{\frac{k}{1+k}} \frac{1}{p^{\frac{1}{1+k}}}. \quad (3.17)$$

Rezystancję szeregową  $R_p(L_u)$  opisuje funkcja

$$R_p(L_u) = \frac{1}{\kappa_p} \left( \frac{\ln \frac{D}{d}}{\cos \alpha_e} + \frac{D}{d} \right). \quad (3.18)$$



Zakładając, że dla izolatorów napowietrznych spełnione są warunki:

$$D < \frac{\ln \frac{qD}{p}}{\cos \alpha} \quad \text{oraz} \quad \alpha_g \cong \alpha_d = \alpha, \quad (3.19)$$

wówczas równanie (3.18) przyjmie postać:

$$R_p(L_u) \cong \frac{1}{\alpha_p \pi} \left( \frac{\ln \frac{D}{p}}{\cos \alpha} \right). \quad (3.20)$$

Wprowadzając do równania (3.17) wartości stałych C, k i  $\alpha_p = \alpha_{po} = 1$  oraz uwzględniając wymiarowanie długości łuku cząstkowego w cm, równanie to przyjmie postać:

$$U_{kcz} = 1,215 \sqrt{\left[ \frac{\ln(1 + \frac{2w}{d})}{\cos \alpha} \right]^{0,86} p^{1,136}}. \quad (3.21)$$

Napięcie jest czynnikiem wymuszającym zapłon i rozwój łuków wędrownych na zabrudzonej powierzchni izolatora. Dlatego poziom napięcia wyładowania zabrudzeniowego jest opisany iloczynem zależności występujących po prawej stronie równań (3.12) i (3.21), wynikających z kryterium zapłonu i rozwoju łuków wędrownych oraz zależności średniej wartości natężenia pola elektrycznego przy przeskoku zabrudzeniowym od konduktywności powierzchniowej izolatora wg równania (3.15). Przyjmując, że wyładowanie elektryczne zabrudzeniowe ma charakter rozkładu normalnego, to średnia wartość napięcia przeskoku zabrudzeniowego opisana równaniem (3.22) oznacza poziom 50% napięcia przeskoku.

$$U_{pz0,5} = 2,43 \sqrt{\text{fnp}^{1,136} \left[ 1 + \frac{d \ln \frac{qD}{p}}{p \cos \alpha} \right] \left[ \frac{\ln \frac{D}{p}}{\cos \alpha} \right]^{0,86} \frac{1}{\log \frac{\alpha_p}{\alpha_{po}}}}, \quad (3.22)$$

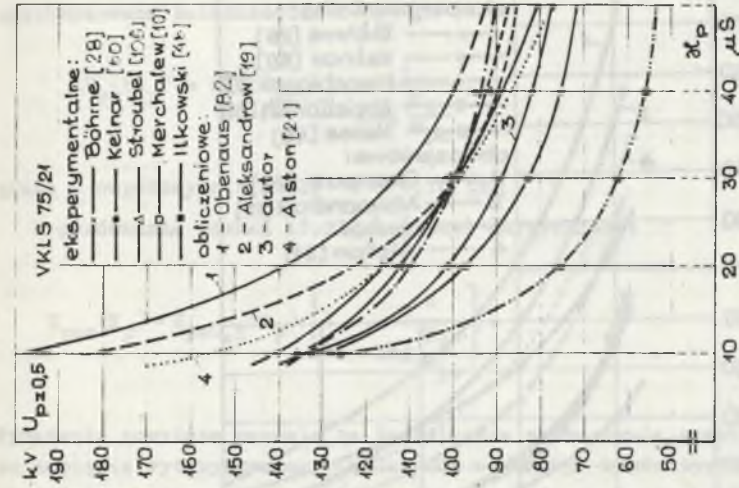
gdzie:

p, d i w - oznaczane w cm,

$U_{pz0,5}$  - pięćdziesięcioprocentowe napięcie przeskoku w kV.

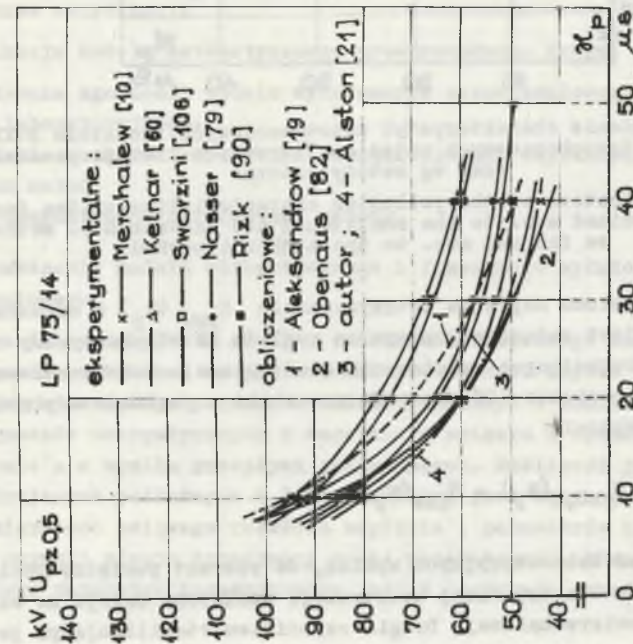
Równanie (3.22) pozwala na wyznaczenie charakterystyki zabrudzeniowej izolatorów jako zależność 50% napięcia przeskoku od wartości konduktywności powierzchniowej  $U_{pz0,5} = f(\alpha_p)$ .

Wyniki obliczeń charakterystyk zabrudzeniowych różnych konstrukcji izolatorów w porównaniu z wynikami badań eksperymentalnych i dotychczas znanych metod analitycznych zestawiono na rys. 3.7, 3.8, 3.9.



Rys. 3.8. Zestawienie charakterystyk zabrudzeniowych izolatora VKLS 75/21 wyznaczonych wg dotychczasowych metod analitycznych i eksperymentalnych oraz wg metody autora

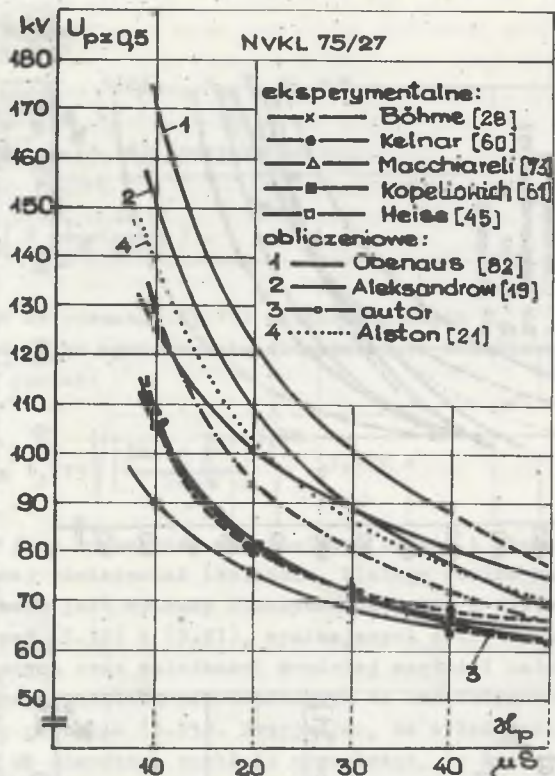
Fig. 3.8. Specification of the pollution characteristics of the insulator VKLS 75/21, determined acc. to the analytical and experimental methods used so far and acc. to the author's method



Rys. 3.7. Zestawienie charakterystyk zabrudzeniowych izolatora LP 75/14 wyznaczonych wg dotychczasowych metod analitycznych i eksperymentalnych oraz wg metody autora

Fig. 3.7. Specification of the pollution characteristics of the insulator LP 75/14, determined acc. to the analytical and experimental methods used so far, and acc. to the author's method





Rys. 3.9. Zestawienie charakterystyk zabrudzeniowych izolatora NVKL 75/27 wyznaczonych wg dotychczasowych metod analitycznych i eksperymentalnych oraz wg metody autora

Fig. 3.9. Specification of the pollution characteristics of the insulator NVKL 75/27 determined acc. to the analytical and experimental methods used so far and acc. to the author's method

Wyznaczenie poziomu napięcia wytrzymywanego  $U_{pzw}(x_p)$  w warunkach zabrudzeniowych jest zadaniem trudnym ze względu na stochastyczny charakter czynników warunkujących wyładowanie elektryczne - zabrudzeniowe. Różnica pomiędzy poziomem 50% napięcia przeskoku a poziomem napięcia wytrzymywanego 0% wynosi:

$$\Delta U_{pz}(x_p) = U_{pz0,5}(x_p) - U_{pzw}(x_p). \quad (3.23)$$

Z wyników badań laboratoryjnych wynika, że rozrzut pomiędzy poziomami napięcia przeskoku dla tej samej konstrukcji izolatora maleje ze wzrostem konduktywności powierzchniowej. Drugim czynnikiem stabilizującym proces

wyładowania zabrudzeniowego jest ilość kloszy izolatora. Wzrost liczby kloszy na danej długości części izolacyjnej powoduje wzrost liczby łuków wędrujących poprzecznych, co prowadzi do mniejszej różnicy napięcia pomiędzy punktami pomiarowymi charakterystyki zabrudzeniowej.

Różnica pomiędzy poziomem napięcia przeskoku 50% i wytrzymywanym jest aproksymowana zależnością:

$$\Delta U_{pz}(x_p) = n^{-k} U_{pz0,5} \frac{1}{\log \frac{x_p}{x_{p0}}}, \quad (3.24)$$

gdzie - współczynnik stały  $k = 0,76$  [21].

Z porównania równań (3.23) i (3.24) otrzymujemy:

$$U_{pzw}(x_p) = U_{pz0,5}(x_p) \left[ 1 - \frac{n^{-k}}{\log \frac{x_p}{x_{p0}}} \right]. \quad (3.25)$$

Wyrażenie powyższe pozwala na teoretyczne wyznaczenie oczekiwanego poziomu napięcia wytrzymywanego izolatorów w funkcji konduktywności powierzchniowej warstwy zabrudzeń (dla równomiernej warstwy zabrudzeń).

### 3.1.5. Weryfikacja modelu matematycznego wyładowania zabrudzeniowego

#### 1. Zakres weryfikacji

Weryfikację modelu matematycznego przeprowadzono drogą:

- Sprawdzenia zgodności modelu wyładowania zabrudzeniowego z wynikami badań laboratoryjnych.
- Porównania z charakterystykami zabrudzeniowymi uzyskanymi wg innych znanych metod.
- Oceny przydatności opracowanej metody.

#### 2. Sprawdzenie modelu matematycznego i fizycznego wyładowania zabrudzeniowego

Badania laboratoryjne i analiza modelu matematycznego zakładają równomierną warstwę zabrudzeń na powierzchni izolatorów. Zapłon i rozwój wyładowania zabrudzeniowego zarówno w modelu fizycznym i analitycznym są wynikiem procesów energetycznych w warstwie w związku z wydzielaniem się ciepła Joule'a w wyniku przepływu prądu upływu. Możliwość połączenia się łuków wędrujących podłużnych w łuki kaskadowe jest uwarunkowana stopniem nierównomierności osiowego rozkładu napięcia i parametrów konstrukcyjnych, które to warunki ujmuje opracowany model matematyczny. Równanie (3.22) zawiera główne parametry konstrukcyjne, które odgrywają zasadniczą rolę



w mechanizmie rozwoju wyładowania. Wartość stała równania jest funkcją procesów energetycznych zachodzących w warstwie zabrudzeniowej zależnych od wartości natężenia pola elektrycznego wzdłuż drogi upływu. Istotne znaczenie w mechanizmie wyładowania zabrudzeniowego mają współczynnik kształtu, liczba kloszy i podziałka klosza w wykładniku potęgowym większym od jedności. Mniejsze znaczenie, lecz nie pomijalne w kształtowaniu charakterystyki zabrudzeniowej, odgrywają takie parametry, jak: kąt pochylenia kloszy i wysięg kloszy. Współczynniki stałe zależne od warunków palenia się łuków wędrownych nie odgrywają w przedstawionym modelu matematycznym tak istotnej roli jak w metodach dotychczasowych. W odróżnieniu od dotychczas znanych metod analitycznych wyznaczania charakterystyki zabrudzeniowej w proponowanym ujęciu brak bezpośredniego wpływu drogi upływu na wartość napięcia przeskoku. Należy podkreślić, że stopień fizycznego oddziaływania drogi upływu na wyładowania zabrudzeniowe wyraża współczynnik kształtu. Takie ujęcie procesów fizycznych jest zdaniem autora całkowicie słuszne.

Wyeksponowanie bowiem roli i znaczenia drogi upływu w mechanizmie wyładowania zabrudzeniowego spowodowało opracowanie szeregu konstrukcji o silnie rozwiniętej powierzchni i długiej drodze upływu, których napięcie przeskoku (przy zabrudzeniu) jak i możliwości eksploatacyjne były niższe w porównaniu z konstrukcjami o gładkiej powierzchni i krótszej drodze upływu. Przedstawiony model matematyczny umożliwia ocenę roli poszczególnych parametrów konstrukcyjnych izolatora oraz porównanie między sobą różnych konstrukcji izolatorów, z punktu widzenia wytrzymałości elektrycznej, w warunkach równomiernej warstwy zabrudzeniowej. Oceny słuszności przyjętych założeń i poprawności wykonanych analiz dokonano na podstawie porównania wyników obliczeń - charakterystyk zabrudzeniowych analitycznych z wynikami badań eksperymentalnych. Proponowana zależność oceny najwyższego poziomu napięcia wytrzymywanego w warunkach zabrudzonej powierzchni izolatora ma istotne znaczenie dla wyznaczenia odporności zabrudzeniowej. Opracowany model matematyczny, w odróżnieniu od metod dotychczasowych, cechuje jednoznaczność ujęcia i interpretacji [11] zjawiska wyładowania zabrudzeniowego oraz definiowania roli i znaczenia parametrów konstrukcyjnych w mechanizmie wyładowania.

### 3. Porównanie charakterystyk zabrudzeniowych uzyskanych wg metod obcych i autora

Analizą porównawczą charakterystyk zabrudzeniowych analitycznych i eksperymentalnych objęto konstrukcje izolatorów długopniowych<sup>1)</sup> stosowanych w liniach przesyłowych wysokiego napięcia, dla których istnieją w dostępnej literaturze charakterystyki doświadczalne.

<sup>1)</sup> Są to konstrukcje typu LP 75/14 - jako izolator standardowy LP 75/17, VKLF 75/10, VKLS 75/21 i NVKL 75/27.



Zestawienie charakterystyk zabrudzeniowych<sup>1)</sup> izolatorów liniowych otrzymanych wg metod analitycznych i badań eksperymentalnych

Metoda badań - autor	$\alpha_p$ μS	Typ izolatora											
		LP75/14	LP75/17	VKLF75/46	VKLS75/21	NVKL75/27							
Metody analityczne	Alstona i Żołędziowskiego [21] $E_{kr} = 10,5 r^{0,48}$ ; $r = \frac{f}{\alpha_p \cdot L}$ $U_{pz} = E_{kr} \cdot L_u$ [kV]		10	80	110	121	158	137					
	20	61	81	88	115	102							
	30	51	68	75	98	86							
	40	45	60	65	85	77							
	Aleksandrowa i Kizewettera a - wg [19] $E_{kr} = 6,32 \cdot r^{0,5}$ ; $r = \frac{f}{\alpha_p \cdot L}$ $U_{pz} = E_{kr} \cdot L_u$ [kV] b) - wg [20] <sup>2)</sup> $U_{pz} = \frac{a^{1+k} n(p-g)}{(\pi d \alpha)^{\frac{k}{1+k}}} \left[ 1 + \frac{gd}{(p-g)D} + \frac{d}{(p-g)\cos\alpha} \ln \frac{D}{d} \right]$ kV		10	85	123	136	178	150					
	20	61	87	93	122	108							
	30	50	71	76	100	90							
	40	42	63	68	90	77							
	Obenausa [82] $E_{kr} = 7,15 r^{0,5}$ ; $r = \frac{f}{\alpha_p \cdot L}$ $U_{pz} = E_{kr} \cdot L_u$ [kV]		10	96	139	152	200	170					
	20	70	98	104	138	122							
	30	58	80	86	114	101							
	40	49	69	76	100	87							
	Sotomonika [99] $U_{pz} = 295 \left( \frac{L}{L_{max}} \right)^{\frac{1}{1+k}} \left[ \frac{R(t)}{R_0} \right]^{\frac{k}{1+k}} \left[ \frac{1}{R_0} \right]^{\frac{k}{1+k}}$ kV W interpretacji Pohla [12] <sup>3)</sup> $E_{kr} = 15 r^{0,41}$ ; $U_{pz} = E_{kr} \cdot L_u$ [kV]		10	*206 $\alpha_p^{-0,41}$				*295 $\alpha_p^{-0,41}$					
	20	80					115						
	30	60					86						
	40	51					73						
wg autora $U_{pz} = 2,43 \sqrt{f n p^{1,156} \left[ 1 + \frac{d \ln \frac{D}{d}}{p \cdot \cos\alpha} \right] \left[ \frac{\ln \frac{D}{d}}{\cos\alpha} \right]^{0,86} \frac{1}{\log \frac{\alpha_p}{\alpha_{p0}}}}$ kV		10	85	95	119	133	107						
20	64	76	95	102	81								
30	57	66	83	90	72								
40	52	62	77	82	66								
Wyniki badań eksperymentalnych	Kelnar A, Kohutowa D. [60] a - flow-on b - metyloceluloza c - warstwa stała		10	a	b <sup>4)</sup>	c		b	b	b <sup>3)</sup>			
	20	104	100	92		135	135	126					
	30	81	81	75		103	110	101					
	40	71	71	68		90	101	89					
	Sworzini [106] < a - metyloceluloza b - warstwa stała		10	a	b	c	e		c	d			
	20	104	95	90	81		126	128					
	Merchalewa i Sotomonika [10] - c - warstwa stała		30	90	78	60	54		75	97			
	Ilkowski [48,49] - d - flow-on, e - warstwa stała		30	80	87	50	42		62	82			
	40	73	61	44	-		58	68					
	Kopaliowitch [61] - a } Nassera [79] - b } - warstwa stała Macchiarelli [73] < c } Heise i in. [45] - d - flow-on		10	b	c	e				a	b	d	
	20	94	100	106					106	103	90		
	30	63	73	82					81	78	76		
	40	58	67	71					71	69	69		
	Cron [33], a - warstwa stała Streubel [105], b - metyloceluloza Böhme [28], c - warstwa stała Pohl, Skowroński [87], d - metyloceluloza Rizk i in. [90], e - warstwa stała		10	a	c	e		5) c	e	b	d	a	c
	20	102	100	84		127	113	132	130	100	129		
	30	77	79	60		105	93	112	114	89	94		
40	69	70	53		93	88	101	102	75	81			
	62	65	50		88	-	92	93	70	72			

1) W warunkach równomiernej warstwy zabrudzeniowej  
 2) W publikacji nie zdefiniowano parametrów a i k, co uniemożliwia praktycznie wyznaczenie charakterystyk zabrudzeniowych  
 3) Warstwa o grubości 0,03 mm  
 4) Warstwa o grubości 0,15 mm  
 5) Ziemia okrzemkowa (Kieselgur-schicht)  
 6) Cement (Flugasche-Zement-Schicht)



Charakterystyki analityczne wg dotychczasowych metod i metody autora oraz doświadczalne uzyskane wg różnych metod<sup>1)</sup> i różnych autorów zestawiono w tablicy 3.1 i na rys. 3.7, 3.8 i 3.9. Ze względu na czytelność rysunków nie wszystkie charakterystyki zestawione w tablicy 3.1 przedstawiono wykreślnie.

Z porównania rezultatów nowej metody i badań laboratoryjnych (rys. 3.8) wynika, że charakterystyka analityczna (krzywa 3) leży niejako pośrodku charakterystyk eksperymentalnych dla przykładowych konstrukcji izolatorów w całym zakresie zmian konduktywności powierzchniowej, a różnice pomiędzy charakterystyką analityczną i doświadczalnymi są prawie dwukrotnie mniejsze niż różnice pomiędzy wynikami badań laboratoryjnych, różnych autorów (wg tych samych metod badań). Charakterystyki wg dotychczasowych metod analitycznych różnią się znacznie z charakterystykami doświadczalnymi nie tylko poziomem napięcia przeskoku, ale i charakterem zmian ze wzrostem konduktywności powierzchniowej. Jedynie dla izolatora LP 75/14 - konstrukcja standardowa - wyniki dotychczasowych metod analitycznych przebiegają w obszarze objętym charakterystykami doświadczalnymi, różnią się jednak szybkością obniżenia poziomu napięcia przeskoku ze wzrostem konduktywności powierzchniowej. Świadczy to, o dopasowywaniu niejako parametrów (stałych) charakterystyki w dotychczasowych analizach do określonej konstrukcji izolatora, a już dla innej konstrukcji nie jest tak obowiązujące. Wydaje się również, że różnica pomiędzy rezultatami badań laboratoryjnych i metody analitycznej jest wynikiem różnic pomiędzy parametrami konstrukcyjnymi izolatorów tego samego typu - jest to spowodowane odchyłkami wynikającymi z tolerancji wymiarów, co w przypadku porcelany nie jest bez znaczenia.

#### 4. Ocena przydatności praktycznej opracowanej metody

Porównania te pokazują, że charakterystyki zabrudzeniowe izolatorów wg opracowanej nowej metody posiadają lepszą zgodność z wynikami badań laboratoryjnych zarówno co do poziomu jak i charakteru zmian w funkcji konduktywności powierzchniowej. Świadczy to o słuszności przyjętych założeń i poprawności analitycznego opisu mechanizmu wyładowania zabrudzeniowego.

W praktyce inżynierskiej przedstawiona metoda może znaleźć zastosowanie przy: projektowaniu nowych konstrukcji izolatorów, porównaniu istniejących rozwiązań konstrukcyjnych pod względem przydatności ich do pracy w warunkach zabrudzeniowych oraz stanowi podstawę do opracowania eksploatacyjnych - w warunkach nierównomiernego zabrudzenia powierzchni - cha-

<sup>1)</sup> Metody badań zabrudzeniowych opisują wytyczne IEC-Publ. 60-1-60-2, Techn. Com. Nr 36, 1971 oraz przepisy normatywne PN-74/E-04068, GOST/0390-71-ZSRR, OEG 348022-CSRS, VOE 0448/1.63.



rakterystyk zabrudzeniowych izolatorów. Oprócz wykorzystania uytylitarne-go przedstawiony model matematyczny wykładowania zabrudzeniowego posiada duże znaczenie poznawcze i dydaktyczne.

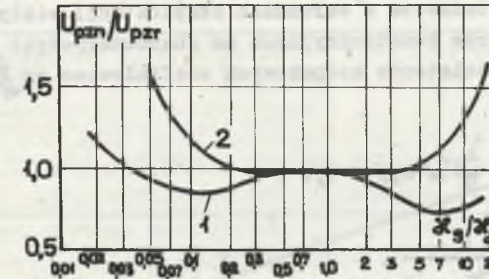
### 3.2. WYTRZYMAŁOŚĆ ELEKTRYCZNA IZOLATORÓW W WARUNKACH NIERÓWNIOMIERNEJ WARSTWY ZABRUDZENIOWEJ

#### 3.2.1. Wprowadzenie

Celem badań analitycznych i eksperymentalnych jest opracowanie paramet-rów i metod ich oznaczania, które charakteryzowałyby zmiany możliwości eksploatacyjnych izolatorów w warunkach oddziaływania narażeń zabrudze-niowych i czynników środowiskowych. Prace prowadzone w NRD i ZSRR zmie-rzają do opracowania metod oceny wytrzymałości elektrycznej izolatorów podczas eksploatacji na podstawie wyników badań laboratoryjnych - dla rów-nomiernej warstwy zabrudzeń. Własnością fizyczną, której zmiana w zada-nych warunkach może przy określonym narażeniu napięciowym doprowadzić do utraty własności izolacyjnych - przeskoku - jest wytrzymałość elektrycz-na. W poprzednim rozdziale podano metodykę oceny wytrzymałości elektrycznej izolatorów w funkcji parametrów konstrukcyjnych w warunkach równomiernej warstwy zabrudzeniowej o zmiennej konduktywności powierzchniowej. Pod-czas eksploatacji oddziaływanie czynników środowiskowych powoduje nie-równomierny rozkład zabrudzeń na powierzchni izolatorów (rozd. 2.3). Po-wstaje więc problem, jak opisać konduktywność powierzchniową w mechanizmie wykładowania zabrudzeniowego, jeśli jej wartość zmienia się wzdłuż drogi upływu oraz jaki jest wpływ nierównomierności rozkładu warstwy zabrudze-niowej na mechanizm wykładowania i poziom napięcia przeskoku. Badania za-leżności napięcia przeskoku zabrudzeniowego od stopnia nierównomierności rozkładu warstwy zabrudzeniowej przedstawiono w pracach [36, 47, 75, 77, 86, 112, 113]. Wyniki tych prac pokazują, że nierównomierność rozkładu zabrudzeń w pewnych warunkach wpływa na mechanizm rozwoju wykładowania i charakterystyki zabrudzeniowe. Badania przeprowadzone w NIPT<sup>1)</sup> - wpływu nierównomiernego rozkładu zabrudzeń na charakterystyki izolatorów kołpa-kowych - pokazały, że przy małej nierównomierności zabrudzenia<sup>2)</sup> (rys. 3.10) charakterystyki zabrudzeniowe, przy równomiernym rozkładzie warstwy zabru-dzeniowej, dostatecznie dobrze opisują mechanizm wykładowania dla konduk-tywności powierzchniowej odpowiadającej średniej wartości jednostkowej ma-

<sup>1)</sup> Naukowo-Badawczy Instytut Prądu Stałego w Leningradzie.

<sup>2)</sup> Iloraz konduktywności powierzchniowej górnej i dolnej powierzchni klosza  $\chi_{pg}/\chi_{pd}$  jest zawarty w przedziale 0,3÷2,0.



Rys. 3.10. Zależność napięcia przeskoku zabrudzeniowego izolatorów kołpa-kowych od stopnia nierównomierności rozkładu zabrudzeń wzdłuż drogi upływu-ilorazu konduktywności powierzchniowej górnej i dolnej powierzchni klosza [75]

1 - dla konduktywności powierzchniowej wyznaczonej metodą techniczną  $\chi_p = f(R_p)$ , 2 - dla konduktywności powierzchniowej wyznaczonej ze średniej jednostkowej masy osadów pyłu

Fig. 3.10. Dependence of the voltage of the pollution flashover of cap insulators on the degree of non-uniformity of the pollution distribution along the leakage path of the surface conductivity quotient of the upper and lower surface of the shed [75]

1 - for surface conductivity determined by the technical method  $\chi_p = f(R_p)$   
2 - for surface conductivity determined from the average unit mass of dust depositions

sy zabrudzeń  $m_{sr}$ <sup>1)</sup> [75]. Korzystając ze wzorcowej krzywej  $\chi_p = f(m_{sr})$  można określić wartość średniej konduktywności powierzchniowej izolatora  $\chi_{p\bar{s}r}$ . Badania [75] izolatorów kołpakowych i długopaliowych zabrudzonych w naturalnych warunkach eksploatacyjnych wykazały, że droga upływu nie jest wykorzystana na całej długości i proponuje się wprowadzenie współ-czynnika poprawkowego dla wyznaczania efektywnej drogi upływu  $L_{uef}$ .

$$L_{uef} = L_u/k, \quad (3.26)$$

gdzie:

$$k = 0,35(1 + \frac{L_u}{H}) \text{ dla izolatorów długopaliowych,}$$

H = długość montażowa izolatora,

$$k = 1 + 0,5(\frac{L_u}{D} - 1) \text{ dla izolatorów kołpakowych.}$$

<sup>1)</sup>

$$m_{sr} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} m_i S_i}{\sum_{i=1}^{i=n} S_i}$$

gdzie i-liczba elementów powierzchni S o jednorodnym zabrudzeniu, przybliżona formuła określenia średniej jednostki masy zabrudzeń ma postać

$$m_{sr} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} m_i}{n}$$



Prowadzone prace badawcze w warunkach eksploatacji miały za cel określenie wpływu parametrów konstrukcyjnych na charakterystyki zabrudzeniowe, których postać dla izolatorów kołpakowych zdefiniowano wg Merchalewa równaniami:

$$E = \frac{D}{\Delta_H H} \text{ przy } \frac{L_u}{D} = 0,9 - 1,1, \quad (3.27)$$

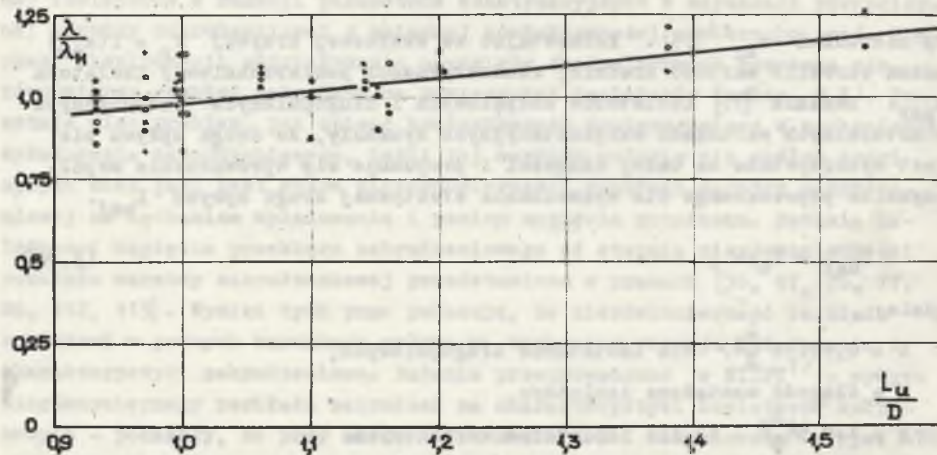
$$E = \frac{1}{H \lambda_H (1 + 0,5(\frac{L_u}{D} - 1))}, \quad (3.28)$$

gdzie:

$\Delta_H = \frac{D}{EH}$  i  $\lambda_H = \frac{L_u}{EH}$  jednostkowe drogi upływu izolatorów o konstrukcji spełniającej warunek  $\frac{L_u}{D} = 1$ ;

E - wytrzymawane natężenie pola elektrycznego dla danego rodzaju zabrudzenia określone eksperymentalnie.

Wyniki badań charakterystyk zabrudzeniowych w funkcji ukształtowania powierzchni kloszy izolatora przedstawiono na rys. 3.11.

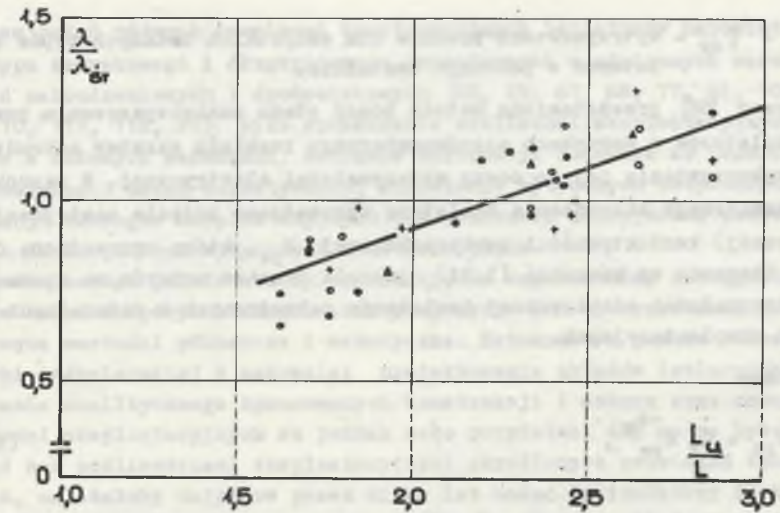


Rys. 3.11. Zależność poziomu napięcia przeskoku zabrudzeniowego izolatorów od ukształtowania powierzchni [75]

x - izolatory czyste i deszcz 3 mm/min, + - izolatory czyste i mgła, 0 - zabrudzenie cementem 1 mg/cm<sup>2</sup>, Δ - zabrudzenie cementem 2 mg/cm<sup>2</sup>, ● - zabrudzenie cementem 4 mg/cm<sup>2</sup>

Fig. 3.11. Dependence of the voltage level of the pollution flash-over of insulators on surface shaping [75]

x̄ - clean insulators and rain 3 mm/min, + - clean insulators and fog, 0 - pollution with cement 1 mg/cm<sup>2</sup>, Δ - pollution with cement 2 mg/cm<sup>2</sup>, ● - pollution with cement 4 mg/cm<sup>2</sup>



Rys. 3.12. Zależność poziomu napięcia przeskoku zabrudzeniowego izolatorów długopniowych od ukształtowania powierzchni [75]

+ - izolatory czyste i mgła, 0 - zabrudzenie cementem 1 mg/cm<sup>2</sup>, Δ - zabrudzenie cementem 2 mg/cm<sup>2</sup>, ● - zabrudzenie cementem 4 mg/cm<sup>2</sup>

Fig. 3.12. Dependence of the voltage level of the pollution flash-over of long-rod insulators on surface shaping [75]

+ - clean insulators and fog, 0 - pollution with cement 1 mg/cm<sup>2</sup>, Δ - pollution with cement 2 mg/cm<sup>2</sup>, ● - pollution with cement 4 mg/cm<sup>2</sup>

Z prac tych wynika, że charakterystyki zabrudzeniowe dla izolatorów długopniowych, podobnie jak dla kołpakowych, zależą przede wszystkim od długości drogi wyładowania i od rezystancji początkowej warstwy zabrudzeniowej. Droga wyładowania na izolatorach długopniowych jest mniejsza od L i większa od długości części izolacyjnej izolatora L. Dlatego wyniki uogólnione charakterystyk zabrudzeniowych przedstawiono względem drogi upływu L<sub>u</sub>, długości części izolacyjnej L i współczynnika kształtu f. Dla obliczeń porównawczych określono jednostkowe charakterystyki przeskoku

$$\lambda = \frac{L_u}{U_p} \text{ i } \eta = \frac{L}{U_p}, \text{ przy różnych postaciach zabrudzenia, których wyniki}$$

pokazano na rys. 3.12.

Przedstawione zależności aproksymowano równaniami:

$$\frac{\lambda}{\lambda_{sr}} = 0,2 + 0,35 \frac{L_u}{L}, \quad (3.29)$$

$$\frac{\eta}{\eta_{sr}} = 1,06 - 0,02 \frac{L_u}{L}, \quad (3.30)$$



gdzie:

$\lambda_{sr}$  i  $\eta_{sr}$  - wytrzymałości średnie dla wszystkich badanych typów izolatorów o podobnym kształcie.

W pracy [86] przedstawiono metodę oceny stanu zanieczyszczenia powierzchni izolatorów w warunkach nierównomiernego rozkładu warstwy zabrudzeniowej i wykorzystania jej do oceny wytrzymałości elektrycznej. W warunkach nierównomiernego zabrudzenia izolatora wprowadzono pojęcie zastępczej (skutecznej) konduktywności powierzchniowej  $\kappa_{ps}$ , która wprowadzona do modelu Obenausa wg równania (3.31) pozwala, zdaniem autorów, na wyznaczenie wytrzymałości elektrycznej izolatorów zabrudzonych w naturalnych warunkach eksploatacyjnych.

Wówczas

$$U_{pz} = K_F \kappa_{ps}^{-n_\kappa} \quad (3.31)$$

gdzie:

$K_F$  - stała zależna od parametrów konstrukcyjnych izolatora,

$n_\kappa$  - wykładnik zależny od stanu zanieczyszczenia powierzchni izolatora.

Konduktywność zastępczą  $\kappa_{ps}$  wyznacza się na podstawie badań rozkładu zabrudzeń na powierzchni standardowych izolatorów w naturalnych warunkach eksploatacji wg relacji:

$$\kappa_{ps} = \frac{c}{r_{ps}} \quad (3.32)$$

oraz

$$r_{ps} = \frac{R_{ps}}{L_u - l_2} = \frac{\int_{x=l_2}^{x=L_u} r_s(x) dx}{L_u - l_2} \quad (3.33)$$

gdzie:

$L_u$  - droga upływu całego izolatora,

$l_2$  - droga upływu zbocznikowana kłakami wędrownymi  $l_2 \approx 0,6 L_u$ ,

$r_s(x)$  - jednostkowa rezystancja powierzchniowa izolatora wzdłuż drogi upływu,

$c$  - stała zależna od średnicy pnia izolatora.

Celem badań różnych rozwiązań konstrukcyjnych izolatorów napowietrznych typu kołpakowego i długopniowego prowadzonych w odmiennych warunkach narażeń zabrudzeniowych i środowiskowych [28, 29, 67, 68, 77, 86, 106, 109, 110, 111, 112, 113] było sprawdzenie możliwości eksploatacyjnych izolatorów w zadanych warunkach, zebranie informacji odnośnie do prawidłowości prowadzonych badań normatywnych, określenie wytycznych dotyczących realizacji zabiegów eksploatacyjnych dla obniżenia awaryjności zabrudzeniowych izolacji oraz wytycznych konstrukcyjnych.

Zdaniem autora przedstawiony sposób ujęcia zagadnienia, interpretacja wyników badań eksperymentalnych oraz propozycje ich wykorzystania prezentują pewne wartości poznawcze i metodyczne. Natomiast z punktu widzenia praktyki inżynierskiej w zakresie: projektowania układów izolacyjnych, porównania analitycznego opracowanych konstrukcji i doboru oraz oceny możliwości eksploatacyjnych są jednak mało przydatne. Aby można było dyskutować nad możliwościami eksploatacyjnymi określonych rozwiązań konstrukcyjnych, należałoby najpierw przez kilka lat badać te izolatory i określać ich współczynniki eksperymentalne ( $\Delta_H$ ,  $\lambda_H$ ,  $E$ ,  $\lambda_{sr}$  itp). Zmieniające się w tym czasie warunki narażeń terenowych sprawiają, że uzyskane wyniki stają się już mało przydatne do wykorzystania praktycznego.

Istnieje natomiast potrzeba opracowania takiego modelu matematycznego, który pozwoliłby na wyznaczenie charakterystyk zabrudzeniowych izolatorów określonych konstrukcji w zadanych warunkach narażeń zabrudzeniowych i środowiskowych.

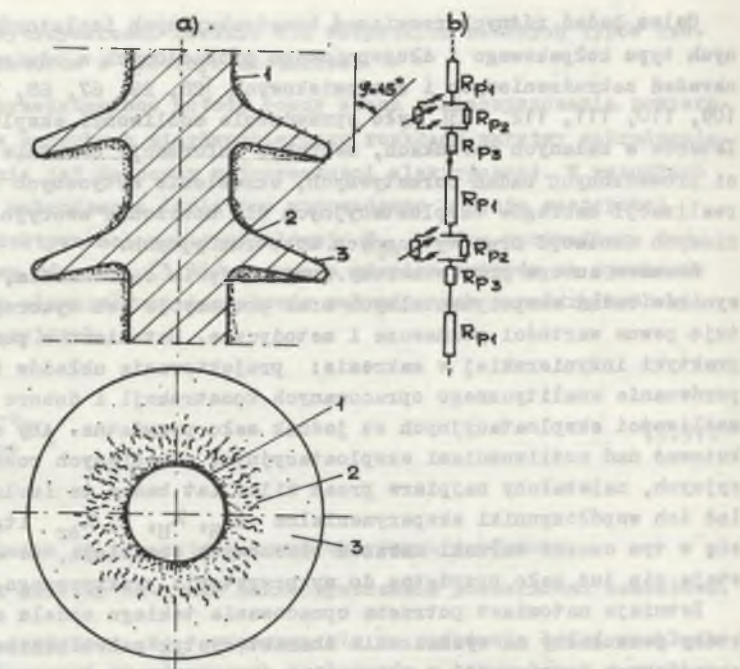
### 3.2.2. Analiza modelu fizycznego wyładowania zabrudzeniowego w warunkach eksploatacyjnych

Jak wykazano w rozdziale 2 pracy, warstwa zabrudzeniowa, która tworzy się na powierzchni izolatorów w wyniku działania czynników narażenia zabrudzeniowego i symocyszczania (wiatr i deszcz), jest rozłożona nierównomiernie wzdłuż drogi upływu. Stopień zróżnicowania wartości konduktywności powierzchniowej - charakteryzującej warstwę zabrudzeniową - jest uwarunkowany zarówno położeniem pracy i parametrami konstrukcyjnymi izolatorów oraz rodzajem i wartością parametrów narażenia zabrudzeniowego w miejscu lub rejonie eksploatacji<sup>1)</sup>.

Model fizyczny zabrudzenia izolatora długopniowego w warunkach eksploatacyjnych pokazano na rys. 3.13, na którym można wyróżnić trzy charakterystyczne stany zabrudzenia powierzchni izolatora: 1 - powierzchnia objęta ciągłą warstwą zabrudzeń, wyznaczona obszarem zastoju, 2 - powierzchnia

<sup>1)</sup> W warunkach przemysłowego zanieczyszczenia atmosfery można wyodrębnić w terenie miejsca o szczególnie intensywnym działaniu narażenia zabrudzeniowego, znacznie odbiegające od średniej dla danej strefy zabrudzeniowej.





Rys. 3.13. Model fizyczny zabrudzenia powierzchni izolatora długopniowego z kloszem daszkowym, pracującego w położeniu pionowym przy kącie padania strug deszczu zbliżonym do 45°

a - rozkład warstwy zabrudzeń

1 - ciągła warstwa zabrudzeń w obszarze zastoju, 2 - nieciągła warstwa zabrudzeń, 3 - zabrudzenie w obszarze czyszczonym deszczem

b - schemat zastępczy rozkładu rezystancji powierzchniowej wzdłuż drogi upływu

Fig. 3.13. Physical model of the surface pollution of long-rod insulator with hood shed operating in vertical position at glancing angle of the rain streams close to 45°

a - distribution of the pollution layer

1 - continuous pollution layer in stagnation area, 2 - discontinuous pollution layer, 3 - pollution in the area cleaned by rain

b - substitute diagram of the distribution of surface resistance along the leakage path

objęta nieciągłą warstwą zabrudzeń (w postaci nieregulowanych pasm), która jest wynikiem czyszczącego działania kropli wtórnych (odbitych od powierzchni izolatora) i spływu zabrudzeń podczas mżawki i deszczu o małej intensywności, 3 - powierzchnia prawie całkowicie wolna od zanieczyszczeń (istnieje cienka błonka zabrudzeń wymytych z cząstek rozpuszczalnych - o dużej rezystywności, która jest wynikiem czyszczącego bezpośredniego działania strug wiatru i deszczu).

Taki rozkład zabrudzeń determinuje warunki zapłonu i rozwoju wyładowania zabrudzeniowego. Rozkład osiowy jednostkowej rezystancji powierzchniowej izolatora wg rys. 3.13 pokazuje, że w obszarze 2 rezystancja charakteryzuje się dużą zmiennością ze względu na boczniujące działanie pasm zabrudzeń wzdłuż drogi upływu. Miejsce zapłonu łuków wędrujących - poprzecznych - nie jest tak jednoznacznie określone, jak w przypadku równomiernej warstwy zabrudzeniowej. Największe różnice wartości rezystancji powierzchniowej występują na pniu i brzegu kloszy. Stosunek rezystancji powierzchniowej jednostkowej (względem drogi upływu  $L_u$ ) części brzegowej klosza i pnia izolatora może być wyrażony równaniem:

$$\frac{R'_{pb}}{R'_{pp}} = \frac{d \kappa_{pp}}{D \kappa_{pb}}, \quad (3.34)$$

gdzie:

$R'_{pb}$  - rezystancja powierzchniowa jednostkowej drogi upływu brzegu klosza,

$R'_{pp}$  - rezystancja powierzchniowa jednostkowej drogi upływu pnia,

$\kappa_{pp}$  - konduktywność powierzchniowa na pniu,

$\kappa_{pb}$  - konduktywność powierzchniowa na brzegu klosza.

Jeśli

$$\kappa_{pp} = \kappa a_p \quad \text{i} \quad \kappa_{pb} = \kappa a_b, \quad (3.35)$$

gdzie:

$a_p$  - grubość warstwy zabrudzeń na pniu,

$a_b$  - grubość warstwy zabrudzeń na brzegu kloszy,

to podstawiając zależności (3.35) do równania (3.34) otrzymujemy:

$$\frac{R'_{pb}}{R'_{pp}} = \frac{d a_p}{D a_b}. \quad (3.36)$$

Z równania (3.36) wynika, że aby nastąpiła równość jednostkowej rezystancji powierzchniowej pnia i brzegu klosza, musi być spełniony warunek:

$$d a_p = D a_b, \quad (3.37)$$

czyli

$$a_p = \frac{D}{d} a_b. \quad (3.38)$$



Grubość warstwy zabrudzeniowej na pniu izolatora musi być większa od grubości warstwy zabrudzeniowej na brzegu klosza o wartość ilorazu średnicy brzegu klosza i pnia izolatora ( $\frac{D}{d}$ ). Z warunku tego wynika, że w początkowym okresie eksploatacji izolatora dla małej grubości warstwy zabrudzeniowej, szczególnie na pniu izolatora, mechanizm zapłonu i rozwoju wyładowania jest prawie zgodny z opisem dla równomiernej warstwy zabrudzeniowej (zapłon łuków wędrujących - poprzecznych na pniu izolatora), co potwierdzają wyniki badań eksperymentalnych.

Ze wzrostem czasu eksploatacji  $t_e$  rośnie grubość warstwy zabrudzeń w obszarze zastoju (na pniu izolatora i dolnej powierzchni klosza w położeniu pionowym izolatora). Na części powierzchni górnej klosza poddanej bezpośredniemu działaniu strug wiatru i deszczu przyrost grubości warstwy zabrudzeniowej jest mały. Zapłon łuków wędrujących (poprzecznych) na części powierzchni klosza podlegającej samooczyszczaniu jest możliwy wtedy, kiedy jednostkowa rezystancja powierzchniowa brzegu klosza jest większa od rezystancji powierzchniowej pnia izolatora

$$R'_{pb} > R'_{pp} \quad (3.39)$$

Z warunku tego wynika, że wówczas grubość warstwy zabrudzeniowej na pniu izolatora musi być większa od grubości warstwy na brzegu klosza i opisana jest zależnością

$$a_p > a_b \frac{D}{d} \quad (3.40)$$

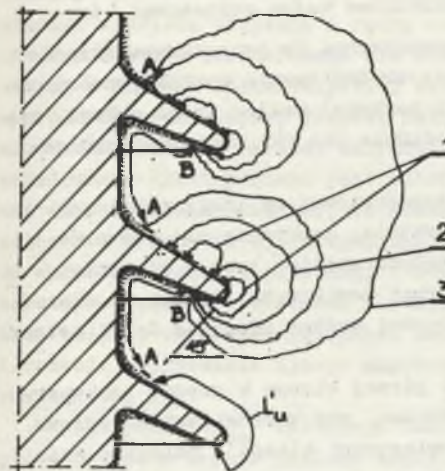
Zakładając minimalną średnicę klosza izolatorów napowietrznych  $D = 2d$ , wówczas:

$$a_p > 2 a_b, \quad (3.41)$$

czyli

$$\kappa_{pp} > 2\kappa_{pb} \quad (3.42)$$

Aby możliwy był zapłon łuków wędrujących poprzecznych na powierzchni brzegowej klosza, konduktywność powierzchniowa obszaru zastoju (pnia izolatora i dolnej powierzchni klosza) powinna być co najmniej dwukrotnie większa od konduktywności powierzchniowej brzegu klosza. Wniosek ten potwierdzają wyniki badań eksperymentalnych [75]. Czas eksploatacji, po którym spełniony musi być warunek wg równania (3.42), jest zależny od intensywności: narażeń zabrudzeniowych i czynników samooczyszczania, zdefiniowanych w rozdziale 2 pracy. Zapłon wyładowania zabrudzeniowego i jego rozwój może być przedstawiony modelowo tak jak na rys. 3.14. W zależności od rozkładu warstwy zabrudzeniowej na górnej części (w obszarze przepływu)



Rys. 3.14. Model fizyczny zapłonu wyładowania elektrycznego na powierzchni izolatora z nierównomierną warstwą zabrudzeniową wzdłuż drogi upływu - dla grubej warstwy zabrudzeń w obszarach zastoju A-B  
1 - początkowe wyładowanie łukowe, 2 - łuk wędrujący, 3 - łuk kaskadowy

Fig. 3.14. Physical model of the ignition of an electric discharge on the surface of an insulator with a non-uniform pollution layer along the leakage path - for a thick layer of pollution in the areas of stagnation A-B

1 - initial arc discharge, 2 - erratic arc, 3 - cascade arc

spowodować wyładowanie zupełne w warstwie powietrza nie zbocznikowanej łukiem wędrownym, co jest równoznaczne z utratą własności izolacyjnych przez izolator. W tych warunkach również charakter rozwoju wyładowania jest inny w porównaniu z izolatorem zabrudzonym równomierną warstwą zanieczyszczeń przemysłowych. Nieciągła warstwa zabrudzeniowa powoduje zapłon łuku wędrownego na pierwszym kloszu od przewodu pod napięciem, a następnie na kolejnych kloszach. Czas palenia się łuków jest uwarunkowany: długością odcinków czyszczonych drogi upływu  $L_{ucz}$ , rodzajem i grubością warstwy zabrudzeniowej oraz poziomem napięcia pracy (próby) układu elektroizolacyjnego. Poziom napięcia wyładowania zupełnego zabrudzeniowego w układzie elektroizolacyjnym jest zatem funkcją: stanu zabrudzenia - konduktywności powierzchniowej w obszarach zastoju, długości odcinków czyszczonych drogi upływu  $L_{ucz}$ , podziałki kloszowej  $p$  oraz liczby kloszy izolatora  $n$ .

powierzchni kloszy, który jest funkcją: rodzaju zabrudzeń, kąta pochylenia i grubości klosza oraz warunków meteorologicznych (częstość deszczu) w okresie poprzedzającym stan przedzakłóceniu, wyładowanie łukowe na odcinkach czyszczonych drogi upływu  $L_{ucz}$  może być poprzedzone zapłonem łuków cząstkowych pierwotnych - 1. Ze względu na stosunkowo dużą stabilność przewodności grubej warstwy zabrudzeń - w obszarze zastoju (duża zawartość wody) - obserwuje się małą prędkość przesuwania się stopy łuku wzdłuż osi izolatora oraz poruszania się łuku po obwodzie klosza. Utrzymujący się długi czas palenia łuków cząstkowych - 2 powoduje jonizację otaczającego powietrza i wydłużanie się chorągwi łuku oraz wysuszenie warstwy zabrudzeniowej w obszarze zastoju pomiędzy punktami A-B. Przyczynia się to do wzrostu rezystancji tej części powierzchni izolatora oraz umożliwia połączenie się kilku łuków cząstkowych w łuk kaskadowy. Zjonizowana warstwa powietrza otaczająca izolator - łańcuch izolatorów - może



Analizując rozkład warstwy zabrudzeniowej podczas eksploatacji i warunki powodujące wyładowanie zabrudzeniowe można wnioskować, że:

- dla małego stopnia zanieczyszczenia powierzchni (w początkowym okresie eksploatacji izolatora) i o małym stopniu zróżnicowania konduktywności powierzchniowej (obszarów czyszczonych i zastoju) wzdłuż drogi upływu, wyładowanie zabrudzeniowe rozwija się podobnie jak dla równomiernego zabrudzenia całej powierzchni izolatora,
- ze względu na małą grubość warstwy zabrudzeniowej na powierzchni czyszczonej i małą pojemność wilgoci w warstwie, tworzenie się obszarów wysuszonych w wyniku działania prądu upływu możliwe jest w pierwszej kolejności w obszarach przepływu na górnej powierzchni klosza, a dla małego stopnia zanieczyszczenia powierzchni wzdłuż odcinków drogi upływu o małej średnicy,
- zapłon łuków wędrownych na powierzchni górnej klosza w części czyszczonej wiatrem i deszczem możliwy jest wówczas, gdy warstwa zabrudzeniowa w obszarach zastoju - pnia i dolnej powierzchni klosza - osiągnie stan zapewniający wystarczająco nierównomierny osiowy rozkład napięcia na odcinkach o dużej i małej grubości zanieczyszczeń,
- grubość warstwy zabrudzeniowej i konduktywność powierzchniowa w obszarach zastoju zapewnia stabilne warunki palenia się łuków wędrownych, co wyraża się małą prędkością stopy łuku tak po obwodzie klosza, jak i wzdłuż osi izolatora. Gradienty napięcia występujące na odcinkach suchych klosza, zasilające łuki wędrowne zapewniają wydłużanie się chorągwi łuków wędrownych, umożliwiając tym samym łączenie się ich w łuk kaskadowy tak, że obserwator odnosi wrażenie, jakoby wyładowanie odbywało się jedynie wzdłuż części brzegowych kloszy izolatora,
- jonizacja termiczna i fotojonizacja warstw powietrza, na długości izolatora nie zbrocznikowanej łukami wędrownymi i kaskadowymi, powoduje także obniżenie się wytrzymałości elektrycznej przerwy powietrznej, że przy napięciu roboczym następuje wyładowanie zupełne w układzie izolacyjnym,
- długość odcinków drogi upływu podlegających samooczyszczaniu  $L_{ucz}$  decydują więc będzie o poziomie napięcia zapłonu łuków wędrownych i wyładowania zupełnego.

### 3.2.3. Model matematyczny wyładowania elektrycznego

Opracowanie modelu deterministycznego wyładowania zabrudzeniowego w warunkach nierównomiernej warstwy zabrudzeń (w warunkach eksploatacji), podczas którego prawie każdy czynnik narażenia posiada charakter stochastyczny, jest zadaniem niezmiernie trudnym, toteż w literaturze aktualnie brak syntetycznych opracowań tego zagadnienia. Ponieważ ocena merytoryczna możliwości eksploatacyjnych izolatorów, w zadanych warunkach zabrudzeniowych, będzie możliwa przy znajomości głównych zależności opisujących wyładowanie zabrudzeniowe, to opracowanie takiego modelu matematycznego w postaci cha-

rakterystyki zabrudzeniowej - eksploatacyjnej uważa się za konieczne. Podstawowe zjawiska fizyczne i cechy charakterystyczne wyładowania zabrudzeniowego zostały zdefiniowane dla warunków równomiernej warstwy zabrudzeniowej w postaci charakterystyki zabrudzeniowej i opisane w modelu fizycznym dla nierównomiernej warstwy zabrudzeniowej. Ponieważ dla małego zróżnicowania grubości warstwy zabrudzeniowej wzdłuż drogi upływu mechanizm wyładowania elektrycznego jest prawie taki sam jak w warunkach równomiernej warstwy zanieczyszczeń, to wówczas zależność zmiany poziomu napięcia przeskoku w funkcji konduktywności powierzchniowej opisuje równanie (3.22). Ze wzrostem czasu eksploatacji i rosnącej konduktywności powierzchniowej warstwy zabrudzeń w obszarze zastoju oraz jej małego przyrostu na powierzchni objętej obszarami przepływu zmianę warunków zapłonu łuków wędrownych i rozwoju wyładowania ujmuje współczynnik nierów. omernego rozkładu zabrudzeń  $\eta_{nz}$ .

Współczynnik  $\eta_{nz}$  definiuje znaczenie samooczyszczania się izolatora pod deszczem w ocenie poziomu napięcia przeskoku zabrudzeniowego w warunkach eksploatacyjnych.

Postać funkcyjna współczynnika nierównomiernego rozkładu warstwy zabrudzeń przedstawia równanie (3.43).

$$\eta_{nz} = 1 + 0,1 \xi_{p,o} n \frac{L_{ucz}}{l_u} \quad (3.43)$$

Wartość współczynnika  $\eta_{nz}$  jest zależna od parametrów konstrukcyjnych i położenia pracy izolatorów. Parametr  $\xi_{p,o}$  opisuje znaczenie kąta pochylecia kloszy izolatora w wymuszeniu nierównomiernego rozkładu warstwy zabrudzeniowej wzdłuż drogi upływu, zależnie od położenia pracy izolatora: p - pionowe, o - poziome (odciągowe). Znaczenie ilościowe parametru  $\xi_{p,o}$  opisują odpowiednio równania (3.44) i (3.45).

$$\xi_p = \sin(\alpha_g + \alpha_d) \quad (3.44)$$

$$\xi_o = \cos \alpha_d \quad (3.45)$$

W warunkach nierównomiernego rozkładu warstwy zabrudzeniowej wpływ liczby i długości odcinków drogi upływu czyszczonej deszczem na poziom napięcia wyładowania zabrudzeniowego opisano parametrem liczby kloszy z wykładnikiem ilorazu drogi upływu czyszczonej deszczem do jej całkowitej długości.

Charakterystyka zabrudzeniowa przedstawiająca zależność poziomu napięcia przeskoku izolatora z nierównomierną warstwą zabrudzeń, o znacznym zróżnicowaniu konduktywności powierzchniowej wzdłuż drogi upływu (w obszarach zastoju i czyszczonych deszczem  $x_{pz}/x_{cz} > 2$ ), opisana jest równaniem (3.46).



$$U_{pze05} = U_{pz05} \cdot n_z \dots \quad (3.46)$$

gdzie:

- $U_{pze05}$  - oznacza 50% poziom napięcia przeskoku zabrudzonego izolatora w warunkach eksploatacyjnych,
- $U_{pz05}$  - oznacza 50% poziom napięcia przeskoku zabrudzonego izolatora w warunkach równomiernej warstwy zabrudzeniowej.

Podstawiając równania (3.22) i (3.43) do (3.46) otrzymujemy postać funkcji opisującej charakterystykę zabrudzeniową izolatorów w warunkach eksploatacyjnych wg równania (3.47):

$$U_{pze05} = .2,43 \sqrt{f_{np}^{1,136} \left[ 1 + \frac{d \ln \frac{D}{d}}{\cos \alpha} \left[ \frac{\ln \frac{D}{d}}{\cos \alpha} \right]^{-0,86} \right]} \cdot (1 + 0,1 \cdot \frac{L_{ucz}}{L_u}) \cdot \frac{1}{\log \frac{\kappa_p}{\kappa_{po}}} \quad (3.47)$$

w którym:

$U_{pze0,5}$  - napięcie przeskoku przy nierównomiernej warstwie zabrudzeń w kV.

Dla małego zanieczyszczenia powierzchni izolatorów i niewielkiego zróżnicowania wartości konduktywności powierzchniowej wzdłuż drogi upływu ( $\frac{\kappa_{pz}}{\kappa_{pcz}} < 2$ ) charakterystyka zabrudzeniowa izolatora może być opisana równaniem (3.22) - jak dla równomiernej warstwy zabrudzeniowej.

Przedstawiony model matematyczny zmian wytrzymałości elektrycznej izolatorów w wyniku zabrudzenia ich powierzchni podczas eksploatacji ujmuje prawie wszystkie istotne czynniki charakteryzujące pracę izolatorów napowietrznych w rejonach o zanieczyszczonej atmosferze.

Sposób oceny poziomu napięcia wytrzymywanego izolatorów zabrudzonych w warunkach eksploatacyjnych zdefiniowano podobnie jak dla równomiernej warstwy zabrudzeń. Zakładając, że rozkład prawdopodobieństwa przeskoku zabrudzeniowego w warunkach laboratoryjnych i eksploatacyjnych ma charakter rozkładu normalnego [1, 8, 47], to poziom napięcia wytrzymywanego (dla małego prawdopodobieństwa przeskoku) wyznaczyć można wg równania:

$$U_{pzew} = U_{pze0,5} (1 - 6k). \quad (3.48)$$

Przyjmując 5-procentowe prawdopodobieństwo przeskoku na izolatorze ( $k=1,6$  i odchylenie standardowe wyników prób w warunkach eksploatacyjnego zabrudzenia  $\sigma = 0,1$  [4, 50], to poziom napięcia wytrzymywanego w warunkach eksploatacyjnych można opisać wyrażeniem

$$U_{pzew} = 0,84 U_{pze0,5} \quad (3.49)$$

Na podstawie analizy wyników badań laboratoryjnych izolatorów zabrudzonych w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych można stwierdzić, że odchylenia poszczególnych wyników pomiaru 50% napięcia przeskoku są uwarunkowane wartością konduktywności powierzchniowej w obszarach zastoju izolatora. Im większa konduktywność powierzchniowa izolatora, tym mniejsze rozrzuty wyników pomiarowych. Należałoby zatem rozważyć i zbadać zależność odchylenia standardowego od wartości konduktywności powierzchniowej, przy której dokonuje się pomiarów napięć przeskoku. Zdaniem autora zależność ta może być opisana równaniem:

$$\sigma_z = \frac{6}{\log \frac{\kappa_p}{\kappa_{po}}} \quad (3.50)$$

Wówczas poziom napięcia wytrzymywanego obliczyć można wg równania:

$$U_{pzew} = U_{pze0,5} \left( 1 - 6k \frac{1}{\log \frac{\kappa_p}{\kappa_{po}}} \right) \quad (3.51)$$

Hipoteza ta wymaga jednak dalszych prac badawczych.

### 3.2.4. Obliczenia przykładowe eksploatacyjnej charakterystyki zabrudzeniowej izolatorów

W przykładzie obliczeniowym wyznaczono charakterystyki zabrudzeniowe dla konstrukcji izolatorów stosowanych w krajowych liniach elektroenergetycznych w.n. typu LP75/17, VKLS75/21 i VKLF75/16. Wyniki obliczeń zgodnie z opracowaną metodą zestawiono w tablicy 3.2 i na rys. 3.15.

Porównując charakterystyki zabrudzeniowe izolatorów długopniowych dla położenia przelotowego i odciągowego, widać, że poziom napięcia przeskoku 50% w położeniu odciągowym jest około 2,5 raza wyższy - dla zakresu zmian konduktywności powierzchniowej  $\kappa_p = 5 \div 50 \mu S$ . Wniosek ten jest całkowicie zgodny z wynikami doświadczeń eksploatacyjnych<sup>1)</sup>.

### 3.2.5. Ocena modelu matematycznego

Weryfikację modelu matematycznego przeprowadzono opierając się na wynikach badań laboratoryjnych izolatorów zabrudzonych w naturalnych warunkach eksploatacyjnych, wykonanych w NIIPT<sup>2)</sup> i innych ośrodkach naukowo-badawczych [47, 74, 80, 86].

<sup>1)</sup> Izolatory tej samej konstrukcji zainstalowane w tych samych warunkach narażeniowych pracują bez przeskoku w położeniu odciągowym kilka lat, a w położeniu pionowym czas eksploatacji do przeskoku wynosi średnio od kilku do kilkunastu miesięcy.

<sup>2)</sup> Wyniki badań nie publikowane, które zawierają wewnętrzne opracowania naukowo-badawcze Instytutu.

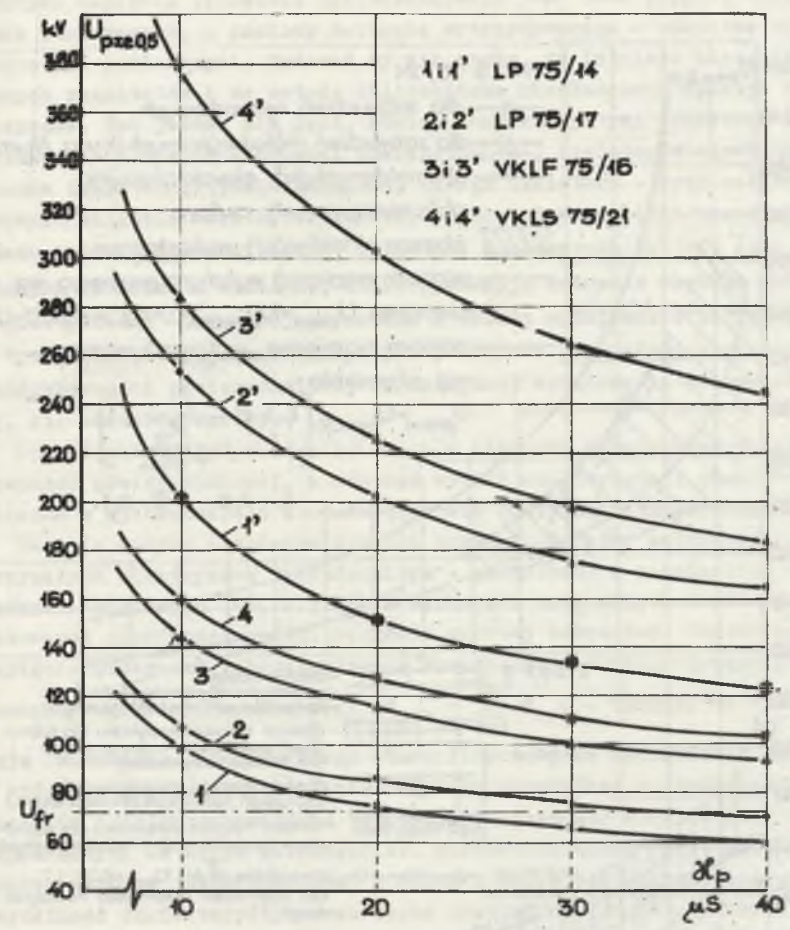


Tablica 3.2  
Zestawienie eksploatacyjnych charakterystyk zabrudzeniowych dla przykładowych izolatorów stosowanych w krajowych liniach napowietrznych w.n.

Wyszczególnienie		typy izolatorów		LP 75/14	VKLS 75/21	VKLF 75/16	LP 75/17	VKLS 75/16	LP 75/14
Pokozenie pracy:		1	1	1	1	1	1	1	1
Liczba kloszy n		17	16	14	21	16	17	21	14
Kąt pochylenia kloszy $\alpha_g / \alpha_d$		18/10	40/30	18/10	37/28	40/30	18/10	37/28	18/10
Droga uplywu czyszczona $L_{ucz}$ mm		80	225	76	250	76	225	250	96
Calkowita droga uplywu $L_u$ mm		225	250	250	335	250	225	335	197
Wspolczynnik		0,985	0,94	0,94	0,906	0,866	0,985	0,882	0,985
Wspolczynnik		0,47	0,94	0,94	0,906	0,866	0,47	0,906	0,47
Wspolczynnik		2,73	17	2,3	16	2,3	17	2,29	21
Wspolczynnik		1,127	2,674	1,218	2,385	1,218	2,674	1,207	2,379
Wspolczynnik		153	363	207	405	207	363	441	288
Wspolczynnik		107	254	145	284	145	254	379	202
Wspolczynnik		86	203	116	227	116	203	304	152
Wspolczynnik		75	177	101	198	101	177	264	135
Wspolczynnik		70	165	94	184	94	165	246	123
Wspolczynnik		129	305	174	340	174	305	370	242
Wspolczynnik		90	213	122	238	122	213	318	170
Wspolczynnik		73	170	97	190	97	170	255	128
Wspolczynnik		63	145	85	166	85	145	221	113
Wspolczynnik		59	139	80	154	80	139	206	103

OBLICZENIA

$$U_{pze0,5} = 2,43 \sqrt{\eta_{ip} \left[ \frac{L_{ucz}}{L_u} \right] \left[ \frac{L_{ucz}}{L_u} \right] \frac{1}{\log \eta_p}} \text{ kV}$$

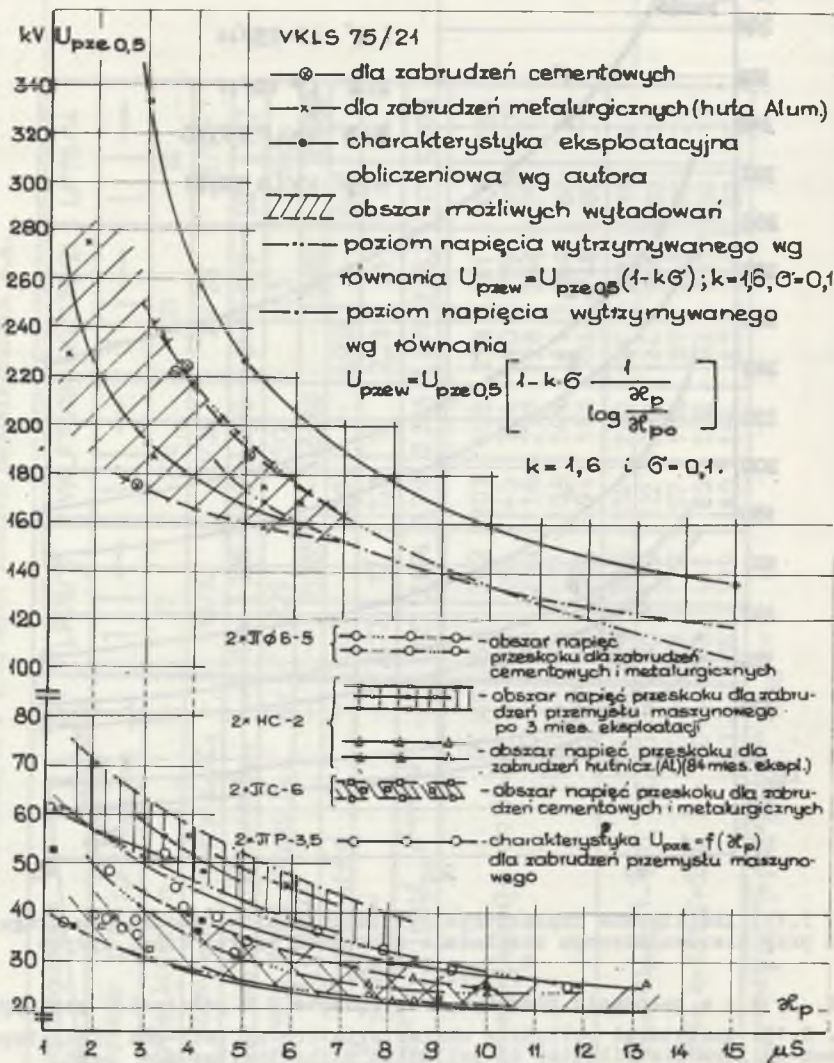


Rys. 3.15. Analityczne charakterystyki zabrudzeniowe izolatorów długopniowych przy nierównomiernym rozkładzie zabrudzeń wzdłuż drogi uplywu

1, 2, 3, 4 - w pokozeniu pionowym, 1', 2', 3', 4' - w pokozeniu poziomym  
 Fig. 3.15. Analytical pollution characteristics of long-rod insulators at non-uniform distribution of pollution along the leakage path  
 1, 2, 3, 4 - in vertical position, 1', 2', 3', 4' - in horizontal position

Wyniki badan naturalnie zabrudzonych izolatorow zestawiono wykreślić na rys. 3.16 i 3.17. Na rys. 3.16 wykreślono również charakterystykę obliczeniową dla warunków eksploatacyjnych 50% napięcia przeskoku  $U_{pze0,5} = f(\alpha_p)$  i napięcia wytrzymywanego  $U_{pzew} = f(\alpha_p)$ . Z porównania wy-





Rys. 3.16. Zestawienie wyników badań eksperymentalnych charakterystyk zabrudzeniowych izolatorów zabrudzonych w naturalnych warunkach eksploatacyjnych w funkcji konduktywności powierzchniowej wyznaczonej metodą techniczną [75]

Fig. 3.16. Specification of experimental test results of the pollution characteristics of the insulators polluted in natural working conditions in the function of surface conductivity determined by the technical method [75]

ników badań doświadczalnych i obliczeniowych autora wynika, że charakterystyki napięcia przeskoku zabrudzeniowego 50% leżą powyżej charakterystyk pomiarowych, a poziomy napięcia wytrzymawanego w obszarze objętym rezultatami pomiarowymi. Wydawać by się mogło, że istnieje niezgodność otrzymanych rezultatów i że metoda obliczeniowa niewłaściwie opisuje zjawiska fizyczne. Tak jednak nie jest, bowiem charakterystyki pomiarowe zostały wyznaczone dla konduktywności powierzchniowej izolatorów określonej z pomiarów rezystancji powierzchniowej całego izolatora - przy całkowitym nasyceniu wilgocią warstwy zabrudzeń, co nie odzwierciedla rzeczywistego stanu zabrudzenia powierzchni izolatora w obszarach zastoju (nie oczyszczanych deszczem i wiatrem), które posiadają znacznie większe wartości konduktywności - warunkujące zapłon i rozwój wyładowania zabrudzeniowego. W tym stanie rzeczy charakterystyki pomiarowe należałoby wyznaczyć dla konduktywności powierzchniowej warunkującej wyładowanie zabrudzeniowe, tj. dla obszarów zastoju.

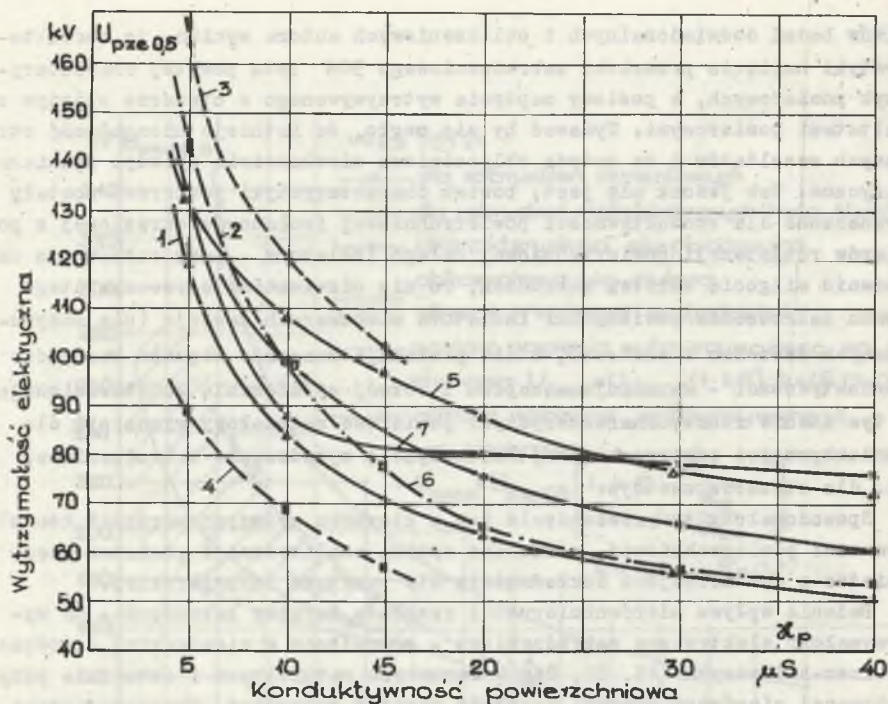
Spowodowałyby to przesunięcie ich w kierunku wyższych wartości konduktywności powierzchniowej, a wówczas wyniki analityczne i pomiarowe będą zbliżone z wystarczającą dokładnością dla praktyki inżynierskiej.

Badania wpływu nierównomierności rozkładu warstwy zabrudzeń - na wytrzymałość elektryczną zabrudzeniową - prowadzono w niemieckich ośrodkach naukowo-badawczych [45, 80, 86] w warunkach naturalnych i sztucznie przygotowanej nierównomierności rozkładu warstwy zabrudzeń. Charakterystyki napięcia przeskoku zabrudzeniowego wyznaczone w funkcji średniej wartości konduktywności powierzchniowej  $\alpha_{p\text{śr}} = \sum_{i=1}^{i=n} \alpha_i/n$ . Warunki te nie odzwierciedlają właściwie rzeczywistego stanu fizycznego w mechanizmie wyładowania,

w którym o zapłonie wyładowania decyduje zasadniczo wartość konduktywności obszarów o dużym zabrudzeniu (w obszarach zastoju) oraz długość odcinków oczyszczonych (o małym zabrudzeniu). Niezdefiniowanie wzajemnych relacji konduktywności powierzchniowej o dużym i małym zabrudzeniu uniemożliwia czytelność charakterystyk oraz ocenę praktyczną zjawiska. Charakterystyka zabrudzeniowa  $U_{pze,0.5} = f(\alpha_p)$  wyznaczona dla nierównomiernego zabrudzenia powierzchni izolatora względem konduktywności powierzchniowej średniej odpowiada w rzeczywistości konduktywności powierzchniowej znacznie większej - w obszarach o dużym zabrudzeniu. Wówczas nie występują te pozornie anomalia w interpretacji zjawiska, jakoby przy nierównomiernym zabrudzeniu izolatora poziom napięcia przeskoku był o ok. 50% niższy w porównaniu do izolatora równomiernie zabrudzonego. I w tym przypadku charakterystykę tę należałoby wyznaczyć dla większych wartości konduktywności powierzchniowych (przesunięcie w prawo). Zadanie to byłoby do sprawdzenia, gdyż autorzy podawali wartości konduktywności powierzchniowej na odcinkach o dużym i małym zabrudzeniu.

Słuszność tej hipotezy potwierdzają wyniki badań Nassera [80], który nierównomierność rozkładu warstwy zabrudzeń na powierzchni izolatore do-





Rys. 3.17. Porównanie wyników badań laboratoryjnych wytrzymałości zabrudzeniowej izolatora LP 75/14 z nierównomierną warstwą zabrudzeniową wzdłuż drogi upływu, w funkcji średniej wartości konduktywności powierzchniowej, z wynikami analitycznymi autora

1 - poziom napięcia wytrzymywanego wg metody autora, 2 - poziom napięcia przeskoku 50% wg metody autora, 3 - charakterystyka zabrudzeniowa dla równomiernej warstwy zabrudzeniowej [47], 4 - charakterystyka zabrudzeniowa dla nierównomiernej warstwy zabrudzeniowej [47], 5 - charakterystyka zabrudzeniowa dla rozkładu zabrudzeń w klimacie suchym [80], 6 - charakterystyka zabrudzeniowa dla równomiernego rozkładu zabrudzeń [80], 7 - charakterystyka zabrudzeniowa dla nierównomiernego zabrudzenia będącego wynikiem samooczyszczania deszczem [80]

Fig. 3.17. Comparison of laboratory test results on the pollution strength of the insulator LP 75/14 with a non-uniform pollution layer along the leakage path, in the function of the mean value of surface conductivity, with the analytical results of the author

1 - level of withstand voltage acc. to the author's method, 2 - level of 50% flashover voltage acc. to the author's method, 3 - pollution characteristic for a non-uniform pollution layer [47], 4 - pollution characteristics for a non uniform pollution layer [47], 5 - pollution characteristics for the distribution of pollution in dry climate [80], 6 - pollution characteristic for a uniform distribution of pollution [80], 7 - pollution characteristic for a non-uniform pollution resulting from the self-cleaning by rain [80]

stosowały do spotykanych w rzeczywistych warunkach eksploatacji: przy obmywaniu izolatorów deszczem i dla klimatu suchego. Wyniki tych badań pokazują (rys. 3.17), że tylko dla stosunkowo małych zabrudzeń, o konduktywności powierzchniowej średniej  $x_{p\text{sr}} < 12 \mu\text{S}$ , napięcie przeskoku dla izolatorów o nierównomierności rozkładu zabrudzeń wymuszonej czyszczącym działaniem deszczu jest nieco niższe w porównaniu z równomiernym rozkładem zabrudzeń wzdłuż drogi upływu. Natomiast dla konduktywności  $x_{p\text{sr}} > 12 \mu\text{S}$  napięcie przeskoku dla izolatorów zabrudzonych nierównomiernie jest wyższe w porównaniu z rozkładem równomiernym.

Przebiegi charakterystyki napięcia przeskoku zabrudzeniowego  $U_{pze0,5} = f(x_p)$  wyznaczone laboratoryjnie [47] dla rozkładu zabrudzeń zbliżonych do spotykanych w warunkach eksploatacyjnych i obliczonej wg metody autora są prawie zbieżne co do poziomu napięcia przeskoku i charakteru zmian w funkcji konduktywności powierzchniowej izolatora.

Dla małych wartości konduktywności powierzchniowej  $3 < x_p < 10 \mu\text{S m/m}$  poziomy napięcia przeskoku zabrudzeniowego zmierzony wg [82] i obliczonego wg metody autora pokrywają się, co również potwierdzają wyniki badań eksperymentalnych prowadzonych w NIPT [75].

Wydaje się, że wyniki te z wystarczającą dokładnością dla praktyki inżynierskiej potwierdzają słuszność analizy modelu fizycznego i opracowanego przez autora modelu matematycznego.

W przedstawionej analizie wyładowania zabrudzeniowego opracowano również model matematyczny zależności poziomu napięcia wytrzymywanego od zmiany konduktywności powierzchniowej w obszarach zastoju  $U_{pze} = f(x_p)$  dla nierównomiernego rozkładu zabrudzeń wzdłuż drogi upływu izolatora.

Z porównania charakterystyk zabrudzeniowych przeskoku: pomiarowych i obliczeniowych - napięcia wytrzymywanego wg rys. 3.17 - widać, że charakterystyka obliczeniowa stanowi obwiednię dolną charakterystyk pomiarowych 50% napięcia przeskoku. Różnica poziomów napięcia przeskoku 50% i napięcia wytrzymywanego (0%) wg: [80] i równań (3.47) i (3.51) wskazuje, że zaproponowany model oceny napięcia wytrzymywanego w warunkach nierównomiernego zabrudzenia powierzchni izolatorów lepiej opisuje losowy charakter zapłonu i rozwoju przeskoku zabrudzeniowego.

Pełne porównanie analitycznych charakterystyk zabrudzeniowych izolatorów, napięcia 50% przeskoku i wytrzymywanego w warunkach nierównomiernego rozkładu warstwy zabrudzeniowej z charakterystykami eksperymentalnymi aktualnie jest utrudnione ze względu na, jak się wydaje, błędną interpretację pojęcia konduktywności powierzchniowej przy przeskoku (jako wartość średnia dla obszarów zastoju i poddanych samooczyszczaniu), stosowaną w dotychczasowych badaniach laboratoryjnych.



3.2.6. Metoda numeryczna analizy wytrzymałości elektrycznej zabrudzeniowej izolatorów w.n.

Opracowane modele matematyczne wytrzymałości elektrycznej zabrudzonych izolatorów wysokiego napięcia opisane zależnościami (3.22), (3.25), (3.43), (3.44) i (3.47) umożliwiają zastosowanie maszyn cyfrowych do analizy istniejących i projektowanych rozwiązań konstrukcyjnych izolatorów z równoczesnym uwzględnieniem położenia pracy i czynników narażenia zabrudzeniowego.

Schemat blokowy podprogramu nr 2 obliczania charakterystyk zabrudzeniowych izolatorów napowietrznych w.n.  $U_{pz} = f(\alpha_p)$  przedstawiono na rys. 3.18.

W schemacie blokowym przyjęto następujące oznaczenia:

$$F(i) = f - \text{współczynnik kształtu izolatora } f = \frac{1}{\pi} \int_0^{L_u} \frac{dL_u}{D(L_u)}$$

$$D(i) = \frac{D}{d} \quad i = 1/1/5 \text{ numer izolatora,}$$

$$i(i,j) = \alpha_{nz} - \text{współczynnik nierównomiernego rozkładu warstwy zabrudzeniowej,}$$

$i = 1/1/5$  - numer izolatora,

$j = 1, 2$  - położenie pracy izolatora (1 - pionowe, 2 - poziome),

$$M(i) = d,$$

$$N(i) = n,$$

$$P(i) = p,$$

$U(i,j,k,l,m)$  - napięcie wytrzymywane lub przeskoku 50%,

$i = 1/1/5$  - numer izolatora,

$j = 1/1/4$  - numer strefy zabrudzeniowej (rejenu eksploatacji),

$k = 1/1/n$  - numer konduktywności powierzchniowej izolatora w strefie zabrudzeniowej,

$l = 1/1/50$  - czas eksploatacji w miesiącach,

$m = 1, 2$  - położenie pracy izolatora (1 - pionowe, 2 - poziome),

$V(i)$  - zmienna pomocnicza,

$i = 1/1/5$  - numer izolatora,

$$Q(j) = Q_{cmax}(5\%),$$

$j = 1/1/4$  - numer strefy zabrudzeniowej (miejsca eksploatacji),

$R(i,j,k)$  - asymptota  $\alpha_p(\tau)$ ,

$S$  - zmienna pomocnicza,

$$T(i,j) = T$$

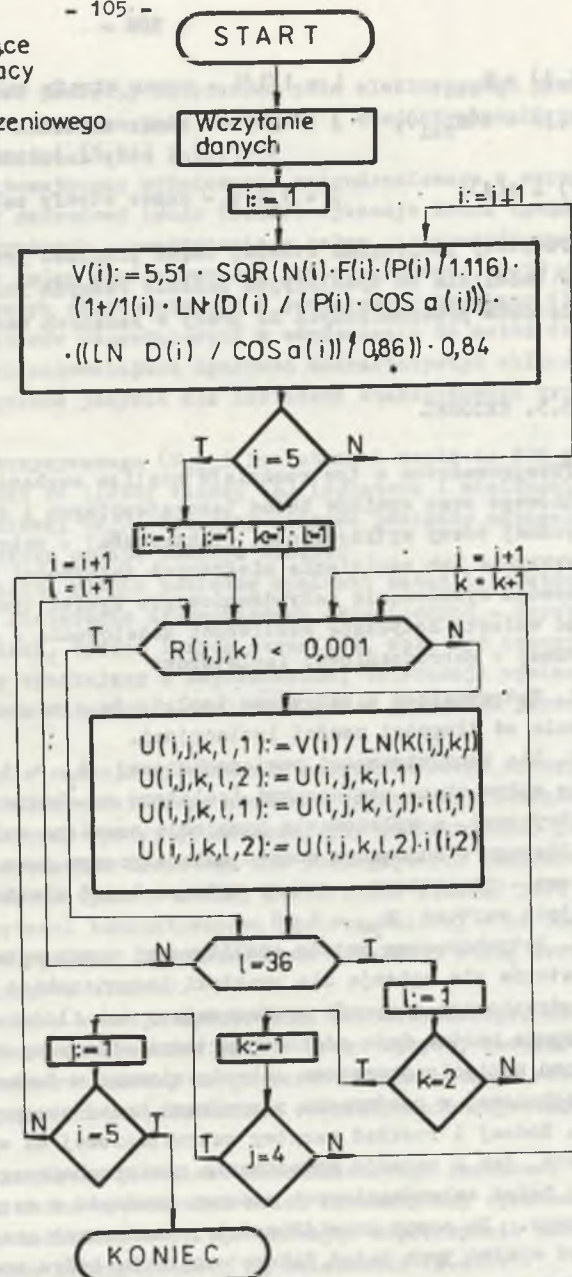
$i = 1/1/5$  - numer izolatora,

$j = 1/1/4$  - numer strefy zabrudzeniowej,

Dane charakteryzujące konstrukcję i stan pracy izolatora oraz wyniki analizy stanu zabrudzeniowego

Obliczenia pomocnicze

Obliczenia charakterystyk  $U_{pz}(t_e) = f(\alpha_p(t_e))$  określonych zależnościami (3.43) i (3.47).



Rys. 3.18. Schemat blokowy podprogramu obliczania wytrzymałości elektrycznej izolatorów w warunkach zabrudzeniowych (charakterystyk zabrudzeniowych)  
Fig. 3.18. Block diagram of the sub-program for the calculation of the electric strength of insulators in the conditions of pollution (pollution characteristics)



$$X(i,j) = x_{rzi}, \quad i = 1/1/4 - \text{numer strefy zabrudzeniowej,}$$

$$Y(i,j) = Z(x_{rzi}), \quad j = 1/1/6 - \text{numer wartości oczekiwanej konduktywności wody deszczowej,}$$

$$Z(j) = Z(1), \quad j = 1/1/4 - \text{numer strefy zabrudzeniowej.}$$

Powyższy podprogram stanowi część programu przedstawionego w rozdziale 4.4. Umożliwia on symulacyjne badanie różnych rozwiązań konstrukcyjnych izolatorów przeznaczonych do pracy w zadanych warunkach eksploatacyjnych.

### 3.3. WNIOSKI

Przeprowadzona w tym rozdziale analiza mechanizmu wyładowania zabrudzeniowego oraz wyników badań laboratoryjnych i dotychczasowych metod analitycznej oceny wytrzymałości elektrycznej - zabrudzeniowej - doprowadziła do wykrycia lub uściślenia niektórych zależności decydujących o zapłonie i rozwoju wyładowania zabrudzeniowego. Wyniki tych rozważań pozwalają wysunąć wnioski dotyczące możliwości modelowania i oceny wytrzymałości elektrycznej - zabrudzeniowej izolatorów:

1. Wytrzymałość elektryczna izolatorów o suchej powierzchni zależy głównie od długości części izolacyjnej.
2. Dla konduktywności powierzchniowej  $x_p > 1 \mu S$  uwidacznia się istotny wpływ stanu powierzchni izolatora na obniżenie jego wytrzymałości elektrycznej, a wyładowanie przyjmuje znamiona wyładowania zabrudzeniowego. Dlatego w budowanym modelu matematycznym jako konduktywność powierzchniowa - początkowa - zmiany wytrzymałości elektrycznej zabrudzeniowej przyjęto wartość  $x_{po} = 1 \mu S$ .
3. Dotychczasowe metody analitycznej oceny wytrzymałości zabrudzeniowej izolatorów nie opisują dla praktyki inżynierskiej zjawiska wyładowania zabrudzeniowego w sposób wystarczający tak ilościowy, jak i jakościowy. Występują bardzo duże różnice wartości obliczonych oraz charakteru zmian poziomu napięcia przeskoku zabrudzeniowego w funkcji konduktywności powierzchniowej w porównaniu z wynikami badań eksperymentalnych.
4. Rodzaj i rozkład warstwy zabrudzeniowej ma wpływ zarówno na warunki zapłonu, jak i rozwoju wyładowania powierzchniowego. Duża różnorodność metod badań zabrudzeniowych stanowi trudność w weryfikacji modelu matematycznego. Do oceny prawidłowości prowadzonych analiz teoretycznych mogą służyć wyniki tych badań laboratoryjnych, które model matematyczny opisuje. Model matematyczny wyładowania zabrudzeniowego dla zabrudzenia o charakterze przemysłowym może być weryfikowany badaniami laboratoryjnymi izolatorów ze stałą lub półpłynną warstwą zabrudzeń.
5. Wartość natężenia pola elektrycznego przy przeskoku zabrudzeniowym zmienia się zależnie od średnicy pnia i konduktywności powierzchniowej

izolatora. Ustalony związek pomiędzy natężeniem pola elektrycznego przy przeskoku zabrudzeniowym a średnicą pnia izolatora i konduktywnością powierzchniową podają zależności (3.14) i (3.15).

6. Opracowany model matematyczny wyładowania zabrudzeniowego w warunkach równomiernej warstwy zabrudzeń (wzór (3.22)) wykazuje dobrą zgodność z wynikami badań laboratoryjnych - praktycznie w całym, interesującym praktykę inżynierską zakresie zmian konduktywności powierzchniowej ( $5+50 \mu S$ ). Dobrą zgodność charakterystyk obliczeniowych i pomiarowych uzyskano dla różnych konstrukcji izolatorów długopniowych w odróżnieniu do metod dotychczasowych, dla których zadowalającą zgodność charakterystyk obliczeniowych i pomiarowych uzyskano jedynie dla izolatora standardowego typu LP 75/14.

7. Różnica poziomu wytrzymywanego ( $U_{pzw}$ ) izolatora i napięcia 50% przeskoku ( $U_{pz0,5}$ ) zależna jest od liczby kłoszy ( $n$ ) izolatora i wielkości konduktywności powierzchniowej ( $x_p$ ). Ustalony związek pomiędzy napięciem wytrzymywanym i 50% przeskoku podaje funkcja (3.25).

8. Zauważono, że przyczyną różnic pomiędzy wynikami badań laboratoryjnych - tych samych typów izolatorów długopniowych ceramicznych - uzyskanych w różnych laboratoriach, oprócz innych czynników, może być rzeczywisty wymiar geometryczny wynikający z dopuszczalnej tolerancji wymiarów konstrukcyjnych - zwłaszcza długości - izolatora, co w przypadku porcelany nie jest bez znaczenia.

9. Różnica w mechanizmie rozwoju wyładowania zabrudzeniowego występująca dla równomiernego i nierównomiernego rozkładu warstwy zabrudzeniowej, wzdłuż drogi upływu izolatora, występuje wówczas, gdy konduktywność powierzchniowa - części powierzchni izolatora nie podlegających bezpośrednio działaniu strug deszczu (pnia i dolnej powierzchni kłosza) jest większa od dwukrotnej wartości konduktywności powierzchniowej - na części powierzchni izolatora podlegającej bezpośrednio działaniu strug deszczu (powierzchnia górna i brzegowa kłosza).

10. O zapłonie i warunkach rozwoju wyładowania zabrudzeniowego, dla nierównomiernego rozkładu zanieczyszczeń wzdłuż drogi upływu, decyduje wartość konduktywności powierzchniowej na powierzchni izolatora w obszarach zastoju (nie podlegających bezpośrednio oddziaływaniu czyszczącemu strug deszczu).

11. Do oceny poziomu napięcia przeskoku zabrudzeniowego izolatora w warunkach eksploatacyjnych można wykorzystać model matematyczny opracowany dla równomiernej warstwy zabrudzeniowej wprowadzając współczynnik nierównomiernego rozkładu warstwy zabrudzeniowej wg zależności (3.47).

12. Model matematyczny oceny wytrzymałości elektrycznej izolatorów w warunkach zabrudzeniowych oprogramowany na e.m.c. umożliwia badania symulacyjne różnych rozwiązań konstrukcyjnych izolatorów przeznaczonych do pracy w warunkach przemysłowego zanieczyszczenia atmosfery.



#### 4. ODPORNOŚĆ ZABRUDZENIOWA IZOLATORÓW W.N. W REJONIE O ZANIECZYSZCZONEJ ATMOSFERZE

##### 4.1. ODPORNOŚĆ ZABRUDZENIOWA JAKO PARAMETR OCENY MOŻLIWOŚCI EKSPLOATACYJNEJ

Ocena możliwości eksploatacyjnej izolacji napowietrznej w rejonie o zanieczyszczonej atmosferze jest jednym z podstawowych zadań praktyki inżynierskiej, które nie zostało dotychczas rozwiązane. Istniejące wymagania normatywne PN [124] i zalecenia międzynarodowe IEC [130], dotyczące doboru izolatorów do warunków zabrudzeniowych, nie są wystarczająco merytorycznie uzasadnione. Równocześnie, jak pokazuje praktyka eksploatacyjna, mimo spełnienia tych wymagań zakłócenia zabrudzeniowe - przeskoki zabrudzeniowe - występują w układach izolacyjnych. Jest to wynikiem braku metod pozwalających na ocenę zmiany wytrzymałości elektrycznej powierzchniowej z czasem eksploatacji i opisu warunków jej odnowy<sup>1)</sup>.

Co prawda od wielu lat wyspecjalizowane służby energetyki zawodowej oraz placówki naukowo-badawcze w kraju i za granicą prowadzą badania izolatorów w naturalnych warunkach eksploatacyjnych, są to jednak próby dostosowane do lokalnych warunków eksploatacji - bez uogólnionej metodyki badań. Dlatego uzyskane wyniki przedstawiają znaczne trudności w wykorzystaniu praktycznym do klasyfikacji i porównania rozwiązań konstrukcyjnych oraz oceny możliwości eksploatacyjnych w innym rejonie eksploatacji. Poza tym, badania takie są kosztowne i długotrwałe (do kilku lat), a wykorzystanie praktyczne ich wyników może okazać się utrudnione - bowiem wcześniej mogły ulec zmianie warunki narażenia w rejonie eksploatacji, w których lub dla których badania takie były wykonywane.

Z punktu widzenia służb energetyki własnością, która charakteryzuje możliwości eksploatacyjne izolatorów w.n., jest czas ich bezzakłócenowej pracy - bez stosowania dodatkowych zabiegów eksploatacyjnych. Dlatego jako parametr oceny izolatorów w warunkach narażeń zabrudzeniowych przyjął autor czas pracy do przeskoku zabrudzeniowego, nazywając go odpornością zabrudzeniową izolatorów.

Wyznaczenie okresu czasu pracy do przeskoku zabrudzeniowego izolatorów w zadanym rejonie eksploatacji wymaga opracowania zależności funkcyjnych, które charakteryzują:

1. Warunki narażenia stanu powierzchni izolatorów,
2. Narażenia napięciowe pracy izolacji w.n.,
3. Wytrzymałość elektryczną zabrudzeniową izolatorów.

Zależności stanu powierzchni izolatorów zdefiniowano w rozdziale II niniejszej pracy przez charakterystykę granicznych wartości konduktywności powierzchniowej izolatorów  $\mathcal{K}_p$  w funkcji czasu eksploatacji  $t_e$ ;

$$\mathcal{K}_p = f(P_k, Z, M, t_e), \quad (4.1)$$

gdzie:

- $P_k$  - określa parametry konstrukcyjne i położenie pracy izolatorów:  
p - przelotowe (pionowe), o - odciągowe (poziome),
- Z - warunki narażeń zabrudzeniowych,
- M - warunki meteorologiczne w wybranym rejonie eksploatacji,
- $t_e$  - czas eksploatacji izolatorów bez dodatkowych zabiegów eksploatacyjnych.

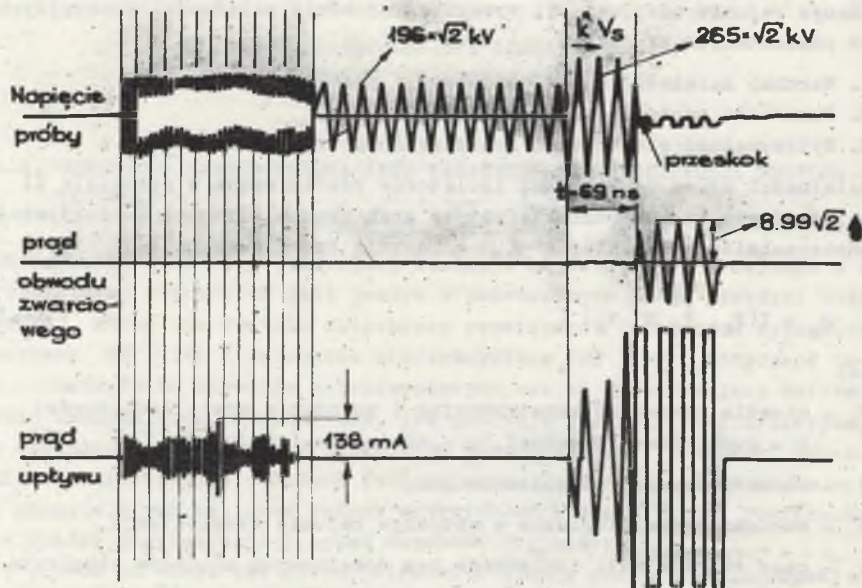
Narażenie napięciowe izolacji napowietrznej w.n. (linii i stacji) określone jest poziomem maksymalnego napięcia roboczego oraz przez te stany przepięciowe w danym miejscu pracy układu elektroizolacyjnego w systemie elektroenergetycznym, które warunkują wyładowanie zabrudzeniowe. Jak pokazują wyniki badań eksperymentalnych [33], poziom napięcia przeskoku zabrudzeniowego jest silnie zależny od czasu oddziaływania pola elektrycznego, co przedstawiono na rys. 3.4. Ustabilizowanie poziomu napięcia przeskoku zabrudzeniowego izolatora następuje przy czasie oddziaływania pola elektrycznego rzędu od ułamków do kilku sekund zależnie od konduktywności powierzchniowej. Z tego względu w mechanizmie wyładowania zabrudzeniowego zasadnicze znaczenie mają przepięcia długotrwałe (łączeniowe i dorywcze)<sup>1)</sup>, których czas trwania jest rzędu 1 s<sup>2)</sup> [5]. Wyniki badań [95] zapłonu wyładowania zabrudzeniowego w warunkach impulsu przepięciowego pokazano na rys. 4.1.

<sup>1)</sup> W warunkach rozwoju wyładowania powierzchniowego przy palących się łukach wędrujących nie można pominąć znaczenia impulsów krótkich, które mogą spowodować wyładowanie zupełne na częściach układu elektroizolacyjnego nie zbocznikowanego łukami wędrującymi.

<sup>2)</sup> Przepięcia dorywcze ze względu na ich długi czas trwania rzędu 1 s w zasadzie nie mogą być ograniczone odgromnikami zaworowymi [16].

<sup>1)</sup> Mamy tu na myśli zasady stosowania zabiegów eksploatacyjnych, takich jak wymiana i mycie izolatorów napowietrznych.





Rys. 4.1. Oscylogram napięcia i prądu wyładowania zabrudzeniowego w warunkach impulsu przepięciowego  $k^* = 1,35$  [95]

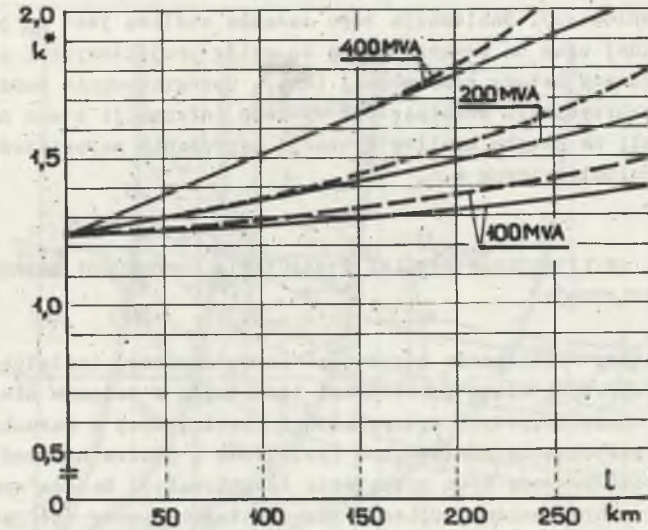
Fig. 4.1. Oscillogram of the voltage and pollution discharge current in the conditions of overvoltage impulse  $k^* = 1,35$  [95]

Równoczesne oddziaływanie napięcia roboczego i przepięć długotrwałych znacznie zwiększają poziom narażenia napięciowego podanego na izolator. Wartość napięcia układu elektroizolacyjnego w warunkach przepięć długotrwałych może być opisana iloczynem maksymalnego napięcia roboczego  $U_{frmax}$  i współczynnika przepięciowego  $k^*$

$$U_{frmax}^* = U_{frmax} k^* \quad (4.2)$$

Współczynnik przepięć długotrwałych  $k^*$  w układach przesyłowych w.n. zależy od parametrów i konfiguracji układu przesyłowego. Stąd narażenia napięciowe w różnych układach przesyłowych o tym samym poziomie napięcia roboczego będą inne. W badaniach przepięć łączeniowych w liniach przesyłowych stwierdzono, że wyłączenie obciążenia na końcu linii długiej spowoduje wystąpienie przepięć o współczynniku  $k^*$  rzędu 1,26-1,48 [5], a nawet wyższym [3]. Zależność zmian współczynnika przepięciowego podczas wyłączenia obciążenia na końcu linii 220 kV pokazano na rys. 4.2.

Jeśli na przepięcia łączeniowe nałożą się przepięcia występujące przy niesymetrycznych zakłóceniach w sieci ze skutecznie uzziemionym punktem



Rys. 4.2. Współczynnik przepięć długotrwałych dla przypadku wyłączenia obciążenia na końcu linii w funkcji długości linii o napięciu 220 kV i  $\cos \varphi = 0,8$  [5]

Fig. 4.2. Coefficient of long-lasting overvoltage for the case of cutting of the load at the end of the line in the function of the length of the line of the voltage 220 kV and  $\cos \varphi = 0,8$  [5]

zerowym, to napięcie na układzie elektroizolacyjnym osiąga wartość 1,5-1,7 napięcia fazowego, tj. rzędu napięcia międzyprzewodowego [5]. Ocena narażenia napięciowego izolacji napowietrznej w warunkach zabrudzeniowych w określonym miejscu układu przesyłowego wymaga analizowania stanów przepięciowych i określenia wartości współczynnika przepięć długotrwałych.

Badanie odporności zabrudzeniowej izolatorów napowietrznych musi uwzględniać rzeczywiste stany narażenia napięciowego izolacji z uwzględnieniem przepięć o częstotliwości zbliżonej do roboczej.

Zagadnienia wytrzymałości elektrycznej izolatorów w warunkach zabrudzeniowych, przy zadanym stopniu i rozkładzie zabrudzeń na powierzchni izolatora, omówiono w rozdziale 3 niniejszej pracy. Zależności funkcyjne poziomu napięcia przeskoku i wytrzymywanego, w zależności od parametrów konstrukcyjnych i konduktywności powierzchniowej, w postaci charakterystyk zabrudzeniowych  $U_{pz} = f(P_k, \mathcal{R}_p)$ , opisują równania (3.22), (3.25), (3.43), (3.44) i (3.47).

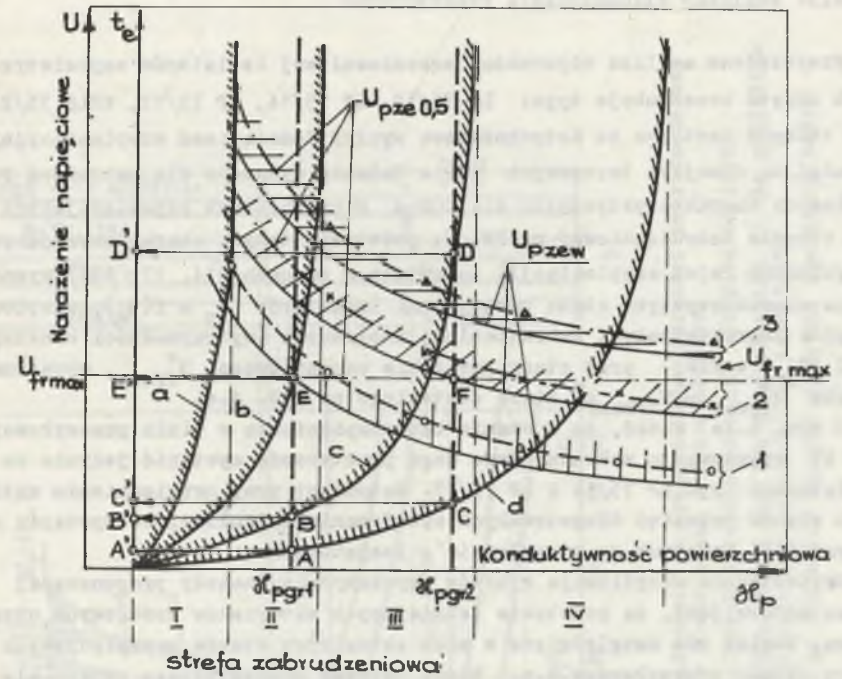
Opracowane zależności funkcyjne: stanu powierzchni izolatorów  $\mathcal{R}_p = f(P_k, Z, M, t_e)$ , wytrzymałości elektrycznej zabrudzeniowej  $U_{pze} = f(P_k, \mathcal{R}_p)$  i narażenia napięciowego w układzie przesyłowym  $U_{frmax}^* = F(U_{frmax}, k^*)$  pozwalają na modelowanie stanu pracy układów elektroizolacyjnych i wyznaczenie spodziewanego czasu bezzakłóceniowej eksploatacji izolatorów (do prze-



skoku zabrudzeniowego). Realizacja tego zadania możliwa jest za pomocą metody wykreselnej oraz na szerszą skalę do celów projektowych i eksploatacyjnych za pomocą metody numerycznej (emc). Oprogramowanie maszyny cyfrowej przy wykorzystaniu rozwiniętego systemu informacji stanu narażenia izolacji pozwoli na ciągłą analizę sytuacji zagrożenia napowietrznych układów elektroizolacyjnych w.n.

#### 4.2. METODA ANALITYCZNO-WYKRESLNA WYZNACZANIA ODPORNOŚCI ZABRUDZENIOWEJ IZOLATORÓW

Podstawę metody wyznaczania odporności zabrudzeniowej izolatorów stanowią: charakterystyki stanu powierzchni izolatorów w zadanym miejscu eksploatacji, charakterystyki wytrzymałości elektrycznej w warunkach eksploatacyjnego zabrudzenia powierzchni izolatorów i poziom narażeń napięciowych (napięcia robocze oraz przepięcia długotrwałe). Metoda wyznaczania odporności zabrudzeniowej opisana przez autora w pracy [51] została pokazana na rys. 4.3. W układzie współrzędnych prostokątnych  $U_{pzew}$ ;  $t_e$  i  $\mathcal{K}_p$  wykreślono charakterystyki stanu zabrudzenia powierzchni izolatorów - różnych konstrukcji - które oznaczono literami a, b, c, d dla przykładowych stref zabrudzeniowych oznaczonych I, II, III, IV. Charakterystyki te wyznaczono wg opracowanych w rozdziale 2 równań uwzględniających parametry konstrukcyjne i położenie pracy izolatorów oraz oddziaływanie narażeń zabrudzeniowych i wyników samooczyszczania (meteorologicznych). Następnie wykreślono charakterystyki zabrudzeniowe wytrzymałości elektrycznej dla eksploatacyjnego (nierównomiernego) rozkładu warstwy zabrudzeniowej, opisujące zmianę poziomu napięcia wytrzymywanego izolatora w funkcji konduktywności powierzchniowej  $U_{pzew} = f(\mathcal{K}_p)$ . Poziom narażenia napięciowego w zadanym miejscu układu przesyłowego w.n. przedstawiono prostą  $U_{frmax}^*$  równoległą do osi odciętych. W przykładowym opisie metody pokazanym na rys. 4.3 charakterystyki zabrudzeniowe  $U_{pzew} = f(\mathcal{K}_p)$  przecinają prostą wyrażającą narażenie napięciowe  $U_{frmax}^*$  w punktach: 1 - dla izolatora 1, F - dla izolatora 2, a dla izolatora 3 przy tym poziom narażenia napięciowego przeskoku zabrudzeniowy nie wystąpi. Punkty E i F wyznaczają wartość graniczną konduktywności powierzchniowej  $\mathcal{K}_{pgr}$  izolatorów, przy której możliwy jest przeskok zabrudzeniowy. Odnosząc punkty E i F na odpowiadające im charakterystyki  $\mathcal{K}_p = f(t_e)$  izolatorów i następnie przenosząc je na oś czasu  $t_e$  (punkty E i F), określamy czas eksploatacji odnośnego izolatora (1 i 2), w którym może on pracować bez przeskoku zabrudzeniowego i bez stosowania dodatkowych zabiegów eksploatacyjnych. Postępując w ten sposób dla kolejnych konstrukcji izolatorów przeznaczonych do pracy w zadanym warunkach eksploatacyjnych, możemy określić ich odporność zabrudzeniową.



Rys. 4.3. Metoda analityczno-wykreslna wyznaczania odporności zabrudzeniowej izolatorów napowietrznych wysokiego napięcia

1, 2, 3 - obszar możliwych wyładowań zabrudzeniowych dla odpowiednich konstrukcji izolatorów, a, b, c, d - charakterystyka stanu powierzchni danych izolatorów w określonych warunkach zabrudzeniowych (strefa I, II, III, IV),  $U_{pze0,5}$  - poziom 50% napięcia przeskoku zabrudzeniowego,  $U_{pzew}$  - poziom napięcia wytrzymywanego w warunkach zabrudzenia powierzchni izolatora,  $U_{frmax}$  - maksymalne napięcie robocze układu elektroizolacyjnego,  $U_{frmax}^*$  - maksymalne możliwe narażenie napięciowe (napięcia robocze i przepięcia długotrwałe)

Fig. 4.3. Analytical-graphical method of determining the pollution resistance of overhead high voltage insulators

1, 2, 3 - area of the possible pollution discharges for the particular constructions of insulators, a, b, c, d - characteristic of the state of surface of the given insulators in the definite conditions of pollution (zone I, II, III, IV)  $U_{pze0,5}$  - level of a 50% voltage of the pollution lashover;  $U_{pzew}$  - level of withstand voltage in the conditions of pollution of the insulator surface;  $U_{frmax}$  - maximum operating voltage of the electroinsulating system,  $U_{frmax}^*$  - maximum possible voltage hazard (operating voltage and longlasting overvoltage)



### 4.3. PRZYKŁAD WYKORZYSTANIA PRAKTYCZNEGO

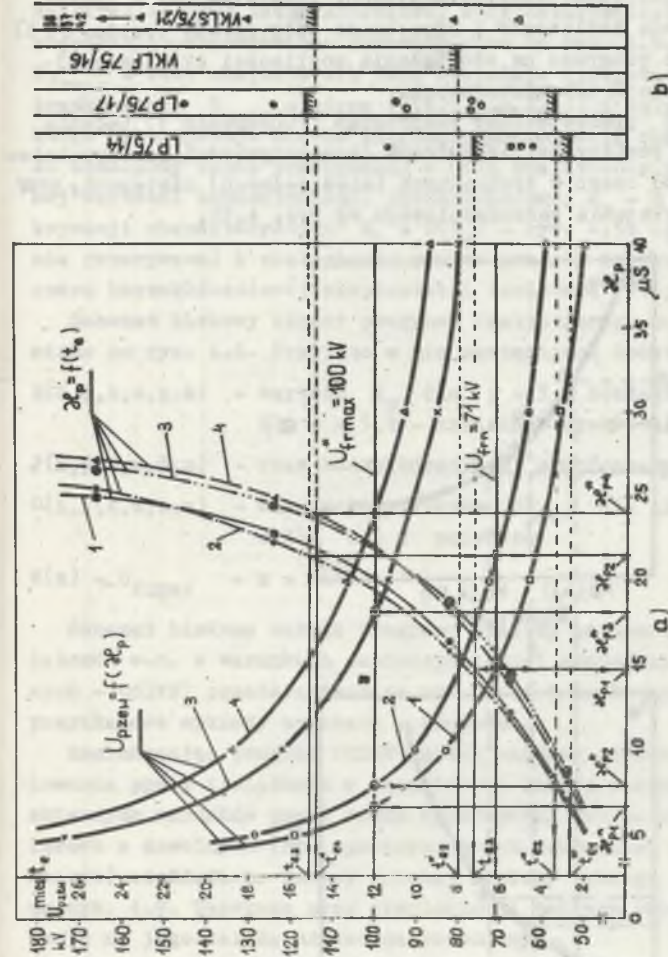
Przykładowa analiza odporności zabrudzeniowej izolatorów napowietrznych objęto konstrukcje typu: LP 75/12, LP 75/14, LP 75/17, WKLS 75/21, dla których dostępne są dotychczasowe wyniki doświadczeń eksploatacyjnych i badań na stacjach terenowych [132]. Badania wykonano dla zabrudzeń przemysłowych charakterystycznych dla GOP-u o parametrach odpowiadających III strefie zabrudzeniowej wg PN. Na podstawie danych charakteryzujących przykładowy rejon eksploatacji, zawartych w pracach [14, 17, 124] wyznaczono charakterystyki stanu powierzchni izolatorów  $x_p = f(t_e)$ , eksploatacyjne charakterystyki zabrudzeniowe izolatorów (wytrzymałości elektrycznej)  $U_{pze} = f(x_p)$  oraz stany narażenia napięciowego  $U_{frmax}^*$ , wyrażone prosta  $U_{frmax} = U_{frmax}^* k^*$ , które zestawiono na rys. 4.4.

Z rys. 4.4a widać, że w stanie bezprzepięciowym w linii przesyłkowej 110 kV wyładowania zabrudzeniowe mogą praktycznie wystąpić jedynie na izolatorach typu LP 75/14 i LP 75/17. Natomiast przy uwzględnieniu możliwych stanów przepięć długotrwałych wyładowania zabrudzeniowe wystąpią na wszystkich, badanych w przykładzie, izolatorach.

Bezpośrednia weryfikacja wyników uzyskanych wg metody proponowanej przez autora jest, na podstawie istniejących materiałów źródłowych, utrudniona, bowiem nie uwzględnione w nich aktualnych stanów przepięciowych pracy układu przesyłkowego w.n. Można dekonstruować bezwzględne porównania wyników uzyskanych w warunkach naturalnych i wg metody autora. Na rys. 4.4b zestawiono przedziały czasu bezzakłóceniewej eksploatacji izolatorów (zakreskowane) i czasy do przeskoku (punkty) uzyskane w warunkach terenowych.

Analizując wyniki badań odporności zabrudzeniowej uzyskane wg zaproponowanej metody modelowej i prób terenowych, można stwierdzić, że różnice pomiędzy rezultatami modelowymi i doświadczalnymi mogą być spowodowane przez nie w pełni porównywalne warunki pracy izolatorów - rzeczywiste i przyjęte w modelu. Należy zaznaczyć, że rzeczywiste parametry narażeń zabrudzeniowych, w miejscu eksploatacji izolatorów, mogą się różnić (w stanach ekstremalnych) od przyjętych w przykładzie wykorzystania praktycznego opracowanych modeli matematycznych. Równocześnie z tym w opisie badań terenowych odporności zabrudzeniowej brak jest informacji o parametrach narażeń napięciowych (przepięć długotrwałych) w układzie przesyłkowym w.n.

Uzyskana w tych warunkach zgodność wyników badań modelowych i terenowych jest zadowalająca i zachęcająca do dalszego doskonalenia modeli analitycznych opisujących stan powierzchni izolatorów i zjawisko przeskoku zabrudzeniowego.



Rys. 4.4. Przykład wykorzystania praktycznego metody graficznej do wyznaczenia odporności zabrudzeniowej (czasu do przeskoku) izolatorów w warunkach eksploatacyjnych

a - wyniki badań modelowych, b - porównanie wyników modelowych z doświadczeniami eksploatacyjnymi

Fig. 4.4. Example of a practical application of the graphic method for the determination of the pollution resistance (time until flashover) of insulators in operating conditions

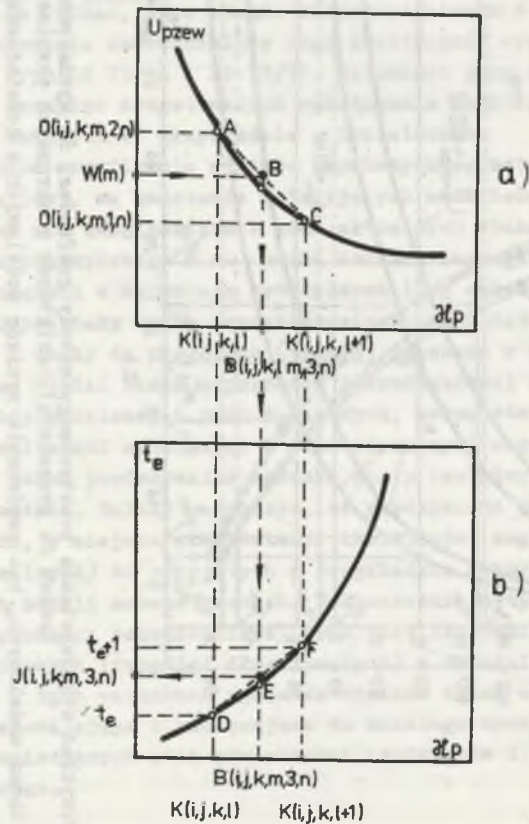
a - results of model studies, b - comparison of the model results with the operating tests



4.4. METODA NUMERYCZNA OCENY CZASU BEZZAKŁÓCENIOWEJ EKSPLOATACJI IZOLATORÓW W.N.

Ogromna zmienność parametrów losowych eksploatacji izolatorów napowietrznych w warunkach zanieczyszczonej atmosfery stwarza bardzo duże trudności w analizie ich możliwości eksploatacyjnych. Przedstawione w pracy metody modelowego badania izolatorów i opracowane podprogramy (rozdz. 2 i 3) są podstawą opracowania programu na emc badania możliwości eksploatacyjnych izolatorów w warunkach zabrudzeniowych.

W podrozdziale 2.4.5 przedstawiono podprogram (PODPROGRAM 1) badania stanu zanieczyszczenia powierzchni izolatorów (konduktywności powierzchniowej  $\kappa_p$ ) w zależności od czasu w dyskretnych (miesięcznych) odstępach, przy zadanych parametrach narażenia zabrudzeniowego wg rys. 4.5b.



Rys. 4.5. Sposób modelowania cyfrowego wyznaczania czasu do przeskoku zabrudzeniowego izolatorów

Fig. 4.5. Method of digital modelling of determining the time until pollution flashover of insulators

Dla modelu matematycznego wyznaczania wytrzymałości zabrudzeniowej izolacji napowietrznej opracowano w podrozdziale 3.2.5 podprogram nr 2 obliczania charakterystyk zabrudzeniowych izolatorów  $U_{pzew} = f(\kappa_p)$  - również w dyskretnych odstępach czasu wg rys. 4.5a. Na podstawie charakterystyk: wytrzymałości zabrudzeniowej  $U_{pzew} = f(\kappa_p)$  i stanu powierzchni  $\kappa_p = f(t_e)$  izolatorów oraz dla danego narażenia napięciowego  $U_{frmax}$ , można określić czas bezzakłócenowej eksploatacji izolatorów  $t_e$ . Metodę postępowania przedstawiono schematycznie na rys. 4.5a i b. Dla napięcia  $U_{frmax} = W(m)$  znajduje się dwie sąsiednie dyskretne wartości napięcia wytrzymywanego  $U_{pzew}$  - górna ( $O(i,j,k,m,2,n)$ ) i dolna ( $O(i,j,k,m,1,n)$ ), które wykorzystuje się do liniowej aproksymacji charakterystyki (odcinek AC oznaczony linią przerywaną) w celu znalezienia punktu pracy B i dokładnej wartości konduktywności powierzchniowej  $\kappa_p = B(i,j,1,m,3,n)$ . Po aproksymacji charakterystyki  $\kappa_p = f(t_e)$  - rys. 4.5b (odcinek DF oznaczony linią przerywaną) i znalezieniu punktu pracy E uzyskuje się szukaną wartość czasu bezzakłócenowej eksploatacji izolatora ( $J(i,j,k,m,3,n)$ ).

Schemat blokowy części programu realizującego te obliczenia przedstawiono na rys. 4.6. Przyjęto w nim następujące dodatkowe oznaczenia:

$B(i,j,k,m,p,n)$  - wartość  $\kappa_p$  dla  $p = 3$  - dokładna,  
dla  $p = 1,2$  - sąsiednie dyskretne,

$J(i,j,k,m,3,n)$  - czas bezzakłócenowej eksploatacji izolatorów,

$O(i,j,k,m,1,n)$  - wartości dyskretne  $U_{pzew}$ , dla  $l = 1$  większe od  $w(m)$ ,  
a dla  $l = 2$  mniejsze.

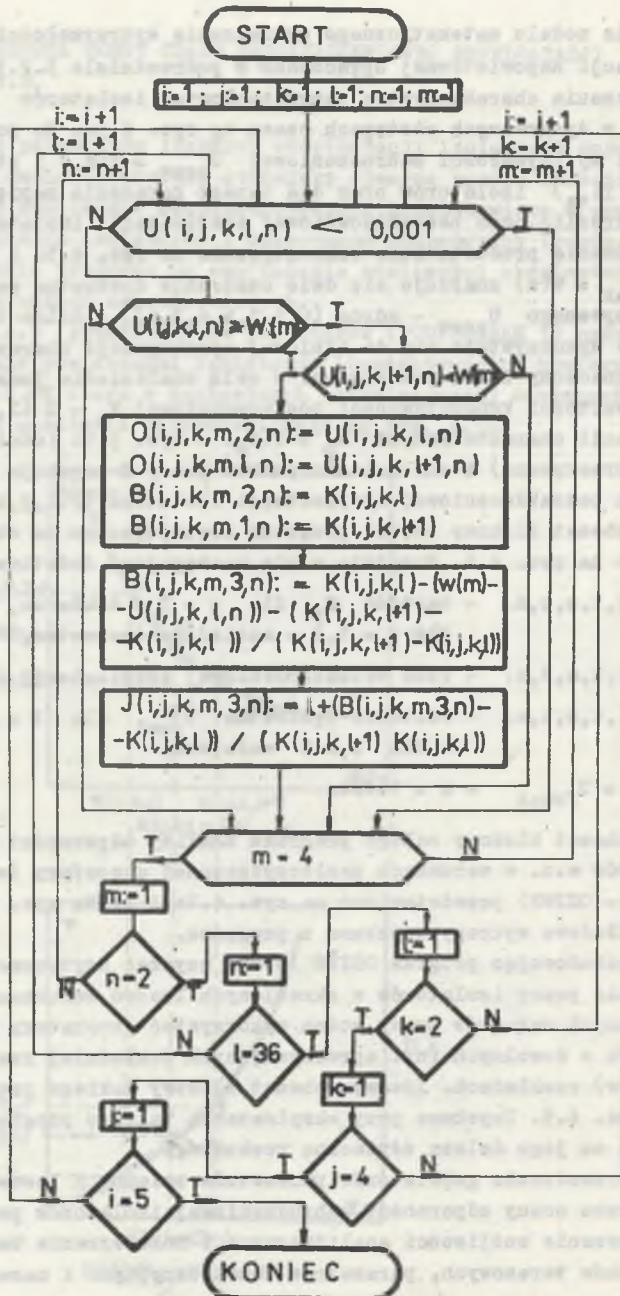
$$W(m) = U_{frmax} \quad - \quad m = 1(1)4.$$

Schemat blokowy całego programu analizy odporności zabrudzeniowej izolatorów w.n. w warunkach zanieczyszczonej atmosfery (w rejonach przemysłowych - OZIWN) przedstawiono na rys. 4.7a i b. Na rys. 4.8 przedstawiono przykładowe wykresy uzyskane z programu.

Rozbudowując program OZIWN można uzyskać użyteczne narzędzie do modelowania pracy izolatorów w określonych losowo warunkach. Do symulowania zmiennych warunków pracy można wykorzystać generatory parametrów zmiennych losowo o dowolnych (np. aproksymujących dokładniej rzeczywiste wyniki pomiarów) rozkładach. Ideowy schemat blokowy takiego programu przedstawiono na rys. 4.9. Uzyskane przy eksploatacji takiego programu doświadczenia pozwolą na jego dalszą użyteczną rozbudowę.

Wprowadzenie generatorów parametrów zmiennych losowo do opracowanego programu oceny odporności zabrudzeniowej izolatorów pozwoli na znaczne zwiększenie możliwości analitycznych i rozszerzenie badań symulacyjnych warunków terenowych, parametrów konstrukcyjnych i narażeń napięciowych.



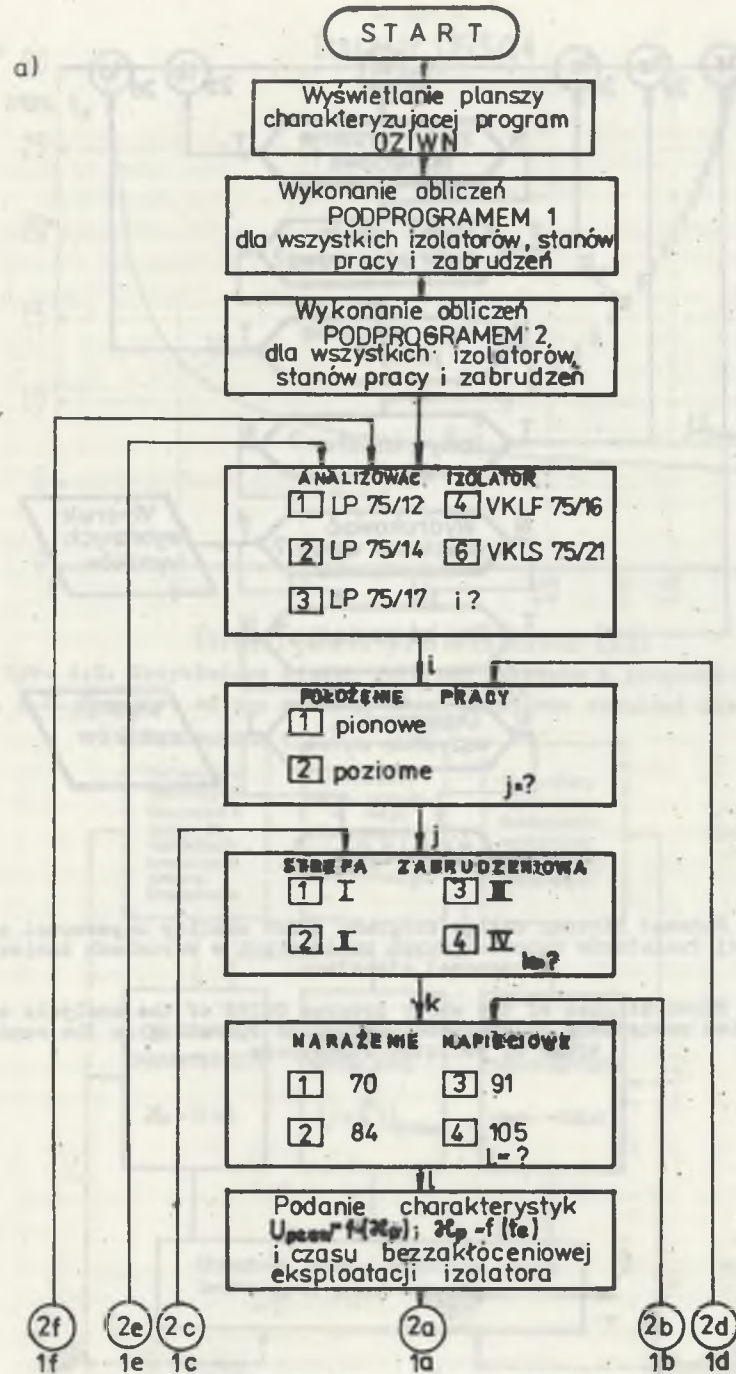


Zapamiętanie wartości dyskretnych napięć  $U_{pze}$  i konduktywności powierzchniowych  $\mathcal{K}_p$   
Wartość  $\mathcal{K}_p$

Wartość czasu bezawaryjnej pracy izolatora

Rys. 4.6. Schemat blokowy części programu realizującego obliczenia pomocnicze

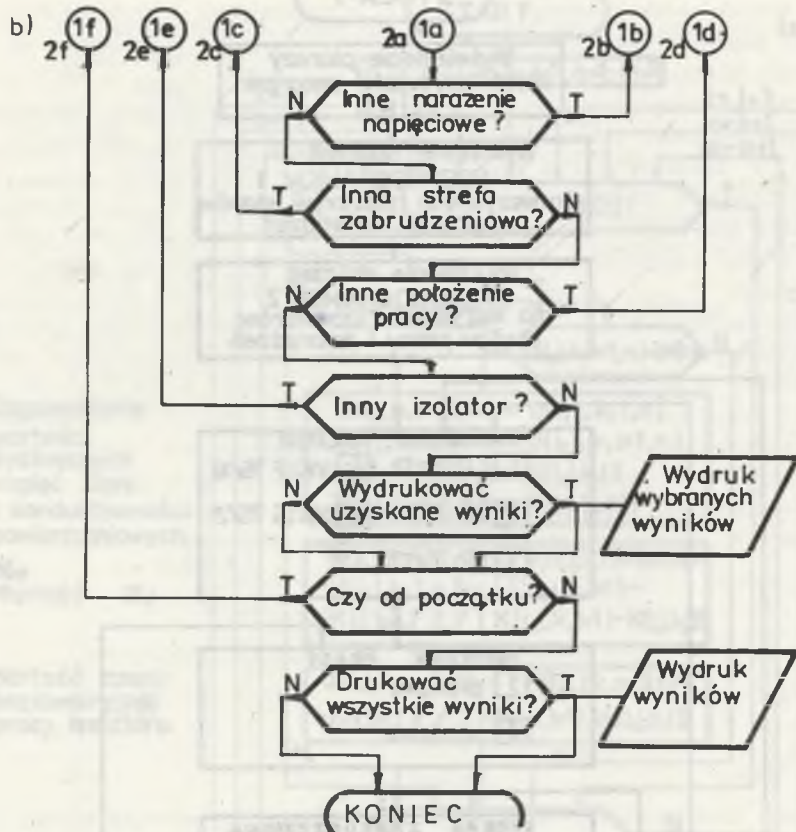
Fig. 4.6. Block diagram of the part of the program of auxiliary calculations.



1f 1e 1c 2a 2b 2d

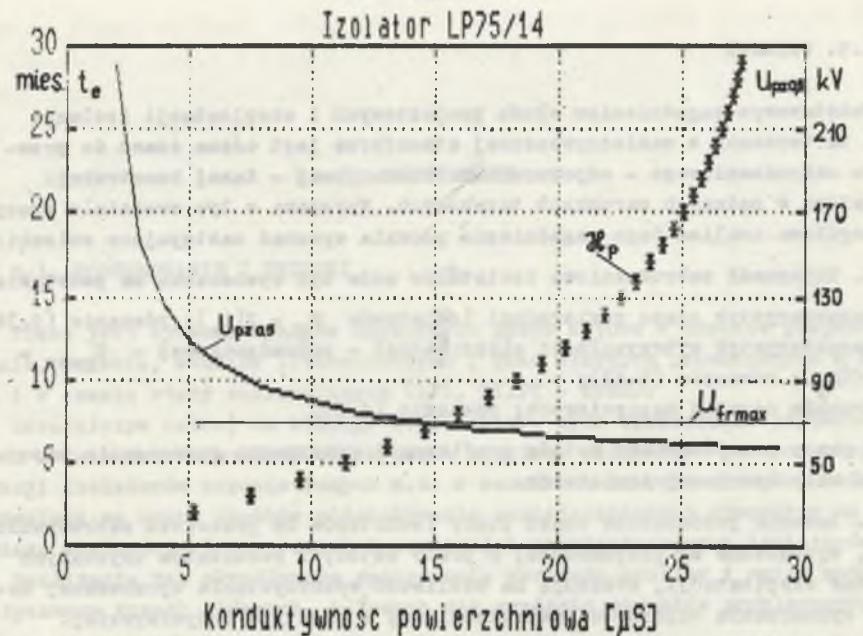
Fig. 4.6. Continuation of the description of the 1118 program



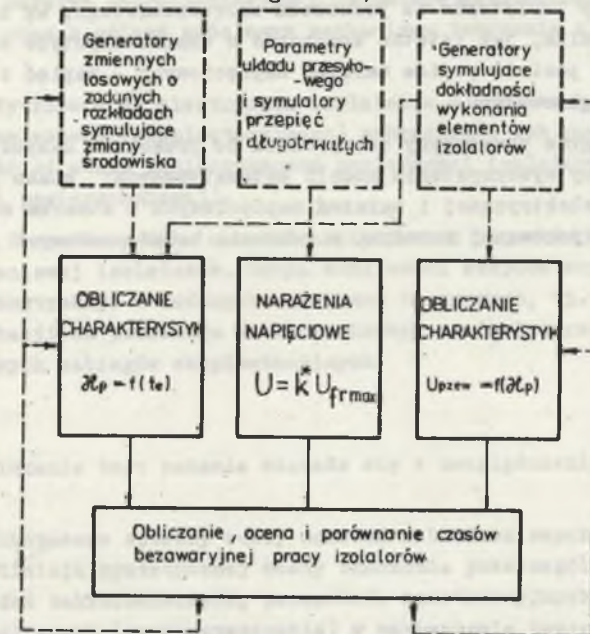


Rys. 4.7. Schemat blokowy całego programu OZIWN analizy odporności zabrudzeniowej izolatorów napowietrznych pracujących w warunkach zanieczyszczonej atmosfery

Fig. 4.7. Block diagram of the whole program OZIWN of the analysis of the pollution resistance of overhead insulators operating in the conditions of polluted atmosphere



Rys. 4.8. Przykładowe wyniki obliczeń uzyskane z programu OZIWN  
Fig. 4.8. Examples of the results of calculations obtained from the program OZIWN



Rys. 4.9. Propozycja rozbudowy programu OZIWN  
Fig. 4.9. Suggestions for the expansion of the OZIWN program



#### 4.5. WNIOSKI

Podstawowym zagadnieniem służb projektowych i eksploatacji izolacji w.n. na terenach o zanieczyszczonej atmosferze jest ocena czasu do przeskoku zabrudzeniowego - odporności zabrudzeniowej - danej konstrukcji izolatora w zadanych warunkach terenowych. Wykonana w tym rozdziale pracy szczegółowa analiza tego zagadnienia pozwala wysunąć następujące wnioski:

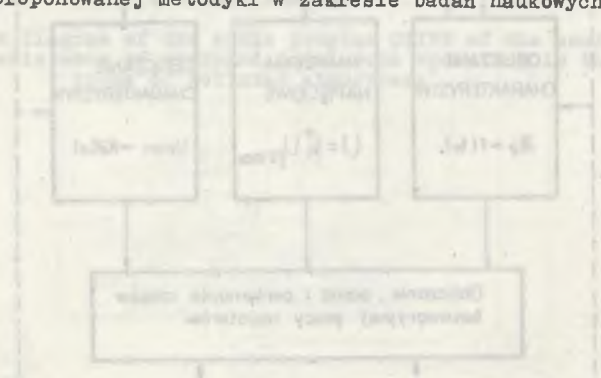
1. Odporność zabrudzeniowa izolatorów może być wyznaczona na podstawie:
  - charakterystyk stanu powierzchni izolatorów  $\mathcal{X}_p = f(t_e)$ ; równanie (2.38);
  - charakterystyk wytrzymałości elektrycznej - zabrudzeniowej -  $U_{pzew} = f(\mathcal{X}_p)$ ; równanie (3.47);
  - warunków narażeń napięciowych; równanie (4.2).

W pracy przedstawiono metodę graficzną i numeryczną wyznaczenia odporności zabrudzeniowej izolatorów.

2. Badania porównawcze czasu pracy izolatorów do przeskoku zabrudzeniowego, wyznaczone wg proponowanej w pracy metody i rezultatów uzyskanych podczas eksploatacji, wskazują na możliwość wykorzystania opracowanej metody wyznaczania odporności zabrudzeniowej w praktyce inżynierskiej.

3. Dotychczasowe wytyczne i przepisy normatywne doboru izolatorów do warunków zabrudzeniowych nie uwzględniają wpływu przepięć długotrwałych. Z analizy czasu pracy izolatorów do przeskoku zabrudzeniowego, wg zaproponowanej metody, wynika, jak istotne znaczenie w charakterystyce warunków pracy izolatorów posiada poziom narażeń napięciowych - napięć roboczych i przepięć długotrwałych.

4. Opracowany program numeryczny oceny czasu do przeskoku zabrudzeniowego izolatorów - przy wykorzystaniu modeli matematycznych: stanu powierzchni, wytrzymałości elektrycznej i narażeń napięciowych - stwarza możliwość zastosowania zaproponowanej metodyki w zakresie badań naukowych i praktyce inżynierskiej.



#### 5. ZAKOŃCZENIE

##### 5.1. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Praca jest syntezą wyników uzyskanych przez autora w trakcie projektowania, badania, studiów literaturowych i prac własnych prowadzonych w kraju i w czasie staży zagranicznych (LPI, NIIPT - ZSRR).

Zasadniczym celem, do którego dążył autor, było opracowanie użytecznych modeli matematycznych opisujących zjawiska zachodzące podczas eksploatacji izolatorów napowietrznych w.n. w warunkach zabrudzeniowych, które pozwalają na ocenę skutków oddziaływania zanieczyszczonej atmosfery na zmianę własności elektrycznych i możliwości eksploatacyjnych izolatorów.

Realizacja tak określonego zamierzenia wymagała analizy i opisu matematycznego trzech głównych, dających się wyróżnić zespołów problemowych:

I. Problemy oceny zmian stanu powierzchni izolatorów podczas eksploatacji. Są one związane z analizą terenu eksploatacji ze względu na oddziaływanie narażeń zabrudzeniowych i czynników meteorologicznych (wiatr i deszcz) oraz z opisem modelowym mechanizmu tworzenia się warstwy zabrudzeniowej.

II. Wytrzymałość elektryczna izolatorów w warunkach równomiernego i nierównomiernego (eksploatacyjnego) zabrudzenia ich powierzchni oraz jej zależność od stanu zanieczyszczeń powierzchni izolatorów (zmiany konduktywności powierzchniowej).

III. Charakterystyka narażeń napięciowych z punktu widzenia odporności zabrudzeniowej izolatorów. Ocena możliwości eksploatacyjnych izolatorów danej konstrukcji w zadanych warunkach terenowych, tj. określenie czasu eksploatacji do przeskoku zabrudzeniowego na izolatorze bez stosowania dodatkowych zabiegów eksploatacyjnych.

##### Ad I

Rozwiązanie tego zadania wiązało się z uwzględnieniem następujących faktów:

a) Dotychczasowe sposoby oceny narażeń zabrudzeniowych izolatorów nie umożliwiają syntetycznej oceny znaczenia poszczególnych parametrów narażeń zabrudzeniowych, parametrów konstrukcyjnych i czynników meteorologicznych (samooczyszczania) w mechanizmie tworzenia się warstwy zabrudzeniowej oraz zmiany stanu powierzchni w czasie eksploatacji.



- b) Istniejące przepisy normatywne (PN) dotyczące charakterystyki terenu eksploatacji (podział na strefy zabrudzeniowe) i doboru izolatorów do określonych warunków terenowych nie mogą być - w świetle doświadczeń eksploatacyjnych - uznane za merytorycznie wystarczająco uzasadnione.
- c) Aktualny stan wiedzy w zakresie badań różnych rodzajów zanieczyszczeń, pomiaru i metod wyznaczania parametrów narażeń zabrudzeniowych oraz badań terenowych i laboratoryjnych mechanizmu zabrudzenia powierzchni izolatorów umożliwił podjęcie prac związanych z opracowaniem modelu matematycznego oceny zmiany stanu powierzchni izolatorów w warunkach narażeń zabrudzeniowych.

Zadanie powyższe rozwiązano - z myślą o opisie matematycznym zmiany stanu powierzchni izolatorów opierając się na znanych parametrach narażeń zabrudzeniowych, czynników meteorologicznych i parametrów konstrukcyjnych - wg następującego schematu postępowania:

- Na podstawie analizy modelu fizycznego oddziaływania przemysłowych zanieczyszczeń atmosfery na powierzchnię izolatorów określono własności i parametry techniczne zanieczyszczeń, które w istotny sposób decydują o tworzeniu się warstwy zabrudzeniowej i jej zdolnościach przewodzenia prądu elektrycznego.
- Obserwacje terenowe oraz wyniki modelowych badań laboratoryjnych pozwoliły na opisanie mechanizmu oddziaływania wiatru i deszczu na powierzchnię izolatora i zdolności konstrukcji do samooczyszczania.

Wykonana w pracy szczegółowa analiza tych badań pozwala wysunąć następujące wnioski ogólne:

1. Opracowany model matematyczny przedstawiony zależnością (2.38) oceny jakościowej i ilościowej zmiany stanu powierzchni izolatorów w.n. w zadanych warunkach (zabrudzeniowych i meteorologicznych) w funkcji czasu eksploatacji umożliwia:
- zdefiniowanie wymagań konstrukcyjnych dla izolatorów przeciwwzabrudzeniowych,
  - porównawczą ocenę różnych rozwiązań konstrukcyjnych (istniejących i projektowanych) w zależności od położenia pracy izolatorów,
  - określenie warunków doboru i oceny technicznej możliwości eksploatacyjnych izolatorów,
  - badania symulacyjne wpływu parametrów narażeń zabrudzeniowych, meteorologicznych i konstrukcyjnych na zmianę stanu powierzchni izolatorów.

2. Weryfikację zaproponowanego modelu matematycznego oparto na istniejących wynikach badań zmian konduktywności powierzchniowej izolatorów w naturalnych warunkach eksploatacyjnych. Z porównania wyników analitycznych i eksperymentalnych wynika, że model matematyczny właściwie opisuje zjawiska fizyczne zmiany stanu powierzchni izolatorów w czasie eksploatacji.

3. Opracowany program numeryczny stwarza możliwości wykorzystania zaproponowanego modelu matematycznego - oceny stanu powierzchni izolatorów - w praktyce eksploatacyjnej służb energetyki (dyspozycja mocy) i projektowej - przy projektowaniu układu izolacyjnego oraz doborze określonej konstrukcji izolatorów. Rozwój techniki pomiarów i przesyłu informacji oraz wykorzystanie techniki komputerowej umożliwia, przy zastosowaniu opracowanych modeli, bieżącą ocenę stopnia narażenia izolacji napowietrznej w.n.

#### Ad II

Opracowanie modelu matematycznego oceny wytrzymałości zabrudzeniowej i jej zależności od stanu powierzchni izolatorów wymagało uwzględnienia następujących faktów:

- a) Dotychczasowe metody analityczne wyznaczania poziomu napięcia przeskoiku zabrudzeniowego izolatorów nie mogą być przyjęte do praktyki inżynierskiej ze względu na zbyt duże różnice wyników obliczeniowych w porównaniu z wynikami badań laboratoryjnych.
- b) Nie ma modeli matematycznych pozwalających na ocenę wytrzymałości elektrycznej izolatorów w warunkach nierównomiernego zabrudzenia.
- c) Istnieją poważne różnice zdań co do roli i znaczenia poszczególnych parametrów konstrukcyjnych izolatorów w mechanizmie wyładowania zabrudzeniowego, a np. przyjęte do praktycznego stosowania (droga upływu) nie zostały potwierdzone praktyką badań laboratoryjnych i eksploatacyjnych.
- d) Zdaniem autora bez opracowania modelu matematycznego wyładowania zabrudzeniowego nie jest możliwy prawidłowy rozwój prac konstrukcyjnych, dobór izolatorów oraz ustalenie uzasadnionych warunków prowadzenia eksploatacji izolatorów w warunkach przemysłowego zanieczyszczenia atmosfery.

Z analizy uzyskanego modelu matematycznego wynikają następujące wnioski ogólne:

1. Opracowane na podstawie kryteriów zapłenu i rozwoju wyładowania zabrudzeniowego, modele matematyczne wytrzymałości elektrycznej w warunkach równomiernej i nierównomiernej warstwy zabrudzeniowej opisują właściwie mechanizm wyładowania zabrudzeniowego.

2. Wyniki uzyskane z modelu są wystarczająco zbliżone zarówno w sensie jakościowym, jak i ilościowym z charakterystykami eksperymentalnymi w równym stopniu dla różnych konstrukcji izolatorów dżugopniowych.

3. Przedstawione w pracy modele matematyczne zmiany wytrzymałości elektrycznej powierzchniowej izolatorów w warunkach zabrudzeniowych pozwalają na pogłębioną analizę wpływu parametrów konstrukcyjnych i czynników samooczyszczania. Jest to poważne ułatwienie i udokumentowanie prac nad konstrukcjami układów izolacyjnych do warunków zabrudzeniowych oraz stanowi



podstawę do opracowania kryterium technicznej oceny ich odporności zabrudzeniowej. Opracowany program numeryczny umożliwia symulacyjne badania roli i znaczenia parametrów konstrukcyjnych oraz weryfikację proponowanych rozwiązań układów izolacyjnych.

Ad III

Ocena odporności zabrudzeniowej izolatorów, tj. czasu do przeskoku zabrudzeniowego, jest podstawowym problemem dla służb eksploatacyjnych energetyki. Metodę oceny odporności zabrudzeniowej izolatorów opracowywano przy uwzględnieniu następujących faktów:

- a) Dotychczas brak jest metod, merytorycznie wystarczająco uzasadnionych, do oceny odporności zabrudzeniowej izolatorów. Zasady prowadzenia eksploatacji izolatorów na terenach o zanieczyszczonej atmosferze ustalane są na podstawie obserwacji zachowania się izolatorów w trudnych warunkach meteorologicznych oraz okresowych pomiarów wybranych parametrów narażeń zabrudzeniowych. Podstawę tych prac stanowi jednak doświadczenie osobiste i wycucie inżynierskie pracowników.
- b) Zaproponowana metoda oceny odporności zabrudzeniowej izolatorów w warunkach zabrudzeniowych jest syntezą wyników badań analitycznych i laboratoryjnych przedstawionych w rozdziale drugim i trzecim rozprawy.

Analiza wykorzystywania proponowanej metody - graficznej i numerycznej - do prac projektowych i eksploatacyjnych izolacji napowietrznej na terenach przemysłowych prowadzi do następujących wniosków:

1. Odporność zabrudzeniowa izolatorów jest własnością izolacji na terenach o zanieczyszczonej atmosferze uwarunkowaną:

- a) stanem powierzchni - opisanym charakterystyką stanu powierzchni izolatorów  $X_p = f(t_e)$ ;
- b) wytrzymałością elektryczną izolatorów - opisaną charakterystyką zabrudzeniową izolatorów,  $U_{pze} = f(X_p)$ ;
- c) poziomem narażeń napięciowych - z uwzględnieniem napięć roboczych i przepięć długotrwałych,  $U = f(U_{fn}, k^*)$ .

2. Z przedstawionej metodyki oceny odporności zabrudzeniowej izolatorów wynika, jak istotny wpływ na ich bezzakłóceniową pracę, oprócz narażeń zabrudzeniowych i napięcia roboczego, mają przepięcia długotrwałe (łączeniowe i dorywcze), opisane współczynnikiem  $k^*$ .

3. Opracowany program numeryczny uwzględnia istotne czynniki narażeń eksploatacyjnych i parametry konstrukcyjne izolatorów.

Wprowadzenie do programu na emc generatorów parametrów zmiennych losowych - charakteryzujących warunki eksploatacyjne - pozwoli na znaczne rozszerzenie możliwości praktycznych opracowanych modeli matematycznych i wprowadzenie badań symulacyjnych zwłaszcza w zakresie narażeń zabrudzeniowych i napięciowych, a tym samym podanie nowych możliwości warsztatowych pracy inżynierskiej.

4. Wykorzystanie proponowanej metody numerycznej oceny odporności zabrudzeniowej układów izolacyjnych w.n. na terenach przemysłowych stwarza możliwości nie tylko określenia okresu czasu pracy do przeskoku zabrudzeniowego, ale również ciągłego śledzenia stanu narażenia zabrudzeniowego. Ma to istotne znaczenie dla podjęcia właściwych działań związanych z zapewnieniem ciągłości zasilania odbiorców energii elektrycznej. To przyszłościowe rozwiązanie - po opracowaniu metod zbierania i przesyłu informacji terenowych do ośrodków dyspozycji mocy - może stać się zasadniczym czynnikiem poprawy niezawodności zabrudzeniowej układów przesyłowych w.n. na terenach o zanieczyszczonej atmosferze.

Opracowane modele matematyczne, metody i uogólnienia zastosowane do rozwiązywania zagadnień z problematyki zabrudzeniowej izolacji napowietrznej w rejonach o zanieczyszczonej atmosferze pozwalają nie tylko na usystematyzowanie i merytoryczne zdefiniowanie poszczególnych zadań technicznych, ale przede wszystkim pozwalają uwolnić się od szeregu dyskusyjnych założeń i współczynników.

Zdaniem autora za oryginalne osiągnięcia rozprawy można uznać w szczególności:

- koncepcję syntetycznego ujęcia problematyki zabrudzeniowej na podstawie modeli stanu powierzchni i wytrzymałości elektrycznej izolatorów;
- opracowanie metody analitycznej i numerycznej oceny stanu zabrudzenia powierzchni izolatorów;
- opracowanie nowych metod analitycznych badania wytrzymałości elektrycznej izolatorów w warunkach równomiernego i nierównomiernego (eksploatacyjnego) zabrudzenia powierzchni izolatorów,
- opracowanie programów numerycznych na emc modeli wytrzymałości elektrycznej izolatorów w warunkach zabrudzeniowych;
- zaproponowanie metodyki (graficznej i numerycznej) oceny czasu pracy izolatorów do przeskoku zabrudzeniowego;
- wskazanie dalszych kierunków prac nad doskonaleniem metod badań modelowych izolacji napowietrznej w.n. w warunkach zabrudzeniowych i ich zastosowaniem praktycznym.

W przedstawionych sposobach wykorzystania praktycznego wyników pracy - w zakresie projektowania (porównania różnych konstrukcji izolatorów) i oceny możliwości eksploatacyjnych - zawiera się znaczenie użytkowe i dydaktyczne pracy.

5.2. KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ

Opracowane modele matematyczne zweryfikowane na podstawie istniejących materiałów źródłowych będą wymagać w trakcie zastosowań praktycznych aktualizacji danych o stanie narażeń terenowych i napięciowych. W tym celu należy rozszerzyć zakres badań dotyczących:



- usystematyzowania i uściślenia parametrów zabrudzeniowych i meteorologicznych,
- opracowania metodyki określania danych oraz przesyłu i magazynowania informacji,
- parametrów przepięciowych - o częstotliwości zbliżonej do roboczej - w układach przesyłowych w.n., a nawet w poszczególnych miejscach pracy układu elektroizolacyjnego.

W celu przeanalizowania w szerokich granicach zmiany parametrów konstrukcyjnych istniejących oraz nowych rozwiązań konstrukcyjnych układów elektroizolacyjnych w.n. uzasadnione wydaje się być podjęcie prac dla opracowania programów na emc.

Dotychczasowe doświadczenia eksploatacyjne pokazują, że przeskoki zabrudzeniowe mają miejsce przy różnym poziomie zabrudzenia powierzchni izolatorów. Pomiaru konduktywności powierzchniowej wykonane po wyładowaniu pokazują wartości, przy których w warunkach badań laboratoryjnych poziom napięcia przeskoku jest znacznie wyższy od maksymalnego napięcia roboczego. Wskazywałoby to, że w momencie bezpośrednio przed wyładowaniem gwałtownie wzrosła konduktywność powierzchniowa izolatora lub też zmieniły się bardzo niekorzystnie narażenia napięciowe, albo obydwie przyczyny występują równocześnie. Należy więc wnioskować dalsze prace dotyczące racjonalnego prowadzenia eksploatacji izolacji linii i stacji w.n. na terenach o zanieczyszczonej atmosferze, które związane będą z dalszym rozwojem zaproponowanych modeli analitycznych.

Wydaje się, że dla pełniejszego opisu warunków eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych w.n. w rejonach o zanieczyszczonej atmosferze należy podjąć badania w celu wyjaśnienia wpływu zanieczyszczeń przemysłowych na wytrzymałość elektryczną układów izolacyjnych powietrznych - przerwy iskrowych. Wstępne prace autora [58] w tym przedmiocie wskazują, że sugestie takie nie są bezpodstawne i wymagają dalszych prac studialnych i laboratoryjnych. Pełne zbadanie tego zagadnienia może przyczynić się do uściślenia zależności opisujących zjawisko przeskoku zabrudzeniowego.

Potrzebne są również dalsze prace konstrukcyjno-wdrożeniowe przy wykorzystaniu materiałów syntetycznych (włókno szklane oraz żywice) o własnościach hydrofobowych. Trudności techniczne i ekonomiczne związane z przesyłem mocy - układami napowietrznymi - w rejonach zabrudzeniowych spowodują większe zainteresowanie przemysłu i energetyki lepszym wykorzystaniem istniejących rozwiązań modelowych i konstrukcyjnych.

## LITERATURA

### KSIĄŻKI I MONOGRAFIE

1. Aleksandrov G.N., Ivanov V.L., Kizevetter V.E.: Električeskaja pročnost naružnoi vysokovoltnoi izolacii. Energia, Leningrad 1962.
2. Aršanikov N.S., Malcev V.N.: Aerodynamika. PWN, Warszawa 1959.
3. Ciok Z.: Procesy łączeniowe w układach elektroenergetycznych. WNT, Warszawa 1983.
4. Gacek Z.: Niezawodność izolacji linii napowietrznych wysokiego napięcia na terenach przemysłowych. Zesz. Nauk. Pol. Śląskiej, Elektryka, nr 67, 1980.
5. Jaczewski M.: Koordynacja izolacji. Postępy techn. w.n., z. 6, PWN, 1966.
6. Juchniewicz J.: Przeskok zabrudzeniowy. Postępy techn. w.n. PWN, 1966.
7. Koćin W.E., Kibiel I.A.: Teoretičeskaja gidromechanika. Leningrad, 1948.
8. Kosztaluk R. i in.: Technika badań wysokonapięciowych. WNT, Warszawa 1985.
9. Mazin I.P.: Fizičeskie osnovy obledenija samoliotov. Gidrometeorizdat. Moskwa 1957.
10. Merchalev S.D., Sołomonik E.A.: Izolacija linii i podstancii v rajonach s zagriazniennoi atmosferoi. Energia, Leningrad 1973.
11. Pohl Z.: Izolatory wysokiego napięcia do warunków zabrudzeniowych. WNT, Warszawa 1968.
12. Pohl Z.: Izolacja wysokonapięciowa w warunkach zwiększonej upływności powierzchniowej. Pr. Nauk. Inst. Podst. Elektr. i Elektrotechn. Polić. Wrocławskiej, nr 10, seria: monografie nr 4, 1975.
13. Prosnak W.: Wykłady aerodynamiki. Wyd. Pol. Warszawskiej. z. 2, 1962.
14. Saferna J.: Praca izolatorów liniowych i stacyjnych w warunkach zabrudzeniowych. WNT, Warszawa 1968.
15. Sirotinskij L.L. i in.: Technika wysokich napięć. PWT, t. 1, Warszawa 1954.
16. Szpor S., Samuła J.: Ochrona odgromowa. t. 1, WNT, 1983.
17. Narodowy Atlas Polski. Wyd. PAN, 1979.

### ARTYKUŁY

18. Abilgaard E.H. i in.: Composite long rod insulators and their influence on the design of overhead lines. CIGRE, rap. 22-03 1976.
19. Aleksandrov G.N., Kizevetter V.E.: Razvitie razriada v dol provodiščei povierchnosti vysokovoltnoi izolacii v električeskich sietiach. Inv. Vyš. Uč. Zav. Energietika, nr 5, 1962. s. 20-27.



20. Aleksandrov G.N. i in.: Optimizacja formy stierżniowych izolatorów na osnovie stiekkopłastikow. Električestvo, nr 12, 1984, s. 7-11.
21. Alston L.L., Żołędziowski S.: Growth of discharges on Polluted Insulation. Proc. IEE, t. 110, z. 7, 1963, s. 1260-1266.
22. Alvarez A.E.C.: Povyšeniye effektivnosti ispolzovaniya stroitelnoi dliny i povierchnosti stierżniowych stiekkopłastikovych izolatorów pri zagriaznienii i uvlažnienii. Dissertacija na soiskaniye naucznoi stiepienii k.t.n. LPJ, Leningrad 1985.
23. Beatz H. i in.: New field experience with out door insulators pollution areas and methods of assessing the performance of insulation under conditions of pollution. CIGRE, rap. 212, 1964.
24. Baginskij M.P., i in.: Stierżniwyje izolatory s vintovymi riebrami. Električeskiye Stancji, nr 3, 1962, s. 74-76.
25. Bauer E.: Hochspannungsisolatoren aus Kunststoffen-Isoliertechnik der Zukunf. Elektrizitätswirtschaft, nr 8, 1976, s. 200-208.
26. Böhme H.: Elektrische Eigenschaften der Langstab Isolatoren. Hermannoder Techn. Mitt. nr 28, 1970.
27. Böhme H., Zeh H.: Schmutzablagerungen durch Wind an Isolatoren Elektrie, nr 7, 1967, s. 239-240.
28. Böhme E., Obenaus F.: Pollution flashover tests on insulators in the laboratory and in systems and the model concept creepage path flashover. CIGRE, rap. 407, 1966.
29. Buda J.A., Delnieko V.A.: Opyt ekspluatacji izolacji VL 35-220 kV v raionach zagriazniennoi atmosferoi. El. Stancji, nr 7, 1973, s. 74-75.
30. Czaplak W.: Izolatory wysokonapięciowe z tworzyw sztucznych do zastosowania w energetyce. Prace Nauk. Inst. Podst. Elektr. i Elektrotechniki Polit. Wrocławskiej nr 20/1980, s. 90-100.
31. Cherney E.A. i in.: Development and application of a new semiconducting glaze insulators to transmission lines. IEEE, Trans. P.A. a S., Pas-93, nr 5, 1974, s. 2117-2126.
32. Cron H., Dorsch H.: Proportioning transmission system insulation to service frequency overvoltages and switching surges with due consideration for loss of insulation strenght through foreign body surface layers. CIGRE, rap. 402, 1958.
33. Cron H.: Testing insulators with reproduceable foreign layers on their surface. CIGRE, rap. 203, 1956.
34. Cron H.: Die Kriechweglänge und das Stehvermögen von Isolatoren unter Fremdschichteinfluss und ihr Wert für die Auswahl der Isolierung für Ortliche Betriebsbedingungen. ETZ-A, t. 78, z. 23, 1957, s. 866-869.
35. Cron H.: Der Fremdschichtüberschlag. Siemens Zeitschrift, H. 10/11, 1955, s. 427/475.
36. Džuvarl Cz.M., Nurmaniedov T.A.: Vlijanie nieravnomiernosti zagriaznienija na razriadnyje charakteristiki girliand izolatorov. Dokł. A.N. Uzb. SSR, seria n.t. nr 11, 1969, s. 14-16.
37. El-Koshairy M.A.B., Rizk F.A.M.: Performance of EHV transmission line insulators under desert pollution conditions. CIGRE rap. 33-05, 1970.
38. Estorff W., Cron H.: Der Hochspannungsisolator als Fremdschichtproblem. ETZ-A, z. 3, 1952, s. 57-62.
39. Forrest I.S. i in.: International studies of insulator pollution problems. CIGRE, 1970, rap. 33-12.
40. Frischmann W.: Fremdschichtüberschlag und Fusspunktwanderung. Deut. Elektr. z. 7, 1957, s. 290-295.
41. Fukui H. i in.: A practical study on application of semiconducting glaze insulators to transmission lines. IEEE. Trans. P.A.aS. PAS-93, nr 5, 1974, s. 1430-1443.

42. Gion L., Meier H.: New insulator with helicoidal sheds for lines and high voltage apparatus. CIGRE, rap. 208, 1960.
43. Głuchov V.G., Mytarev M.M.: Rasčiet intensivnosti obledenija vysotnych sooruženii pri vypadenii pierieochčaždiennyh osadkov. Trudy GGO, vyp. 379, 1976.
44. Heise W., Köthe H.: Über das Isoliervermögen bei Betriebsfrequenter Wechselfpannung. ETZ-A, Bd. 87, nr 22, 1966, s. 777-782.
45. Heise W. i in.: Assessment of the solid layer artificial pollution tests. CIGRE, rap. 33-09, 1972.
46. Hirose W., i in. Switching surge insulation characteristics of insulators under polluted condition. CIGRE, 1972, rap. 33-02.
47. Hirsch F. i in.: Flashover of insulators under natural pollution and HVDC. Trans. P.A. a S., 1975, nr 1, s. 45-50.
48. Ilkowski K.: Badania izolatorów długopniowych zabrudzonych warstwa stażą. Prace Nauk. Inst. Podst. Elektr. i Elektrotechn. Pol. Wrocławskiej nr 14, seria: Konferencje nr 2, 1976, s. 26-29.
49. Ilkowski K.: Badania izolatorów 110-400 kV przy zabrudzeniu metoda powłoki płynnej. Pr. Nauk. Inst. Podst. Elektr. i Elektrot. Pol. Wrocławskiej, nr 20, seria: Konferencje nr 4, 1980, s. 28-36.
50. Ilkowski K., Pohl Z.: Technika badań wysokonapięciowych, t. 1, rozdz. 10. WNT, Warszawa 1985, s. 277-303.
51. Kałużny A.: Metoda wyznaczania odporności zabrudzeniowej izolatorów napowietrznych wysokiego napięcia. Prace Inst. Elektroener. i Sterowania Układów Pol. Śląskiej, 1977, s. 67-71.
52. Kałużny A.: Zastosowanie kloszy śrubowych do izolatorów wysokiego napięcia pracujących w warunkach zwiększonej upływności powierzchniowej. Praca doktorska. Pol. Śląska, Gliwice 1973.
53. Kałużny A.: Konstrukcje izolatorów długopniowych o pełnej samooczyszczalności. Zeszyty Naukowe Pol. Śląskiej Elektryka, nr 62, 1979, s. 163-170.
54. Kałużny A.: Analiza charakterystyki zabrudzeniowej izolatorów wysokiego napięcia w warunkach równomiernej warstwy zabrudzeniowej. Prace Inst. Elektroenergetyki i Sterowania Układów Pol. Śląskiej, Gliwice 1978, s. 97-110.
55. Kałużny A.: Wyznaczenie charakterystyki stanu zabrudzenia powierzchni izolatorów wysokiego napięcia. Zeszyty Naukowe Pol. Śląskiej Elektryka, z. 85, 1983, s. 31-43.
56. Kałużny A.: Jaki powinien być izolator przeciwbabrudzeniowy - pytanie wciąż aktualne. Energetyka nr 2, 1987, s. 56-59.
57. Kałużny A.: Wpływ warunków otoczenia na konduktywność powierzchniową warstwy zabrudzeniowej. Zeszyty Naukowe Pol. Śląskiej nr 689, Elektryka, z. 76, 1981, s. 81-89.
58. Kałużny A.: Wytrzymałość elektryczna powietrza zanieczyszczonego pyłem przemysłowym. Mat. Konf. Nauk. "Urządzenia Elektroenergetyczne - Izolacja Linii i Stacji WN". Bielsko-Biała 1983, s. 147-164.
59. Kałużny A.: Model matematyczny wyładowania elektrycznego po zabrudzonej i zawilgoconej powierzchni izolatora. Prace Naukowe Inst. Podst. Elektr. i Elektrot. Pol. Wrocławskiej, nr 24, seria: Konferencje nr 5, Wrocław 1986, s. 30-40.
60. Kelnar O., Kohutova D. i in.: Výzkum vztahu mezi provozním v laboratorním znečištěním izolatory. Výskumný Ústav Energetický, Praha 1970.
61. Kopeliowitch J.: Operating results of the H.V. Network of Israel from the point of view of insulator performance under pollution. CIGRE, rap. 228, 1964.



62. Korbust E.W. i in.: Vžagorazriadnyje charakteristiki izolatorov pri komutacionnyh pierienapriazhenijach. Izv. NIIPT, nr 17, 1971, s. 175-183.
63. Kosztaluk R., i in.: Pollution measuring contaminated insulators testing and choice of insulators. CIGRE, rap. 33-07, 1978.
64. Kosztaluk R., Saferna J.: Field investigations of line insulators in pollution areas. CIGRE rap. 33-13, 1972.
65. Kosztaluk R.: Narażenia zabrudzeniowe izolatorów i ich dobór w pracach CIGRE. Przegląd Elektr. nr 10, 1979, s. 437-440.
66. Krengauz E.B. i in.: Vžagorazriadnyje napriazhenija zagriazniennych aparatnyh izolatorov s razvitoi naružnoi povierchnostiu. El. Stan-cji, 1977, nr 7, s. 59-61.
67. Kucharski K.: Kryteria i ocena przydatności izolacji wysokonapięciowej do warunków zabrudzeniowych. Prace Nauk. Inst. Podst. Elektr. i Elektrotechn. Pol. Wr., nr 20, seria: Konferencje, nr 4, Wrocław 1980, s. 37-47.
68. Kucharski K.: Metody pomiaru przewodności powierzchniowej izolatorów zabrudzonych. Energetyka nr 3, 1975, s. 89-93.
69. Lambeth P.I. i in.: The salt fog artificial pollution test. CIGRE, rap. 25-08, 1968.
70. Lambeth P.I.: The use of semi-conducting glaze insulators. Electra nr 86, 1983.
71. Levšunov R.T. i in.: Opytnaja eksploatacja s glazurju o povysiennoi provodimosti. El. St., nr 8, 1968, s. 60-63.
72. Looms J.S.T.: Developments in composite insulators for transmission lines. Electr. Rev. (Gr. Brit.), nr 4, 1971, s. 117-118.
73. Macchiarelli B., Turner P.I.: Comparison of insulator types by the wet contaminant and clean fog test methods. IEEE Trans. P.A.a.S, nr 2, 1970, s. 190-197.
74. Majkopar A.S., Morozov K.P.: Vžagorazriadnyje charakteristiki izolatorov pri nieravnomiernom zagriaznienii. Električestvo nr 9, 1968, s. 17-20.
75. Merchalev S.D.: Zavisimost razriadnyh charakteristik zagriazniennych izolatorov v normalnom eksploatacionnom režimie ot ich konfiguracii. Izv. NIIPT nr 14, Leningrad 1968, s. 169-183.
76. Merchalev S.D., Sołomonik E.A.: Mechanizm razvitia razriada po provodjaščoj uvžazniennoi povierchnosti izolatorov pri dlitelnom vozdeistvii napriazhenija. Izv. NIIPT nr 11, Leningrad 1965, s. 3-18.
77. Merchalev S.D., Sołomonik E.A.: Vlijanie konfiguracii izolatorov na vybor dliny girland. V.L. El. St. nr 7, 1968, s. 89-93.
78. Merchalev S.D., Sołomonik E.A.: Vlijanie parametrov inspytatielnoi ustanovki na razriadnyje charakteristiki zagriazniennych izolatorov pri pieriemienom napriazhenii. Izv. NIIPT nr 11, Leningrad 1965, s. 105-121.
79. Nasser E.: Zum Problem des Fremdschichtüberschlagen an Isolatoren, ETZ-A, t. 83, z. 11, 1962, s. 356-365.
80. Nasser E.: Verhalten von Isolatoren bei unterschiedlich verteilter Fremdschicht. ETZ-A, t. 84, z. 11, 1963, s. 353-357.
81. Nikiforov E.P.: Razpriedielenije viesa gožoliedoobrazova. Trudy VNIIE, vyp. XI, 1961.
82. Obenaus F.: Fremdschichtüberschlag und Kriechweglänge. Deut. Elektr., t. 12, z. 4, 1958, s. 135-137.
83. Obenaus F.: Die Uberschlagspannung verschmutzter Isolatoren. Elektr. Ztschr., t. 56, H. 13, 1935, s. 369-370.

84. Obenaus F.: Kriechüberschlag von Isolatoren mit Fremdschichten. El. Wirtsch., z. 24, 1960, s. 878-882.
85. Obenaus F., Böhme H.: Laboratoriums - und Netzversuche mit verschmutzten Schirmisolatoren und Modellvorstellung vom Kriechüberschlag. Elektr. H. 11, 1966, s. 417-422.
86. Pilling J. i in.: Bewertung partieller Schichtleitfähigkeitsmessungen natürlich verschmutzter Isolatoren. Elektr. H. 11, 1982, s. 518-602.
87. Pohl Z., Skowroński J.I.: Wyniki badań laboratoryjnych i terenowych oraz doświadczalnej eksploatacji izolatorów przeciwzabrudzeniowych schodkowych typu LPZs 75/15. Prace Nauk. Inst. Podst. Elektr. i Elektrotechn. Pol. Wr. nr 20, seria: Konferencje nr 4, 1980, s. 79-84.
88. Pohl Z., Sojda E.: O niektórych zasadniczych zagadnieniach metodyki prób zabrudzeniowych. Prace Nauk. Inst. Podst. Elektr. i Elektrotechn. Pol. Wrocławskiej, nr 4, 1971, s. 109-119.
89. Ranachowski J., Winkler J.: Dobór kształtu izolatorów epoksydowych do warunków zabrudzeniowych. Przegl. Elektr., nr 6, 1966, s. 231-233.
90. Rizk F.A.M. i in.: Comparative tests on contaminated insulators with reference to desert conditions. CIGRE, 1972, rap. 33-03.
91. Rizk F.A.M.: Mathematical models for pollution flashover. Electra, nr 78, s. 71-108.
92. Saferna J.: Terenowa stacja 110 kV do badania izolacji w warunkach zabrudzeń przemysłowych. Przegl. Post. Techn. ZE, z. 1, Gliwice 1965.
93. Schlayer S.: Isolatoren und armaturen für Hochspannungsfreileitungen. Elektrizitätswirtschaft, nr 14, 1977, s. 462-464.
94. Seredyński J., Zaborowski B.: Izolator liniowy przeciwzabrudzeniowy LPZ 75/27 ze zmiennym wysięgiem kloszy. Konstrukcja i technologia. Pr. Nauk. Inst. Podst. Elektr. i Elektrotechn. Pol. Wrocławskiej, nr 20, seria: Konferencje nr 4, 1980, s. 74-78.
95. Seta T. i in.: A study of short-time AC flashover voltage of contaminated insulators and a consideration of its application to transmission line insulation design. IEEE Trans. P.A.a.S nr 5, 1976, s. 1723-1729.
96. Skowroński J.I., Pohl Z.: Nowa koncepcja izolatora napowietrznego do pracy w warunkach zabrudzeń pyłkami przemysłowymi. Przegl. Elektr., nr 7, 1966, s. 257-260.
97. Skowroński J.I.: Kierunki rozwoju izolatorów najwyższych napięć i metod ich badania. Mat. Semin. Izolatorowe, SEP i Inst. El., Kazimierz Dolny 1968, s. 1-10.
98. Sokołow S.G.: O projektirovanii vysokevoltnyh izolatorov dla rejonov s povysiennym zagriaznienijem. El. St., nr 7, 1962, s. 59-64.
99. Sołomonik E.A.: Issledovanie i rasčet razriadnyh charakteristik zagriazniennych izolatorov. Izv. NIIPT, nr 11, Leningrad 1965, s. 19-73.
100. Stannet A.W. i in.: Resin-bonded glass-fibre outdar h.v. insulators. Proc. of the Inst. of Elec. Eng. nr 2, 1969, s. 261-272.
101. Stępniewski T., Kałużny A.: Izolatory długopniowe przeciwzabrudzeniowe z kloszami daszkowymi i śrubowymi. Zeszyty Naukowe Pol. Śląskiej Elektryka, nr 28, 1970, s. 231-256.
102. Stępniewski T.: Wpływ formy konstrukcyjnej izolatorów na własności izolacyjne w warunkach zwiększonej upływności powierzchniowej. Mat. Konf. Nauk.-Techn., SEP, Gliwice 1965, s. 42-58.
103. Stępniewski T.: Wpływ ukształtowania elementów konstrukcyjnych na wytrzymałość zabrudzeniową izolatorów napowietrzných. Pr. Nauk. Inst. Podst. Elektr. i Elektrotechn. Pol. Wrocławskiej, nr. 20, seria: Konferencje nr 4, 1980, s. 64-73.



104. Stireli R.: Epoxydharze für die Elektroindustrie. Kunststoffe, nr 8, 1963, s. 541-546.
105. Streubel H.: Die Regenüberschlagwechselspannung von Isolatoren bei hoher Regenwasserleitfähigkeit und Unterschiedlicher Isolatorenlage. Hermsdorfer Techn. Mitt., nr 22, 1968, s. 696-700.
106. Sworzini M.: L'isolamento in atmosfera contaminata. L'Elektrotechnica, nr 3, 1972, s. 204-223.
107. Šamsijev A.S.: Vlijanje meteorološkičeskih faktorov na električeskiju pročnost girland izolatorov vozdušnyh linii elektropierieđač. Obzor Inst. Nauč. Techn. Inf., Duszanbe 1974.
108. Šamsijev A.S.: Issledovanije wlijanija formy izolatorov na ich vžagorazriadnyje napriazhenija v usłovijach Tadžykistana. Dissertacija na soiskanije naučenoj stiepeni k.t.n. LPI, Leningrad 1971.
109. Trusova V.N.: Issledowanije specjalnych konstrukcii opornych izolatorov pri različnyh vidach zagriaznenii. El. St. nr 8, 1967, s. 65-70.
110. Trusova V.N. i in.: Issledowanije podstancjonnoj izolacii v usłovijach zagriaznenija sołočakovoi pyliu i morskimi tumanami. El. St. nr 8, 1969, s. 65-71.
111. Trusova V.N. i in.: Issledovanija podstancjonnyh izolatorov v usłovijach zagriaznenija promyšlennymi unosami i sołočakovoi pyliu. El. St. nr 4, 1974, s. 17.
112. Verma M.P.: Isolierverhalten von Hochspannungs-Langstabisolatoren verschiedener Bauform unter natürlichen Fremdschichtbedingungen. ETZ-A, H.7, 1971, s. 407-413.
113. Verma H.P. i in.: Hochspannungs-Stützisolatoren unter natürlichen Fremdschichtbedingungen. ETZ-A, 1974, s. 98-105.
114. Vose F.C., Nicholas P.S.: A polymer insulator for high voltage transmission lines. Electrical Engineering, nr 11, 1963, s. 684-688.
115. Winkler J.: Pierwsze krajowe rozwiązania poprzeczników izolacyjnych z tworzyw sztucznych. Pr. Nauk. Inst. Pod. Elektr. i Elektrotechn. Pol. Wrocławskiej, nr 20, seria: Konferencje, nr 4, 1980, s. 101-110.
116. Wilkins R.: Flashover voltage of high voltage insulators with uniform surface pollution films. Proc. Inst. Electr. Eng. 116, nr 3, 1969, s. 457-465.
117. Żołędziowski S. i in.: The dynamic model of flashover along a conductive surface. Third Intern. Symp. on H.V. Engineering, Milano. Ref. 54-03, 1979.

#### PATENTY I WZORY UŻYTKOWE

118. Kałużny A.: Izolatory wysokiego napięcia. Patent, PRL, nr 59850.
119. Kałużny A. i in.: Izolator kołpakowy wysokiego napięcia. W.U. PRL, nr 29217.
120. Kałużny A., Kaczmarczyk A.: Sposób wykonania izolatora napowietrznego wysokiego napięcia z tworzywa sztucznego. Patent, PRL, nr 102940.
121. Stępniewski T., Zaborowski B.: Izolator napowietrzny wysokiego napięcia z kloszem śrubowym. Patent, PRL, nr 59897.

#### NORMY

122. PN-65/E-04060 - Próby izolacji napięciem przemiennym.
123. PN-74/E-04068 - Pomiarы wysokonapięciowe. Próby zabrudzeniowe izolacji napowietrznej.
124. PN-79/E-06303 - Urządzenia elektroenergetyczne wysokiego napięcia. Narażenia zabrudzeniowe izolacji napowietrznej i dobór izolatorów do warunków zabrudzeniowych.
125. PN-66/E-06308 - Elektroenergetyczne izolatory w.n. Izolatory liniowe. Wymagania ogólne i metody badań.
126. GOST-10390-71. Elektrooborudowanije vysokovo napriazhenija. Metody ispytanii električeskoj pročnosti vniešniej izolacii v usłovijach zagriaznenija.
127. IEC Document 36/00/43. Report on artificial pollution tests for H.V. insulators to be used on a.c. Systems. Publ. 507, 1975.
128. IEC Publication 60-1 High voltage test techniques. Part 1: General definitions and test requirements.
129. VDE 0448/Teil 1/10.75. Prüfung von Isolatoren für Betriebs-Wechselspannungen über 1 kV unter Fremdschichteinfluss.
130. IEC Publication 815: Guide for the selection of insulators in respect of polluted conditions. 1986.

#### OPRACOWANIA NIE PUBLIKOWANE

131. Janczur A. i inni: Badania metodowe tworzenia się warstwy zabrudzeniowej na izolatorach napowietrznych wysokiego napięcia. Praca dyplomowa inżynierska, Inst. EISU Pol. Śląskiej, Gliwice 1981.
132. Kucharski K. i in.: Ocena nowych konstrukcji liniowych izolatorów długopniowych. BBIS, ZE, Gliwice 1975.
133. Kucharski K.: Metoda statystycznej analizy wyników pomiarów parametrów zapylenia. Opr. BBIS, ZE, Gliwice 1974.
134. Stępniewski T., Kałużny A., i in.: Izolatory liniowe długopniowe przeciwbabrudzeniowe na nap. 110 kV. Dok. Techn. Pol. Śląskiej NB-37/DT cz. I, II i III, 1966-68.
135. Stępniewski T., Kałużny A.: Osłony ceramiczne dla izolatorów przepustowych transformatorowych w zakresie napięć 45-220 kV. Dok. Techn. Pol. Śląskiej NB-496/371/RE4/26/23/71.
136. Jawosch L., Dębowski W.: Badanie wytrzymałości elektrycznej powietrza zanieczyszczonego pyłem przemysłowym. Praca dyplomowa inżynierska. IEISU Pol. Śląskiej, 1986.



**METODY MODELOWE OCENY WŁASNOŚCI IZOLATORÓW NAPOWIETRZNYCH W.N.  
W WARUNKACH ZABRUDZENIOWYCH**

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

Przedmiotem monografii są zagadnienia oceny własności izolatorów wysokiego napięcia w warunkach przemysłowego zanieczyszczenia atmosfery. Scharakteryzowano rodzaje zabrudzeń i przeanalizowano warunki tworzenia się warstwy zabrudzeniowej w zależności od: parametrów konstrukcyjnych i położenia pracy izolatorów oraz czynników meteorologicznych i narażenia zabrudzeniowego. Opracowano model matematyczny i program numeryczny do analizy i oceny stanu powierzchni izolatorów w funkcji czasu eksploatacji. Wskazano na możliwości wykorzystania elektronicznych maszyn cyfrowych do badań analitycznych i symulacyjnych różnych rozwiązań konstrukcyjnych izolatorów w istniejących lub przewidywanych warunkach pracy.

Oporając się na analizie mechanizmu przeskoku zabrudzeniowego i wynikach badań eksperymentalnych opracowano nową metodę analizy i oceny wytrzymałości elektrycznej izolatorów z równomierną i nierównomierną warstwą zabrudzeń. Uzyskany model matematyczny opisuje zależność wytrzymałości elektrycznej izolatorów od ich parametrów konstrukcyjnych i konduktywności powierzchniowej warstwy zabrudzeń. Podano zależność natężenia pola elektrycznego, przeskoku zabrudzeniowego, od średnicy pnia i konduktywności powierzchniowej. Przeanalizowano zależność wytrzymałości elektrycznej od stopnia nierównomierności rozkładu warstwy zabrudzeń i warunki determinujące nierównomierny rozkład zabrudzeń na powierzchni izolatora. W zaproponowanym modelu matematycznym własność tę opisuje współczynnik nierównomiernego rozkładu warstwy zabrudzeniowej.

Przeprowadzono analizę porównawczą wyników obliczeń wytrzymałości elektrycznej - zabrudzeniowej - wg metody autora i metod znanych z literatury z wynikami badań eksperymentalnych z wielu ośrodków krajowych i zagranicznych.

Stwierdzono, że zaproponowane modele matematyczne z wystarczającą dokładnością dla praktyki inżynierskiej opisują zależność wytrzymałości elektrycznej od stopnia zanieczyszczenia powierzchni izolatorów. Opracowano program numeryczny, który pozwala na symulacyjne badania i porównania różnych rozwiązań konstrukcyjnych izolatorów przy różnych narażeniach zabrudzeniowych.

Zasady oceny przydatności eksploatacyjnej izolatorów, sformułowane w pracy, oparte są na analizie stanu narażenia zabrudzeniowego powierzchni i wytrzymałości elektrycznej - zabrudzeniowej - izolatorów. Opracowano metodę graficzną i numeryczną oceny czasu pracy - do przeskoku zabrudzeniowego - izolatorów w zadanych warunkach terenowych. Wskazano na znaczenie przepięć łączeniowych i dorywczych w warunkach eksploatacyjnych do oceny czasu pracy do przeskoku zabrudzeniowego izolatorów. Podane przykłady zastosowania praktycznego opracowanych metod do oceny konstrukcji izolatorów napowietrznych w.n.

Wykonane analizy i opracowane modele matematyczne oraz programy numeryczne umożliwiają merytoryczną ocenę i porównanie różnych rozwiązań konstrukcyjnych izolatorów oraz dobór i ocenę ich możliwości eksploatacyjnych w zadanych warunkach terenowych.



продолжительности работы до загрязнённого разряда изоляторов в заданных условиях. Указано на значение коммутационных перенапряжений в условиях эксплуатации для оценки продолжительности работы загрязнённых изоляторов. Даны примеры практического применения разработанных методов оценки конструкции наружных изоляторов высокого напряжения.

Выполненные анализы и разработанные математические модели, а также числовые программы позволяют на существенную оценку и сравнение различных решений конструкции изоляторов, подбор и оценку их эксплуатационных возможностей в заданных условиях эксплуатации.

МЕТОДЫ МОДЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ СВОЙСТВ ИЗОЛЯТОРОВ ВЫСОКОГО НАПЯЖЕНИЯ  
В УСЛОВИЯХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Резюме

Предметом монографии является вопрос оценки свойств изоляторов высокого напряжения в условиях промышленного загрязнения окружающей среды. Охарактеризованы виды загрязнения и проанализированы условия образования загрязнённого слоя в зависимости от: конструктивных параметров и положения работы изоляторов, а также от метеорологических факторов и подвержения загрязнению. Разработана математическая модель и числовая программа для анализа и оценки состояния поверхности изоляторов как функции продолжительности эксплуатации. Указаны возможности использования электронно-вычислительных машин для аналитических и симуляционных исследований различных конструктивных решений изоляторов в существующих или предполагаемых условиях работы.

На основе анализа механизма загрязнённого разряда и экспериментальных исследований разработан новый метод анализа и оценки электрической прочности изоляторов с равномерным слоем загрязнения. Полученная математическая модель описывает зависимость электрической прочности изоляторов от их параметров и конструкции, а также от проводимости поверхностного слоя загрязнения. Даны зависимости напряжённости электрического поля, загрязнённого разряда от диаметра ствола и поверхностной проводимости. Проанализированы зависимости электрической прочности от степени неравномерности распределения слоя загрязнения и условия детерминирующие неравномерное распределение загрязнения на поверхности изолятора. В предложенной модели это свойство описывается коэффициентом неравномерного распределения слоя загрязнения.

Проведён сравнительный анализ результатов расчётов электрической прочности изоляторов по методу автора и методов известных из литературы - и результатов экспериментальных исследований во многих научных центрах как в стране так и за границей.

Утверждается, что предложенные математические модели с достаточной точностью для инженерской практики описывают зависимость электрической прочности от степени загрязнения поверхности изоляторов. Разработана числовая программа, которая позволяет на симуляционные испытания и сравнение различных решений конструкции изоляторов при различных загрязнениях.

Основы оценки эксплуатационной пригодности изоляторов, сформулированные в работе, опираются на анализ состояния загрязнённой поверхности и электрической прочности изоляторов. Разработан графический метод и числовая оценка



MODEL METHODS OF ASSESSING OVERHEAD HV INSULATORS  
IN POLLUTED CONDITIONS

S u m m a r y

The subject of the investigation were the problem of assessing high voltage insulators in the conditions of industrial pollution of the atmosphere. Different kinds of pollution have been characterized and the conditions of forming of the pollution layer have been analyzed depending on the constructional parameters and the working positions of insulators, as well as meteorological factors and exposure to pollution. A mathematical model and a numerical program for the analyzing and assessment of the surface state of insulators in the function of operation time have been developed. Some possibilities of applying electronic digital computers to analytical and simulation studies of various constructional solutions of insulators in the existing or foreseen working conditions have been pointed out.

On the basis of an analysis of the mechanism of pollution flashover and the results of experimental tests a new method of analyzing and evaluating the electric strength of insulators with a uniform and non-uniform pollution layer has been elaborated. The mathematical model obtained describes the dependence of the electric strength of insulators on their constructional parameters and the conductivity of the surface pollution layer. The dependence of the electric field intensity, at pollution flashover, on rod diameter and surface conductivity has been given. The dependence of the electric strength on the degree of non-uniformity of the pollution layer distribution and the conditions determining the non-uniform distribution of pollution on the insulator surface have been analyzed. In the proposed mathematical model this property is described by the coefficient of non-uniform distribution of the polluted layer.

A comparative analysis of the calculation results of the electric - pollution strength acc, to the author's method and the methods known from literature with the experimental tests results in many home and foreign centres has been made.

It has been found that the mathematical models proposed describe sufficiently well for engineering practice, the dependence of the electric strength on the degree of surface pollution of insulators. A numerical program which permits simulation studies and comparison of various con-

structional solutions of insulators at various pollution hazards has been developed.

The principles of operational usability of insulators as formulated in the study are based on an analysis of the state of pollution hazard and electric - pollution strength of insulators. A graphic and numerical method of assessing the operating time until pollution flashover of insulators in the assigned site conditions has been elaborated. Emphasized has been the importance of switching and irregular overvoltage in operating conditions for the assessment of the operating time until pollution flashover of insulators. Examples of the practical applications of the method in the assessment of the construction of overhead h.v. insulators have been given.

The analyses made and the mathematical models elaborated, as well as the numerical programs make possible an essential evaluation and comparison of various constructional solutions, as well as a selection and assessment of their operational possibilities in the given site conditions



P.3347/88/112

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

- 44-100 Gliwice — Księgarnia nr 096, ul. Konstytucji 14 b  
44-100 Gliwice — Spółdzielnia Studencka, ul. Wrocławska 4 a  
40-950 Katowice — Księgarnia nr 015, ul. Zwirki i Wigury 33  
40-098 Katowice — Księgarnia nr 005, ul. 3 Maja 12  
41-900 Bytom — Księgarnia nr 048, Pl. Kościuszki 10  
41-500 Chorzów — Księgarnia nr 063, ul. Wolności 22  
41-300 Dąbrowa Górnicza — Księgarnia nr 081, ul. ZBoWiD-u 2  
47-400 Racibórz — Księgarnia nr 148, ul. Odrzańska 1  
44-200 Rybnik — Księgarnia nr 162, Rynek 1  
41-200 Sosnowiec — Księgarnia nr 181, ul. Zwycięstwa 7  
41-800 Zabrze — Księgarnia nr 230, ul. Wolności 288  
00-901 Warszawa — Ośrodek Rozpowszechniania Wydawnictw Naukowych PAN —  
Pałac Kultury i Nauki
- Wszystkie wydawnictwa naukowe i dydaktyczne zamawiać można poprzez Składnicę Księgarską w Warszawie, ul. Mazowiecka 9.