AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
im. Stanisława Staszica w Krakowie
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki

KATEDRA ELEKTROENERGETYKI

Rafał Tarko

MODELOWANIE ULOTU ELEKTRYCZNEGO DLA ANALIZY WARUNKÓW EKSPLOATACYJNYCH WYSOKONAPIĘCIOWYCH UKŁADÓW ELEKTROENERGETYCZNYCH

ROZPRAWA DOKTORSKA

Promotor:
Prof. dr hab. inż. Barbara Florkowska

Kraków 2007

Składam serdeczne podziękowania
Pani Profesor Barbarze Florkowskiej
za inspirację do podjęcia tematu tej Rozprawy
i pomoc przy jego realizacji.

Dziękuję Panu dr. hab. Wiesławowi Nowakowi
za wieloletnie wsparcie i współpracę,
która zaowocowała właściwym ukierunkowaniem
mojej drogi rozwoju naukowego.

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń 5

1. Wstęp 8

2. Warunki projektowania i eksploatacji wysokonapięciowych układów elektroenergetycznych 12

   2.1. Narażenia eksploatacyjne układów elektroenergetycznych 12

   2.2. Wytrzymałość elektryczna układów izolacyjnych 13

   2.3. Koordynacja izolacji 16

   2.4. Zjawisko ulotu elektrycznego w koordynacji izolacji 18

   2.5. Teoretyczne aspekty ulotu elektrycznego 23

      2.5.1. Warunki występowania ulotu elektrycznego 24

      2.5.2. Efekt biegunowości – wpływ ładunku przestrzennego 27

   2.6. Kryteria projektowe wynikające ze zjawiska ulotu elektrycznego 33

      2.6.1. Ulotowe straty mocy czynnej 33

      2.6.2. Hałas jako efekt ulotu elektrycznego 38

      2.6.3. Zakłócenia radioelektryczne 42

3. Analiza pola elektrycznego w liniach przesyłowych wysokiego napięcia 48

   3.1. Model matematyczny pola elektrycznego 48

   3.2. Obrazy pola elektrycznego w wybranych konstrukcjach linii przesyłowych 52

   3.3. Wpływ konstrukcji przewodów fazowych na rozkład pola elektrycznego 55

4. Modelowanie układów elektroenergetycznych dla analizy wpływu ulotu na warunki propagacji przepięć atmosferycznych 60

   4.1. Piorunowe zaburzenia elektromagnetycznego 60

   4.2. Model matematyczny linii elektroenergetycznych w warunkach ulotu ... 65

4.2.1. Istota modelu linii elektroenergetycznych 66
4.2.2. Modele linii długich 68
4.2.3. Implementacja modeli ulotu elektrycznego w modelach linii elektroenergetycznych 76
4.3. Modele konstrukcji wsporczych i uziomów w warunkach oddziaływania przepięć atmosferycznych 82
4.4. Modele stacji elektroenergetycznej w warunkach przepięć atmosferycznych 85
5. Analiza narażeń napięciowych układów elektroenergetycznych z uwzględnieniem odkształcenia i tłumienie fal przepięciowych 90
5.1. Estymacja parametrów σ_G i σ_C modelu ulotu elektrycznego 90
5.2. Programowa forma realizacji modelu ulotu elektrycznego w programie *EMTP-ATP* 93
5.3. Analiza porównawcza efektywności modeli ulotu elektrycznego 100
5.4. Analiza propagacji fal przepięciowych w liniach elektroenergetycznych 104
5.4.1. Jednotorowa linia przesyłowa o napięciu 400 kV 104
5.4.2. Dwutorowa linia rozdzielcza o napięciu 110 kV 106
5.5. Analiza narażeń przepięciowych rozdzielni elektroenergetycznych 110
6. Podsumowanie 118
Literatura 119

Wykaz ważniejszych oznaczeń

a – odstęp między przewodami linii
c – prędkość światła (prędkość fali w linii bezstratnej bez ulotu)
C_c – całkowita pojemność jednostkowa linii
C_d – pojemność dynamiczna
C_i – pojemność izolatora liniowego
C_{lp} – pojemność ładunku przestrzennego
C_p – pojemność przewodu
C_s – pojemność geometryczna
ΔC – przyrost pojemności wywołany zjawiskiem ulotu
d – średnica przewodu wiązki
D – średnica wiązki przewodowej
E_0 – natężenie początkowe ulotu elektrycznego w warunkach normalnych
E_k – natężenie krytyczne ulotu elektrycznego
$E_{\max}$ – największa skuteczna wartość natężenia pola elektrycznego na powierzchni przewodu
f – częstotliwość
$f(U)$ – funkcja gęstości rozkładu prawdopodobieństwa wartości przepięć
$G(U)$ – dystrybuanta wytrzymałości elektrycznej
h – wysokość przewodu nad ziemią
$[I]$ – wektor $n\times 1$ prądów fazowych
i_C – składowa pojemnościowa impulsu prądowego
I_{cr} – wartość szczytowa impulsu prądu
I_F – wartość szczytowa prądu pioruna
I_g – graniczna wartość prądu, po przekroczeniu której występuje jonizacja gruntu
i_G – składowa upływnościowa impulsu prądowego
k_C, k_G – stałe w modelu ulotu, charakterystyczne dla konstrukcji linii
K_{co} – stała tłumienia ulotowego
l – długość linii elektroenergetycznej
l_{ML} – długość odcinka modelu liniowego ML
Δl – długość odcinka linii w warunkach ulotu przy dyskteryzacji modelu
m_1 – współczynnik uwzględniający gładkość powierzchni przewodu
m_2 – współczynnik uwzględniający warunki pogodowe
M_K – margines koordynacyjny
N – liczba przewodów w wiązce
N_F – nakłady finansowe
O – poziom ochrony
p – ciśnienie powietrza
P – ulotowe straty mocy

$[P_u]$, $[P_i]$ – macierze współczynników prądu i napięcia
P_n – zredukowane straty mocy
PRR – współczynnik repetycji impulsów prądowych
q_C – ładunek związany z prądem i_C
q_G – ładunek związany z prądem i_G
q_{SC} – ładunek przestrzenny
R – niezawodność
r – promień przewodu
R – promień wiązki
r_D – odległość decyzji pioruna
r_e – promień zastępczy wiązki
R_u – udarowa rezystancja uziemienia
R_z – promień równoważny wiązki
S – stromość narastania fali przepięciowej
S_G, S_C – funkcje S_1 lub S_2 zależne od wartości i pochodnej napięcia węzłowego $u(t)$ w modelu ulotu
S_m – maksymalna stromość narastania prądu pioruna
T_1 – czas czoła
T_2 – czas do półszczytu
$[T_I]$ – macierz wektorów własnych $[P_i]$
$[T_U]$ – macierz wektorów własnych $[P_u]$
t_b – czas do przeskoku w przerwie iskrowej
T_d – czas trwania impulsu prądu
T_L – czas trwania fazy liderowej przeskoku
T_S – czas trwania fazy strimerowej przeskoku
Δt – opóźnienie wystąpienia określonej wartości napięcia U na czole fali
$[U]$ – wektor $n\times1$ napięć fazowych
$U(0)$ – napięcie w punkcie początkowym linii
$U(x)$ – napięcie w odległości x
U_0 – napięcie początkowe ulotu elektrycznego
U_{lp} – napięcie odpowiadające pojemności ładunku przestrzennego
U_m – wartość szczytowa napięcia
U_w – graniczne napięcia wytrzymywane
U_{50} – pięćdziesięcioprocentowe napięcie przeskoku
W – poziom wytrzymałości elektrycznej
$[Y]$ – macierz $n\times n$ jednostkowych admitancji poprzecznych własnych i wzajemnych
$[Z]$ – macierz $n\times n$ jednostkowych impedancji wzdłużnych własnych i wzajemnych
$[Z_M]$ – macierz impedancji wzajemnych
$[Z_W]$ – macierz impedancji własnych
$Z_{fmod(i)}$ – impedancja falowa i-tego modu propagacji
Z_T – impedancja falowa słupa

α_i – współczynnik tłumienia *i*-tego modu

β_i – współczynnik przesunięcia fazowego *i*-tego modu

δ – względna gęstość powietrza

δ_{ii} – współczynniki potencjałowe własne ($i = 1, \ldots, n$)

$\delta_{ij} = \delta_{ji}$ – współczynniki potencjałowe wzajemne ($i \neq j$; $i, j = 1, \ldots, n$)

ε_0 – przenikalność elektryczna próżni

γ – współczynnik określający procesy wtórne na katodzie

γ_g – konduktywność gruntu

η – współczynnik wychwytywania elektronów

ϑ – temperatura powietrza

$[\Lambda]$ – diagonalna macierz wartości własnych $[P]$

μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni

Π_k – współczynnik potencjałowy Maxwella

σ_C, σ_G – stałe charakterystyczne dla konstrukcji przewodu fazowego, polaryzacji i wartości szczytowej napięcia

$\hat{\tau}_1, \ldots, \hat{\tau}_n$ – gęstości liniowe ładunków przewodów

ξ – granica strefy ulotu

1. Wstęp

Przepięcia atmosferyczne stanowią szczególne, niekontrolowane źródło zaburzeń elektromagnetycznych. Wymagania ochrony przed nimi – w dobie intensywnego rozwoju komputeryzacji i technik informatycznych – stworzyły potrzebę kontynuowania badań w tej dziedzinie. Dotyczą one zarówno analiz teoretycznych propagacji przepięć w układach elektroenergetycznych, ochrony przeciwprzepięciowej, jak i aspektów teoretycznych i praktycznych koordynacji izolacji oraz badań podstawowych nad mechanizmami wyładowań elektrycznych w silnym polu elektrycznym.

W koordynacji izolacji przepięcia atmosferyczne mają zasadnicze znaczenie, bowiem ich wartości szczytowe przekraczają wielokrotnie najwyższe napięcia pracy urządzeń, stanowiąc podstawowe zagrożenia dla wytrzymałości elektrycznej układów izolacyjnych. Źródło przepięć atmosferycznych tkwi poza układem elektroenergetycznym – są to przepięcia pośrednie indukowane impulsem pola elektromagnetycznego pioruna oraz przepięcia bezpośrednie, powstające w wyniku bezpośrednich wyładowań do układu elektroenergetycznego. Przepięcia bezpośrednie stanowią najistotniejsze narażenia dla układów elektroenergetycznych wszystkich napięć znamionowych.

Mechanizm powstawania przepięć atmosferycznych bezpośrednich wynika ze złożonych zjawisk o charakterze nieliniowym oraz falowym, zachodzących w elementach konstrukcyjnych linii i stacji elektroenergetycznych w wyniku wprowadzenia do nich prądu pioruna. Do zjawisk tych należy ulot elektryczny, który jest charakterystyczny dla elektroenergetycznych linii przesyłowych wysokich i najwyższych napięć. Z punktu widzenia eksploatacji układów elektroenergetycznych ulot jest wyładowaniem niezupełnym przejściowym lub ustalonym, wymagającym ograniczania ze względu na straty mocy czynnej, zakłócenia elektromagnetyczne i akustyczne.

Ulot jako zjawisko o złożonym mechanizmie fizykalnym, odznaczającym się charakterystykami nieliniowymi, jest obiektem badań, mających na celu opracowanie modelu matematycznego, który – stanowiąc element modelu sieci lub systemu – mógłby służyć do analizy roli ulotu w procesie tłumienia przepięć. Skomplikowany mechanizm fizykalny ulotu sprawia, iż szczególne korzyści w rozpoznawaniu warunków propagacji przepięć w obecności inicjowanego ulotu przynoszą metody symulacyjne. Są one narzędziem doskonalenia metod projektowania i eksploatacji elektroenergetycznych linii przesyłowych i stacji.

Metody analizy narażeń przepięciowych są obecnie intensywnie rozwijane, a jednym z głównych kierunków jest opracowywanie kompleksowych modeli linii i stacji elektroenergetycznych, ujmujących i podkreślających istotne zjawiska determinujące kształt i poziom narażeń. Do zjawisk tych należy między innymi ulot elektryczny, który przyczynia się do obniżania i łagodzenia stromości przepięć.

Efektywna ocena narażeń przepięciowych wymaga opracowania modeli matematycznych oraz metod komputerowych symulacji układów elektroenergetycznych wysokich i najwyższych napięć, pozwalających na formułowanie wniosków zarówno o charakterze poznawczym, jak i użytkowym, mających zastosowanie w praktycznych rozwiązaniach koordynacji izolacji. Formułowane modele matematyczne tych zjawisk są złożonymi opisami matematycznymi, z których rozwiązania szczegółowe uzyskuje się przy zastosowaniu metod numerycznych i technik komputerowych. Dalszym efektem jest coraz szersze zastosowanie pakietów matematyki i specjalistycznego oprogramowania w uściślaniu procedur projektowania układów elektroenergetycznych, optymalnych pod względem technicznym oraz ekonomicznym.

Do tych grup problemów wpisuje się niniejsza rozprawa doktorska stanowiąca wkład w dziedzinie modelowania układów elektroenergetycznych z uwzględnieniem przejściowych zakłóceń elektromagnetycznych i niestabilnych wyładowań elektrycznych. Treść pracy zawarta jest w czterech zasadniczych rozdziałach.

Pierwszym z nich jest rozdział 2, w którym przedstawiono wybrane warunki projektowania i eksploatacji wysokonapięciowych układów elektroenergetycznych. Wskazano na koordynację izolacji jako zadanie optymalizacyjne, w którym poszukuje się rozwiązań technicznych, zapewniających maksimum niezawodności przesyłu i rozdziału energii elektrycznej przy minimalnych możliwych do poniesienia nakładach finansowych. Efektywne rozwiązanie tego zadania możliwe jest między innymi dzięki postępowi dokonującemu się w koordynacji izolacji, wynikającemu z rozwoju i doskonalenia komputerowych metod rozpoznawania narażeń przepięciowych, wykorzystujących zaawansowane modele matematyczne zjawisk dynamicznych w układach elektroenergetycznych, w tym modelu zjawiska ulotu elektrycznego. Efekt tłumienia i odkształcenia fal przepięciowych towarzyszących ulotowi elektrycznemu, zależny jest od biegunowości elektrody ulotowej (przewodu fazowego) oraz od mechanizmu rozwoju zjawiska ulotu w określonych warunkach w polu elektrycznym. W rozdziale 2 przedstawiono również warunki inicjowania ulotu elektrycznego i kompleksowy opis mechanizmu wyładowań ulotowych uwzględniający efekty biegunowości napięcia, wpływ ładunku przestrzennego oraz przejściowe stany udarowe w etapach ich inicjowania i rozwoju.

Końcową część rozdziału 2 poświęcono kryteriom projektowym wynikającym ze zjawiska ulotu elektrycznego, rozważając zagadnienia ulotowych strat mocy czynnej, hałasu i zakłóceń radioelektrycznych. Wskazano zarówno na negatywne aspekty zjawiska, jak i możliwości jego oceny metodami nowoczesnej diagnostyki elektroenergetycznych linii przesyłowych, poprzez detekcją obrazów fazowo-rozdzielczych wyładowań ulotowych z pokładu śmigłowca.

Rozdział 3 dotyczy analizy pola elektrycznego w liniach przesyłowych wysokiego napięcia. Znajomość rozkładu natężenia pola elektrycznego w elektroenergetycznych liniach napowietrznych wysokich i najwyższych napięć jest podstawą oceny zjawisk towarzyszących przesyłowi energii elektrycznej, w tym skutków ulotu elektrycznego. Stosując metodę ładunków symulowanych opracowano procedurę numeryczną obliczeń

rozkładu pola elektrycznego na powierzchni przewodów fazowych oraz w ich otoczeniu. Przy odpowiednich założeniach program Matlab umożliwił wyznaczenie rozkładów i obrazów pól elektrycznych. Obrazy te wykazują specyfikę powietrznych układów izolacyjnych elektroenergetycznych linii przesyłowych, jaką jest silna niejednostajność rozkładu pola elektrycznego. Efektem silnego pola elektrycznego na powierzchni przewodów linii napowietrznych i w ich otoczeniu są warunki dla inicjowania wyładowań elektrycznych w tym w postaci ulotu elektrycznego już przy napięciu roboczym. Jednym z zasadniczych czynników decydujących o powstawaniu tego zjawiska jest rozwiązanie konstrukcyjne przewodów fazowych linii. Dla oceny skutków oddziaływania ulotu istotna jest znajomość natężenia pola elektrycznego na powierzchni przewodów linii elektroenergetycznej. Obrazy pól elektrycznych na powierzchniach przewodów fazowych wskazują na przypadek szczególny, jakim są zmiany natężenia pola elektrycznego, będącego sinusoidalną funkcją konta biegunowego.

W rozdziale 4 przedstawiono opracowany w niniejszej rozprawie doktorskiej, złożony model układu elektroenergetycznego w warunkach propagacji fal przepięciowych, wywołanych bezpośrednim wyładowaniem piorunowym. Zasadniczym jego elementem jest model linii elektroenergetycznej w postaci niejednorodnej struktury, stanowiącej kaskadowe połączenie modeli cząstkowych. Modele cząstkowe reprezentują zasadnicze elementy konstrukcyjne linii, uwzględniając zachodzące w nich zjawiska o charakterze falowym i nieliniowym, w tym zjawisko ulotu elektrycznego i jego wpływ na tłumienie i odkształcenie fal przepięciowych. Istotnym elementem modelu jest zastosowanie teorii elektrogeometrycznej, która umożliwiła oszacowanie krytycznych wartości szczytowych prądów piorunowych, poniżej których możliwe jest uderzenie pioruna w przewód fazowy linii.

Modelowanie ulotu elektrycznego przeprowadzono bazując na jego makroskopowym modelu w postaci pojemności dynamicznej, wynikającej z zależności sumy ładunków powierzchniowego i przestrzennego w otoczeniu przewodu linii przesyłowej od wartości chwilowej napięcia udarowego. Model linii jest więc modelem różnicowym, w którym rozłożone parametry ulotu elektrycznego reprezentowane są w wybranych węzłach linii w postaci obwodów o stałych skupionych. Dokładność jego rozwiązania zależna jest od podziału linii, przy czym większa dokładność wymaga jej gęstszego podziału i większej liczby elementów reprezentujących ulot.

Stacja elektroenergetyczna jest istotnym elementem opracowanego modelu, wpływającym na poziom narażeń linii poprzez odbicie fali przepięciowej. Dla analizy narażeń przepięciowych wewnątrz stacji, konieczne jest dokładne odwzorowanie jej wyposażenia, ze względu na wewnętrzne efekty falowe, wpływające na poziom narażeń urządzeń i aparatów stacyjnych. Szczególne znaczenie posiada również dynamiczny model ogranicznika przepięć.

Dla programowej realizacji opracowanego modelu matematycznego układu elektroenergetycznego w warunkach propagacji fal przepięciowych i i ich tłumienia wskutek ulotu elektrycznego, wybrano renomowany pakiet *ElectroMagnetic Transients Program* (*EMTP*) w wersji *ATP* (*Alternative Transients Program*), który stanowi

obecnie w świecie podstawowe narzędzie komputerowej analizy układów elektroenergetycznych. Zaprezentowane modele stanowią istotne rozszerzenie możliwości zastosowań programu *EMTP-ATP* w obszarze koordynacji izolacji wysokonapięciowych układów elektroenergetycznych.

W rozdziale 5 przedstawiono aplikacje modeli do analizy narażeń przepięciowych układów elektroenergetycznych. Uzyskane wyniki mają duże znaczenie w aspekcie projektowania linii i stacji elektroenergetycznych wysokich oraz najwyższych napięć. Zaproponowano oryginalną procedurę estymacji parametrów modelu ulotu elektrycznego w oparciu o eksperymentalne krzywe $q-u$. Procedura ta stała się podstawą opracowania w środowisku *MATLAB* programów, przy pomocy których aproksymowano krzywe $q-u$, rozważając przy tym wpływ postaci funkcji załączających na jej wyniki. W rozdziale 5 przedstawiono również programową formę realizacji modelu ulotu elektrycznego w programie *EMTP-ATP*, który zrealizowano w postaci procedury *CORONA* w wewnętrznym języku programowaniu *MODELS* programu *EMTP-ATP*. Wyniki badań własności dynamicznych dotyczą różnych form programowej realizacji modelu ulotu elektrycznego. Zaprezentowano wyniki analizy porównawczej efektywności modeli ulotu elektrycznego, której celem było określenie dokładności i wrażliwości rozwiązania numerycznego na postać funkcji załączających oraz sposób dyskretyzacji linii długiej.

Analizie poddano warunki propagacji fal przepięciowych w wybranych liniach elektroenergetycznych wysokich i najwyższych napięć, rozpatrując między innymi wpływ wartości szczytowej fali na poziom jej tłumienia i odkształcenia w linii bezstratnej o długości nieskończonej, a także wpływ tłumienia oporowego w modelu rzeczywistego układu elektroenergetycznego. W końcowej części rozdziału 5 przedstawiono wpływ tłumienia ulotowego – jako jednego z czynników – determinujących wartości i kształt narażeń przepięciowych rozdzielni elektroenergetycznych, wywołanych bezpośrednim uderzeniem pioruna w przewód fazowy linii elektroenergetycznej zasilającej rozdzielnię.

2. Warunki projektowania i eksploatacji wysokonapięciowych układów elektroenergetycznych

2.1. Narażenia eksploatacyjne układów elektroenergetycznych

Urządzenia elektroenergetyczne podlegają w eksploatacji działaniu narażeń systemowych i środowiskowych, których odpowiednie parametry nie mogą przekraczać wartości kryterialnych, określających stopień odporności urządzenia [33].

Warunki środowiskowe są zewnętrznymi, w stosunku do układów elektroenergetycznych, warunkami fizycznymi, chemicznymi lub biologicznymi, na które układy te narażane są w eksploatacji. Warunki środowiskowe kształtowane są przez określone czynniki środowiskowe, np. temperaturę, wilgotność, ciśnienie, zanieczyszczenia, wibracje i udary sejsmiczne, wynikające przede wszystkim z oddziaływania przyrody.

Warunki systemowe są kształtowane przez narażenia prądowe oraz narażenia napięciowe. *Narażenia prądowe* związane są z przepływem prądów roboczych w warunkach obciążenia znamionowego oraz prądów zakłóceniowych w stanach przeciążeń i zwarć, a ich skutki mają charakter cieplny lub elektrodynamiczny. *Narażenia napięciowe* są podstawowym narażeniem układów izolacyjnych i stanowią je napięcia robocze, a także mające zasadnicze znaczenie *narażenia przepięciowe*, będące wzrostem napięcia roboczego powyżej najwyższego napięcia pracy urządzeń.

Narażenia napięciowe oddziałując na układy izolacyjne mogą prowadzić do ich uszkodzenia wynikającego z utraty wytrzymałości elektrycznej. Tym samym, niezawodność przesyłu i rozdziału energii elektrycznej zależy od niezawodności eksploatacji układów izolacyjnych, która z kolei uwarunkowana jest właściwą koordynacją izolacji układów elektroenergetycznych.

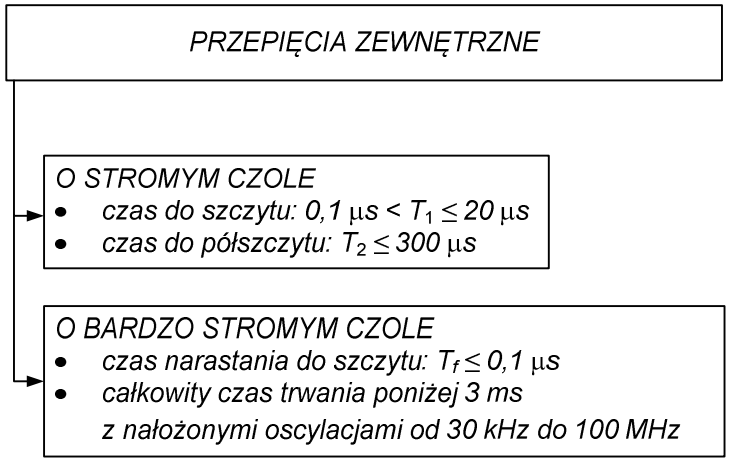
W koordynacji izolacji zasadnicze znaczenie mają przepięcia zewnętrzne, których wartości przekraczają wielokrotnie najwyższe napięcia pracy urządzeń, stanowiąc podstawowe zagrożenia dla wytrzymałości elektrycznej układów izolacyjnych.

Źródło *przepięć zewnętrznych* tkwi poza układem elektroenergetycznym – są to bowiem przepięcia atmosferyczne indukowane impulsem pola elektromagnetycznego pioruna oraz przepięcia bezpośrednie, powstające w wyniku bezpośrednich wyładowań do układu elektroenergetycznego. Przepięcia bezpośrednie stanowią największe zagrożenie dla układów elektroenergetycznych wszystkich napięć znamionowych.

W praktyce koordynacji izolacji nie są rozpatrywane przyczyny i mechanizmy przepięć zewnętrznych, podstawowe znaczenie ma odpowiedź układu izolacyjnego na

ich oddziaływanie, którą jest wartość wytrzymałości elektrycznej przy określonych parametrach impulsowych przebiegów przepięciowych.

W szczególności dotyczy to wartości szczytowej i stromości narastania przepięcia, czyli wartości pochodnej napięcia w pierwszej fazie wystąpienia zaburzenia. Z tego powodu norma [93, 94], dotycząca koordynacji izolacji, wprowadza podział na przepięcia o stromym czole i o bardzo stromym czole (rys. 2.1).



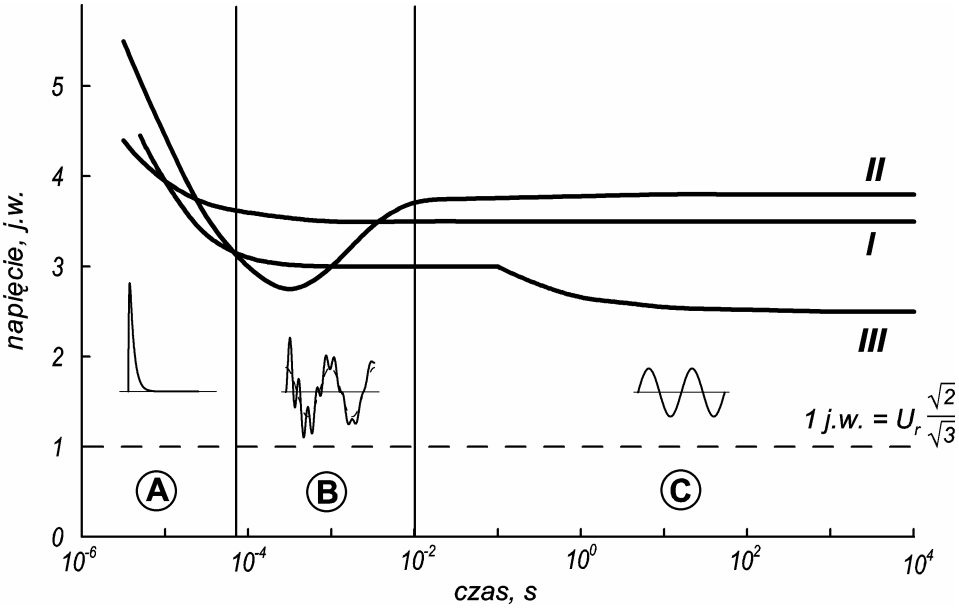
Rys. 2.1. Klasyfikacja przepięć według wymagań normatywnych [93] i [94]

Przepięcia doziemne występujące jednocześnie w różnych, niepołączonych ze sobą galwanicznie, częściach składowych układu elektroenergetycznego, zwane przepięciami kombinowanymi, są uwzględniane przy projektowaniu izolacji międzyfazowej a także przy koordynacji izolacji wzdłużnej.

2.2. Wytrzymałość elektryczna układów izolacyjnych

Problematyka pracy doktorskiej dotyczy wytrzymałości elektrycznej wielkich odstępów powietrznych (WOP), przy napięciach wysokich i najwyższych, która wykazuje zasadnicze różnice w stosunku do wytrzymałości układów izolacyjnych powietrznych średnich napięć oraz układów izolacyjnych stałych wewnętrznych (rys. 2.2).

Wytrzymałość elektryczna wielkich odstępów powietrznych (krzywa *II*, rys. 2.2) charakteryzuje się znaczną wytrzymałością dla udarów stromych i przepięć długotrwałych (obszary (A) i (C)) oraz stosunkowo niską wytrzymałością dla przepięć łączeniowych [99].



Rys. 2.2. Charakterystyki wytrzymałości elektrycznej układów izolacyjnych typowych urządzeń elektroenergetycznych [77]
I – izolacja powietrzna średnich napięć i SF_6, *II* – duże odstępy powietrzne, *III* – stała izolacja wewnętrzna; *A* – obszar przepięć piorunowych, *B* – obszar przepięć łączeniowych, *C* – obszar przepięć długotrwałych

Niezależnie od rodzaju izolacji, dla przepięć piorunowych występuje wzrost wytrzymałości elektrycznej w stosunku do wytrzymałości przy napięciu przemiennym o częstotliwości sieciowej. Jednak ze względu na realne wartości przepięć piorunowych powstających w układach elektroenergetycznych, stanowią one istotne zagrożenie izolacji i muszą być brane pod uwagą jako jej zasadnicze narażenie, niezależnie od napięcia znamionowego. Z tego względu, znajomość charakterystyki napięciowo-czasowej (charakterystyki udarowej) w obszarze (*A*), obrazująca wzrost wytrzymałości dla szybko narastających przepięć, ma w koordynacji izolacji istotne znaczenie.

Charakterystyczne jest występowanie minimum wytrzymałości elektrycznej dla przepięć łączeniowych biegunowości dodatniej. Minimalna wartość napięcia przeskoku, zwana również wytrzymałością krytyczną, zależy od wielkości i geometrii odstępu międzyelektrodowego oraz od czasu trwania czoła udaru łączeniowego. Wytrzymałość krytyczna musi być brana pod uwagę w koordynacji układów izolacyjnych najwyższych napięć.

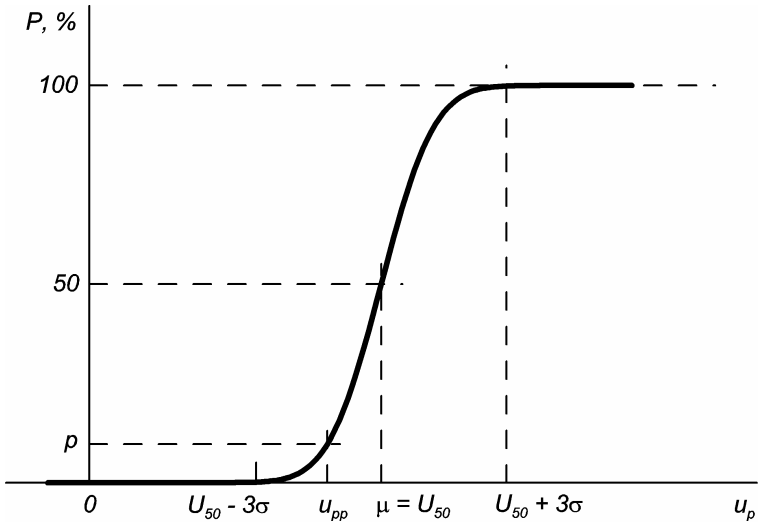
W skali makroskopowej wytrzymałość elektryczna izolacji urządzeń i zbudowanych z nich układów elektroenergetycznych, określana jest w postaci granicznych wartości napięć, po przekroczeniu których izolacja traci swe właściwości w postaci przeskoku w izolacji samoregenerującej albo przebicia w izolacji pozbawionej tej właściwości.

Wyładowanie elektryczne jest zjawiskiem losowym, a wartość przeskoku (przebicia) U_p jest ciągłą zmienną losową, dla której nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy, że podlega ona rozkładowi normalnemu $N(\mu,\sigma)$ o wartości oczekiwanej μ

i odchyleniu standardowemu σ [99]. Wytrzymałość elektryczna scharakteryzowana jest dystrybuantą zmiennej losowej U_p, określającą prawdopodobieństwo P zdarzenia losowego, że zmienna U_p nie przyjmie wartości większej niż u_p:

$$F(u_p) = P(U_p \le u_p) \tag{2.1}$$

Z formalnego punktu widzenia dziedziną wartości u_p zmiennej losowej U_p jest zbiór liczb rzeczywistych $u_p \in (-\infty, +\infty)$. W zakresie $u_p < 0$ rozkład normalny $N(\mu,\sigma)$ nie posiada interpretacji fizykalnej i dlatego powinien być stosowany rozkład normalny lewostronnie ucięty w punkcie $u_p = 0$. Z drugiej jednak strony dla realnie występujących względnych odchyleń standardowych $\bar{\sigma} = \sigma/\mu$ nieprzekraczających kilka-, kilkanaście procent [99] ucięcie rozkładu nie musi być stosowane (rys. 2.3), bowiem $F(0) \approx 0$.



Rys. 2.3. Statystyczny model wytrzymałości elektrycznej wyrażony rozkładem normalnym $N(\mu,\sigma)$

Parametry μ i σ rozkładu $N(\mu,\sigma)$, pozwalają wyrazić wytrzymałość elektryczną w postaci kwantyli u_{pp} rzędu p, którym odpowiada prawdopodobieństwo $P = p$:

$$u_{pp} = \mu + \sigma z_p \tag{2.2}$$

gdzie:

z_p – kwantyl rzędu p rozkładu normalnego unormowanego $N(0,1)$

Szczególną rolę odgrywa kwantyl rzędu 0,5, który nazywany jest pięćdziesięcioprocentowym napięciem przeskoku (przebicia) U_{50} i domyślnie traktowany jest jako wytrzymałość elektryczna. Należy zaznaczyć, że posługiwanie się tylko wartością U_{50} bez określenia odchylenia standardowego σ, daje tylko częściowy obraz wytrzymałości.

W pewnych przypadkach wygodnie jest posługiwać się jako miarą wytrzymałości elektrycznej nie wartością pięćdziesięcioprocentową, ale kwantylem zerowego rzędu, co pozwala określić graniczne napięcia wytrzymywane U_w przez układ izolacyjny. Teoretycznie nie jest to możliwe dla zakładanego rozkładu normalnego, jednak praktycznie napięcie wytrzymywane może być traktowane wówczas jako kwantyl bardzo niskiego rzędu.

2.3. Koordynacja izolacji

Koordynacja izolacji wysokonapięciowych układów przesyłu i rozdziału energii elektrycznej dotyczy wzajemnego zharmonizowania trzech podstawowych czynników związanych z eksploatacją układów elektroenergetycznych [77]:

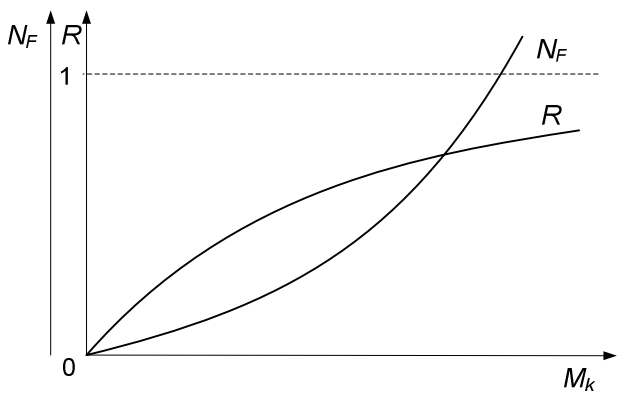
1) narażeń napięciowych układów izolacyjnych,
2) wytrzymałości elektrycznej układów izolacyjnych
3) środków i sposobów ochrony przed przepięciami.

W deterministycznym ujęciu procesu koordynacji izolacji, wymaganą niezawodność eksploatacyjną układów elektroenergetycznych – ze względu na niezawodną pracę układu izolacyjnego – uzyskuje się w wyniku przyjęcia odpowiedniego marginesu koordynacyjnego M_K:

$$M_K = W - O \tag{2.3}$$

będącego różnicą poziomu wytrzymałości elektrycznej W układu izolacyjnego i poziomu ochrony O, do którego obniżane są wartości szczytowe przepięć w wyniku zastosowanych środków ochrony.

Wielkość marginesu M_K wpływa nie tylko na niezawodność układu elektroenergetycznego, ale wpływa również na jego koszty (rys. 2.4).



Rys. 2.4. Wpływ marginesu koordynacyjnego M_K na niezawodność R i nakłady finansowe N_F układu izolacyjnego

Niezawodność eksploatacji R układu izolacyjnego zwiększa się wraz ze zwiększaniem szerokości marginesu koordynacyjnego M_K, lecz jednocześnie zwiększeniu ulegają również stosowne nakłady finansowe N_F, ponoszone na zwiększenie wytrzymałości elektrycznej układów izolacyjnych (np. zastosowanie urządzeń o wyższym poziomie napięcia probierczego) lub na rozbudowę systemu ochrony odgromowej i przepięciowej. Ponadto, szerokość marginesu koordynacyjnego uwzględniać powinna nie tylko środowiskowe i systemowe warunki eksploatacji układów elektroenergetycznych, lecz także zmiany charakterystyk i parametrów w czasie oraz rozrzut technologiczny urządzeń.

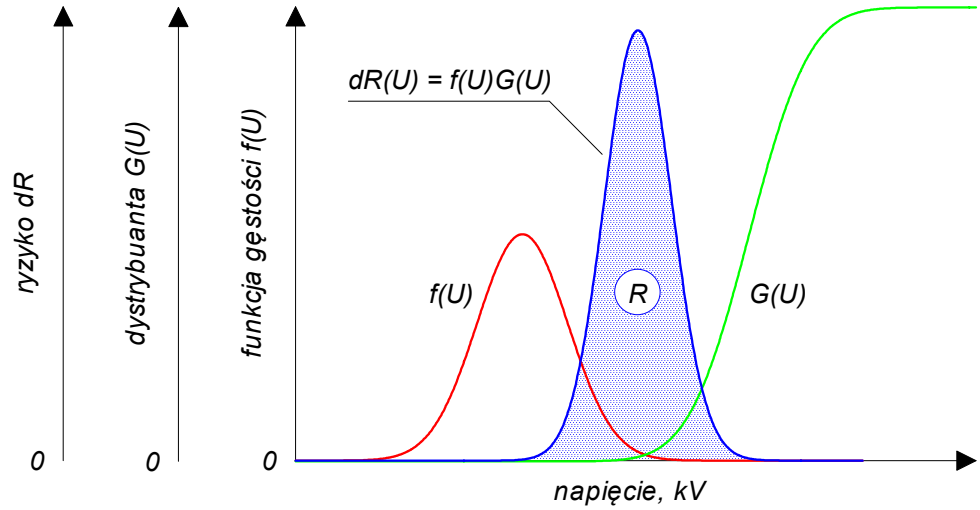
W rzeczywistości, margines koordynacyjny nie jest wielkością deterministyczną, lecz zmienną losową, uwarunkowaną losowością wytrzymałości elektrycznej i narażeń przepięciowych oraz losowością charakterystyk środków ochronnych. W tym ujęciu, wymiarowanie układu izolacyjnego przeprowadzane jest w oparciu o ryzyko (prawdopodobieństwo) uszkodzenia (rys. 2.5), wyrażone następującą zależnością [94]:

$$R = \int_0^\infty f(U)G(U)dU \tag{2.4}$$

gdzie:

$f(U)$ – funkcja gęstości rozkładu prawdopodobieństwa wartości przepięć [82, 83, 84],

$G(U)$ – dystrybuanta wytrzymałości elektrycznej.



Rys. 2.5. Ryzyko uszkodzenia układu izolacyjnego

Koordynacja izolacji w ujęciu zarówno deterministycznym, jak i w ujęciu statystycznym, jest de facto zadaniem optymalizacyjnym, w którym poszukuje się

rozwiązań technicznych zapewniających maksimum niezawodności przy minimalnych możliwych do poniesienia nakładach finansowych. Efektywne rozwiązanie tego zadania możliwe jest między innymi dzięki postępowi dokonującemu się w koordynacji izolacji, wynikającemu z rozwoju i doskonalenia:

- środków i metod ochrony odgromowej oraz przeciwprzepięciowej,
- technologii urządzeń elektroenergetycznych, umożliwiających wzrost wartości roboczych natężeń pól elektrycznych,
- komputerowych metod rozpoznawania narażeń przepięciowych, wykorzystujących zaawansowane modele matematyczne zjawisk dynamicznych w układach elektroenergetycznych.

2.4. Zjawisko ulotu elektrycznego w koordynacji izolacji

Przepięcia atmosferyczne stanowią najistotniejszą grupę narażeń eksploatacyjnych układów elektroenergetycznych w całym zakresie stosowanych napięć znamionowych. Mechanizm ich powstawania wynika ze zjawisk o charakterze nieliniowym oraz falowym, zachodzących w elementach konstrukcyjnych linii i stacji elektroenergetycznych. Formułowane modele matematyczne tych zjawisk są złożonymi opisami matematycznymi, z których rozwiązania szczegółowe uzyskuje się przy zastosowaniu metod numerycznych i technik komputerowych. Metody teoretyczne analizy narażeń przepięciowych są obecnie intensywnie rozwijane, a jednym z kierunków jest opracowywanie kompleksowych modeli linii i stacji elektroenergetycznych, ujmujących i podkreślających istotne zjawiska determinujące kształt i poziom narażeń. Do zjawisk tych należy między innymi ulot elektryczny, który przyczynia się do obniżania i łagodzenia stromości przepięć [59]. Efekt tego oddziaływania zależy od biegunowości elektrody ulotowej (przewodu fazowego) oraz od mechanizmu rozwoju zjawiska ulotu w określonych warunkach w polu elektrycznym. W szczególności dotyczy to warunków generowania ładunków przestrzennych w otoczeniu przewodów fazowych linii napowietrznej oraz ich wpływu na rozkład natężenia pola elektrycznego w tym obszarze. Warunki inicjowania ulotu elektrycznego oraz podstawowy opis jego rozwoju przedstawiono w podrozdziale 2.5 niniejszej pracy.

Obniżanie wartości szczytowych i łagodzenie stromości narażeń przepięciowych jest z punktu widzenia koordynacji izolacji bardzo korzystne. Według klasycznej literatury zagadnienia [16, 61, 109] obniżenie wartości szczytowej fali przepięciowej propagującej wzdłuż linii elektroenergetycznej, może być wyrażone doświadczalnym wzorem Fousta i Mengera [61]:

$$U(x) = \frac{U(0)}{1 + kU(0)x} \tag{2.5}$$

gdzie:

$U(0)$ – napięcie w punkcie początkowym linii w kV,

x – odległość przebyta przez falę w km,

$U(x)$ – napięcie w odległości x w kV,

k – współczynnik doświadczalny, określany na podstawie pomiarów fal w liniach elektroenergetycznych.

Wartości współczynnika k zawierają się w zakresie od $0{,}05 \cdot 10^{-3}$ do $0{,}6 \cdot 10^{-3}$, przy czym współczynnik ten jest większy dla fal dodatnich, co oznacza, że amplituda tych fal maleje bardziej pod wpływem ulotu. Na rysunku 2.6 przedstawiono tłumienie $U(x)/U(0)$ wartości szczytowej fali, jako funkcje napięcia, odległości x i napięcia $U(0)$, wyznaczone dla typowych wartości współczynników k, które według A. Rotha [61] wynoszą $0{,}4 \cdot 10^{-3}$ dla ulotu dodatniego oraz $0{,}2 \cdot 10^{-3}$ dla ulotu ujemnego. Wykresy na rysunku 2.6 świadczą o bardzo istotnej roli ulotu w obniżaniu poziomu narażeń przepięciowych układów elektroenergetycznych.

Przy wyprowadzeniu wzoru Fousta-Mengera zakłada się, że straty energii związane z ulotem są proporcjonalne do trzeciej potęgi wartości szczytowej fali, a pojemność linii jest wielkością niezależną od wartości napięcia. Wzór ten należy traktować jako wzór przybliżony o charakterze empirycznym, w którym współczynnik k zależy od wielu parametrów.

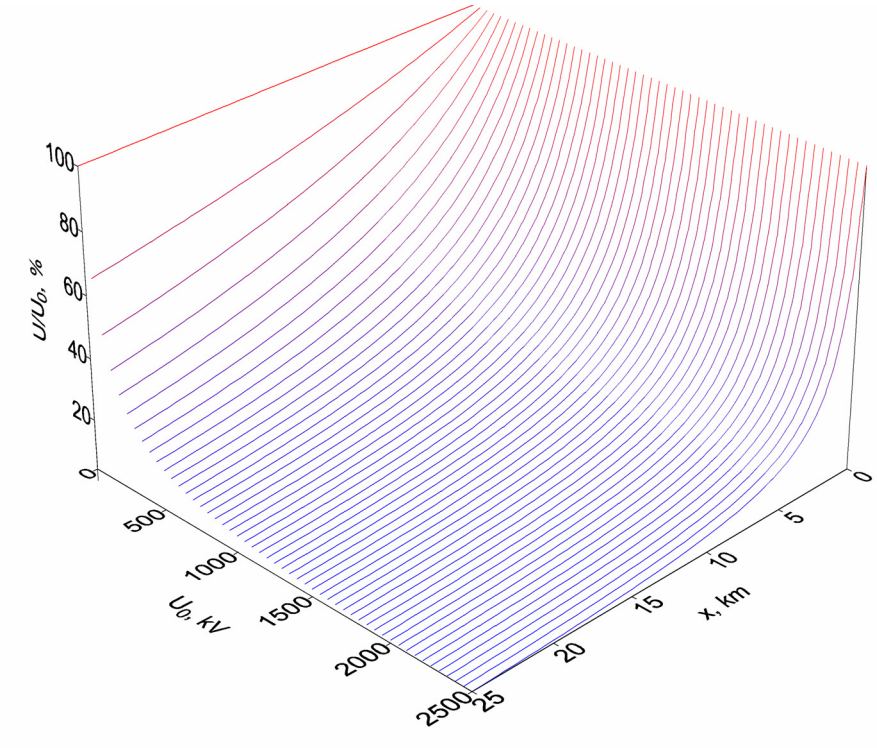
Ulot elektryczny powoduje również zmniejszenie prędkości fazowych dla napięć na czole fali. Każda wartość napięcia na czole fali, przekraczająca napięcie początkowe ulotu, ma prędkość fazową tym mniejszą, im większa jest wartość napięcia [16, 61]. Towarzyszy temu również opóźnienie danej wartości napięcia na czole fali w stosunku do przesuwania się jej z prędkością w linii przesyłowej, w której ulot nie występuje (rys. 2.7).

Zmiana prędkości fazowej oraz opóźnienie Δt osiągnięcia przez falę przepięciową określonej wartości napięcia U, po przebyciu przez nią drogi x (rys. 2.7), wynika z dynamicznej charakterystyki ładunkowo-napięciowej linii przesyłowej, w której występuje ulot elektryczny (rys. 2.8).

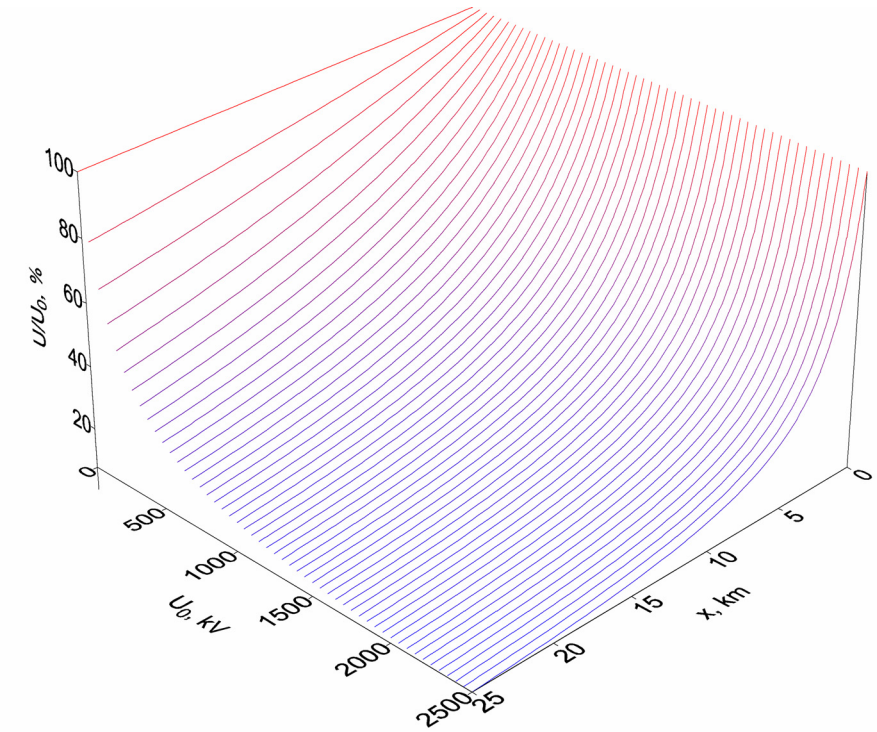
Przy narastającym napięciu u, ładunek q gromadzony w linii elektroenergetycznej zależy początkowo od jej pojemności geometrycznej C_s. Po osiągnięciu i przekroczeniu napięcia początkowego ulotu elektrycznego U_0, ładunek ten zwiększa się ze wzrostem napięcia, szybciej niż wynika to z pojemności geometrycznej linii przesyłowej C_s. Różnica ta jest spowodowana wzrostem pojemności ΔC i jest odwzorowana w modelu linii elektroenergetycznej za pomocą pojemności dynamicznej C_d (na przykład [90]):

$$C_d = \frac{dq}{du} \tag{2.6}$$

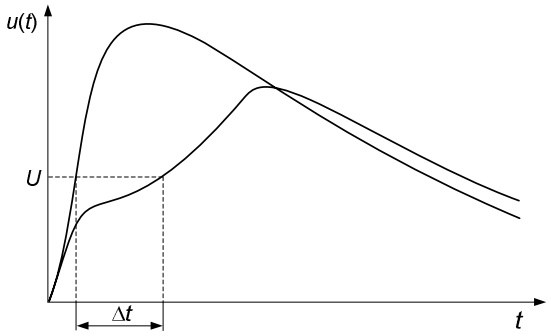
a)



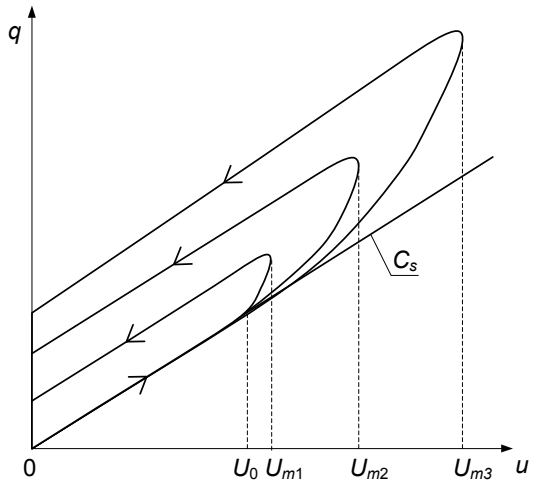
b)



Rys. 2.6. Zależność tłumienia $U(x)/U(0)$ wartości szczytowej fali przepięciowej od drogi x przebytej przez falę i od napięcia $U(0)$ w punkcie początkowym linii przesyłowej: a) ulot dodatni, b) ulot ujemny



Rys. 2.7. Deformacja fali przepięciowej propagującej w linii elektroenergetycznej na skutek zjawisk ulotowych; Δt – opóźnienie wystąpienia określonej wartości napięcia U na czole fali



Rys. 2.8. Dynamiczne charakterystyki ładunku q od napięcia u linii elektroenergetycznej w warunkach ulotu elektrycznego [76]; U_0 – napięcie początkowe ulotu, U_m – wartość szczytowa udaru napięcia, C_s – pojemność geometryczna linii

Pojemność dynamiczna C_d zwiększa się w miarę wzrostu napięcia, aż do momentu osiągnięcia wartości szczytowej U_m. Dla opadającej części fali napięciowej charakterystyka $q - u$ przebiega w przybliżeniu równolegle do części charakterystyki odpowiadającej pojemności geometrycznej C_s. Zakładając, że o prędkości propagacji wzdłuż linii danego punktu fali przepięciowej decyduje chwilowa wartość pojemności, prędkość fazowa v określona jest wzorem [16, 61]:

$$v = \frac{1}{\sqrt{L\left(C_s + \Delta C\right)}} = \frac{1}{\sqrt{LC_s}} \frac{1}{\sqrt{1 + \dfrac{\Delta C}{C_s}}} = \frac{c}{\sqrt{1 + \dfrac{\Delta C}{C_s}}} \tag{2.7}$$

gdzie:

ΔC – przyrost pojemności wywołany zjawiskiem ulotu,

c – prędkość światła (prędkość fali w linii bezstratnej bez ulotu).

Opóźnienie Δt, (rys. 2.7) na czole fali propagującej z prędkością v w linii przesyłowej w warunkach ulotu, względem fali w linii, w której zjawisko ulotu nie występuje, określa wzór:

$$\Delta t = \frac{x}{c}\left(\sqrt{1+\frac{\Delta C}{C_s}}-1\right) \tag{2.8}$$

Prędkość v (m/s) przesuwania się napięcia u o dowolnej wartości przekraczającej napięcie początkowe ulotu U_0 wyrazić można wzorem [111]:

$$v = \frac{0{,}87c}{\sqrt{1+\frac{U-U_0}{k}}} \tag{2.9}$$

gdzie:

c – prędkość światła w m/s,

U, U_0 – napięcie w kV,

$k = 15 + 120h$ – przy biegunowości dodatniej fali,

$k = 50 + 275h$ – przy biegunowości ujemnej fali,

h – wysokość przewodu nad ziemią.

Redukcja wartości szczytowych i łagodzenie stromości przepięć przez ulot elektryczny w liniach elektroenergetycznych jest zjawiskiem bardzo korzystnym z punktu widzenia koordynacji izolacji stacji elektroenergetycznych. Przepięcia w rozdzielniach i stacjach elektroenergetycznych zależą od wartości szczytowej i kształtu fal docierających z przewodów linii napowietrznych, jak również od zjawisk falowych zachodzących wewnątrz samej rozdzielni. Według założeń normy [94] dla stacji całkowicie lub częściowo pozbawionych ograniczników przepięć, najważniejszym parametrem określającym poziom narażeń napięciowych jest wartość szczytowa występujących przepięć. W przypadku stacji chronionych ogranicznikami przepięć, najważniejszymi parametrami są stromość przepięcia i odległość między ogranicznikiem przepięć a rozpatrywanym urządzeniem.

Stromość nadchodzącej fali jest ograniczana głównie przez tłumienie ulotowe w linii napowietrznej. Norma [94] zaleca następujący wzór do jej szacowania:

$$S = \frac{1}{nK_{co}X} \tag{2.10}$$

gdzie:

S – stromość narastania fali przepięciowej w kV/μs,

n – liczba linii napowietrznych dołączonych do stacji; w przypadku słupów wielotorowych, biorąc pod uwagę jednoczesne przeskoki odwrotne, zalecane jest podzielenie tej liczby przez dwa,

K_{co} – stała tłumienia ulotowego w μs/(kV·m) według tabeli 2.1,

X – odległość między miejscem uderzenia pioruna a stacją, w m.

Tabela 2.1. Stałe tłumienia ulotowego K_{co} [94]

Układ przewodów	K_{co}, μs/(kV·m)
Pojedynczy przewód	$1{,}5 \cdot 10^{-6}$
Wiązka dwuprzewodowa	$1{,}0 \cdot 10^{-6}$
Wiązka trzy- lub czteroprzewodowa	$0{,}6 \cdot 10^{-6}$
Wiązka sześcio- lub ośmioprzewodowa	$0{,}4 \cdot 10^{-6}$

Wzór (2.10) opiera się na założeniu, że odległości między chronionym urządzeniem a miejscami dołączenia linii napowietrznych są takie, że czasy przebiegu fali są mniejsze od połowy czasu fali nadchodzącej. Dla wyznaczenia rzeczywistych przepięć wynikających z nadchodzącej fali, założenie to może być jednak nieprawdziwe.

W rzeczywistości problem ten jest bardziej złożony, zważywszy na złożone zjawiska zachodzące w układach elektroenergetycznych przy wyładowaniach atmosferycznych. Efektywna ocena narażeń przepięciowych wymaga więc opracowania modeli matematycznych oraz metod komputerowych symulacji układów elektroenergetycznych wysokich i najwyższych napięć, pozwalających na formułowanie wniosków zarówno o charakterze poznawczym, jak i użytkowym, mających zastosowanie w praktycznych rozwiązaniach koordynacji izolacji. Dalszym tego efektem jest coraz szersze zastosowanie pakietów matematyki i specjalistycznego oprogramowania w uściślaniu procedur projektowania układów elektroenergetycznych, optymalnych pod względem technicznym oraz ekonomicznym.

2.5. Teoretyczne aspekty ulotu elektrycznego

Ulot elektryczny – zjawisko charakterystyczne dla elektroenergetycznych linii przesyłowych wysokich i najwyższych napięć – jest wyładowaniem niezupełnym w silnym polu elektrycznym o wartości przekraczającej natężenie początkowe jonizacji w powietrzu w danych warunkach atmosferycznych. Z punktu widzenia eksploatacji układów elektroenergetycznych, ulot jest przejściowym lub ustalonym wyładowaniem strimerowym, wymagającym ograniczania ze względu na straty mocy czynnej, generowane zakłócenia radioelektryczne i akustyczne. W przypadku linii elektroenergetycznych o napięciu większym niż 220 kV, na etapie ich projektowania wprowadzane są

odpowiednie rozwiązania konstrukcyjne przewodów fazowych dla zmniejszenia natężenia pola elektrycznego i eliminowania ulotu w warunkach znamionowych.

2.5.1. Warunki występowania ulotu elektrycznego

Mechanizm ulotu elektrycznego zależy od wielu czynników, w tym od: rozkładu natężenia pola elektrycznego w otoczeniu przewodów fazowych linii napowietrznej, ich biegunowości, warunków atmosferycznych [30]. W technicznych układach izolacyjnych wielkością charakteryzującą warunki inicjowania ulotu jest natężenie początkowe ulotu E_0 i odpowiadające mu napięcie początkowe U_0.

W układzie modelowym elektrod przewód – płaszczyzna (rys. 2.9), reprezentującym pojedynczy przewód linii napowietrznej i płaszczyznę jako ziemię odniesienia, gradient napięcia zmienia się w przestrzeni międzyelektrodowej, a strefa ulotu jest ograniczona do najbliższego otoczenia przewodu fazowego [30, 112]. Ulot przy natężeniu pola E_0 jest niewidoczny i niesłyszalny, natomiast przy wyższym napięciu elektroda ulotowa pokrywa się świetlącą warstwą, a zjawisku towarzyszą charakterystyczne efekty akustyczne.

W mechanizmie rozwoju wyładowania ulotowego zasadniczą rolę odgrywa ładunek przestrzenny, którego koncentracja i wpływ na rozkład pola elektrycznego, zależą od biegunowości elektrody ulotowej. Strefa ładunku przestrzennego oznacza granicę strefy ulotu ξ, którą wyznacza promień r_u (rys. 2.9) w każdym z punktów, w którym natężenie pola elektrycznego $E < E_0$. Jeżeli napięcie przewodu względem ziemi przekracza napięcie początkowe ulotu U_0, na jego powierzchni występuje początkowe natężenie pola elektrycznego E_0, któremu według praw elektrostatyki odpowiada napięcie U_0 i ładunek q_0 (2.11), a w otoczeniu przewodu pojawia się ładunek przestrzenny q_{lp} (2.12):

$$q_0 = U_0 \cdot C_p \tag{2.11}$$

$$q_{lp} = U_{lp} \cdot C_{lp} \tag{2.12}$$

gdzie:

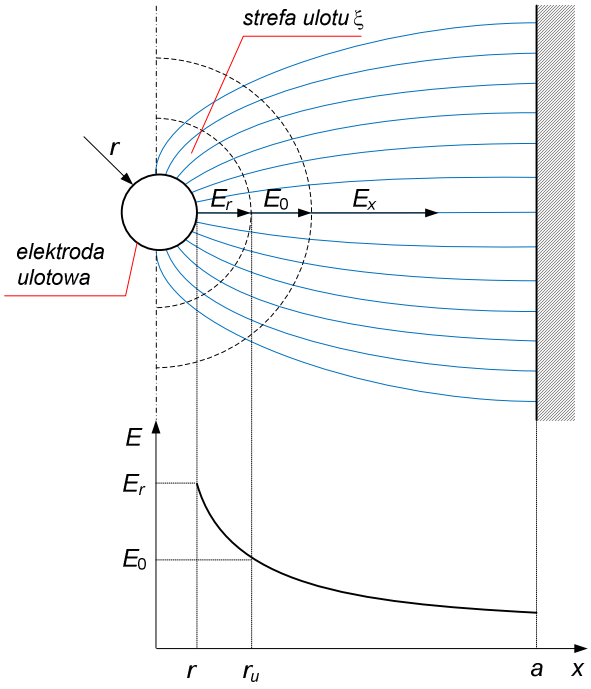
C_p – pojemność przewodu,

C_{lp} – pojemność ładunku przestrzennego,

U_{lp} napięcie odpowiadające pojemności ładunku przestrzennego.

Napięcie w układzie modelowym jest sumą napięć U_0 i U_{lp} [102]:

$$U = U_0 + U_{lp} \tag{2.13}$$



Rys. 2.9. Modelowy układ elektrod: przewód linii napowietrznej – płaszczyzna ziemi wraz z rozkładem natężenia pola elektrycznego; r – promień przewodu, a – odległość przewodu od ziemi, E_r – natężenie pola przy powierzchni przewodu, E_0 – natężenie początkowe ulotu

Jednym z układów elektrod do modelowania i badania zjawisk ulotowych jest konfiguracja elektroda ostrzowa – płaszczyzna (rys.2.10), reprezentująca układ elektrod o polu silnie niejednostajnym, w którym zachodzą złożone procesy jonizacji i dejonizacji cząsteczek gazu. Zasadniczy wpływ na rozwój i podtrzymanie wyładowań ulotowych w powietrzu ma jonizacja zderzeniowa, jonizacja powierzchniowa, fotojonizacja oraz rekombinacja jonów.

Wyładowanie ulotowe ma charakter wyładowania samodzielnego, gdy spełniony jest warunek opisany w teorii Townsenda [69, 102, 110,], dotyczący samopodtrzymania wyładowania, niezależnie od działania zewnętrznych czynników jonizacyjnych:

$$\gamma\left\{\exp\left[\int_0^a(\alpha-\eta)dx\right]-1\right\}\geq 1 \qquad (2.14)$$

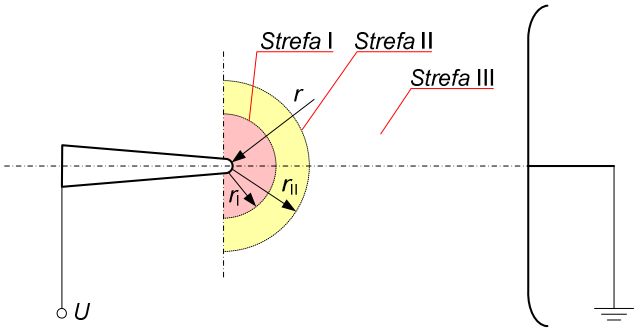
gdzie:

- α – współczynnik jonizacji zderzeniowej Townsenda,
- γ – współczynnik określający procesy wtórne na katodzie (jonizacji powierzchniowej),
- η – współczynnik wychwytywania elektronów,
- a – odstęp między elektrodami.

Pole elektryczne wokół elektrody ulotowej charakteryzuje się dużą niejednostajnością, zatem warunek (2.14) jest spełniony tylko w niewielkim, ograniczonym obszarze przy tej elektrodzie.

W obszarze międzyelektrodowym, w którym występuje zjawisko ulotu, z punktu widzenia zachodzących w nim procesów jonizacyjnych, można wyodrębnić trzy strefy (rys. 2.10) [30]:

I – strefa jonizacji i wyładowań strimerowych,
II – strefa lawin elektronowych,
III – strefa, w której jonizacja zderzeniowa i wychwytywanie elektronów są jednakowo prawdopodobne.



Rys. 2.10. Strefy jonizacji w obszarze międzyelektrodowym

Podstawowe wzory określające natężenie początkowe ulotu zostały wyznaczone przez Peek'a [91] na podstawie badań eksperymentalnych z zastosowaniem przewodów o konfiguracji równoległej i koncentrycznej. Nieznacznie zmodyfikowany wzór Peek'a (2.15), różni się od oryginalnego współczynnikami korygującymi zmienność warunków atmosferycznych i stan powierzchni przewodów [18]:

$$E_k = E_0 \cdot \delta \cdot m_1 \cdot \left(1 + \frac{K}{\sqrt{\delta \cdot r}}\right) \tag{2. 15}$$

$$\delta = K_d \frac{p}{273 + \vartheta} \tag{2. 16}$$

gdzie:

E_k – natężenie początkowe ulotu elektrycznego,
E_0 – natężenie początkowe ulotu elektrycznego w warunkach normalnych (temperatura 20°C, ciśnienie 1013 hPa),
r – promień przewodu [cm],

m_1 – współczynnik zależny od stanu powierzchni przewodu i warunków atmosferycznych ($m_1 = 1$ – dla gładkiej i suchej powierzchni; $m_1 = 0{,}6 \div 0{,}8$ – dla wilgotnej powierzchni; $m_1 = 0{,}3 \div 0{,}6$ – na powierzchni krople wody, sople lub znaczne zabrudzenia; $m_1 = 0{,}25$ – intensywny deszcz),

δ – względna gęstość powietrza,

p – ciśnienie powietrza w Pa,

ϑ – temperatura powietrza w °C,

$K_d = 0{,}00289$ – w normalnych warunkach atmosferycznych.

W tabeli 2.2 zebrano wartości charakterystycznych współczynników użytych we wzorach (2.15) oraz (2.16).

Tab. 2.2. Wartości natężenia początkowego ulotu elektrycznego E_0 oraz współczynnika K dla różnych rodzajów napięć i konfiguracji przewodów [18]

Rodzaj napięcia	Konfiguracja przewodów	E_0 (wartość maksymalna) [kV/cm]	K [$cm^{1/2}$]
przemienne	równoległa	30,0	0,301
przemienne	koncentryczna	31,0	0,308
stałe +	koncentryczna	31,0	0,308
stałe –	koncentryczna	33,7	0,241

2.5.2. Efekt biegunowości – wpływ ładunku przestrzennego

Wyzwalanie elektronów i procesy jonizacji lawinowej w powietrzu zależą od rodzaju napięcia oraz od biegunowości elektrody ulotowej.

Przy *napięciu stałym* – odpowiednio do biegunowości elektrody ulotowej – rozróżnia się ulot dodatni i ujemny, przy czym mechanizm ich powstawania nie jest jednakowy, a więc i natężenia początkowe są różne. Przy ujemnej biegunowości elektrody ulotowej wytwarzanie elektronów niezbędnych do zainicjowania lawin elektronowych, odbywa się przy niższych wartościach natężenia pola elektrycznego. Jest to spowodowane intensyfikacją procesów jonizacji w przestrzeni przyelektrodowej oraz emisji polowej. Przy biegunowości dodatniej – lawiny elektronowe rozwijają się w kierunku anody z obszaru o mniejszej wartości natężenia pola elektrycznego. Samodzielne wytwarzanie elektronów jest efektem jonizacji zderzeniowej oraz fotojonizacji, natomiast jonizacja polowa nie ma większego wpływu na rozwój wyładowań ulotowych [29, 30, 99,109].

Przy *napięciu przemiennym*, przy zmianach biegunowości elektrody ulotowej, występują na niej wyładowania, odpowiadające na przemian dodatniej i ujemnej biegunowości. Po każdym półokresie napięcia pozostaje w otoczeniu elektrody

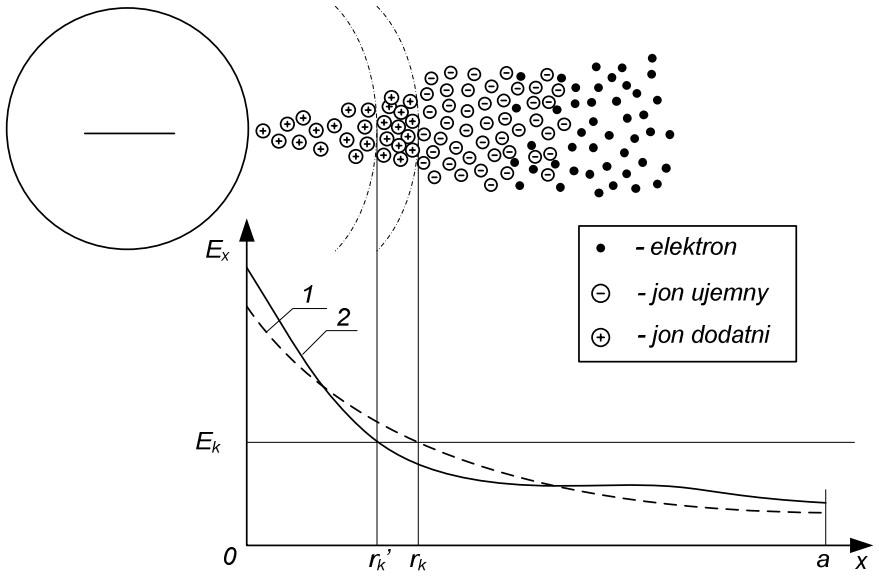
ulotowej ładunek przestrzenny, wpływający na rozkład natężenia pola w układzie. Zjawisko to prowadzi do inicjowania wyładowań niezupełnych przy niższym napięciu niż ma to miejsce w układzie stałonapięciowym.

NAPIĘCIE STAŁE BIEGUNOWOŚCI UJEMNEJ

Przy biegunowości ujemnej ulotu elektrycznego lawina elektronowa rozwija się w obszarze silnego pola elektrycznego w bezpośrednim sąsiedztwie elektrody ulotowej, w kierunku malejącego natężenia pola elektrycznego. Dzięki procesom fotojonizacji i silnemu własnemu polu elektrycznemu, przekształca się ona od czoła wstecz w przewodzący kanał strimera. Dojście czoła strimera do katody powoduje wzrost natężenia pola elektrycznego w tym obszarze. Następuje rozwój kolejnych lawin elektronowych i proces powtarza się. Rozkład natężenia pola elektrycznego w strefie międzyelektrodowej oraz jego deformację podczas wyładowania z elektrody o biegunowości ujemnej, przedstawiono na rysunku 2.11. Rozwój lawin elektronowych zostaje wówczas zahamowany w odległości $x = r_k'$, to jest w obszarze, w którym wypadkowy współczynnik jonizacji zderzeniowej elektronowej α jest równy współczynnikowi wychwytywania elektronów η. Ponieważ jony charakteryzują się mniejszą ruchliwością niż elektrony, w przestrzeni międzyelektrodowej wytworzony zostaje ładunek przestrzenny wpływający na rozkład pola elektrycznego. Jony dodatnie przemieszczają się w kierunku katody, na powierzchni której są neutralizowane. Zanim to jednak nastąpi, tworzą w tym obszarze chmurę powodującą lokalny wzrost natężenia pola elektrycznego. Jony ujemne powstają w wyniku wychwytywania elektronów przez elektroujemne atomy tlenu i z powodu małej ruchliwości skupiają się w obszarze gdzie $x > r_k'$ (rys. 2.11) [98].

Ładunek przestrzenny wzmacnia pole w pobliżu katody i osłabia w pobliżu anody. Zakres strefy, w której natężenie pola elektrycznego ma wartość krytyczną przesuwa się w kierunku katody. Warunki dla rozwoju lawin elektronowych występują zatem w silniejszym polu elektrycznym, odległości $a < r_k'$.

Efektem przemieszczania się ładunków przestrzennych w kierunku anody i ich neutralizacji jest powstawanie impulsu prądowego. Wyładowanie rozwija się w wąskim kanale od katody, w którym strimery są formowane w zbliżonych do siebie odstępach czasu. Czas trwania pojedynczego strimera jest bardzo krótki, rzędu kilkudziesięciu nanosekund, natomiast odstępy czasu między nimi mogą wynosić kilka mikrosekund, kilka milisekund i więcej. Ujemne impulsy prądowe występujące podczas ulotu mają wartości rzędu miliamperów i nazywane są impulsami Trichela. Jako napięcie początkowe wyładowań należy uznać pojawienie się pierwszego strimera o rozmiarze impulsu zawierającym około $5 \cdot 10^8$ elektronów. Przy wzroście napięcia lawiny elektronowe są formowane w tak krótkim czasie, że impulsy prądowe zanikają a wyładowanie przechodzi w ulot ciągły [98, 29, 30].

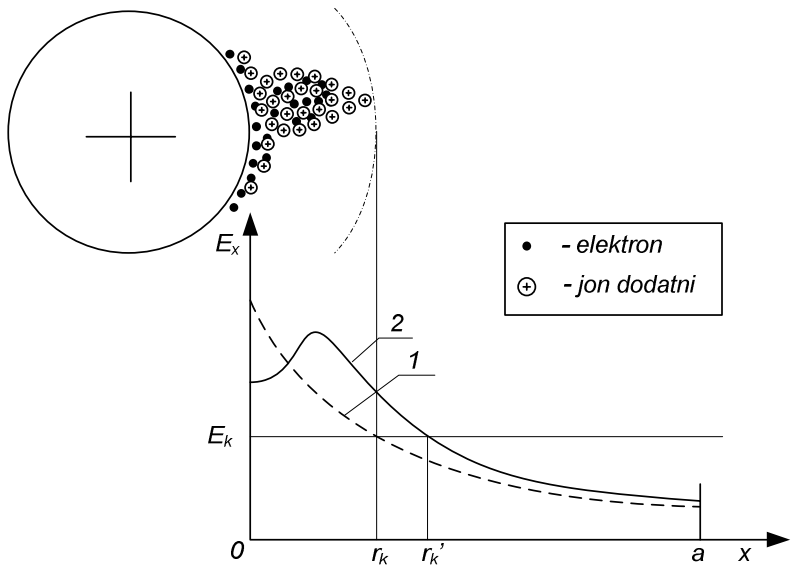


Rys. 2.11. Rozwój wyładowania ulotowego oraz wpływ ładunku przestrzennego na rozkład natężenia pola elektrycznego podczas wyładowań niezupełnych z ujemnej elektrody ulotowej (opracowano na podstawie [30, 98]); 1 – pole pierwotne, 2 – pole zakłócone, r_k – zasięg strefy ulotowej bez uwzględnienia ładunku przestrzennego, r_k' – zasięg strefy ulotowej z uwzględnieniem ładunku przestrzennego, a – odstęp międzyelektrodowy, E_k – krytyczne natężenie pola elektrycznego.

NAPIĘCIE STAŁE BIEGUNOWOŚCI DODATNIEJ

Przy dodatniej biegunowości elektrody ulotowej, lawiny elektronowe rozwijają się w kierunku rosnącego natężenia pola elektrycznego. Warunki dla ich inicjowania występują w pewnej odległości od elektrody ulotowej. Po dojściu lawiny do anody tworzy się kanał strimera anodowego. Dodatni ładunek przestrzenny lawiny elektronowej wzmacnia pole elektryczne umożliwiając rozwój nowych lawin skierowanych do anody. Proces powstawania kolejnych lawin zostaje zahamowany w pewnej odległości od elektrody ulotowej, w obszarze, w którym natężenie pola elektrycznego jest mniejsze od natężenia początkowego jonizacji zderzeniowej. podobnie jak w przypadku ujemnej biegunowości elektrody ulotowej, wyładowanie ma charakter impulsowy, któremu towarzyszy świetlenie oraz prąd proporcjonalny do ładunku lawiny (rys 2.12). Generowane impulsy prądowe charakteryzuje: znaczna amplituda (kilkanaście mA), krótki czas trwania (rzędu kilku μs), niska częstość (rzędu kilkadziesiąt tysięcy na sekundę). Przy wzroście napięcia częstotliwość występowania strimerów zwiększa się, aż do wystąpienia w otoczeniu anody ulotu ciągłego [29].

Podczas ulotu elektrony są wytwarzane w silnym polu elektrycznym w otoczeniu elektrody ulotowej. Powstające równocześnie mało ruchliwe jony dodatnie tworzą ładunek przestrzenny zlokalizowany w obszarze przyległym do elektrody ulotowej.



Rys. 2.12. Rozwój wyładowania ulotowego oraz wpływ ładunku przestrzennego na rozkład natężenia pola elektrycznego podczas wyładowań niezupełnych z dodatniej elektrody ulotowej (opracowano na podstawie [30, 98]); 1 – pole pierwotne, 2 – pole zakłócone, r_k – zasięg strefy ulotowej bez uwzględnienia ładunku przestrzennego, r_k' – zasięg strefy ulotowej z uwzględnieniem ładunku przestrzennego, a – odstęp międzyelektrodowy, E_k – krytyczne natężenie pola elektrycznego.

W silnym polu elektrycznym przy anodzie wychwytywanie elektronów jest mniej skuteczne niż w przypadku rozwoju lawin elektronowych, gdy elektroda ulotowa ma potencjał ujemny. Większość elektronów wytworzonych w wyniku jonizacji zderzeniowej jest neutralizowana na anodzie. Zatem jony ujemne mogą powstawać tylko w wąskim obszarze w znacznej odległości od elektrody. Efektem sukcesywnego powstawania lawin elektronowych i neutralizowania elektronów na anodzie jest powstawanie dodatniego ładunku przestrzennego wpływającego na zmianą rozkładu pola w otoczeniu elektrody ulotowej. Cechą charakterystyczną ulotu dodatniego jest osłabienie pola elektrycznego w pobliżu elektrody oraz jego wzmocnienie w pewnej odległości od elektrody (rys. 2.12) [29, 30, 98].

NAPIĘCIE PRZEMIENNE

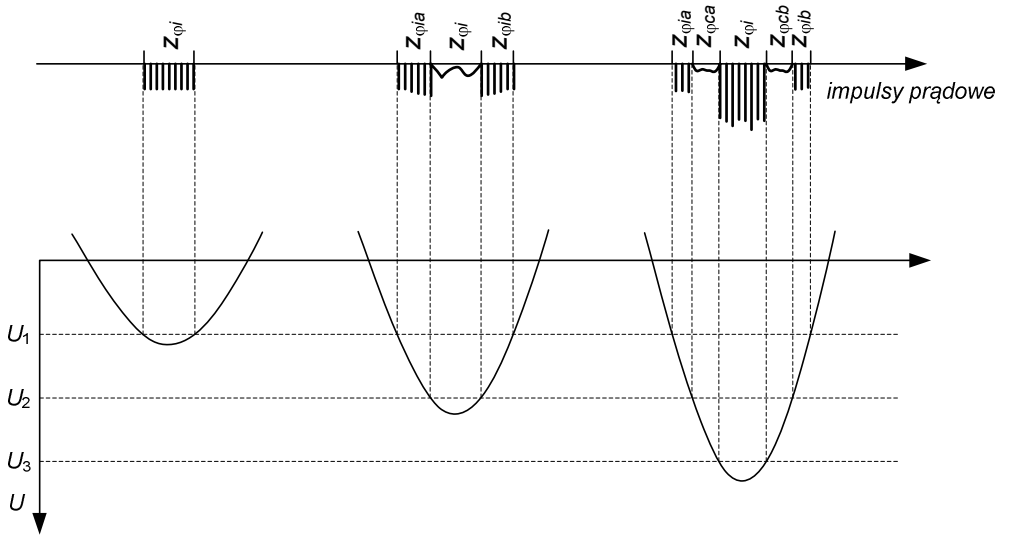
W modelowym układzie elektrod wytwarzających niejednostajny rozkład pola elektrycznego, wyładowanie jest zapoczątkowane w ujemnej połowie okresu napięcia przemiennego, przy jego wartości chwilowej równej U_0. W wyniku oddziaływania ładunku przestrzennego, przy napięciu przemiennym wartości napięcia początkowego U_0 przy biegunowości dodatniej i ujemnej nie są jednakowe. W przypadku biegunowości dodatniej – następuje osłabienie pola w otoczeniu elektrody ulotowej i wzmocnienie w pozostałej części układu (rys. 2.12), co powoduje wzrost napięcia początkowego ulotu U_0. Przy biegunowości ujemnej – sytuacja jest odwrotna, z tym, że pojawiają się również jony ujemne powodujące osłabienie pola w obszarze oddalonym od elektrody

ulotowej (rys. 2.11). Różnice w wartościach napięcia początkowego ulotu występują w wyidealizowanych układach, na przykład dla gładkich powierzchniach elektrod walcowych czy w układzie elektrod ostrze – płaszczyzna. Dla układów elektrod spotykanych w praktyce (na przykład przewody fazowe linii elektroenergetycznej wysokiego napięcia), pomimo różnych mechanizmów zjawisk jonizacyjnych zachodzących podczas wyładowań o biegunowości ujemnej i dodatniej, biegunowość elektrod ma niewielki wpływ na napięcie początkowe ulotu elektrycznego. Jest to spowodowane głównie nierównościami oraz zabrudzeniami powierzchni przewodów, a także kroplami wody zbierającymi się na ich powierzchni podczas opadów atmosferycznych [18, 29].

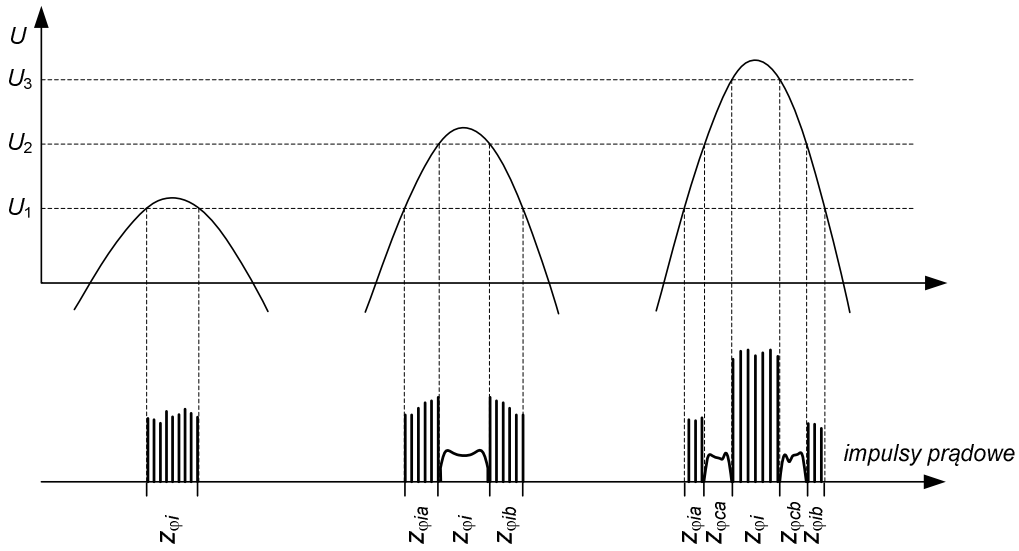
Wartości szczytowej napięcia przemiennego odpowiada największa wartość ładunku przestrzennego tej samej biegunowości. W części okresu, gdy wartość napięcia zmniejsza się zdążając do zera, procesy jonizacyjne zostają zahamowane. Warość ładunku przestrzennego w otoczeniu elektrody ulotowej nie zmienia się, lecz pod wpływem pola elektrycznego oddala się od przewodu, do momentu aż napięcie nie zmieni biegunowości. Wówczas ładunek przestrzenny zaczyna przemieszczać się w przeciwnym kierunku. Obecność ładunku przestrzennego po zmianie biegunowości napięcia na ujemną, wywołuje wzrost natężenia pola elektrycznego na powierzchni przewodu. Dlatego wartość natężenia początkowego ulotu elektrycznego E_0, wystąpi przed osiągnięciem przez napięcie wartości chwilowej U_0. Różnica ta jest zależna od wartości ładunku przestrzennego zgromadzonego w przestrzeni międzyelektrodowej [30, 102].

W modelu mechanizmu wyładowań ulotowych przestawionym na rysunkach 2.13 i 2.14 występują charakterystyczne obszary fazowe z_φ, których szerokość zależy od wartości maksymalnej napięcia przemiennego. W przypadku, gdy przekracza ono nieznacznie napięcie początkowe ulotu elektrycznego ($U = 1{,}1 \div 1{,}3\ U_0$), wyładowanie ma charakter impulsowy wyłącznie w obszarach fazowy $z_{\varphi i}$. Przy większych wartościach maksymalnych napięcia następuje zanik formy impulsowej i prąd w obszarze fazowym $z_{\varphi c}$ ma charakter ciągły. Należy zaznaczyć, że szerokość obszarów fazowych oraz amplituda i częstotliwość występowania impulsów są różne w dodatniej i ujemnej połowie okresu napięcia przemiennego [15, 30, 31, 69].

Model przedstawiony na rysunkach 2.13 i 2.14 dotyczy powietrznych układów izolacyjnych, w których odległości elektrod nie przekraczają kilkunastu centymetrów. Wówczas całkowity ładunek przestrzenny zostaje zneutralizowany przed zmianą biegunowości napięcia elektrod i tylko w takich warunkach mechanizm inicjowania oraz rozwoju wyładowań jest taki sam, jak przy napięciu stałym. Przy większych odstępach międzyelektrodowych obszary fazowe z_φ są niesymetryczne w częściach półokresu, gdy napięcie narasta i maleje. Występujące w tych warunkach wyładowania ulotowe należą do grupy tak zwanych wyładowań podtrzymywanych.



Rys. 2.13. Model mechanizmu wyładowań ulotowych przy napięciu przemiennym – ujemna połowa okresu napięcia (opracowano na podstawie [15])



Rys. 2.14. Model mechanizmu wyładowań ulotowych przy napięciu przemiennym – dodatnia połowa okresu napięcia (opracowano na podstawie [15])

Amplitudy impulsów prądowych generowanych przy dodatniej biegunowości napięcia są znacznie większe od impulsów biegunowości ujemnej. Jednak częstotliwość wyładowań ujemnych jest wielokrotnie większą od częstotliwości wyładowań dodatnich, co skutkuje kilkukrotnie większą stromością narastania impulsów ulotowych. (tab. 2.3) i (tab. 2.4) [15, 69]. Należy także podkreślić stochastyczny charakter formy impulsowej wyładowań [45, 46, 49].

Tab. 2.3. Cechy charakterystyczne ulotu występującego przy ujemnym półokresie napięcia przemiennego [15]

Wartość napięcia	U_1	U_2	U_3
Rodzaj wyładowań	impulsy Trichela	jarzeniowe ujemne	strimery przeskokowe
amplituda	≈ 10 mA	lawiny ciągłe	≈ 100 mA
częstotliwość	10 – 100 kHz	lawiny ciągłe	1 kHz
czas narastania	≈ 10 ns	lawiny ciągłe	≈ 100 ns
straty mocy	niskie	bardzo duże	bardzo duże
oddziaływanie elektromagnetyczne	słabe	brak	bardzo duże

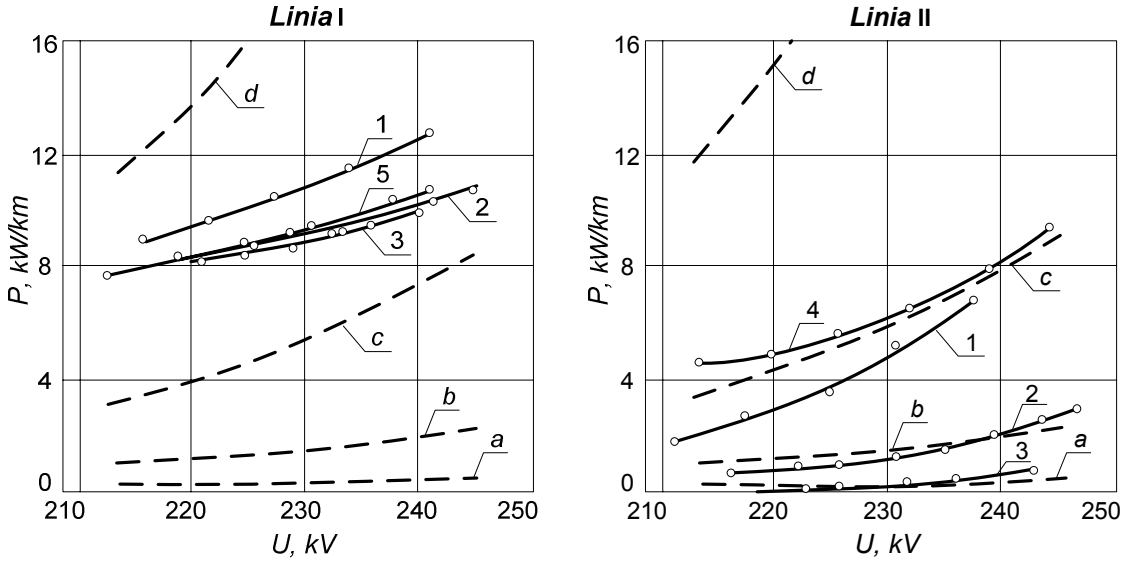
Tab. 2.4. Cechy charakterystyczne ulotu występującego przy dodatnim półokresie napięcia przemiennego [15]

Wartość napięcia	U_1	U_2	U_3
Rodzaj wyładowań	strimery początkowe	jarzeniowe dodatnie	strimery przeskokowe
amplituda	≈ 100 mA	lawiny ciągłe	bardzo wysoka
częstotliwość	1 kHz	lawiny ciągłe	mała
czas narastania	≈ 30 ns	lawiny ciągłe	-
straty mocy	niskie	bardzo duże	bardzo duże
oddziaływanie elektromagnetyczne	duże	brak	bardzo duże

2.6. Kryteria projektowe wynikające ze zjawiska ulotu elektrycznego

2.6.1. Ulotowe straty mocy czynnej

Przemiany energetyczne zachodzące w obszarze wyładowania ulotowego są przyczyną dodatkowych strat mocy czynnej przy przesyle i rozdziale energii elektrycznej (rys. 2.15). W liniach trójfazowych przy napięciu przemiennym straty ulotowe wyznaczane są na podstawie metod pomiarowych [24, 100] lub empirycznych bądź półempirycznych metod obliczeniowych [15, 18]. Celem badań i analiz jest wybór optymalnych rozwiązań konstrukcyjnych linii napowietrznych ze względu na wielkość strat ulotowych.



Rys. 2. 15. Straty ulotowe w dwóch liniach 220 kV o podobnych konstrukcjach – wg [100] 2, 3, 5, a – dobra pogoda; 1, c – deszcz; 4 – marznąca mżawka; b – suchy śnieg; 4 – szron. Linie przerywane (oznaczenia literowe) – wartości obliczeniowe; Linie ciągłe (oznaczenia liczbowe) – wartości pomiarowe

Według klasycznego wzoru Peeka wielkość strat ulotowych P wyrażona jest zależnością [91]:

$$P = \frac{241}{\delta}(f+25)\sqrt{\frac{r}{a}}(U-U_j)^2 \cdot 10^{-5} \quad \text{[kW/km]} \tag{2.17}$$

gdzie:

δ – gęstość względna powietrza,
f – częstotliwość w Hz,
a – odstęp między przewodami linii,
r – promień przewodu linii,
U – wartość skuteczna napięcie fazowego w kV,
U_j – wartość skuteczna napięcie fazowego w kV odpowiadająca natężeniu pola elektrycznego jonizacji zderzeniowej:

$$E_j = 21{,}2\,\delta\, m_1\, m_2 \tag{2.18}$$

gdzie:

m_1 – współczynnik uwzględniający gładkość powierzchni przewodu, równy 0,98 ... 0,83 w zależności od konstrukcji i stopnia zestarzenia przewodu,
m_2 – współczynnik uwzględniający warunki pogodowe, równy 0,8 dla deszczu.

Wzór (2.17) jest uogólnieniem obszernych wyników doświadczalnych i dotyczy linii jednofazowej dwuprzewodowej oraz trójfazowej o symetrycznym układzie przewodów, a straty obliczone są na jeden przewód i na 1 km. Stosowany jest także dla niesymetrycznego rozmieszczenia przewodów linii (np. linia jednotorowa w układzie płaskim), co wymaga wyznaczenia maksymalnych wartości natężeń pól elektrycznych na powierzchniach przewodów np. przy pomocy metody proponowanej w rozdziale 3.

Wzór Peeka, będąc formułą czysto empiryczną, nie wyjaśnia zagadnień teoretycznych, okazując się jednocześnie niedostatecznie dokładnym dla celów praktycznych przy zastosowaniu go do napięć wyższych niż 220 kV [102]. Opracowane liczne wzory (np. Holma, Zalesskiego, Mayra czy Petersona), oparte często na rozważaniach teoretycznych, nadają się jednak przeważnie tylko dla pewnego zakresu parametrów linii i warunków atmosferycznych.

W związku z projektowaniem i budową linii przesyłowych o napięciu 400 kV i wyższym, nastąpił rozwój prac doświadczalnych, w wyniku których opracowano liczne metody empiryczne szacowania strat ulotowych [15, 18]. Na przykład w energetyce francuskiej Electricité de France (EdF) stosowana jest metoda półempiryczna, w której straty ulotowe wyraża wzór [18]:

$$P = KP_n \tag{2.19}$$

gdzie:

P – straty ulotowe w W/m,

P_n – straty zredukowane w W/m (rys. 2.16),

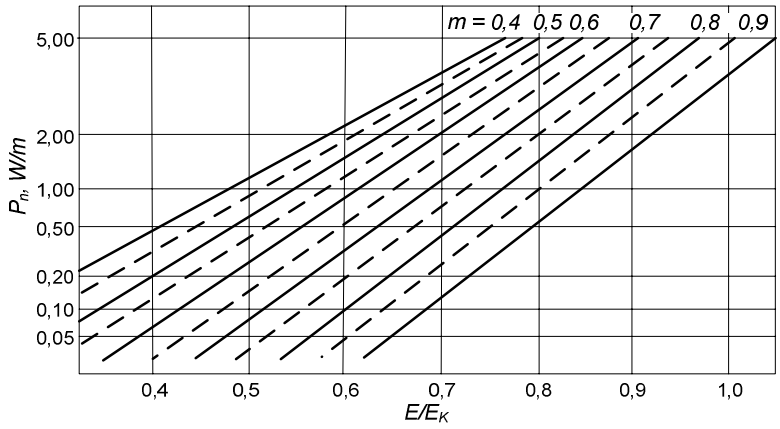
K – współczynnik redukcyjny.

Straty zredukowane P_n są funkcją stosunku E/E_k dla różnych wartości współczynnika nieregularności przewodu m (rys. 2.17), przy czym E jest średnim natężeniem pola elektrycznego na powierzchni przewodu, a E_k krytyczną wartością natężenia pola według wzoru Peeka, wyznaczoną dla $m = 1$ oraz gęstości względnej powietrza $\delta = 1$:

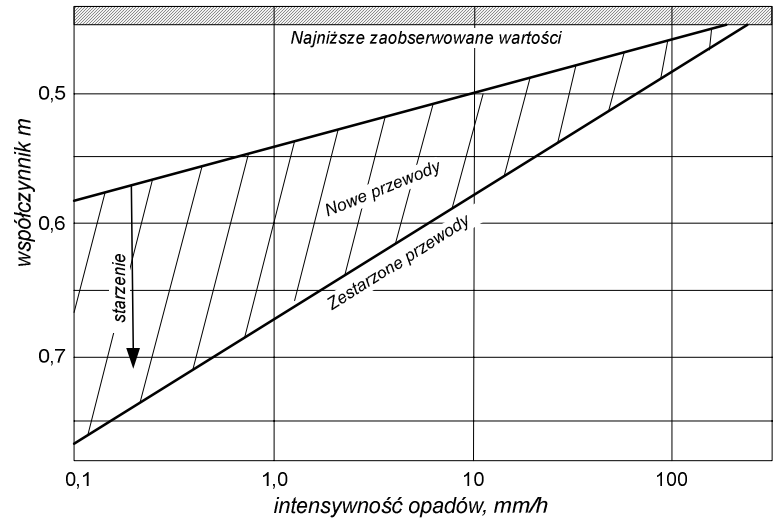
$$E_k = 21{,}2\,\delta\, m\left(1 + \frac{0{,}308}{\sqrt{\delta\, r}}\right) \tag{2.20}$$

gdzie:

r – promień przewodu w cm.



Rys. 2.16. Straty zredukowane P_n wyrażone jako funkcja stosunku E/E_k dla różnych wartości współczynnika nieregularności przewodu m [18]



Rys. 2.17. Wartości współczynnika nieregularności przewodu m wyrażone jako funkcja intensywności opadu deszczu [18]

Współczynnik redukcyjny K jest wyrażony wzorem:

$$K = \frac{f}{50} \cdot (Nr\beta)^2 \cdot \frac{\log\frac{R_z}{r_e} \cdot \log\frac{\rho}{r_e}}{\log\frac{R_z}{\rho}} \tag{2.21}$$

gdzie:

- f – częstotliwość w Hz,
- N – liczba przewodów w wiązce (rys. 2.18),
- r – promień przewodu wiązki w cm,
- β – współczynnik Peeka:

$$\beta = 1 + \frac{0{,}308}{\sqrt{r}} \tag{2.22}$$

r_e – promień zastępczy wiązki w cm:

$$r_e = R \sqrt[N]{\frac{Nr}{R}} \tag{2.23}$$

R – promień wiązki w cm,

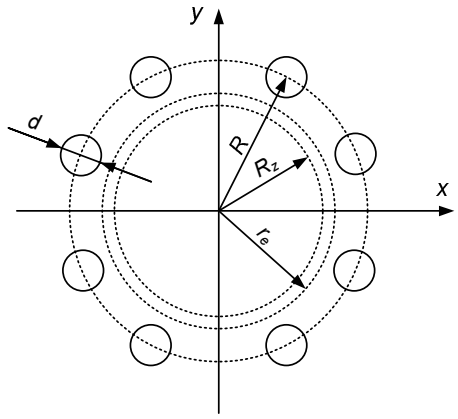
R_z promień równoważny w cm:

$$R_z = r_e \exp\left(\frac{2\pi\varepsilon_0}{C_c}\right) \tag{2.24}$$

C_c całkowita pojemność jednostkowa linii w F/m,

ρ – współczynnik:

$$\rho = \begin{cases} 18\sqrt{r} & \text{dla przewodów pojedynczych} \\ 18\sqrt{Nr+4} & \text{dla przewodów wiązkowych} \end{cases} \tag{2.25}$$



Rys. 2.18. Przekrój wiązki przewodowej; R – promień wiązki, R_z – promień równoważny, r_e – promień zastępczy wiązki, $r = 0{,}5\ d$ – promień przewodu wiązki

Celem analiz z uwzględnieniem różnych warunków środowiskowych jest wyznaczenie rocznej sumy strat mocy spowodowanych zjawiskiem ulotu elektrycznego [100]. Straty te zależą od czasu występowania w ciągu roku najmniej korzystnych warunków atmosferycznych, podczas których straty są największe ze względu na dużą intensywność wyładowań. Jednak w ogólnym bilansie, ze względu na fakt długotrwałego występowania, powinny być uwzględniane również straty występujące podczas dobrej pogody, mimo że są kilkunastokrotnie mniejsze od strat występujących w warunkach złej pogody.

2.6.2. Hałas jako efekt ulotu elektrycznego

Występujący w liniach elektroenergetycznych wysokich i najwyższych napięć ulot elektryczny może być źródłem hałasu (szumu akustycznego), którego intensywność przy dobrej pogodzie jest na poziomie 30-40 dB, osiągając poziom 55 dB w warunkach deszczu i dużej wilgotności [27]. Zgodnie z ustawą *Prawo Ochrony Środowiska* [113] ochrona przed hałasem polega na zapewnieniu jak najlepszego stanu akustycznego środowiska, w szczególności poprzez:

- utrzymanie poziomu hałasu poniżej dopuszczalnego lub co najmniej na tym poziomie;
- zmniejszanie poziomu hałasu co najmniej do dopuszczalnego, gdy nie jest on dotrzymany.

Podstawą oceny emisji akustycznej linii elektroenergetycznych są wskaźniki hałasu, będące parametrami hałasu określonymi poziomem dźwięku A wyrażonym w decybelach (dB), w tym:

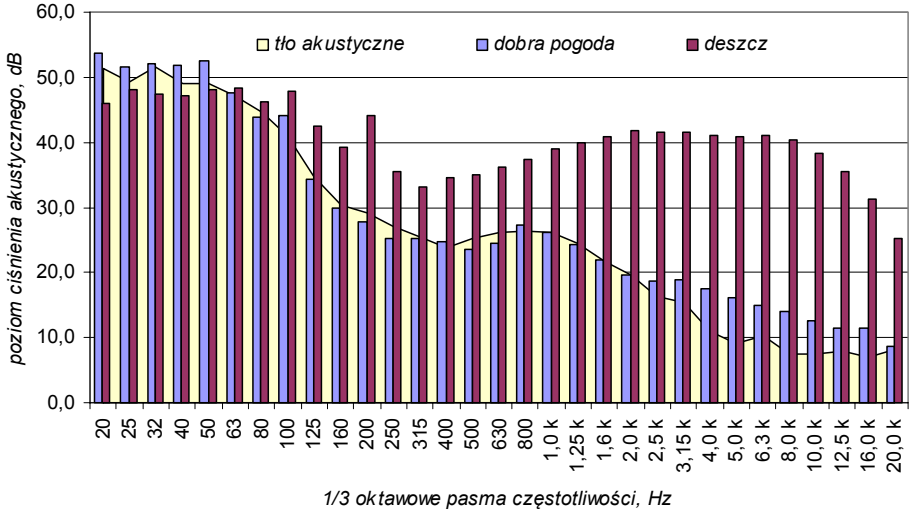
1) wskaźniki hałasu mające zastosowanie do prowadzenia długookresowej polityki w zakresie ochrony środowiska przed hałasem, w szczególności do sporządzania map akustycznych oraz programów ochrony środowiska przed hałasem:
   a) LDWN – długookresowy średni poziom dźwięku A wyrażony w decybelach (dB), wyznaczony w ciągu wszystkich dób w roku, z uwzględnieniem pory dnia (przedział czasu od godz. 6^{00} do godz. 18^{00}), pory wieczoru (przedział czasu od godz. 18^{00} do godz. 22^{00}) oraz pory nocy (przedział czasu od godz. 22^{00} do godz. 6^{00}),
   b) LN – długookresowy średni poziom dźwięku A wyrażony w decybelach (dB), wyznaczony w ciągu wszystkich pór nocy w roku (przedział czasu od godz. 22^{00} do godz. 6^{00});
2) wskaźniki hałasu mające zastosowanie do ustalania i kontroli warunków korzystania ze środowiska w odniesieniu do jednej doby:
   a) $L_{Aeq\ D}$ – równoważny poziom dźwięku A dla pory dnia (przedział czasu od godz. 6^{00} do godz. 22^{00}),
   b) $L_{Aeq\ N}$ – równoważny poziom dźwięku A dla pory nocy (przedział czasu od godz. 22^{00} do godz. 6^{00}).

Ustawa [113] dopuszcza wprowadzenie przy ustalaniu wartości dopuszczalnych hałasu możliwości jego zmienności w czasie, charakterystyki częstotliwościowej oraz impulsowości. Dopuszczalne wartości wskaźników hałasu dotyczące między innymi oddziaływania linii elektroenergetycznych zawarte są w Rozporządzeniu Ministra Środowiska [104] – tabela 2.5.

Tab. 2.5. Dopuszczalne poziomy hałasu w środowisku powodowanego przez linie elektroenergetyczne [104]

Lp.	Rodzaj terenu	L_{DWN}	L_N	$L_{Aeq\,D}$	$L_{Aeq\,N}$
1	a) strefa ochronna *A* uzdrowiska b) tereny szpitali, domów opieki społecznej c) tereny zabudowy związanej ze stałym lub czasowym pobytem dzieci i młodzieży	45	40	45	40
2	a) tereny zabudowy mieszkaniowej jedno- i wielorodzinnej oraz zabudowy zagrodowej i zamieszkania zbiorowego b) tereny rekreacyjno-wypoczynkowe c) tereny mieszkaniowo-usługowe d) tereny w strefie śródmiejskiej miast powyżej 100 tys. mieszkańców	50	45	50	45

W celu określenia wielkości emisji hałasu do środowiska przez linie elektroenergetyczne [95] należy pomiarowo wyznaczony poziom dźwięków *A* w analizowanych punktach, porównać z wartościami normatywnymi. Hałas pochodzący od ulotu charakteryzuje się dużą zmiennością w czasie, zarówno co do poziomu, jak i struktury widmowej, która zależna jest przede wszystkim od czynników pogodowych oraz stanu technicznego linii (rys. 2.19).



Rys. 2.19. Widma hałasu ulotu elektrycznego w otoczeniu linii elektroenergetycznej podczas złej i dobrej pogody [115]

Hałas od ulotu elektrycznego różni się istotnie od hałasu wytwarzanego przez inne źródła, np. środki transportu czy źródła przemysłowe. Hałas od ulotu jest bowiem silnie zależny od zjawisk losowych, jakimi są warunki atmosferyczne, a także stan

powierzchni przewodów linii. Ponadto pomiar hałasu utrudnia również często niewielki odstęp poziomów ulotu i tła akustycznego. Ma to miejsce zarówno w warunkach dobrej pogody, jak również np. przy intensywnych opadach atmosferycznych, kiedy podstawowym źródłem hałasu mierzonego w otoczeniu linii – są wówczas same opady. Trudności w określeniu i sparametryzowaniu przyczyn rozrzutów pomiarów [115] są nie tylko przyczyną niepewności pomiarów hałasu ulotu, ale również powodem trudności w budowie modelu akustycznego linii. Z tego powodu w analizach teoretycznych stosowane są uproszczone metody empiryczne, głównie przedstawione i proponowane w publikacjach CIGRE [15, 18] do zastosowań praktycznych. Przykładowo w metodzie proponowanej przez amerykański instytut Electric Power Research Institute (EPRI) poziom ciśnienia akustycznego L_A szacowany jest według zależności:

$$L_A = 54{,}3 + \Gamma\mathrm{A} - 10\log x - 0{,}02x \quad [\mathrm{dB}] \tag{2.26}$$

gdzie:

x – odległość pomiędzy przewodem a punktem obliczeń w m.

Składnik ΓA w warunkach intensywnego deszczu obliczany jest z wzoru:

$$\Gamma\mathrm{A}_5 = C_5 - \frac{665}{E_{\max}} + 20\log N + 44\log d + k_n \tag{2.27}$$

gdzie:

$E_{\max}$ – największa skuteczna wartość natężenia pola elektrycznego na powierzchni przewodu w kV/cm,

N – liczba przewodów w wiązce (rys 2.18),

d – średnica przewodu wiązki w cm,

C_5, k_n – składniki zależne od liczby N, średnicy przewodu d oraz średnicy wiązki D – tabela 2.6.

Tabela 2.6. Wartości współczynników C_5 i k_n [18]

Liczba N	Współczynnik	
	C_5	k_n
1	20,9	7,5
2	20,9	2,6
≥ 3	13,6	$22{,}9(n-1)\frac{d}{D}$

Inna postać wzoru (2.27) proponowana jest dla opadów o średniej intensywności – składnik $\Gamma\mathrm{A}_{50}$. Zakres poprawności wzoru (2.26) zawiera się w przedziale napięć znamionowych linii od 230 kV do 1500 kV, liczby przewodów w wiązce N od 1 do 16 oraz średnicy przewodu d od 2 do 6 cm.

W Polskiej Normie [95] do obliczeń poziomu emitowanego hałasu w czasie złej pogody stosuje się wzór empiryczny:

$$L_A = 10\log\left\{E_{\max}^{8,5}\left[1-\exp\left(-k\rho^{\frac{E_{\max}}{E_0}}\left(E_{\max}-E_0\right)^{1,33}\right)\right]\right\}+ \\ +45\log d+18\log N-11{,}4\log x-L_0 \tag{2.28}$$

gdzie:

L_A – prognozowany poziom dźwięku A wytwarzanego przez przewody (dla jednej fazy) w dB,

$E_{\max}$ – maksymalna wartość natężenia pola elektrycznego na powierzchni przewodu w kV/cm,

E_0 – wartość początkowa natężenia pola elektrycznego w kV/cm (dla linii 400 kV istniejących w Polsce na podstawie badań doświadczalnych wyznaczono: E_0 = 12 kV/cm w środku przęsła oraz 10 kV/cm w osi słupa odporowo-narożnego),

k – współczynnik wyznaczony doświadczalnie uwzględniający stan powierzchni przewodu (dla linii 400 kV k = 0,17 dla środka przęsła oraz k = 0,13 dla osi słupa odporowo-narożnego),

ρ – intensywność opadów deszczu [mm/h] (orientacyjnie: ρ = 0,5 mm/h – lekki deszcz, mżawka, ρ = 1,2 mm/h – średni deszcz, opady o charakterze ciągłym),

d – średnica przewodu składowego wiązki w cm,

N – liczba przewodów w wiązce,

x – odległość punktu obserwacji od wiązki przewodów (fazy) w m,

L_0 – poziom odniesienia w dB (dla linii 400 kV w Polsce L_0 = 64 dB, przy czym dopuszcza się przyjęcie tej wartości poziomu w nowych rozwiązaniach).

Poziom dźwięku pochodzący od wszystkich faz wyznacza się według wzoru:

$$L_{Am} = 10\log\sum_{i=1}^{m}10^{0,1L_{Ai}} \tag{2.29}$$

gdzie:

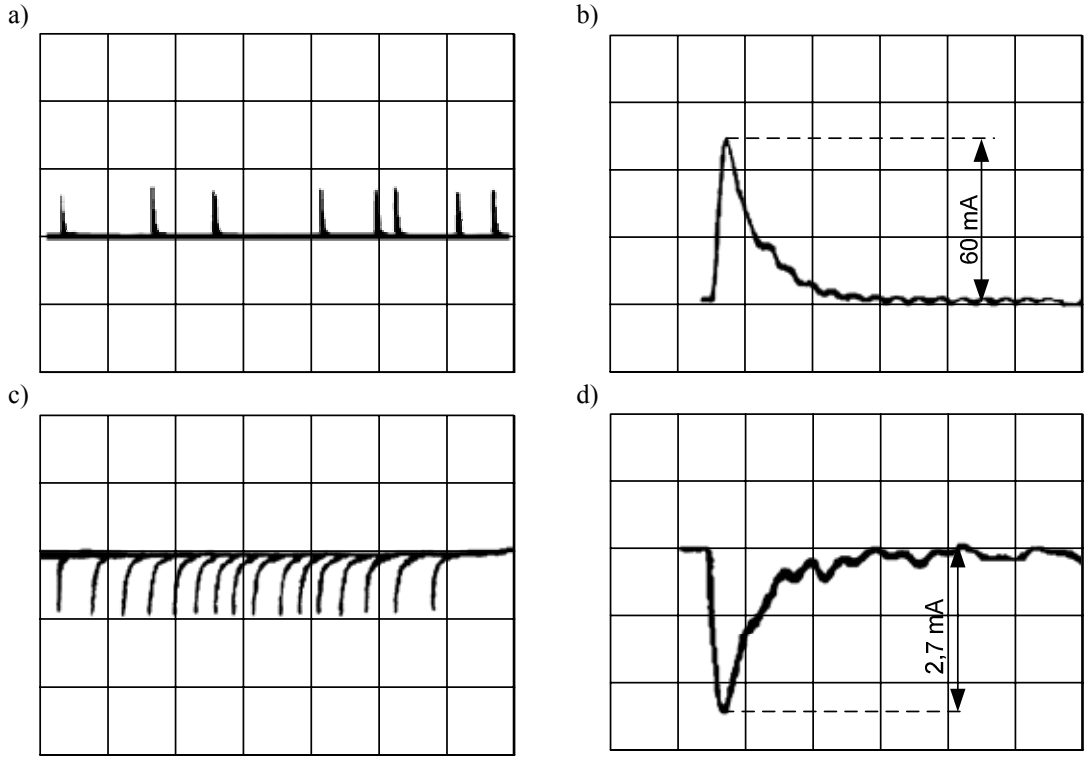
m – liczba faz,

L_{Ai} – poziom dźwięku i-tej fazy w punkcie obserwacji [dB] wyznaczony według wzoru (2.28).

Należy zaznaczyć, że norma [95] proponuje również empiryczną zależność do oszacowania maksymalnej wartość natężenia pola elektrycznego $E_{\max}$ na powierzchni przewodów linii elektroenergetycznych.

2.6.3. Zakłócenia radioelektryczne

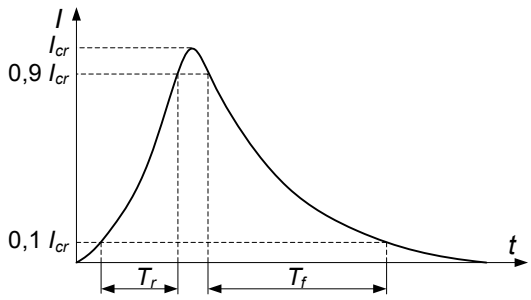
Wyładowania ulotowe na przewodach linii elektroenergetycznych oraz na osprzęcie izolatorowym są źródłem zaburzeń elektromagnetycznych w otaczającej przestrzeni. Pole tych zaburzeń wytworzone jest bezpośrednio przez impulsy prądowe wywołane nagłym rozładowaniem pojemności odciętej znaczną impedancją od źródła energii o częstotliwości sieciowej [30, 100]. W efekcie wyładowania ulotowe generują aperiodyczne impulsy prądowe o czasach narastania rzędu kilku nanosekund i czasach opadania około 100 ns (rys. 2.20).



Rys. 2.20. Oscylogramy impulsów prądowych wyładowań ulotowych (opracowano na podstawie [15]): a), b) – ulot dodatni; c), d) – ulot ujemny

Typowy przebieg czasowy impulsu przedstawiono na rysunku 2.21, a jego parametrami są:

- I_{cr} – wartość szczytowa impulsu,
- T_r – czas narastania, określony jako przedział czasu na czole impulsu pomiędzy wartościami odpowiadającymi 10% i 90% wartości szczytowej I_{cr},
- T_f – czas opadania, określony jako przedział czasu na grzbiecie impulsu pomiędzy wartościami odpowiadającymi 90% i 10% wartości szczytowej I_{cr},
- T_d – czas trwania impulsu,
- PRR – współczynnik repetycji impulsów.



Rys. 2.21. Typowy przebieg impulsu prądowego wyładowania ulotowego [18]

Charakterystyczne wartości powyższych parametrów dla ulotu dodatniego i ujemnego przedstawiono w tabeli 2.7.

Tab. 2.7. Typowe wartość impulsów prądowych wyładowań ulotowych [18]

Rodzaj ulotu	I_{cr} mA	T_r ns	T_r ns	T_d ns	*PRR* impulsy/s
dodatni	50	10	100	200	do 10000
ujemny	2	3	80	100	do 100000

Przebieg czasowy impulsu może być aproksymowany zależnością dwuwykładniczą [15, 30]:

$$i(t) = I_0\left[\exp\left(-t/\tau_1\right) - \exp\left(-t/\tau_2\right)\right] \tag{2.30}$$

gdzie:

$I_0 \approx \dfrac{I_{cr}}{0{,}6} I_0$

I_{cr} – wartość szczytowa impulsu,

τ_1, τ_2 – stałe czasowe.

Na rysunku 2.22 przedstawiono typowe widma częstotliwościowe i amplitudy względne impulsów prądowych wyładowań ulotowych o polaryzacji dodatniej i polaryzacji ujemnej. Widmo ulotu ujemnego charakteryzuje się około 80-krotnie mniejszymi wartościami amplitud (ok. -38 dB) w porównaniu do widma ulotu dodatniego, jednak graniczna wartość częstotliwości (odpowiadająca spadkowi 3 dB) wynosi około 3,5 MHz, natomiast dla ulotu ujemnego wartość ta wynosi około 1 MHz.

Miarą pól zakłócających jest intensywność poszczególnych harmonicznych impulsów elektromagnetycznych, odniesiona do zakresu częstotliwości pracy urządzeń elektronicznych, w szczególności odbiorników RTV. Intensywność ta zależy od wartości szczytowych impulsów, ich kształtu oraz częstości występowania.

Zakłócenia radioelektryczne mogą rozchodzić się od miejsca ich powstawania w dwojaki sposób:

1) w postaci fal prądu zakłóceń wzdłuż przewodów linii elektroenergetycznej,
2) w postaci fali elektromagnetycznej w przestrzeni otaczającej linię elektroenergetyczną – przewody linii są wówczas zarówno falowodem, jak i anteną nadawczą.

Prądy i napięcia zakłóceń rozchodzą się wzdłuż linii w postaci fal wędrownych, przy czym ich tłumienie zachodzi według zależności [15, 100]:

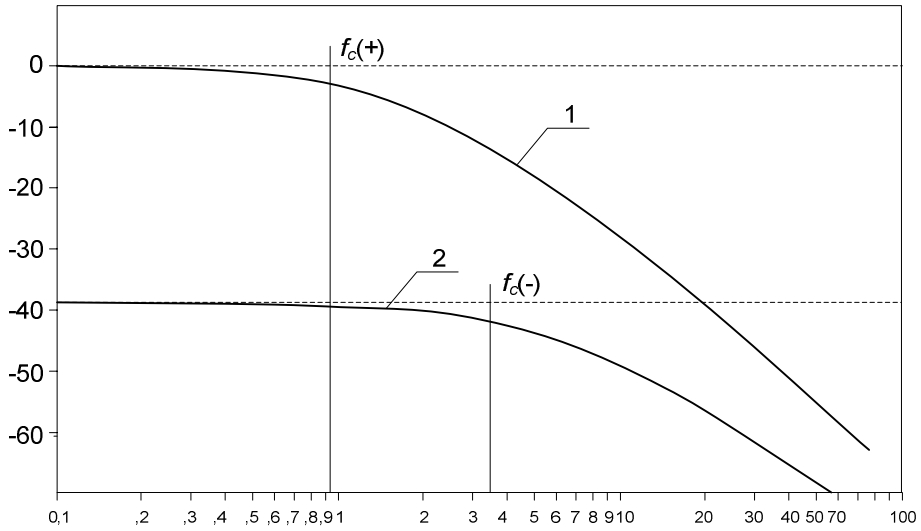
$$\begin{cases} U(x) = U_0 \exp(-\alpha x) \\ I(x) = I_0 \exp(-\alpha x) \end{cases} \tag{2.31}$$

gdzie:

$U(x)$, $I(x)$ – prąd i napięcie w odległości x od źródła zakłóceń,

U_0, I_0 – prąd i napięcie źródła zakłóceń,

α – współczynnik tłumienia zakłóceń wzdłuż przewodów linii.



Rys. 2.22. Typowy kształt widma częstotliwościowego impulsów prądowych wyładowań ulotowych [15]: 1) ulot dodatni (strimery dodatnie); 2) ulot ujemny (impulsy Trichela)

Współczynnik tłumienia α zależy zarówno od częstotliwości składowych widma zakłóceń, jak i strat w obwodach ziemnopowrotnych linii elektroenergetycznej. Współczynnik tłumienia pętli ziemnopowrotnej (układu przewód-ziemia) przy częstotliwości 0,5 MHz zawiera się w przedziale około 2÷4 dB/km, a przy częstotliwości 1 MHz w przedziale około 3,5÷8 dB/km [100]. Wartości współczynnika tłumienia zwiększają się ze wzrostem rezystywności gruntu, na przykład stukrotny wzrost rezystywności z 20 Ω·m do 2000 Ω·m powoduje przy częstotliwości f = 0,5 MHz wzrost współczynnika tłumienia α od około 1 dB/km do około 6 dB/km.

Zakłócenia radioelektryczne rozchodzące się w postaci fali elektromagnetycznej wywołane są falami napięć i prądów, które propagują wzdłuż przewodów linii. Cechą charakterystyczną pola elektromagnetycznego zakłóceń w otoczeniu linii elektro-

energetycznych jest praktycznie stały stosunek pomiędzy składową elektryczną E i składową magnetyczną H [30, 100]:

$$\frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 120\pi \tag{2.32}$$

gdzie:

μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni,

ε_0 – przenikalność elektryczna próżni.

Składowe pola tłumione są w funkcji odległości od linii elektroenergetycznej. Składowa elektryczna tłumiona jest zgodnie z zależnością [100]:

$$\frac{E(d)}{E_1(d_1)} = \left(\frac{d}{d_1}\right)^k \tag{2.33}$$

gdzie:

$E(d)$ – natężenie pola zakłóceń w odległości d od skrajnego przewodu linii,

$E_1(d_1)$ – natężenie pola zakłóceń w odległości d_1 od skrajnego przewodu linii,

k – współczynnik tłumienia, który zawiera się w przedziale od 1,5 do 2,0.

Poziom zakłóceń radioelektrycznych określa się na podstawie pomiaru natężenia składowej elektrycznej pola wyrażonego w dB, odniesionego do poziomu referencyjnego 1 μV/m, w zakresie częstotliwości do 30 MHz. Natężenie zakłóceń pojawia się w chwili rozpoczęcia jonizacji w powietrzu, a wraz ze wzrostem jej intensywności jego wartość rośnie. W przypadku zakłóceń radioelektrycznych wywołanych przez ulot elektryczny Polska Norma [92] wymaga, aby poziom zakłóceń mierzonych w odległości 20 m od rzutu poziomego skrajnego przewodu fazowego przy częstotliwości 500 ± 10 kHz nie przekraczał 57,5 dB (750 μV/m) w warunkach atmosferycznych o wilgotności względnej nie większej niż 80% i w temperaturze nie niższej niż 5°C.

Poziom zakłóceń może być również szacowany przy zastosowaniu uproszczonych metod analitycznych (empirycznych), na przykład metody przedstawionej w [30]:

$$RI = 50 + k\left(E_{\max} - 16{,}95\right) + 17{,}36 \ln\frac{d}{3{,}93} + A_1 + 13{,}98 \ln\frac{20}{a} + A_2 \tag{2.34}$$

gdzie:

RI – poziom zakłóceń radioelektrycznych [dB],

$E_{\max}$ – maksymalna wartość natężenia pola elektrycznego na powierzchni przewodu [kV/cm],

d – średnica przewodu [cm],

k – współczynnik równy 3,5 dla napięć 220 kV i 400 kV oraz równy 3,0 dla napięcia 750 kV,

A_1 – współczynnik równy 4 dB dla pojedynczego przewodu oraz równy 4,3422ln(N/4) dla przewodu wiązkowego, gdzie N jest liczbą przewodów w wiązce,

a – odległość pomiędzy przewodem fazowym a rozpatrywanym punktem,

A_2 – współczynnik zależny od warunków atmosferycznych: $A_2 = 0$ w warunkach dobrej pogody, $A_2 = 17$ przy deszczu i dużej wilgotności.

Wzrost poziomu zakłóceń ulotowych, szczególnie powyżej 10 MHz, świadczyć może o występowaniu w linii elektroenergetycznej uszkodzonych elementów, na przykład [32]:

— uszkodzenia przewodów roboczych typu rozmietlenia, pęknięcia drutów,

— niedokręcone odstępniki wiązkowe, luźne połączenia między elementami łańcucha izolatorowego a przewodem roboczym,

— uszkodzenia izolatorów.

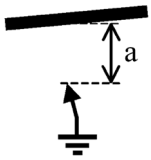
Zagadnienie detekcji ulotowej ma wielorakie znaczenie. Jednym z nich są metody oceny ulotu w liniach napowietrznych na podstawie pomiarów wykonywanych ze śmigłowców, z zastosowaniem detekcji radiowej i rejestracji obrazów fazowo-rozdzielczych impulsów zakłóceń elektromagnetycznych. Obrazy fazowo-rozdzielcze tworzone są jako odwzorowanie liczby n występujących w czasie pomiaru impulsów zakłóceń o określonej amplitudzie a i o określonej fazie φ. W efekcie uzyskuje się trójwymiarowe obrazy $D(a,\varphi, n)$ w przestrzeni amplituda-faza-liczba. Odpowiadają one akumulowaniu informacji o impulsach zakłóceń w matrycy $N(a,\varphi)$, w której wiersza reprezentują fazę napięcia φ, kolumny amplitudę impulsu a, zaś zawartość elementu matrycy przedstawia liczbę impulsów n. Dla celów wizualizacji liczba wyładowań jest kodowana w postaci palety kolorów lub stopni szarości [31].

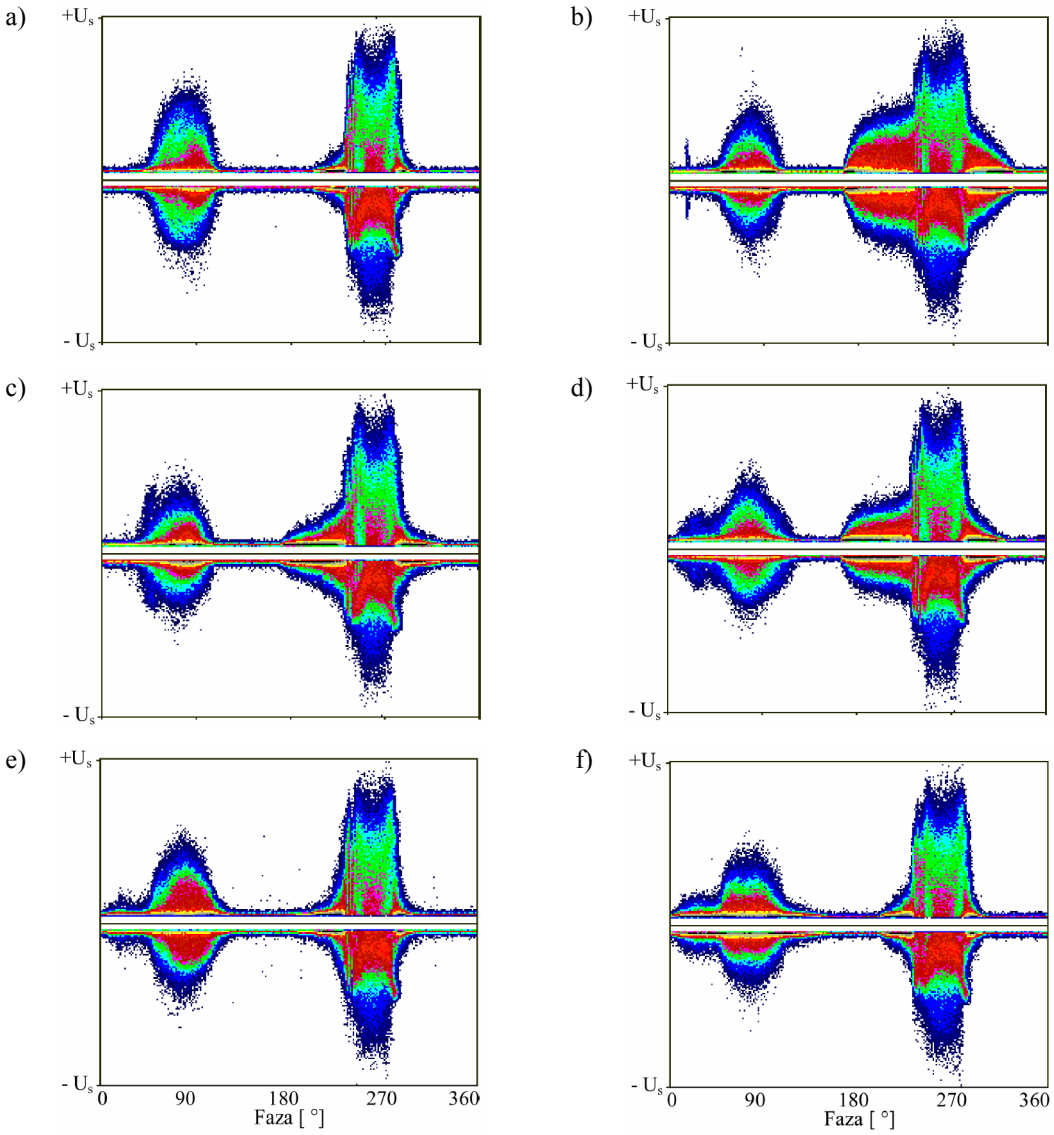
Akumulowane z rozdzielczością fazową obrazy impulsów zakłóceń ulotowych umożliwiają – w odróżnieniu od klasycznych metod pomiarowych – separację odmiennych rodzajów zakłóceń, na przykład występowanie impulsów o amplitudzie dodatniej oraz ujemnej znajduje odzwierciedlenie w obrazie fazowo-rozdzielczym.

Badania przeprowadzone w Katedrze Elektroenergetyki AGH [32] wykazały możliwość skorelowania wyników pomiarów z rodzajem występującego defektu na przewodach linii elektroenergetycznej (tab. 2.8). Ilustrują to przykładowe obrazy fazowo-rozdzielcze przedstawione na rysunku 2.23, na którym każdy z defektów powoduje wygenerowanie innego charakterystycznego obrazu zakłóceń. Oznacza to możliwość zastosowania metody obrazów fazowo-rozdzielczych w diagnostyce linii przesyłowych wysokich napięć i ich korelację z defektami w liniach.

Szwajcarska firma Korona Messtechnik opracowała specyficzną aparaturę do rejestracji i analizy ulotu od linii [63]. Jej zasadniczą częścią jest antena oraz wzmacniacz szerokopasmowy zamontowane na śmigłowcu, wykorzystywanym do oblotów kontrolnych linii elektroenergetycznych.

Tab. 2.8. Modelowe defekty na przewodach linii elektroenergetycznych [32]

Defekt A	Defekt B	Defekt C	Defekt D	Defekt E
				



Rys. 2.23. Obrazy fazowo-rozdzielcze zakłóceń przy napięciu 75 kV [32]: a) defekt typu *A*, b) defekt typu *B*, c) defekt typu *C*, d) defekt typu *D*, e) defekt typu *E* dla a = 1,2 m, f) defekt typu *E* dla a = 0,6 m

Metoda ta jest szeroko stosowana w krajach gospodarczo rozwiniętych, jak również w Polsce przy eksploatacji linii przesyłowych 400 kV i 220 kV.

3. Analiza pola elektrycznego w liniach przesyłowych wysokiego napięcia

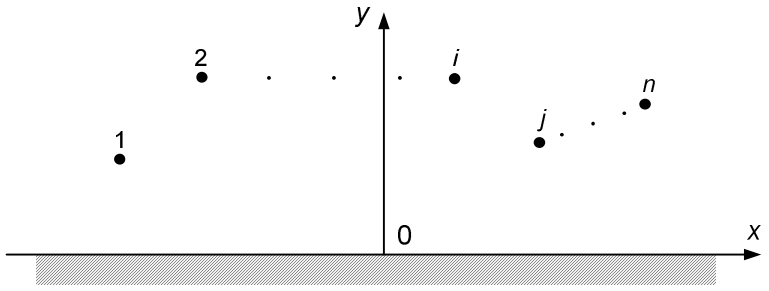
3.1. Model matematyczny pola elektrycznego

Znajomość największych wartości natężenia pola elektrycznego na powierzchni przewodów linii elektroenergetycznych wysokich i najwyższych napięć jest niezbędna do oceny skutków ulotu elektrycznego, w tym poziomu zakłóceń radioelektrycznych, poziomu hałasu i wielkości strat mocy. Stosując metodę ładunków symulowanych [101] opracowano procedury numeryczne wyznaczania rozkładu natężenia pola elektrycznego w otoczeniu przewodów fazowych linii napowietrznych oraz na ich powierzchni.

W modelu matematycznym przyjęto następujące założenia:

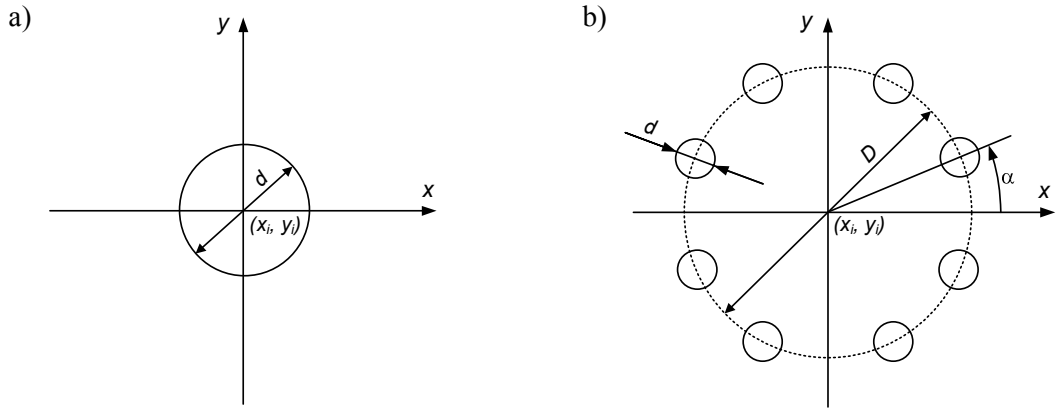
— przewody linii elektroenergetycznej są przewodzącymi walcami, równoległymi względem siebie i powierzchni ziemi,
— przewody linii są nieskończenie długie,
— linia zawiera *n* przewodów w przyjętym układzie współrzędnych 0xy (rys. 3.1), którymi są przewody fazowe linii (pojedyncze lub wiązkowe – rys. 3.2) oraz przewody odgromowe,
— ziemia jest idealnie gładką i przewodzącą powierzchnią,
— pomija się wpływ obiektów sąsiednich, takich jak drzewa, słupy itp.

Uwzględniając możliwość stosowania przewodów wiązkowych (rys. 3.2), układ *n* przewodów tworzy fizycznie zbiór *m* przewodów (rys. 3.1).



Rys. 3.1. Zbiór *n* przewodów linii elektroenergetycznej

Przy powyższych założeniach na *m* przewodach linii rozłożony jest ze stałą gęstością liniową ładunek, którego wartość zależy od napięcia przewodów względem ziemi oraz ich konfiguracji przestrzennej.



Rys. 3.2. Przewody fazowe linii elektroenergetycznych: a) pojedynczy, b) wiązkowy
(x_i, y_i) – współrzędne przewodu, d – średnica przewodu, D – średnica wiązki, α – kąt mierzony od osi $0x$ do pierwszego przewodu wiązki

Związek pomiędzy napięciami fazowymi przewodów a ładunkami powierzchniowymi – na podstawie zasady superpozycji potencjału i metody odbić lustrzanych – przedstawia wyrażenie:

$$\left[\hat{U}\right]_{m\times 1} = \left[\delta\right]_{m\times m}\left[\hat{\tau}\right]_{m\times 1} \tag{3.1}$$

gdzie:

$\hat{U}_1, \ldots, \hat{U}_n$ – zespolone wartości napięć fazowych przewodów,
$\hat{\tau}_1, \ldots, \hat{\tau}_n$ – gęstości liniowe ładunków przewodów,
δ_{ii} – współczynniki potencjałowe własne ($i = 1, \ldots, n$),
$\delta_{ij} = \delta_{ji}$ – współczynniki potencjałowe wzajemne ($i \neq j$; $i, j = 1, \ldots, n$),

w którym elementy macierzy $[\delta]$ – tzw. współczynniki potencjałowe – obliczane są na podstawie wzorów [101]:

$$\delta_{ii} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\ln\frac{4y_i}{d_i} \tag{3.2}$$

$$\delta_{ij} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\ln\frac{a_{ij'}}{a_{ij}} \tag{3.3}$$

gdzie:

ε_0 – przenikalność elektryczna próżni,
d_i – średnica (ewentualnie średnica zastępcza) i–tego przewodu,
a_{ij} – odległość między przewodem i–tym a j–tym,
$a_{ij'}$ – odległość między przewodem i–tym a odbiciem lustrzanym względem powierzchni ziemi przewodu j–tego.

W równaniu (3.1) znane są wartości napięć fazowych przewodów linii oraz charakterystyczne wartości współczynników potencjałowych przewodów, określone

wzorami (3.2) i (3.3), co pozwala wyrazić gęstości liniowe ładunków przewodów jako rozwiązanie równania (3.1):

$$\left[\hat{\tau}\right] = \left[\delta\right]^{-1}\left[\hat{U}\right] \tag{3.4}$$

Ładunki rozmieszczone na przewodach linii oraz ich odbiciach względem powierzchni ziemi są w otaczającej przestrzeni źródłem pola elektrycznego. W punkcie P o współrzędnych (x, y) – w szczególności punkt $P(x, y)$ może znajdować się na powierzchni przewodu (rys. 3.3) – wartość wektora natężenia pola elektrycznego wytworzonego przez ładunek rozmieszczony na przewodzie o numerze i wyraża się wzorem:

$$\hat{E}_i = \frac{\hat{\tau}_i}{2\pi\varepsilon_0 r_i} \tag{3.5}$$

natomiast wartość wektora natężenia pola elektrycznego wytworzonego przez ładunek rozmieszczony na odbiciu lustrzanym (rys. 3.3) przewodu o numerze i wyraża się wzorem:

$$\hat{E}_{i'} = \frac{\hat{\tau}_i}{2\pi\varepsilon_0 r_{i'}} \tag{3.6}$$

gdzie:

r_i, $r_{i'}$ – odległości przewodu oraz jego odbicia od punktu P.

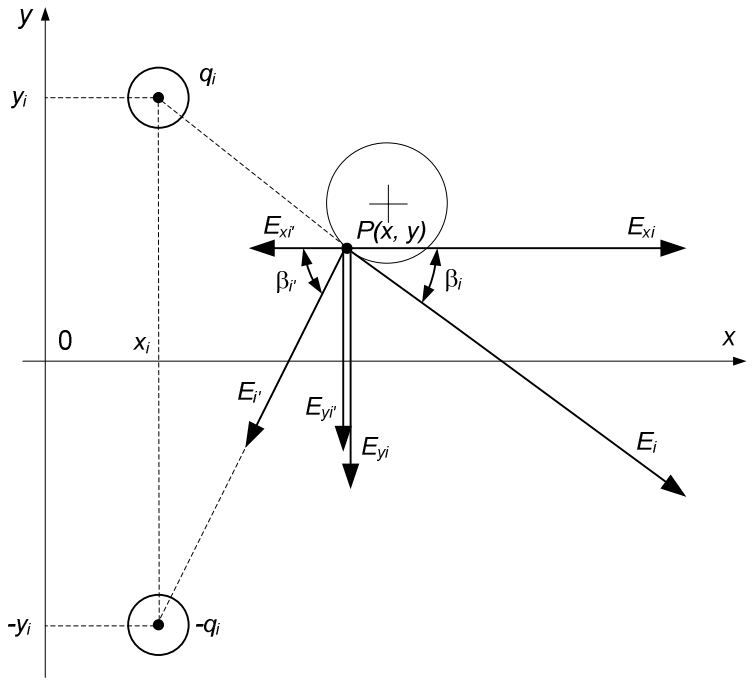
Wektor wypadkowy natężenia pola elektrycznego w punkcie $P(x, y)$ wytworzony jest przez m ładunków rozmieszczonych na przewodach linii i m ładunków rozmieszczonych na ich odbiciach lustrzanych. Składowe tego wektora w kierunku osi $0x$ i w kierunku osi $0y$ są sumami w następującej postaci:

$$\hat{E}_x = \sum_{i=1}^{m}\left(\hat{E}_{xi} - \hat{E}_{xi'}\right) \tag{3.7}$$

$$\hat{E}_y = \sum_{i=1}^{m}\left(\hat{E}_{yi} + \hat{E}_{yi'}\right) \tag{3.8}$$

gdzie:

$\hat{E}_{xi}, \hat{E}_{yi}, \hat{E}_{xi'}, \hat{E}_{yi'}$ – składowe wektora wywołanego przez ładunek i–tego przewodu oraz jego odbicia lustrzanego (rys. 3.3), które wyrażone są wzorami:



Rys. 3.3. Wektory natężenia pola elektrycznego pochodzącego od ładunków przewodu *i*–tego i jego odbicia lustrzanego

$$\hat{E}_{xi} = \hat{E}_i \cos\beta_i, \quad \hat{E}_{yi} = \hat{E}_i \sin\beta_i, \quad \hat{E}_{xi'} = \hat{E}_{i'} \cos\beta_{i'}, \quad \hat{E}_{yi'} = \hat{E}_{i'} \sin\beta_{i'} \qquad (3.9)$$

Podstawiając (3.9) do (3.5) i (3.6), a następnie do (3.7) i (3.8) składowe wektora wypadkowego wyrażone są następującymi wzorami:

$$\hat{E}_x = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \sum_{i=1}^{m} \hat{\tau}_i \left(\frac{\cos\beta_i}{r_i} - \frac{\cos\beta_{i'}}{r_{i'}} \right) = E_{xm} \exp(\mathrm{j}\varphi_x) \qquad (3.10)$$

$$\hat{E}_y = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \sum_{i=1}^{m} \hat{\tau}_i \left(\frac{\sin\beta_i}{r_i} + \frac{\sin\beta_{i'}}{r_{i'}} \right) = E_{ym} \exp(\mathrm{j}\varphi_y) \qquad (3.11)$$

Wartości chwilowe wektorów składowych (3.10) i (3.11) wyrażone jako zależności od czasu, są funkcjami harmonicznymi o pulsacji sieciowej ω, amplitudach E_{xm}, E_{ym} oraz fazach φ_x, φ_y:

$$E_x(t) = E_{xm} \sin(\omega t + \varphi_x) \qquad (3.12)$$

$$E_y(t) = E_{ym} \sin(\omega t + \varphi_y) \qquad (3.13)$$

Wartość chwilowa wektora wypadkowego pola elektrycznego wynosi:

$$E(t) = \sqrt{E_x^2(t) + E_y^2(t)} \tag{3.14}$$

natomiast jego wartość największa wzorem:

$$E_{mt} = \max_{\omega t \in [0,2\pi]} \left[E(t) \right] \tag{3.15}$$

W przypadku analizy pola elektrycznego na powierzchniach przewodów linii napowietrznej, na każdym przewodzie wybierane jest K punktów, w których obliczana jest wartość natężenia pola elektrycznego (3.15). Jeżeli dana wiązka linii jest N-przewodowa, (w szczególnym przypadku $N = 1$), to największa wartość natężenia pola elektrycznego na powierzchni przewodu przyjmowana jest jako [13, 15, 18]:

$$E_{max} = \frac{1}{KN} \left[1 + \frac{d}{D}(N-1) \right] \sum_N \sum_K E_{mt} \tag{3.16}$$

gdzie:

d – średnica przewodu w wiązce,

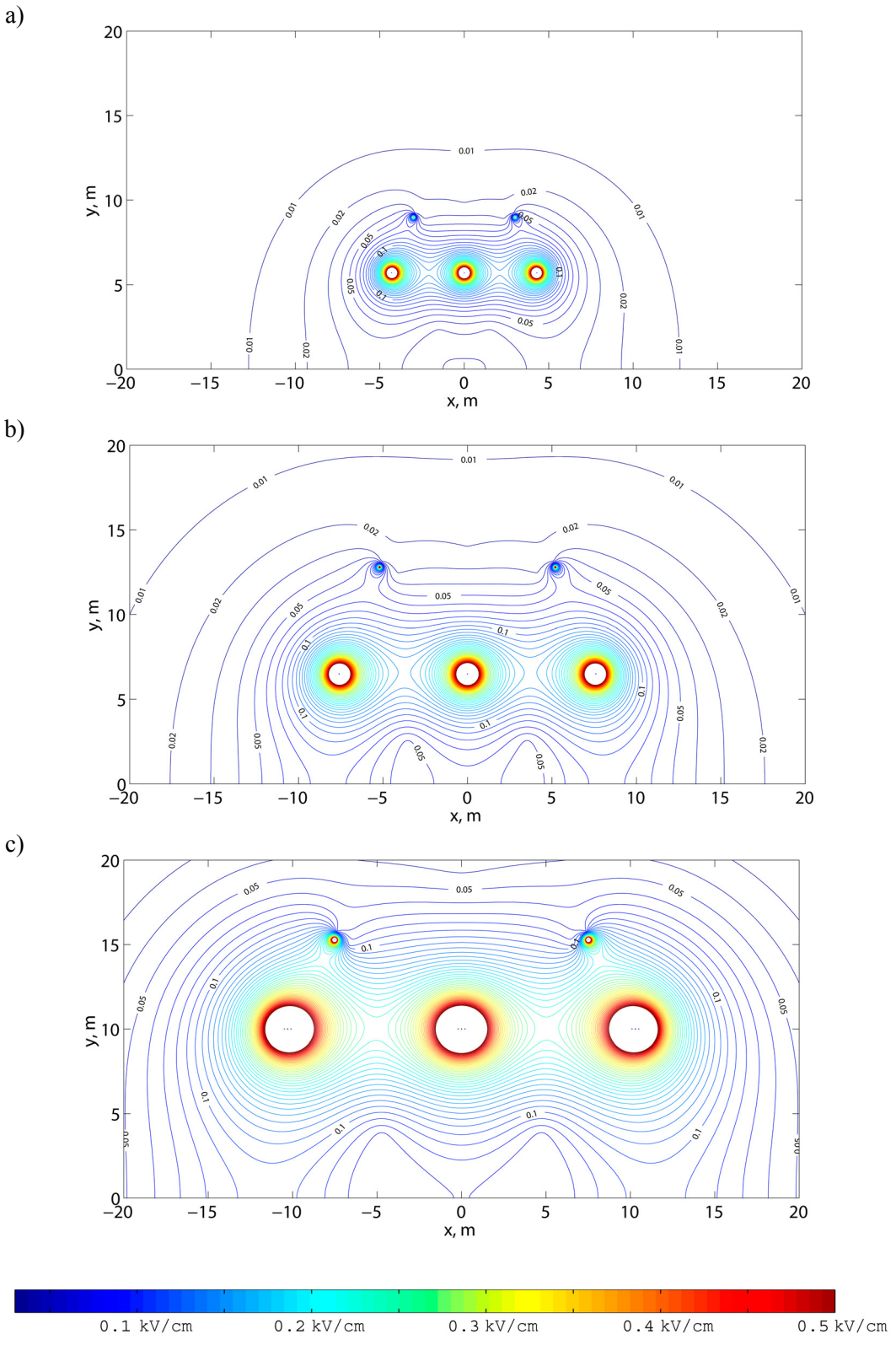
D – średnica wiązki (rys. 3.2)

3.2. Obrazy pola elektrycznego w wybranych konstrukcjach linii przesyłowych

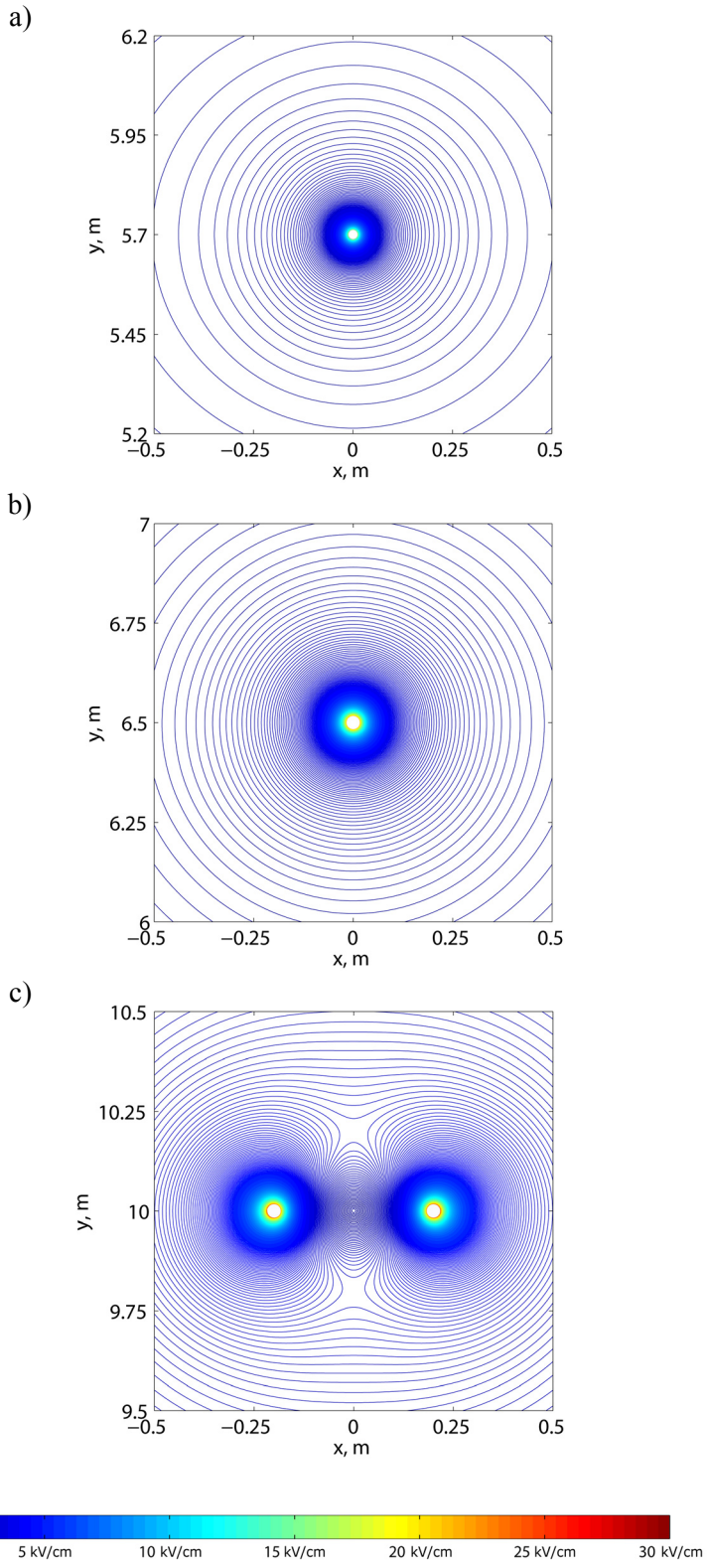
Wzory (3.15) i (3.16) stanowiły podstawę opracowanych w środowisku MATLAB programów komputerowych. Przy ich zastosowaniu przeprowadzono analizę rozkładów oraz obrazów pola elektrycznego w otoczeniu linii elektroenergetycznych.

Przykładowe obrazy pola elektrycznego w otoczeniu jednotorowych linii 110, 220 i 400 kV (rys 3.4), otrzymano przy założeniu najwyższego napięcia roboczego wynoszącego odpowiednio 123 kV, 245 kV i 420 kV. Obrazy te stanowią izolinie największych wartości chwilowych E_{mt} wektora wypadkowego (3.15), wyrażone w kV/cm. Specyfiką powietrznych układów izolacyjnych elektroenergetycznych linii przesyłowych jest silna niejednostajność rozkładu pola elektrycznego, wyraźny wpływ napięcia znamionowego linii na wartości natężenia pola elektrycznego, oraz zależność zasięgu strefy oddziaływania elektromagnetycznego od międzyfazowych i doziemnych odstępów izolacyjnych, które są proporcjonalne do wartości napięcia znamionowego linii.

W wyniku silnej niejednostajności rozkładu pola elektrycznego, możliwe jest powstawanie w otoczeniu przewodów fazowych linii wyładowań niezupełnych w postaci ulotu elektrycznego już przy napięciu roboczym.



Rys. 3.4. Obrazy natężenia pola elektrycznego w środku przęsła jednotorowych linii w układzie płaskim o napięciu znamionowym 110 kV (a), 220 kV (b) i 400 kV (c)



Rys. 3.5. Obrazy natężenia pola elektrycznego w otoczeniu przewodu fazy środkowej a) linia 110 kV, przewód AFL-6 240 mm^2, b) linia 220 kV, przewód AFL-8 525 mm^2, c) linia 400 kV, przewód 2 × AFL-8 525 mm^2

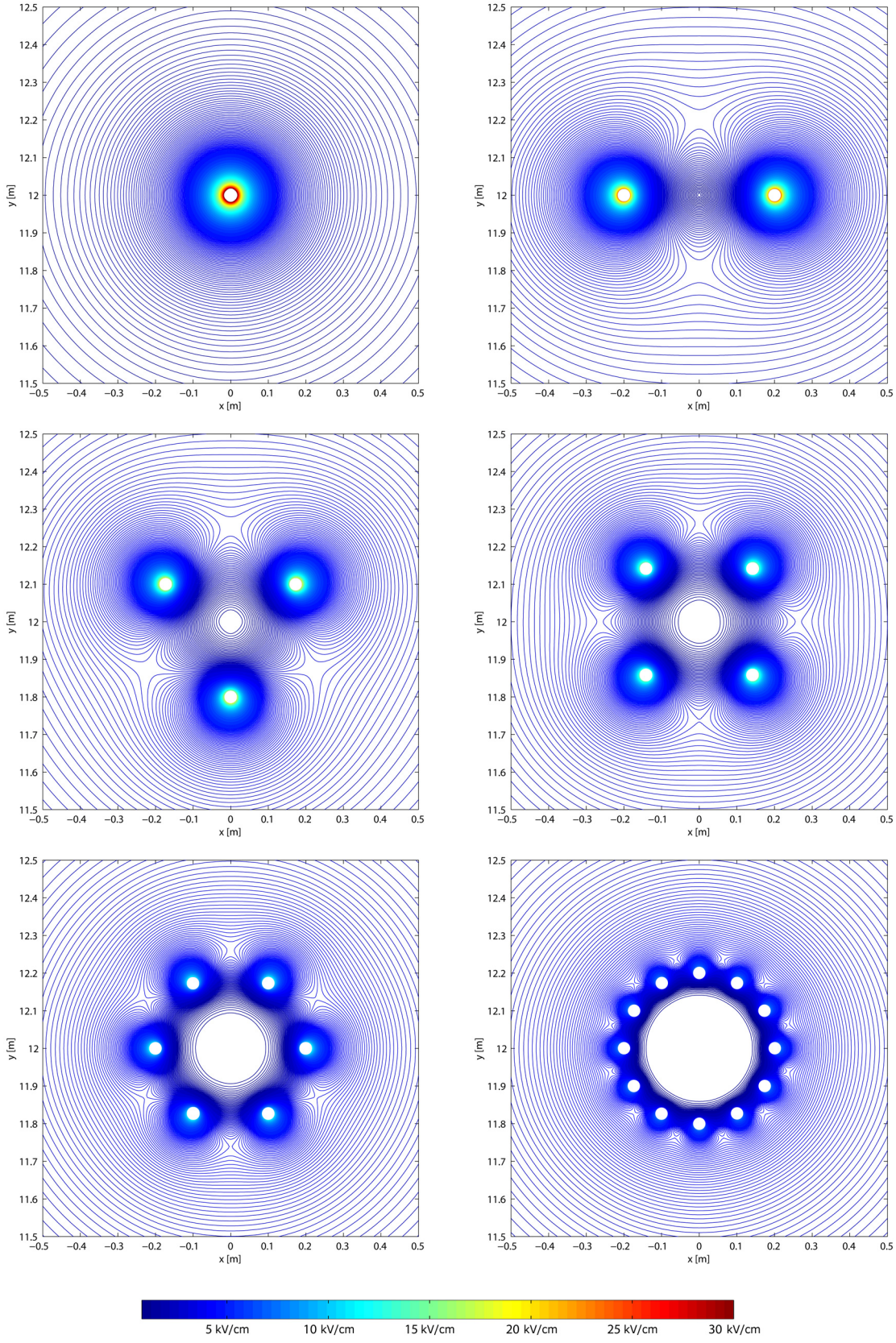
Na uwagę zasługuje fakt, że w otoczeniu i na powierzchni przewodów fazowych obrazy natężenia pola elektrycznego zasadniczo nie różnią się pod względem wartości maksymalnych (rys. 3.5). Jest to efektem działań projektowych zmierzających między innymi do optymalizacji konstrukcji napowietrznych linii elektroenergetycznych również w aspekcie zjawiska ulotu elektrycznego.

3.3. Wpływ konstrukcji przewodów fazowych na rozkład pola elektrycznego

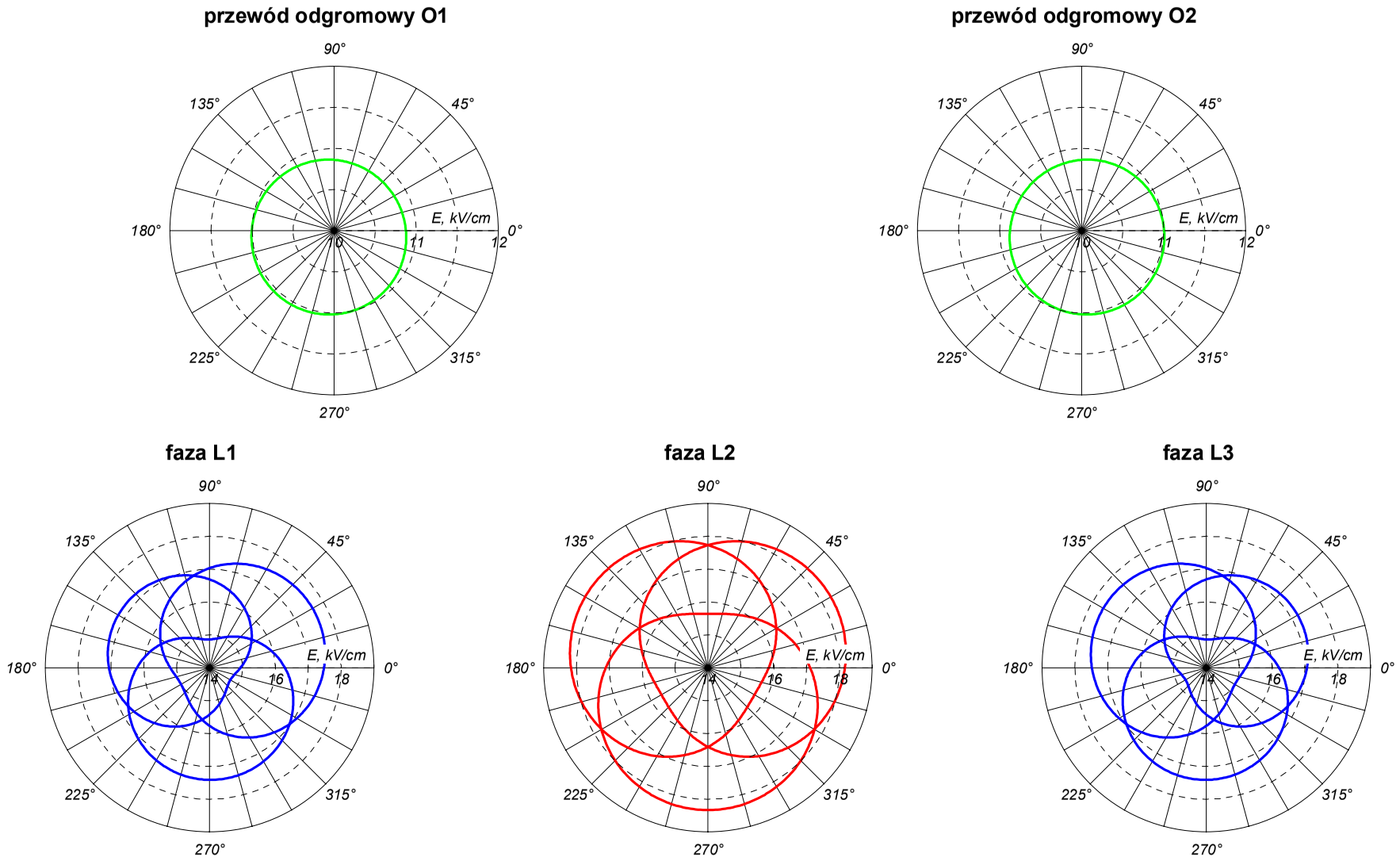
Jednym z zasadniczych czynników decydujących o powstawaniu ulotu elektrycznego w liniach elektroenergetycznych, jest rozwiązanie konstrukcyjne przewodów fazowych linii. Zmniejszenie wartości natężenia pola elektrycznego na powierzchniach przewodów fazowych uzyskuje się przez stosowanie wiązek przewodowych, które są wprowadzone w liniach napowietrznych o napięciu znamionowym 400 kV i wyższym. Liczba przewodów w wiązce wynosi od 2 do 5, lecz w liniach doświadczalnych o napięciu najwyższym i w układach modelowych może być znacznie większa. Dla zilustrowania wpływu liczby przewodów w wiązce na rozkład natężenia pola elektrycznego w jej otoczeniu przedstawiono na rysunku 3.6 przykładowe obrazy pola elektrycznego w otoczeniu fazy środkowej linii 400 kV. Analizę przeprowadzono przy założeniu, że wiązka składa się z $N = 1, 2, 3, 4, 6, 12$ przewodów typu ALF-8 525 mm^2 o średnicy 31,5 mm, rozmieszczonych na obwodzie koła o średnicy 400 mm. Należy nadmienić, że w polskich liniach przesyłowych o napięciu znamionowym 400 kV znaczenie mają wyłącznie przypadki $N = 2$ oraz $N = 3$, przy czym w tym drugim przypadku zastosowanie znajduje przewód ALF-8 350 mm^2 o średnicy 26,1 mm.

Dla oceny skutków oddziaływania ulotu elektrycznego istotna jest znajomość natężenia pola elektrycznego na powierzchni przewodów linii elektroenergetycznej. Wartość natężenie pola na powierzchni przewodu nie jest wielkością stałą, lecz jest funkcją kąta α (rys. 3.2). Na rysunku 3.7 przedstawiono wykresy natężenia pola elektrycznego na powierzchni przewodów w jednotorowej linii 400 kV z potrójnymi ($N = 3$) przewodami wiązkowymi, we współrzędnych biegunowych, przy czym są to największe wartości chwilowe natężenia pola E_{mt} określone wzorem (3.15). W przedstawionym przypadku największe wartości E_{mt} występują na przewodach fazy środkowej *L2*, a najmniejsze – na przewodach odgromowych *O1* i *O2*. Wykresy powyższe umożliwiają wyznaczenie największych wartości natężenia pola elektrycznego E_{max} na powierzchniach przewodów według wzoru (3.16).

Na rysunku 3.8 a pokazano wartości E_{max} dla przewodów jednotorowej linii napowietrznej, otrzymane przy założeniu, że przewody fazowe składają się z $N = 1, 2, 3, 4, 6, 12$ – przewodowej wiązki typu ALF-8 525 mm^2.

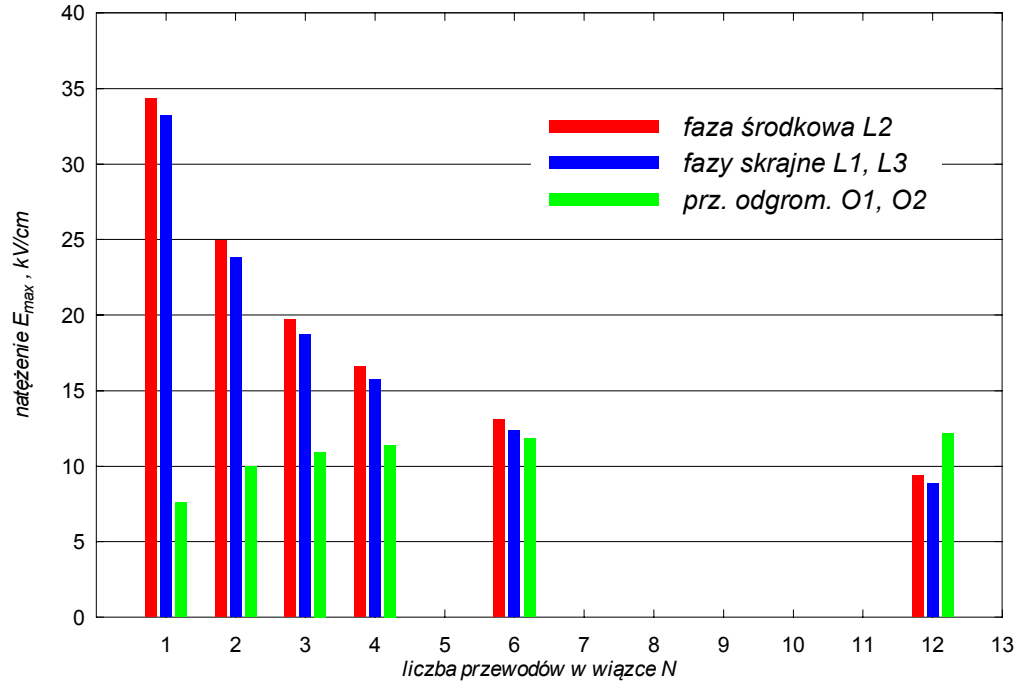


Rys. 3.6. Obrazy natężenia pola elektrycznego w otoczeniu fazy środkowej jednotorowej linii 400 kV dla liczby przewodów w wiązce $N = 1, 2, 3, 4, 6$ i 12

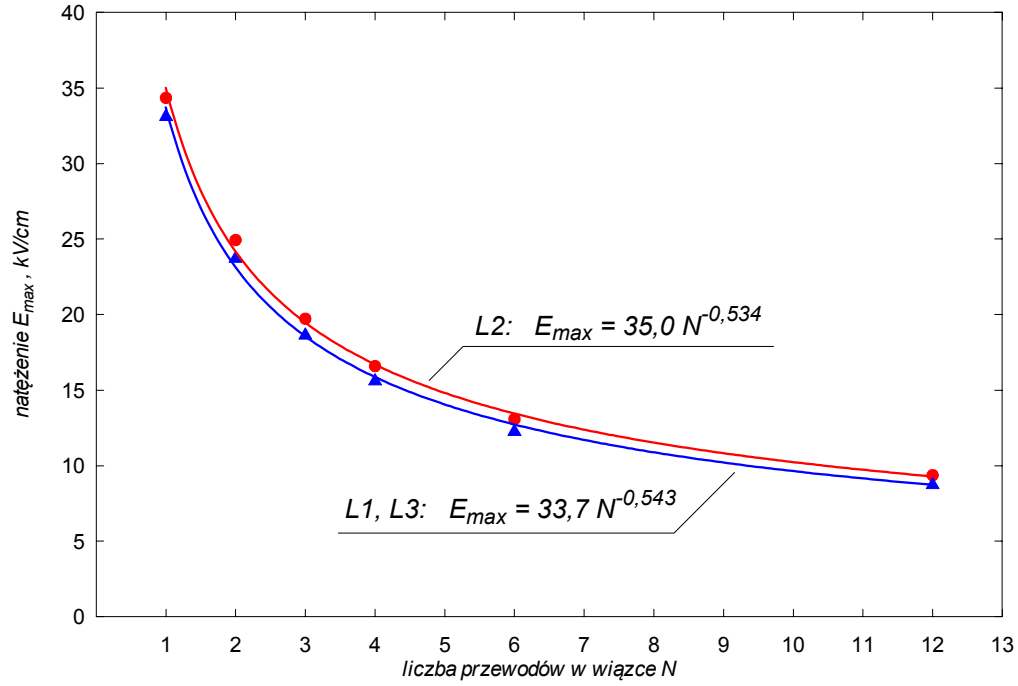


Rys. 3.7. Rozkłady natężenia pola elektrycznego na powierzchni przewodów jednotorowej linii 400 kV z potrójną ($N = 3$) wiązką przewodową, przedstawione w postaci wykresów we współrzędnych biegunowych

a)



b)



Rys. 3.8. a) Zależność natężenia pola elektrycznego E_{max} na powierzchniach przewodów jednotorowej linii 400 kV od liczby przewodów N w wiązce, b) aproksymacje $E_{max}(N)$ funkcjami potęgowymi

Zwiększanie liczby przewodów w wiązce N powoduje zmniejszenie wartości E_{max} na przewodach fazowych, przy czym jak wykazała analiza jest to zależność potęgowa:

$$E_{max} = aN^{-b} \tag{3.17}$$

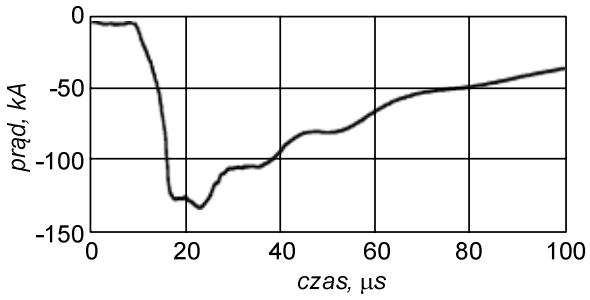
Dla rozważanej konstrukcji linii można przyjąć, że wykładnik b wynosi w przybliżeniu 0,5 (rys. 3.8b), a więc maksymalne natężenie pola elektrycznego na przewodach fazowych jest odwrotnie proporcjonalne do pierwiastka z liczby N przewodów w wiązce. Zwiększaniu liczby N towarzyszy wzrost wartości E_{max} na przewodach odgromowych, jednak wartość ta wyraźnie ustala się przy większej liczbie przewodów w wiązce (rys. 3.8a).

4. Modelowanie układów elektroenergetycznych dla analizy wpływu ulotu na warunki propagacji przepięć atmosferycznych

4.1. Piorunowe zaburzenia elektromagnetycznego

Wyładowania atmosferyczne są źródłem przepięć, które stanowią poważne narażenie układów izolacyjnych urządzeń i układów elektroenergetycznych. W ocenie zagrożenia wyładowaniami piorunowymi obiektów elektroenergetycznych wysokich i najwyższych napięć, podstawowe znaczenie ma pierwsza składowa wyładowania odgórnego biegunowości ujemnej. Właśnie ten rodzaj wyładowania (według [28] w około 90% przypadków) dominuje w przypadku obiektów o wysokości do kilkudziesięciu metrów i na terenach równinnych.

Kształt prądu wyładowania piorunowego jest przebiegiem aperiodycznym o wklęsłym czole, który narasta w czasie kilku mikrosekund do wartości szczytowej, a następnie maleje w przybliżeniu wykładniczo, osiągając połowę wartości szczytowej po czasie kilkudziesięciu mikrosekund (rys. 4.1) [75].



Rys. 4.1. Przykładowy oscylogram prądu wyładowania głównego (opracowano na podstawie [75])

Dowolny parametr X prądu piorunowego jest zmienną losową, która podlega rozkładowi logarytmo-normalnemu [17]:

$$f(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\beta x}\exp\left(-\frac{1}{2}\left[\frac{\ln(x/M)}{\beta}\right]^2\right) \tag{4.1}$$

gdzie:

M – mediana

β – parametr określający nachylenie rozkładu

Proponowane przez CIGRE wartości M i β najistotniejszych parametrów: wartości szczytowej I_F, maksymalnej stromości narastania S_m, zastępczego czasu wystąpienia wartości szczytowej (minimalnego równoważnego czasu trwania czoła) $t_m = I_F / S_m$, rozkładu warunkowego stromości $S_m|I_F$, czasu do półszczytu na grzbiecie t_h oraz współczynnika korelacji pomiędzy t_m i I_F – zawarto w tabeli 4.1.

Tab. 4.1. Wartości wybranych parametrów pierwszej składowej odgórnego wyładowania biegunowości ujemnej według CIGRE [17]

Parametr X	Prąd pioruna I			
	3 kA ≤ I ≤ 20 kA		I >20 kA	
	M	β	M	β
I_F, wartość szczytowa, kA	61,1	1,330	33,3	0,605
S_m, maksymalna stromość narastania, kA/μs	24,3	0,599	24,3	0,599
$t_m = I_F / S_m$, minimalny równoważny czas czoła, μs	2,51	1,230	1,37	0,670
$S_m \mid I_F$, rozkład warunkowy S_m, kA/μs	$12{,}0I_F^{0{,}171}$	0.554	$6{,}50I_F^{0{,}376}$	0,554
t_h, czas do półszczytu, μs	77,5	0,557	77,5	0,557
$\rho_c(t_m, I_F)$ współczynnik korelacji pomiędzy t_m i I_F	0,89		0,56	

Poglądy dotyczące wartości poszczególnych parametrów statystycznych prądów piorunowych – szczególnie wartości szczytowej – ulegają ciągłej weryfikacji, co związane jest z intensywnym rozwojem i stosowaniem w ciągu ostatnich dwudziestu lat systemów automatycznej rejestracji wyładowań piorunowych [51, 52].

Przykładowe mediany wartości szczytowej prądu piorunowego wyznaczone w niektórych krajach w ciągu ostatnich lat przedstawiono w tabeli 4.2.

Zagrożenie przepięciami atmosferycznymi układów elektroenergetycznych związane jest zarówno z bezpośrednimi wyładowaniami piorunowymi do tych układów, jak i wyładowaniami, których kanał zlokalizowany jest w pewnej odległości. Mechanizm powstawania przepięć jest w obu przypadkach odmienny. W pierwszym przypadku powstają przepięcia bezpośrednie, a w drugim przepięcia pośrednie (indukowane).

Tab. 4.2. Mediany rozkładu wartości szczytowej prądu piorunowego biegunowości ujemnej

Kraj (źródło)	Mediana, kA	Uwagi
Austria (Diendorfer G., et al. [25])	12	dane z systemu ALDIS za okres 1995-1997
Brazylia (Schroeder M.A.O, et al. [109])	45,3	dane ze stacji Morro do Cachimbo Station za okres 1985-1998
Irlandia (Corbett J., et al. [21])	9-10	dane z systemu LLS za okres 12 lat
Japonia (Narita T., et al. [75])	39 kA	dane z wyładowań do słupów linii 500 (1000 kV) za okres 1994-1997
Kanada (Hussein A.M., et al. [54])	7,19	dane z wyładowań do Toronto Canadian National Tower (wysokość 553 m) za okres 1992-2001
Włochy (Bernardi M., et al. [9])	22,7	dane z systemu SIRF za okres 1995-2000

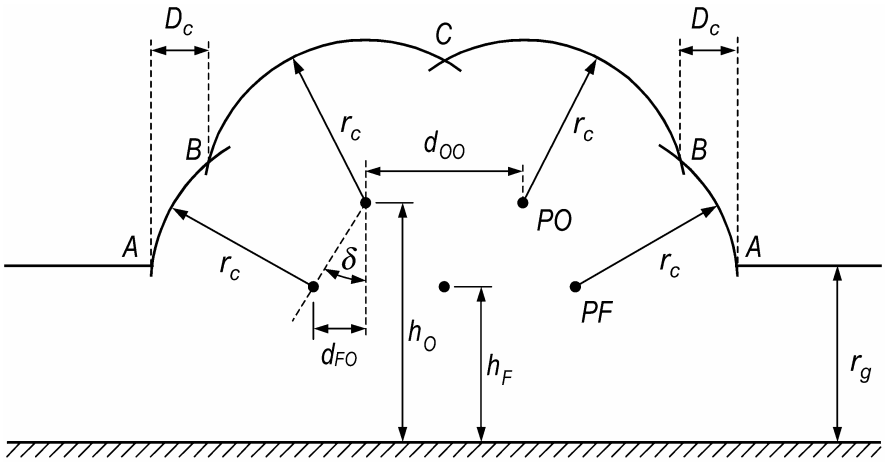
Skutki bezpośredniego wyładowania piorunowego do napowietrznych linii elektroenergetycznych są ściśle związane ze stosowaną ochroną odgromową w postaci zwodów poziomych wysokich, czyli przewodów odgromowych. Dla prawidłowo zaprojektowanej ochrony odgromowej stacji (odpowiednie pokrycie obszaru stacji strefą osłonową zwodów pionowych), bezpośrednie uderzenie pioruna w urządzenia i aparaty tam zainstalowane jest praktycznie zdarzeniem niemożliwym. Również zagrożenie przeskokiem odwrotnym jest minimalne, co wynika z wielokrotnie mniejszych wartości oporu układu uziomowego stacji w stosunku do uziomów słupów. Narażenie izolacji stacji elektroenergetycznych wysokich i najwyższych napięć przepięciami atmosferycznymi, wynika więc przede wszystkim z wyładowań do linii wprowadzonych do stacji.

Pomimo stosowania przewodów odgromowych ich działanie ochronne nie jest całkowicie niezawodne, a tym samym możliwe jest uderzenie pioruna w przewód roboczy linii. Skutkiem tego jest powstanie przepięć stanowiących narażenie nie tylko dla izolacji linii, ale powstała fala przepięciowa ulegając propagacji stanowi zagrożenie izolacji stacji, do których linia jest przyłączona.

W sytuacji, gdy wyładowanie piorunowe zostanie przechwycone przez przewody odgromowe bądź uziemione elementy konstrukcyjne (np. słupy), istnieje jednak niebezpieczeństwo, że w niesprzyjających warunkach w linii wystąpi przeskok odwrotny i towarzyszące mu zwarcie w postaci prądu następczego. Mimo, że prąd następczy jest łatwo gaszony (zwarcie przemijające) przez automatykę samoczynnego ponownego załączanie, to wyłączenie niejednokrotnie ważnych linii systemowych obniża w ogólności niezawodność pracy układu przesyłu i rozdziału energii elektrycznej.

Dla celów analizy skuteczności ochrony napowietrznych linii elektroenergetycznej przez przewody odgromowe wykorzystywana jest najczęściej uproszczona wersja teorii elektrogeometrycznej, wiążąca odległość decyzji r_D pioruna z wartością szczytową I_F jego prądu (rys. 4.2), przy czym związek ten jest najczęściej wyrażany wzorem [17, 57, 58]:

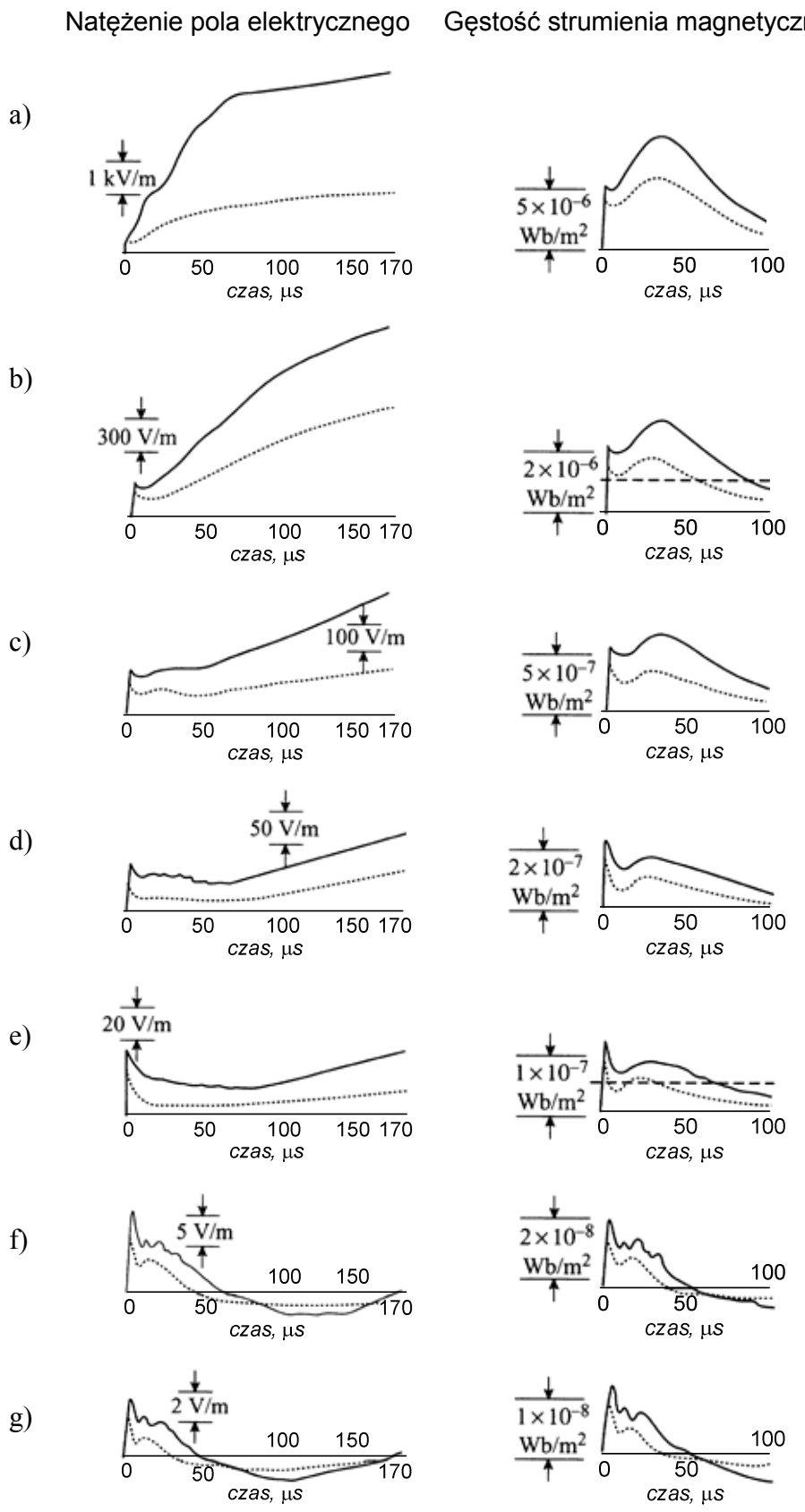
$$r_D = AI_F^b \tag{4.2}$$



Rys. 4.2. Model elektrogeometryczny strefy ochronnej przewodów odgromowych linii napowietrznej (według [17]): *PO* – przewody odgromowe, *PR* – przewody fazowe

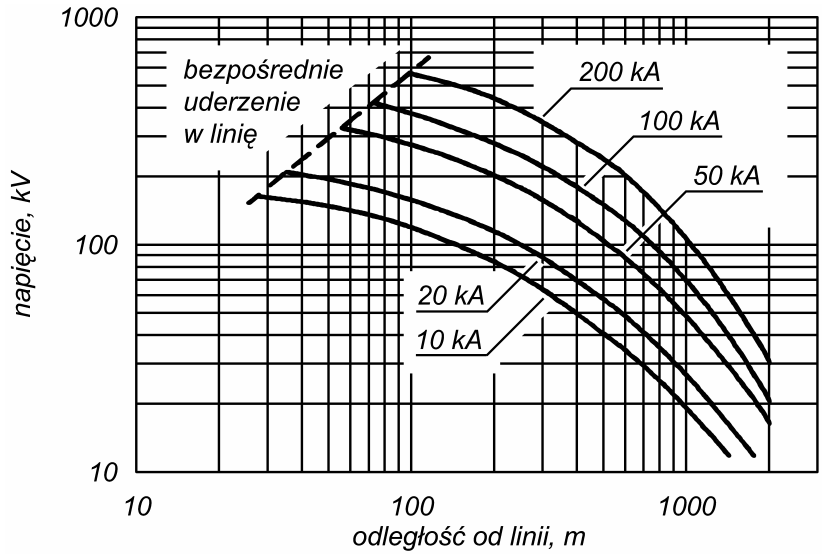
Łuki o promieniach r_c wykreślone z przewodów fazowy oraz odgromowych (rys. 4.2), stanowią wraz z prostą poziomą usytuowaną na wysokości r_g zbiór punktów, określających dla wyładowania liderowego najkrótszą odległość do przewodów odgromowych, fazowych i do powierzchni ziemi, a tym samym określają lokalizację trafienia pioruna. Powyżej pewnej wartości szczytowej I_{max} prądu pioruna, punkty *A* i *B* pokrywają się, a uderzenie pioruna w przewody fazowe jest niemożliwe. Jednocześnie punkty *A* wyznaczają granicę pomiędzy wyładowaniami bezpośrednimi a wyładowaniami pośrednimi prowadzącymi do powstawania przepięć indukowanych. W otoczeniu linii może więc istnieć obszar zależny od rozmieszenia geometrycznego przewodów linii, z którego pomimo istnienia przewodów odgromowych, wyładowanie nastąpi w przewód fazowy linii. Przy założeniu prostopadłego do ziemi kierunku wyładowania liderowego, wielkość tego obszaru określa pozioma odległość D_c pomiędzy punktami *A* i *B* (rys. 4.2).

Przepięcia pośrednie są wynikiem indukowania potencjałów i napięć poprzez oddziaływanie impulsowego pola elektromagnetycznego, istniejącego w przestrzeni otaczającej kanał wyładowania atmosferycznego (rys 4.3) [3, 6, 8, 88].



Rys. 4.3. Przebiegi czasowe natężenia pola elektrycznego w kierunku pionowym oraz gęstości strumienia magnetycznego w kierunku poziomym dla pierwszego (linia ciągła) i kolejnego (linia przerywana) wyładowania głównego w odległościach: a) – 1 km, b) – 2 km, c) – 5 km, d) – 10 km, e) – 15 km i f) – 200 km od kanału pioruna (opracowano na podstawie[98])

Przepięcia indukowane nie stanowią istotniejszego narażenia izolacji układów wysokich i najwyższych napięć a ich rozważania ogranicza się do układów niskich i średnich napięć. W publikacji [1] dokonano oszacowania wartości szczytowej przepięć indukowanych w linii o napięciu znamionowym 20 kV (rys. 4.4) dla różnych wartości szczytowych prądów piorunowych, w zależności od odległości uderzenia pioruna od linii.



Rys. 4.4. Wartości szczytowe przepięć indukowanych w linii średniego napięcia w zależności od odległości uderzenia pioruna dla różnych wartości szczytowych prądu pioruna [1]

Krzywe z rysunku 4.4 otrzymano wiążąc w myśl teorii elektrogeometrycznej wartość szczytową prądu pioruna z jego odległością decyzji. Tym samym przedstawia on punkty krytyczne, w których dla danej odległości uderzenia pioruna i powyżej pewnej wartości szczytowej prądu, wyładowanie pośrednie przechodzi w wyładowanie bezpośrednie do linii. Na podstawie rysunku 4.4 należy wnioskować, że poziom przepięć indukowanych w liniach elektroenergetycznych nie przekracza wartości 500 kV, co potwierdza postawioną wcześniej tezę, że nie stanowią one istotniejszego narażenia układów izolacyjnych wysokich i najwyższych napięć.

4.2. Model matematyczny linii elektroenergetycznych w warunkach ulotu

Podstawowym warunkiem przeprowadzenia analizy propagacji fal przepięciowych i określenia poziomu narażeń przepięciowych dla poszczególnych elementów układu elektroenergetycznego, za pomocą modelowania matematycznego zjawisk fizycznych, jest opracowanie kompleksowego modelu układu. Często, ze względu na złożoność obliczeń, model końcowy składa się z wielu modeli cząstkowych,

specyficznych dla poszczególnych elementów konstrukcyjnych oraz istotnych z punktu widzenia prowadzonej analizy, zjawisk fizycznych zachodzących w układzie.

Podstawowymi elementami układu elektroenergetycznego odwzorowywanymi w modelu matematycznym w warunkach przepięć atmosferycznych są: przewody fazowe i odgromowe, konstrukcje wsporcze, układy izolacyjne i uziomowe linii napowietrznych oraz elementy wyposażenia stacji elektroenergetycznych w postaci układów szyn zbiorczych, aparatury łączeniowej i pomiarowej, transformatorów i ograniczników przepięć. Do zjawisk fizykalnych modelowanych podczas analizy przepięć atmosferycznych należą między innymi: władowania piorunowe generujące fale przepięciowe, wyładowania iskrowe występujące na elementach izolacyjnych linii napowietrznych, zjawiska zachodzące w gruncie podczas przepływu prądu piorunowego oraz zjawisko ulotu elektrycznego występujące na przewodach fazowych linii napowietrznej. Ulot elektryczny na elementach układu elektroenergetycznego jest niekorzystny z eksploatacyjnego punktu widzenia, a co za tym idzie dąży się na drodze konstrukcyjnej do jego eliminacji lub ograniczania. Jednak w aspekcie narażeń przepięciowych, ulot może pozytywnie wpływać na przepięcia w układach izolacyjnych, powodując zmniejszenie wartości szczytowych oraz stromości narastania propagujących fal przepięciowych.

4.2.1. Istota modelu linii elektroenergetycznych

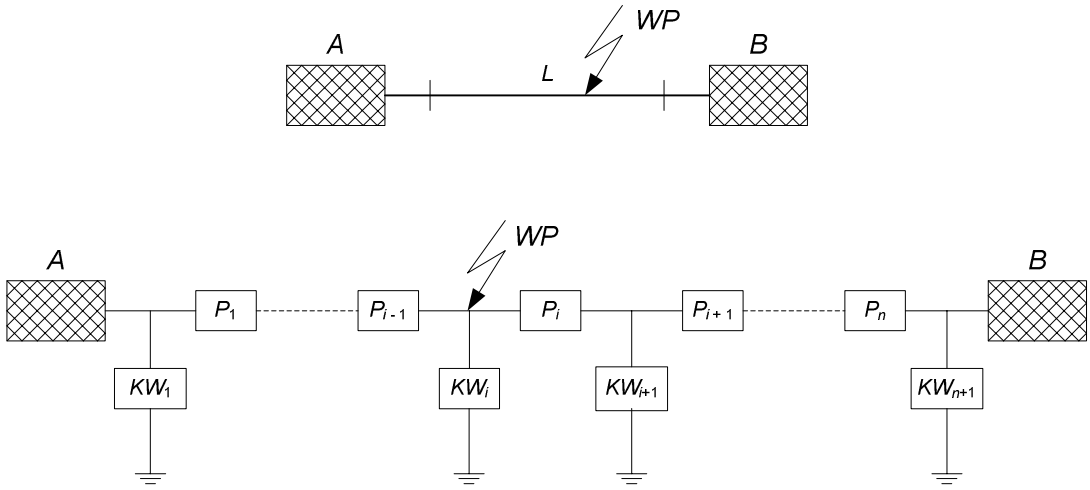
Analiza przepięć atmosferycznych wymaga opracowania modeli elementów konstrukcyjnych uwzględniających zachodzące w nich zjawiska falowe i udarowe (szybkozmienne). Ze względu na charakter rozpatrywanych przebiegów, modele takie są odmienne oraz znacznie bardziej złożone niż modele wykorzystywane do analizy przebiegów ustalonych czy przebiegów przepięć łączeniowych [77].

Linia elektroenergetyczna w warunkach przepięć przejściowych jest rozpatrywana jako linia długa, co wynika z konieczności uwzględnienia zachodzących w niej efektów falowych. Dodatkowo układy elektroenergetyczne w warunkach przepięć szybkozmiennych muszą być rozpatrywane jako obwody o parametrach rozłożonych.

Linia długa jest modelem jednorodnym, który we właściwy sposób może odwzorować przęsła linii napowietrznej w warunkach przepięć. Jednak linia napowietrzna nie jest układem jednorodnym ze względu na swoją konstrukcję, czyli istnienie przęseł i słupów. Implikuje to wypadkowy model linii napowietrznej w postaci kaskadowego połączenia modeli przęseł i konstrukcji wsporczych (rys. 4.5).

Propagacja fali w takim układzie jest związana z efektami falowymi takimi jak: przepuszczenie fali, odbicie od węzłów nieciągłości i tłumienie. Węzły nieciągłości mają szczególny wpływ na kształt fal przepięciowych przy wyładowaniach w konstrukcję wsporczą *KW* lub przewód odgromowy. Natomiast w przypadku wyładowań bezpośrednich do przewodów fazowych, jeżeli nie dojdzie do utraty wytrzymałości na

izolacji doziemnej, decydującą rolę odgrywają parametry falowe linii długich odwzorowujących przęsła *P*.



Rys. 4.5. Uogólniony model elektroenergetycznej linii napowietrznej
L – linia; *A*, *B* – stacje elektroenergetyczne, *P* – przęsła linii, *KW* – konstrukcje wsporcze, *WP* – wyładowanie piorunowe

Zmiana kształtu oraz zmniejszenie wartości szczytowych fal przepięciowych propagujących wzdłuż linii wynika z dwóch zasadniczych przyczyn:

a) propagacja fali odbywa się w stratnych obwodach ziemnopowrotnych, które stanowią przewody linii oraz środowisko przewodzące jakim jest ziemia.
b) przy znacznych wartościach szczytowych fal przepięciowych na przewodach pojawia się ulot elektryczny będący przyczyną strat energii.

Te dwa aspekty warunkują wybór właściwego modelu linii długiej, przy pomocy którego należy odwzorowywać przęsła linii napowietrznej przy analizie przepięć atmosferycznych.

Stacja elektroenergetyczna jest istotnym elementem układu elektroenergetycznego z punktu widzenia propagacji fal przepięciowych w liniach napowietrznych. Opracowanie modelu matematycznego stacji elektroenergetycznej ma zasadnicze znaczenie z dwóch powodów. Po pierwsze przy wyładowaniach atmosferycznych występujących w pobliżu stacji wpływa ona na pozom narażeń izolacji linii poprzez odbicie fali, po drugie jest elementem wrażliwym i narażonym na działanie przepięć docierających od strony linii napowietrznych. Przy analizie narażeń przepięciowych stacji elektroenergetycznych, konieczne jest dokładne odwzorowanie jej topografii, ponieważ przepięcie podlega skomplikowanym efektom falowym, przede wszystkim odbiciom wielokrotnym wewnątrz rozdzielni, wpływającym na poziom narażeń urządzeń i aparatów stacyjnych.

4.2.2. Modele linii długich

Dla szybkozmiennych przebiegów przepięć atmosferycznych przęsła linii przesyłowych rozpatrywane są jako wieloprzewodowe linie długie, których modele opracowywane są dla n wzajemnie sprzężonych pętli ziemnopowrotnych. Rozkłady napięć i prądów wzdłuż n-przewodowej linii elektroenergetycznej opisują równania, które dla przebiegu harmonicznego o pulsacji $\omega = 2\pi f$ przyjmują postać [7, 64]:

$$\begin{cases} -\dfrac{d}{dx}\begin{bmatrix} U_1(x) \\ \vdots \\ U_i(x) \\ U_j(x) \\ \vdots \\ U_n(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & \cdots & Z_{1i} & Z_{1j} & \cdots & Z_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{1i} & \cdots & Z_{ii} & Z_{ij} & \cdots & Z_{in} \\ Z_{1j} & \cdots & Z_{ij} & Z_{jj} & \cdots & Z_{jn} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{1n} & \cdots & Z_{in} & Z_{jn} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1(x) \\ \vdots \\ I_i(x) \\ I_j(x) \\ \vdots \\ I_n(x) \end{bmatrix} \\ -\dfrac{d}{dx}\begin{bmatrix} I_1(x) \\ \vdots \\ I_i(x) \\ I_j(x) \\ \vdots \\ I_n(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1i} & Y_{1j} & \cdots & Y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{1i} & \cdots & Y_{ii} & Y_{ij} & \cdots & Y_{in} \\ Y_{1j} & \cdots & Y_{ij} & Y_{jj} & \cdots & Y_{jn} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{1n} & \cdots & Y_{in} & Y_{jn} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1(x) \\ \vdots \\ U_i(x) \\ U_j(x) \\ \vdots \\ U_n(x) \end{bmatrix} \end{cases} \tag{4.3}$$

lub

$$\begin{cases} -\dfrac{d^2}{dx^2}\begin{bmatrix} U_1(x) \\ \vdots \\ U_i(x) \\ U_j(x) \\ \vdots \\ U_n(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & \cdots & Z_{1i} & Z_{1j} & \cdots & Z_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{1i} & \cdots & Z_{ii} & Z_{ij} & \cdots & Z_{in} \\ Z_{1j} & \cdots & Z_{ij} & Z_{jj} & \cdots & Z_{jn} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{1n} & \cdots & Z_{in} & Z_{jn} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1i} & Y_{1j} & \cdots & Y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{1i} & \cdots & Y_{ii} & Y_{ij} & \cdots & Y_{in} \\ Y_{1j} & \cdots & Y_{ij} & Y_{jj} & \cdots & Y_{jn} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{1n} & \cdots & Y_{in} & Y_{jn} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1(x) \\ \vdots \\ U_i(x) \\ U_j(x) \\ \vdots \\ U_n(x) \end{bmatrix} \\ -\dfrac{d^2}{dx^2}\begin{bmatrix} I_1(x) \\ \vdots \\ I_i(x) \\ I_j(x) \\ \vdots \\ I_n(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1i} & Y_{1j} & \cdots & Y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{1i} & \cdots & Y_{ii} & Y_{ij} & \cdots & Y_{in} \\ Y_{1j} & \cdots & Y_{ij} & Y_{jj} & \cdots & Y_{jn} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{1n} & \cdots & Y_{in} & Y_{jn} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Z_{11} & \cdots & Z_{1i} & Z_{1j} & \cdots & Z_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{1i} & \cdots & Z_{ii} & Z_{ij} & \cdots & Z_{in} \\ Z_{1j} & \cdots & Z_{ij} & Z_{jj} & \cdots & Z_{jn} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{1n} & \cdots & Z_{in} & Z_{jn} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1(x) \\ \vdots \\ I_i(x) \\ I_j(x) \\ \vdots \\ I_n(x) \end{bmatrix} \end{cases} \tag{4.4}$$

gdzie:

$[U]$ – wektor $n\times 1$ napięć fazowych,

$[I]$ – wektor $n\times 1$ prądów fazowych,

$[Z] = [R] + j\omega[L]$ – macierz $n \times n$ jednostkowych impedancji wzdłużnych własnych i wzajemnych,

$[Y] = [G] + j\omega[C]$ – macierz $n \times n$ jednostkowych admitancji poprzecznych własnych i wzajemnych $[Y]$.

Wprowadzając pojęcie macierzy współczynników $[P_u]$ i $[P_i]$ w równaniach (4.4) definiuje się: $[P_u] = [Z]\,[Y]$, oraz $[P_i] = [Y]\,[Z]$. Ponieważ macierze $[Z]$ i $[Y]$ są symetryczne, dlatego:

$$[P_u] = [P_i]^T \tag{4.5}$$

TRANSFORMACJA RÓWNAŃ DO DZIEDZINY MODÓW PROPAGACJI

Zmiana bazy układu współrzędnych fazowych w równaniach (4.4) na układ współrzędnych, w których macierze współczynników $[P_u]$ i $[P_i]$ są macierzami diagonalnymi, prowadzi do istotnego uproszczenia obliczeń przy rozwiązywaniu równania wieloprzewodowej linii elektrycznej. Diagonalizacji macierzy współczynników równań (4.4) dokonuje się przez wyznaczenie macierzy transformacji $[T]$, będących macierzami wektorów własnych macierzy $[P_u]$ i $[P_i]$. W wyniku tej operacji modelem linii jest n niezależnych linii jednoprzewodowych w dziedzinie modów propagacji. Po przekształceniu równania te mają postać [26]:

$$\begin{cases} -\dfrac{d^2}{dx^2}[U_{\mathrm{mod}}] = [\Lambda][U_{\mathrm{mod}}] \\ -\dfrac{d^2}{dx^2}[I_{\mathrm{mod}}] = [\Lambda][I_{\mathrm{mod}}] \end{cases} \tag{4.6}$$

przy czym:

$$[\Lambda] = [T_U]^{-1}[P_u]\,[T_U] \tag{4.7}$$

gdzie:

$[\Lambda]$ – diagonalna macierz wartości własnych $[P_u]$.

$$[\Lambda] = \begin{bmatrix} \lambda_1 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \lambda_i & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & \lambda_j & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & \lambda_n \end{bmatrix} \tag{4.8}$$

Napięcia i prądy modalne są powiązane z napięciami i prądami fazowymi następującymi równaniami:

$$[U_{\mathrm{mod}}] = [T_U]^{-1}\,[U] \tag{4.9}$$

$$[I_{\mathrm{mod}}] = [T_I]^{-1}\,[I] \tag{4.10}$$

gdzie:

$[T_U]$ – macierz wektorów własnych $[P_u]$.

$[T_I]$ – macierz wektorów własnych $[P_i]$.

Ponieważ macierz $[P_i]$ spełnia warunek (4.3), ma te same wartości własne co macierz $[P_u]$, a także spełniony jest warunek:

$$[T_i] = \left([T_u]^{-1}\right)^T \tag{4.11}$$

Równania (4.6) są układem n niezależnych równań dla poszczególnych modów propagacji, pozwalającym rozpatrywać n-przewodową, wzajemnie sprzężoną linię długą, jako n niezależnych umyślonych linii jednoprzewodowych. Zmiana bazy układów współrzędnych, którą stanowi również przejście od współrzędnych fazowych do modów propagacji, jest często stosowana w analizie układów elektroenergetycznych, np. w postaci składowych symetrycznych. Umożliwia ona nie tylko uproszczenie odpowiednich równań matematycznych, ale również ich efektywniejszą implementację w algorytmach numerycznych. Ponadto, w przypadku składowych symetrycznych mają one oczywistą interpretację fizyczną oraz mogą być mierzone i wykorzystywane np. jako sygnały dla automatyki zabezpieczeniowej. Nie bez znaczenia jest tu również względnie prosta identyfikacja pomiarowa parametrów modelu dla składowej zerowej, zgodnej i przeciwnej.

Porównując równanie (4.6) dla i-tego modu napięcia:

$$-\frac{d^2 U_{\mathrm{mod}(i)}}{dx^2} = \lambda_i U_{\mathrm{mod}(i)} \tag{4.12}$$

z równaniem dla pojedynczej pętli ziemnopowrotnej, można określić współczynnik propagacji dla i-tego modu w postaci:

$$\gamma_i = \alpha_i + \mathrm{j}\beta_i = \sqrt{\lambda_i} \tag{4.13}$$

gdzie:

α_i – współczynnik tłumienia i-tego modu,

β_i – współczynnik przesunięcia fazowego i-tego modu.

Wykorzystując macierze $[T_U]$ oraz $[T_I]$ można również dokonać diagonalizacji macierzy jednostkowych impedancji wzdłużnych $[Z]$ oraz macierzy jednostkowych admitancji poprzecznych $[Y]$:

$$[Z_{\mathrm{mod}}] = [T_U]^{-1}[Z][T_I]$$
$$[Y_{\mathrm{mod}}] = [T_I]^{-1}[Y][T_U] \tag{4.14}$$

Pozwala to określić dla *i*-tego modu impedancję falową, która jest wyrażona zależnością:

$$Z_{f\mathrm{mod}(i)} = \sqrt{\frac{Z_{\mathrm{mod}(i)}}{Y_{\mathrm{mod}(i)}}} \tag{4.15}$$

IMPEDANCJE OBWODÓW ZIEMNOPOWROTNYCH

Modele linii tworzone są dla *n* pętli ziemnopowrotnych utworzonych przez *n* przewodów linii. Pojęcie obwodu ziemnopowrotnego ma fundamentalne znaczenie w elektroenergetyce [64], a pierwsze sformułowanie równań dla przewodu o nieskończonej długości i ich rozwiązanie w postaci sumy nieskończonej liczby wyrazów szeregu zostało podane przez J. R. Carsona w publikacji [11], dotyczącej linii telekomunikacyjnych. Do celów praktycznych stosowane są również uproszczenia na przykład przedstawione w pracy [43], a także zaawansowane modele komputerowe z wykorzystaniem między innymi programu *EMTP-ATP* [85, 86, 87]

Impedancja napowietrznej linii elektroenergetycznej w postaci macierzowej jest sumą dwóch składników [7, 64]:

$$[Z] = [Z_W] + [Z_M] \tag{4.16}$$

gdzie:

$[Z_W]$ – macierz impedancji własnych,

$[Z_M]$ – macierz impedancji wzajemnych,

Dla danego układu *n* obwodów ziemnopowrotnych zawierających przewody o znacznej długości umieszczone nad powierzchnią ziemi na wysokości h_k (k = 1, 2, …, n). Macierz impedancji własnych $[Z_w]$ jest równa sumie macierzy impedancji wewnętrznych $[Z_i]$ oraz impedancji zewnętrznych $[Z_e]$ linii napowietrznej:

$$[Z_w] = [Z_i] + [Z_e] \tag{4.17}$$

Impedancja wewnętrzna jednostkowa *i*-tego przewodu o przekroju kołowym jest określona jako współczynnik między składową osiową wektora natężenia pola elektrycznego na powierzchni przewodu i prądem płynącym przez przewód. Dla przewodu jednorodnego o promieniu r_k (k = 1, 2, …, n), konduktywności γ_p i przenikalności magnetycznej μ rozwiązaniem równania opisującego rozkład pola elektromagnetycznego wewnątrz przewodu jest wzór [7, 64]:

$$Z_{ik} = \frac{K}{2\pi r_k \gamma_p} \cdot \frac{I_0(Kr_k)}{I_1(Kr_k)} \tag{4.18}$$

gdzie:

$K^2 = j\omega\mu\gamma_p$

I_0, I_1 – zmodyfikowane funkcje Bessela pierwszego rodzaju, rzędu zerowego i pierwszego.

Dla małych wartości argumentu funkcji Bessela wzór upraszcza się do postaci:

$$Z_{ik} = \frac{1}{\pi r_k^2 \gamma_p} + \mathrm{j}\omega\frac{\mu}{8\pi} \tag{4.19}$$

W celu obliczenia jednostkowej impedancji własnej obwodu *i* przyjmuje się, że *i*-ty przewód wiodący prąd *I* znajduje się w płaszczyźnie *x*, *y* układu współrzędnych prostokątnych a prądy we wszystkich pozostałych obwodach są równe zeru. Przy tych założeniach impedancję zewnętrzna opisana jest wzorem:

$$Z_{ek} = -\frac{E_{i0x}(0, h_k - r_k)}{I} \tag{4.20}$$

gdzie:

E_{i0x} – natężenie indukowanego pola elektrycznego,

r_k – promień *k*-tego przewodu,

h_k – wysokość zawieszenia *k*-tego przewodu.

Zakładając również, że $h_k >> r_k$ impedancja zewnętrzna wynosi:

$$Z_{ek} = \frac{\omega\mu_0}{\pi}\left[Q(2h'_k, 0) + \mathrm{j}\frac{1}{2}\ln\frac{2h_k}{r_k}\right] \tag{4.21}$$

gdzie:

$h'_k = |K| \cdot h_k = h_k\sqrt{\omega\mu_0\gamma_g}$

γ_g – konduktywność gruntu,

$Q(p, q)$ – funkcja opisana wzorem (4.22), której wartości można odczytać z tablic [np.: 2, 64, 66]:

$$Q(p,q) = \int_0^\infty e^{-pu}\left(\sqrt{u^2 + \mathrm{j}} - u\right)\cos(uq)du \tag{4.22}$$

dla: $p > 0 \wedge q \in \Re$

Macierz impedancji wzajemnych, zawarta w równaniu (4.16), jest wyznaczona dla wzajemnych obwodów ziemnopowrotnych *k*, *m*, (gdzie *k*, *m* = *1*, *2*, ... , *n*). Obwody *k*, *m*, są do siebie równoległe, a ich przewody zawieszone są na wysokości h_k nad

ziemią. W celu obliczenia jednostkowej impedancji wzajemnej obwodów *k*, *m* przyjęto, że przewód *k* wiodący prąd *I* znajduje się w płaszczyźnie *x*, *y* układu współrzędnych prostokątnych a prądy we wszystkich pozostałych obwodach są równe zeru. Impedancję wzajemną przedstawia wzór:

$$Z_M = -\frac{E_{i0x}(x_{km}, h_m)}{I} \tag{4.23}$$

gdzie:

E_{i0x} – natężenie indukowanego pola elektrycznego,

x_{km} – rzut odstępu między przewodami na powierzchnię ziemi,

h_m – wysokość zawieszenia *m*-tego przewodu.

Wyznaczając i podstawiając do (4.23) wzór na natężenie indukowanego pola elektrycznego od przepływu prądu *I* otrzymuje się wzór:

$$Z_M = \frac{\omega\mu_0}{\pi}\left[Q(h'_k + h'_m,\ x'_{km}\ ) + \mathrm{j}\frac{1}{2}\ln\sqrt{\frac{(h_k + h_m)^2 + x_{km}^2}{(h_k - h_m)^2 + x_{km}^2}}\right] \tag{4.24}$$

gdzie:

$h'_k = |K| \cdot h_k$, $\quad x'_{km} = |K| \cdot x_{km}$, $\quad |K| = \sqrt{\omega\mu_0\gamma_g}$

γ_g – konduktywność gruntu,

$Q(p, q)$ – funkcja opisana zależnością (4.22)

Odstęp między przewodami *k*-tym i *m*-tym, jest określony na podstawie współrzędnych geometrycznych przewodu i wynosi:

$$d_{km} = \sqrt{(h_k - h_m)^2 + a_{km}^2} \tag{4.25}$$

gdzie:

a_{km} – rzut odstępu między przewodami na powierzchnię ziemi,

h_k – wysokość zawieszenia *k*-tego przewodu,

h_m – wysokość zawieszenia *m*-tego przewodu.

ZALEŻNOŚĆ PARAMETRÓW MODELU OD CZĘSTOTLIWOŚCI

Zarówno impedancje własne, jak i wzajemne pętli ziemnopowrotnych linii są zależne od częstotliwości przebiegów prądów i napięć:

$$[Z(\omega)] = [R(\omega)] + \mathrm{j}\omega[X(\omega)] \tag{4.26}$$

W związku z tym w analizie stanów nieustalonych związanych z propagacją przepięć atmosferycznych istnieją zasadniczo dwie możliwości wykorzystania równań (4.6):

1) wyznaczenie parametrów podłużnych linii dla jednej częstotliwości,
2) uwzględnienie zależności wartości parametrów podłużnych linii od częstotliwości przebiegów prądów i napięć.

W pierwszym przypadku macierz impedancji podłużnych (4.26) wyznaczana jest dla jednej częstotliwości, odpowiedniej dla propagacji fal przepięciowych pochodzenia piorunowego, przy czym częstotliwość ta wynosi około kilkaset kiloherców (najczęściej 400 – 500 kHz) [55]. Uproszczenie tego modelu staje się możliwe po pominięciu rezystancji podłużnej i konduktancji poprzecznej oraz założeniu, że ziemia jest doskonale przewodzącym ośrodkiem o rezystywności wynoszącej zero. Prowadzi to do wyidealizowanego modelu linii bezstratnej, w którym prędkość propagacji fal przepięciowych jest równa prędkości światła.

Elementy macierzy impedancji falowych w dziedzinie napięć i prądów fazowych przyjmują wówczas postać:

— dla impedancji własnych:

$$Z_{fkk} = 60 \ln \frac{2h_k}{r_k}, \quad k = 1, 2, \ldots, n \tag{4.27}$$

— dla impedancji wzajemnych:

$$Z_{fkm} = 60 \ln \frac{a'_{km}}{a_{km}}, \quad k = 1, \ldots, n, \quad m = 1, \ldots, n, \quad k \neq m \tag{4.28}$$

gdzie:

h_k – wysokość przewodu linii nad ziemią,
r_k – promieniem (ewentualnie promieniem zastępczym) przewodu,
a_{km} – odległością pomiędzy przewodami k oraz m,
a'_{km} – odległością pomiędzy przewodami k oraz odbiciem lustrzanym względem powierzchni ziemi przewodu m.

Pomimo uproszczenia, model linii bezstratnej może jednak mieć zastosowanie w tych zagadnieniach, gdzie poczynione inne uproszczenia (na przykład co do modelu wytrzymałości udarowej izolacji linii) nie uzasadniają zastosowania modelu bardziej złożonego. Najbardziej szczegółowe modele linii napowietrznej tworzone są z uwzględnieniem zmiany jej parametrów wraz z częstotliwością, a tym samym zmiany impedancji falowej oraz współczynnika propagacji [26]:

$$Z_{f\,\mathrm{mod}}(\omega) = \sqrt{\frac{R_{\mathrm{mod}}(\omega) + \mathrm{j}X_{\mathrm{mod}}(\omega)}{G_{\mathrm{mod}}(\omega) + \mathrm{j}Y_{\mathrm{mod}}(\omega)}} \tag{4.29}$$

$$A(\omega) = \exp[-\gamma(\omega) l] \tag{4.30}$$

gdzie:

l – długość linii

$$\gamma(\omega)=\sqrt{[R_{\mathrm{mod}}(\omega)+\mathrm{j}X_{\mathrm{mod}}(\omega)][G_{\mathrm{mod}}(\omega)+\mathrm{j}Y_{\mathrm{mod}}(\omega)]} \tag{4.31}$$

Z praktycznego punktu widzenia celowe jest dokonanie syntezy obwodu o własnościach wyrażonych równaniami (4.29) oraz (4.30). Np. Marti w pracy [71] proponuje aproksymację (4.29) funkcją wymierną w postaci operatorowej:

$$Z_{f\mathrm{apr}}(s)=k\frac{\prod_{i=1}^{n}(s+z_i)}{\prod_{i=1}^{n}(s+p_i)} \tag{4.32}$$

gdzie:

z, p – zera i bieguny funkcji,

k – współczynnik transmitancji.

Funkcji (4.32) może zostać przyporządkowany schemat zastępczy w postaci struktury szeregowej Fostera dwójnika *RC*.

Współczynnikowi propagacji (4.30) można nadać interpretację w postaci stosunku wartości napięcia na końcu otwartej linii do wartości napięcia źródła zasilającego linię poprzez impedancję o wartości $Z_{f\mathrm{mod}}(\omega)$.

Funkcja operatorowa aproksymująca zależność współczynnika propagacji od częstotliwości według Martiego przyjmuje postać:

$$A_{\mathrm{apr}}(s)=k\frac{\prod_{i=1}^{n}(s+z_i)}{\prod_{j=1}^{m}(s+p_j)}\exp(-s\tau) \tag{4.33}$$

gdzie:

τ – czas propagacji fali w linii o długości L,

$m > n$

W dziedzinie czasu zależność $A(\omega)$ określa odpowiedź w postaci przebiegu napięcia na końcu linii na wymuszenie źródła w postaci impulsu jednostkowego.

Należy zwrócić uwagę, że również macierze $[T_U]$ oraz $[T_I]$ we wzorach (4.7), (4.9) i (4.10) są zależne od częstotliwości:

$$[T_U]=[T_U(\omega)],\qquad [T_I]=[T_I(\omega)] \tag{4.34}$$

i słuszne tylko dla danej częstotliwości, dla której zostały wyznaczone. Modele linii o parametrach zależnych od częstotliwości tworzone dla modów propagacji wymagają założenia stałości macierzy (4.34). Przy analizie stanów nieustalonych, a więc w sytuacjach, gdy przebiegi napięć i prądów charakteryzują się szerokim widmem częstotliwościowym, przyjęcie macierzy $[T_U]$ oraz $[T_I]$ jako niezależnych od częstotliwości jest przyczyną błędu obliczeń. Częstotliwość, dla której wyznacza się te macierze

powinna zapewnić minimalny błąd w zakresie częstotliwości jak najbardziej zbliżonym do widma analizowanych przebiegów. Poza tym zakresem błąd ten jest mniej istotny. Jest to szczególnie możliwe właśnie dla linii napowietrznych, co np. wykazano w publikacji [70]. Dla stanów nieustalonych związanych z propagacją przepięć atmosferycznych, ze względu na specyfikę widma przebiegów, częstotliwość, dla której przyjmuje się macierze $[T_U]$ oraz $[T_I]$ wynosi około kilkaset kiloherców.

4.2.3. Implementacja modeli ulotu elektrycznego w modelach linii elektroenergetycznych

DYSKRETNY MODEL LINII DŁUGIEJ W WARUNKACH ULOTU

Do makroskopowego opisu zjawiska ulotu elektrycznego przy przepięciach szybkozmiennych występujących na przewodach linii najczęściej stosowane są dynamiczne charakterystyki wypadkowego ładunku przewodu w funkcji napięcia lub potencjału linii. Gdy potencjał przewodu względem ziemi przekracza wartość napięcia początkowego ulotu U_0 (rys. 2.10), w jego otoczeniu wytwarzany jest ładunek przestrzenny. Zależności wypadkowego ładunku q, stanowiącego sumę ładunku na powierzchni i w przestrzeni wokół przewodu, od wartości chwilowej przyłożonego napięcia u mają charakter pętlic (na przykład [76]). Widoczna na rysunku 2.10 histereza związana jest z opóźnieniem formowania ładunku przestrzennego względem zmiany napięcia. Poniżej wartości U_0 ładunek q jest wyłącznie ładunkiem powierzchniowym, określonym przez pojemność geometryczną linii C_s. Dynamiczne charakterystyki $q = \mathrm{f}(u)$ mogą stanowić podstawę jego uwzględnienia w modelu linii przez wykorzystanie pojemności dynamicznej C_d (2.6). Wynika to z założenia, że ładunek przestrzenny w otoczeniu przewodu zwiększa pozornie jego promień, co przyczynia się do wzrostu pojemności własnych i wzajemnych linii [20, 23]. Przy założeniu koncentrycznego względem przewodu rozkładu $q(r)$ ładunku przestrzennego (rys 4.6), M.T. Correia de Barros określiła dla linii n-przewodowej elementy macierzy pojemności $[C]$ wzorem[22]:

$$C_{ij} = C_{s_{ij}} + \sum_{k=1}^{n} C_{s_{ik}} \left(\frac{\partial q_{sp_k}}{\partial u_j} \Pi_k + q_{sp_k} \frac{\partial \Pi_k}{\partial u_j} \right), \qquad (4.35)$$
$$i = 1,\ldots n, \quad j = 1,\ldots,n, \quad k = 1,\ldots,n$$

gdzie:

C_s – pojemność geometryczna linii (bez ulotu),

$u(t)$ – napięcie przewodu,

q_{sp} – ładunek przestrzenny w otoczeniu przewodu o promieniu r_0 w obszarze ograniczonym promieniem r_{mk}:

$$q_{sp_k} = 2\pi \int_{r_{0k}}^{r_{mk}} r_k q(r_k)\, dr_k \tag{4.36}$$

Współczynniki potencjałowe Maxwella wyraża wzór:

$$\Pi_k = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \frac{\int_{r_{0k}}^{r_{mk}} r_k q(r_k) \ln \frac{r_k}{r_{0k}}\, dr_k}{\int_{r_{0k}}^{r_{mk}} r_k q(r_k)\, dr_k} \tag{4.37}$$

przy czym ε_0 jest przenikalnością elektryczną próżni.

Złożoność modelowania ulotu (nawet przy założeniu $q(r)$ = const) powoduje, że stosowane są uproszczenia wzorów określających pojemność dynamiczną, jak na przykład według C.A. Nucciego i in. [89]:

$$C_d(t) = \begin{cases} C_s & \text{dla } u(t) < U_0 \\ C_s \left[k_1 + k_2 \dfrac{u(t) - U_0}{U_0} \right] & \text{dla } u(t) \geq U_0,\ \dfrac{du}{dt} > 0 \\ C_s & \text{dla } \dfrac{du}{dt} < 0 \end{cases} \tag{4.38}$$

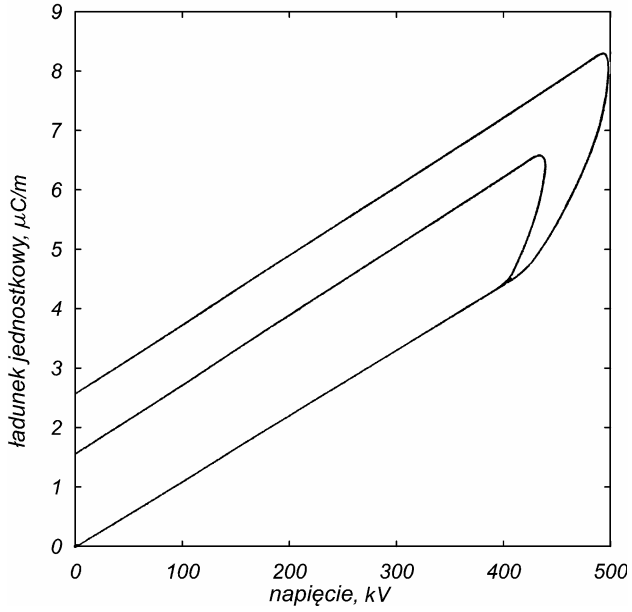
gdzie:

k_1, k_2 – współczynniki zależne od konstrukcji linii

We wzorze (4.39) zmiana pojemności dynamicznej ma charakter skokowy w momencie osiągnięcia przez napięcie $u(t)$ wartości napięcia początkowego ulotu U_0, przy czym dalszemu wzrostowi $u(t)$ towarzyszy liniowa zmiana wartości pojemności dynamicznej.

Charakterystyki $q - u$ można zarejestrować w układzie modelowym linii mierząc ładunek elektryczny zgromadzony na powierzchni i w przestrzeni otaczającej przewody badanej linii oraz rejestrując przebieg napięcia udarowego występującego na przewodach. Wyniki badań doświadczalnych w postaci charakterystyk $q - u$ zaprezentowane są między innymi w publikacjach [1, 18, 44, 76, 96] (rys. 4.6).

Pod wpływem intensyfikacji ulotu podczas przepięć atmosferycznych propagujących wzdłuż przewodów linii, przepięcia te podlegają odkształceniom połączonym z redukcją ich amplitudy. Tego typu odkształcenia są superpozycją tłumienia fal przepięciowych wynikającego z efektu naskórkowości w przewodach, oraz rozproszenia energii będącego skutkiem formowania się ładunku przestrzennego wokół przewodów. Rozproszenie to ma miejsce dopóty, dopóki nieustalone napięcie przewodu przekracza wartość napięcia początkowego ulotu [16].



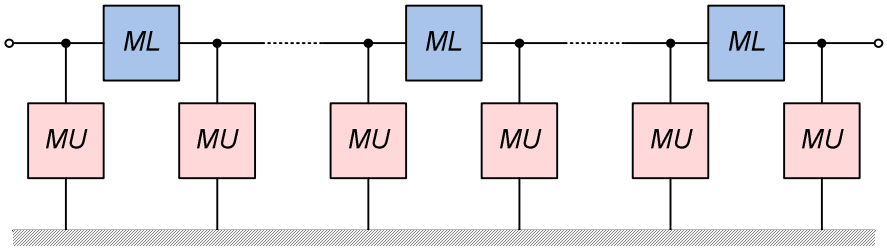
Rys. 4.6. Krzywe $q - u$ dla pojedynczego przewodu o średnicy 46,3 mm w warunkach dobrej pogody przy napięciu udarowym 2,5/60 μs biegunowości dodatniej (opracowano na podstawie [106])

Modelowanie matematyczne ulotu elektrycznego, występującego na liniach napowietrznych w warunkach przepięć atmosferycznych, przeprowadza się bazując na jego makroskopowym modelu. Warunkiem wystąpienia ulotu na powierzchni przewodów jest przekroczenie w ich otoczeniu krytycznej wartości natężenia pola elektrycznego. Następuje wówczas jonizacja powietrza, która w modelu makroskopowym może być odwzorowana przez pozorne zwiększenie średnicy przewodu. Modelowanie ulotu elektrycznego z wykorzystaniem pojemności dynamicznej wymaga modyfikacji macierzy pojemności linii, w której wyodrębnia się macierz pojemności geometrycznych oraz macierz pojemności z elementami zależnymi od napięcia (4.25) [36, 37, 38, 77, 103, 116, 117,].

$$[C_d] = [C_s] + [C(u)] \tag{4.39}$$

Prowadzi to do powstania nieliniowego modelu linii długiej o parametrach zależnych od częstotliwości oraz napięcia. W wyniku tego, nie jest możliwa transformacja modelu do przestrzeni modów propagacji, jak i synteza modelu o parametrach zależnych od częstotliwości. Model linii należy więc przekształcić do postaci różnicowej (na przykład [1, 10, 34, 42, 48]), w którym rozłożone parametry ulotu elektrycznego reprezentowane są w wybranych węzłach linii w postaci obwodu o stałych skupionych (rys. 4.7).

Ulot jest również powodem strat energii określonej dla przebiegów napięć udarowych przez pole powierzchni ograniczonej pętlą krzywej $q - u$.



Rys. 4.7. Linia długa z ulotem reprezentowanym przez obwody o stałych skupionych [34, 112];
ML – model liniowy o parametrach stałych lub zależnych od częstotliwości parametrach,
MU – model ulotu reprezentowany przez nieliniowy obwód o stałych skupionych

Dokładność rozwiązania modelu różnicowego, zależna jest od liczby odcinków *ML* powstających w wyniku podziału linii [53, 80]. Większa dokładność wymaga gęstszego podziału i większej liczby elementów reprezentujących ulot. Modelowanie wpływu ulotu elektrycznego na propagację fal przepięciowych jest więc zadaniem złożonym pod względem matematycznym oraz numerycznym, co wpływa również na komplikację i wydłużenie czasu symulacji. Podstawowym programem komputerowym, umożliwiającym odwzorowanie układów elektroenergetycznych w warunkach występowania szybkozmiennych zjawisk przejściowych, jest obecnie program *EMTP-ATP* (np. [4]).

PROGRAMOWA FORMA REALIZACJI MODELU

Realizacja idei z rysunku 4.7 wymaga dodatkowego podziału wieloprzewodowych linii długich na odcinki, pomiędzy którymi znajdują się obwody o parametrach skupionych, odwzorowujące dynamiczne charakterystyki ulotu elektrycznego [12, 41, 65, 72, 114]. Przyjętą strukturę obwodu przedstawiono na rysunku 4.8, przy czym pojemność i upływność zależne są od napięcia [35, 67]:

$$C(u) = k_C\left(1 - \frac{U_0}{u}\right), \qquad k_C = \sigma_C\sqrt{\frac{r}{2h}}\cdot 10^{-11} l_{ML} \quad \left[\frac{F}{m}\right] \tag{4.40}$$

$$G(u) = k_G\left(1 - \frac{U_0}{u}\right)^2, \qquad k_G = \sigma_G\sqrt{\frac{r}{2h}}\cdot 10^{-11} l_{ML} \quad \left[\frac{S}{m}\right] \tag{4.41}$$

gdzie:

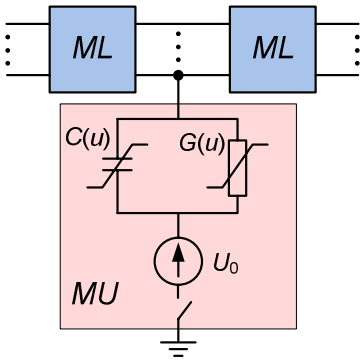
k_C, k_G – stałe charakterystyczne dla konstrukcji linii,

σ_C, σ_G – parametry modelu ulotu,

U_0 – napięcie początkowe ulotu,

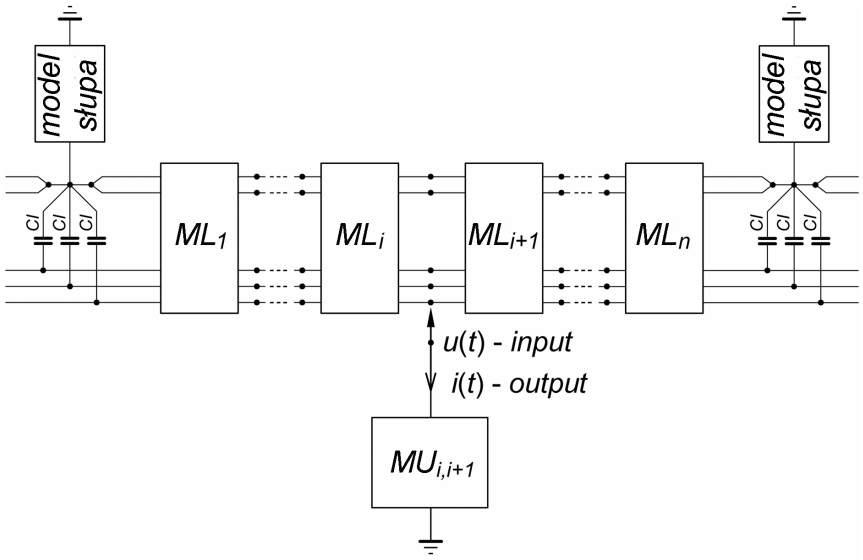
l_{ML} – długość odcinka modelu liniowego *ML*.

Szeregowo z elementami $C(u)$ i $G(u)$ połączone jest źródło napięcia stałego o wartości U_0 oraz wyłącznik sterowany różnicą napięć $u(t)$ i U_0.



Rys. 4.8. Odwzorowanie ulotu w postaci obwodu o stałych skupionych

Fragment przykładowej realizacji modelu w programie *EMTP-ATP* przedstawiono na rysunku 4.9. Dotyczy on przęsła jednotorowej linii przesyłowej, która wyposażona jest w trzy przewody robocze oraz dwa przewody odgromowe. Przewody w przęśle linii podzielone są na *n* odcinków *ML*, które odwzorowane są jako wieloprzewodowe linie długie o parametrach zależnych od częstotliwości.



Rys. 4.9. Implementacja modelu ulotu w programie EMTP – ATP

Do węzłów pomiędzy odcinkami *ML* przyłączane są bloki *MU* zawierające aktywne dwójniki Thevenina typu 94. Ich działanie jest zdefiniowane przez użytkownika z wykorzystaniem języka programowania *MODELS*. Wielkościami wyjściowymi są wartości prądów gałęziowych $i(t)$, które na podstawie [67] wyrażono następującymi zależnościami:

$$i(t) = i_G(t) + i_C(t) \tag{4. 42}$$

$$i_G(t) = \sigma_G \sqrt{\frac{r}{2h}} \cdot 10^{-11} l_{ML} \left[1 - \frac{U_0}{u(t)}\right]^2 u(t) \cdot S_G \tag{4. 43}$$

$$i_C(t) = 2\sigma_C \sqrt{\frac{r}{2h}} \cdot 10^{-11} l_{ML} \left[1 - \frac{U_0}{u(t)}\right] \frac{du(t)}{dt} \cdot S_C \tag{4. 44}$$

gdzie:

U_0 – napięcie początkowe ulotu,

l_{ML} – długość odcinka modelu liniowego,

r – promień przewodu,

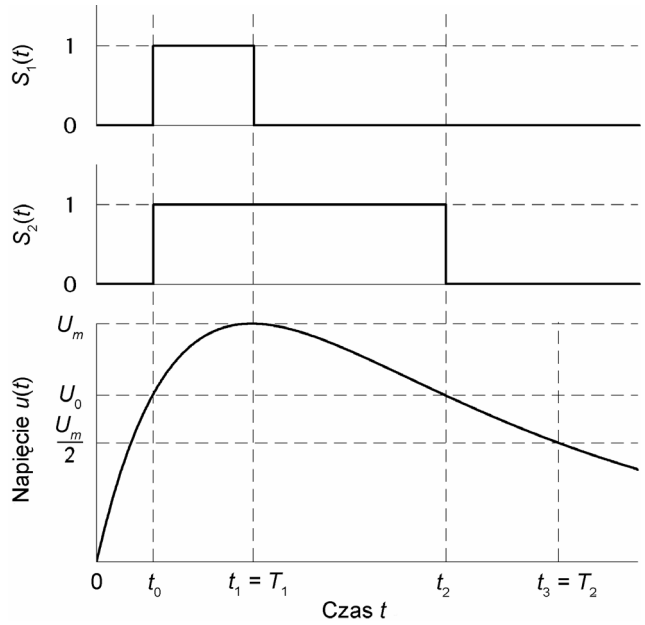
h – wysokość przewodu nad ziemią,

σ_C, σ_G – stałe, które są charakterystyczne dla konstrukcji przewodu fazowego, polaryzacji i wartości szczytowej napięcia,

S_G, S_C – funkcje S_1 lub S_2 (rys. 4.10) zależne od wartości i pochodnej napięcia węzłowego $u(t)$ [39, 112]:

$$S_1(t) = \begin{cases} 0 \quad \text{dla} \quad u(t) \le U_0 \text{ lub } \dfrac{du}{dt} \le 0 \\ 1 \quad \text{dla} \quad u(t) > U_0 \text{ i } \dfrac{du}{dt} > 0 \end{cases} \tag{4.45}$$

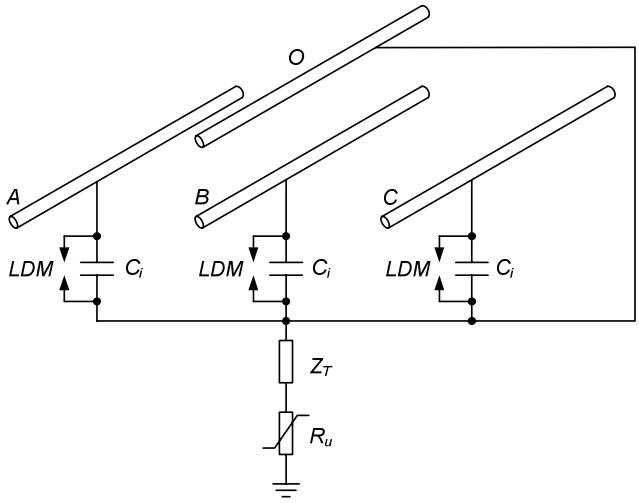
$$S_2(t) = \begin{cases} 0 \quad \text{dla} \quad u(t) \le U_0 \\ 1 \quad \text{dla} \quad u(t) > U_0 \end{cases} \tag{4.46}$$



Rys. 4.10. Funkcje S1 i S2 zależne od wartości i pochodnej napięcia węzłowego u(t)

4.3. Modele konstrukcji wsporczych i uziomów w warunkach oddziaływania przepięć atmosferycznych

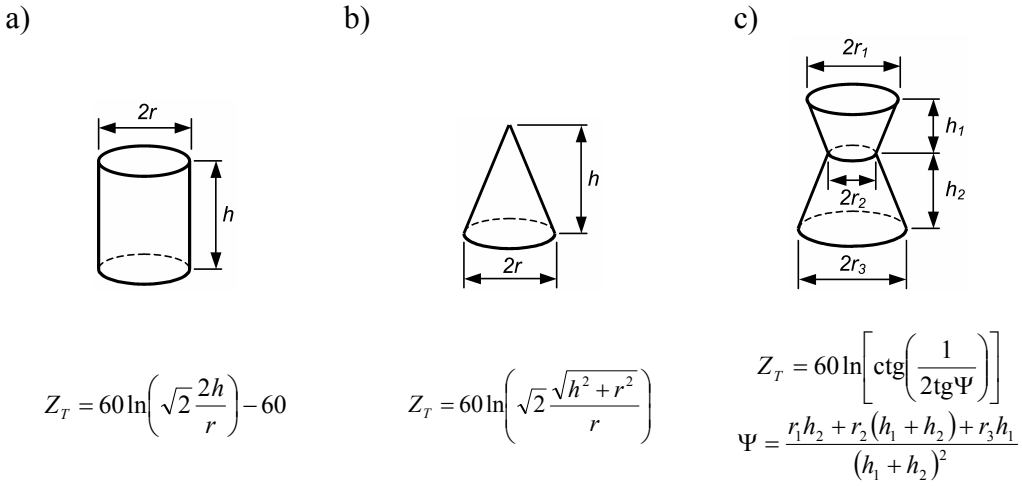
Konstrukcje wsporcze linii napowietrznych mogą być narażone na przepływ prądu będącego wynikiem wyładowania piorunowego w dwóch przypadkach. Po pierwsze, przy bezpośrednim wyładowaniu w konstrukcję słupa lub przewód odgromowy chroniący linię. Po drugie przy przeskoku napięcia pomiędzy przewodami fazowymi linii a słupem. Sytuacja taka ma miejsce w warunkach przekroczenia przez falę przepięciową propagującą wzdłuż przewodów fazowych wytrzymałości elektrycznej izolacji doziemnej linii. W obydwóch przypadkach przez konstrukcję oraz uziom słupa płynie prąd udarowy szybkozmienny, odprowadzający ładunek elektryczny do ziemi. Ze względu na szerokie widmo płynącego prądu udarowego, konstrukcje słupów wysokich napięć, pomimo stosunkowa niewielkich wysokości, muszą być modelowane w sposób umożliwiający odwzorowanie efektów falowych w nich zachodzących (rys.4.11).



Rys. 4.11. Przykładowy model konstrukcji wsporczej jednotorowej linii przesyłowej z jednym przewodem odgromowym do analizy przepięć atmosferycznych: *A*, *B*, *C* – przewody fazowe, *O* – przewód odgromowy, C_i – pojemność izolatora liniowego, *LDM* – model udarowej wytrzymałości elektrycznej, Z_T – impedancja falowa słupa, R_u – udarowa rezystancja uziemienia

MODELE SŁUPÓW

Słupy są najczęściej reprezentowane jako jednoprzewodowe linie długie, połączone z jednej strony z przewodami odgromowymi linii, a z drugiej rezystancją uziemienia. Impedancja falowa słupa obliczana jest w zależności od typu sylwetki i wymiarów geometrycznych (rys. 4.12). Typowe wartości impedancji falowej zawierają się w granicach od 100 Ω do 250 Ω, a zastępcza prędkość fali wynosi od 80% do 100% prędkości światła, [14, 17, 57, 58, 60].



Rys. 4.12. Impedancje falowe Z_T wyidealizowanych słupów:
a) walec, b) stożek, c) dwa stożki

Bardziej szczegółowe modele wymagane są dla słupów o znacznych wysokościach. Na przykład „wielopiętrowy" model słupa linii dwutorowej proponują autorzy publikacji [60] w oparciu o przeprowadzone pomiary dla linii 500 kV. Model ten został przez nich następnie wykorzystany do analizy w programie *EMTP* przeskoku odwrotnego na izolacji linii 1100 kV.

UDAROWE MODELE UZIOMÓW

Uziomy słupów w warunkach przewodzenia prądów udarowych wywołanych uderzeniem pioruna charakteryzują się własnościami odmiennymi niż w warunkach statycznych. Duże wartości szczytowe udarów prądowych powstałych wskutek wyładowań piorunowych, wywołują wzrost potencjału uziomu, a w konsekwencji wzrost natężenia pola elektrycznego na powierzchni uziomu i w jego bezpośrednim otoczeniu. Po przekroczeniu krytycznej wartości natężenia pola elektrycznego w otoczeniu uziomu powstają wyładowania elektryczne, prowadzące do pozornego wzrostu wymiaru poprzecznego uziomu. W efekcie rezystancja uziemienia R_u zmniejsza się, przy czym jest to zależność nieliniowa względem zmian prądu [17, 55]:

$$R_u = \frac{\rho_g}{2\pi l}\ln\left(4\pi l^2 \frac{E_0}{\rho_g i_{max}}\right) \tag{4.47}$$

gdzie:

ρ_g – rezystywność gruntu,
E_0 – wartość natężenia pola elektrycznego, powyżej której występuje jonizacja gruntu,
l – długość uziomu pionowego,
i_{max} – wartość szczytowa prądu w uziomie.

Rezystancje udarowe uziomów słupów traktowane są jako obwody o stałych skupionych, co jest uzasadnione zważywszy na prędkość propagacji fali w ziemi wynoszącą około 150 m/μs oraz realne wymiary geometryczne uziomów. Czas propagacji fali w uziomie jest wielokrotnie mniejszy od czasu wystąpienia wartości szczytowej prądu pierwszej składowej wyładowania głównego pioruna, wynoszącego około kilka mikrosekund. Takie podejście jest zalecane zarówno w publikacjach CIGRE [17], jak i IEEE [55], w których proponowane jest oszacowanie rezystancji udarowej słupów z wzoru:

$$R_u(i) = \frac{R_0}{\sqrt{1+\frac{i}{I_g}}} \tag{4.48}$$

gdzie:

I_g – graniczna wartość prądu, po przekroczeniu której występuje jonizacja.

Prąd I_g zależy od natężenia pola elektrycznego E_0 i jest określony wzorem:

$$I_g = \rho_g \frac{E_0}{2\pi R_0^2} \tag{4.49}$$

przy czym wartość E_0 wynosi 300 – 400 kV/m [17, 55, 74].

MODELE WYTRZYMAŁOŚCI UDAROWEJ UKŁADÓW IZOLACYJNYCH

Izolatory liniowe reprezentowane są przez pojemności włączone pomiędzy przewody fazowe a konstrukcję słupa. Wartości pojemności przyjmowane dla izolatorów długopniowych wynoszą ok. 80 pF, a dla izolatorów kołpakowych ok. 100 pF [55].

W zakresie przepięć atmosferycznych związek pomiędzy wytrzymałością elektryczna układu izolacyjnego a narażeniem w pełni opisuje odpowiednia charakterystyka udarowa. Podstawą współczesnych modeli charakterystyk udarowych przerw iskrowych są metody rozwoju lidera *LDM* (na przykład [55, 73, 108]), w których upraszcza się rzeczywisty proces wyładowania elektrycznego, zakładając że składa się on z dwóch zasadniczych faz: fazy strimerowej o czasie trwania T_S oraz fazy liderowej o czasie trwania T_L. W konsekwencji czas do przeskoku t_b jest sumą czasów trwania poszczególnych faz:

$$t_b = T_S + T_L \tag{4.50}$$

W literaturze przedstawiono wiele zależności pozwalających na oszacowanie czasu T_s, jednak szczególnie interesująca jest zależność całkowa (oparta na wartości średniej napięcia) proponowana w publikacji [73], która nie wymaga znajomości maksymalnej wartości napięcia w układzie izolacyjnym przed przeskokiem:

$$\frac{1}{T_s}\int_0^{t_s} u(t)dt = A \tag{4.51}$$

gdzie:

$u(t)$ – napięcie na układzie izolacyjnym,

$A = 400d + 50$ [kV] – dla napięć biegunowości dodatniej,

$A = 460d + 150$ [kV] – dla napięć biegunowości ujemnej,

d – odstęp międzyelektrodowy w m

Po czasie t_s następuje rozwój lidera, którego długość L jako funkcja czasu może być wyznaczona przez rozwiązanie równania różniczkowego [17, 55]:

$$\frac{dL}{dt} = ku(t)\left[\frac{u(t)}{d-L} - E_0\right] \tag{4.52}$$

Przeskok następuje, jeżeli w czasie $t = T_l$ długość lidera $L = d$. Występujące we wzorze 4.52 współczynniki k oraz E_0 wyznaczane są na podstawie badań eksperymentalnych.

Powyższy opis matematyczny zjawisk zachodzących w przerwie iskrowej układu izolacyjnego jest wykorzystywany do wyznaczania charakterystyk udarowych typowych przerw izolacyjnych stosowanych w liniach napowietrznych wysokich i najwyższych napięć. Przykładem takiego zastosowania są prace prezentowane np. w [77, 78].

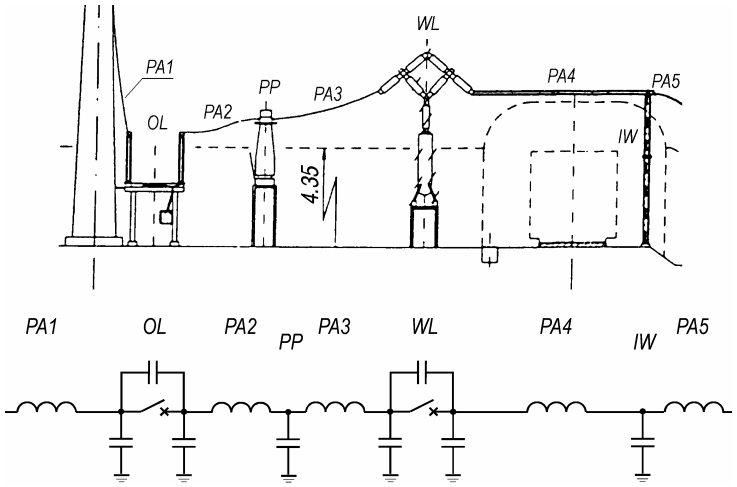
4.4. Model stacji elektroenergetycznej w warunkach przepięć atmosferycznych

Stacje elektroenergetyczne są chronione od bezpośrednich wyładowań piorunowych za pomocą instalacji odgromowej w postaci układu zwodów pionowych. Tego typu rozwiązanie konstrukcyjne sprowadza prawdopodobieństwo uderzenia pioruna w obiekty stacyjne praktycznie do zera. Również, ze względu na sposób wykonania uziomu stacji, wyładowanie w maszt instalacji odgromowej nie powoduje przeskoków odwrotnych. Przepięcia atmosferyczne, które stanowią dla izolacji rozdzielni najbardziej niekorzystne narażenia pod względem spodziewanego ich poziomu, są konsekwencją bezpośrednich wyładowań do przewodów fazowych linii [81].

Fala przepięciowa, wywołana wyładowaniem atmosferycznym, propagując wzdłuż przewodów fazowych linii dociera do stacji elektroenergetycznej, wewnątrz której podlega skomplikowanym zjawiskom falowym wynikającym ze złożonej przestrzennie struktury. Powoduje to, że o poziomie narażeń decyduje nie tylko liczby przyłączonych i pracujących linii oraz stosowane ograniczniki przepięć, ale również efekty falowe – przede wszystkim odbicia wielokrotne – wewnątrz rozdzielni. Wyposa-

żenie stacji, jaką stanowi aparatura, urządzenia i układy szynoprzewodów można traktować jako zbiór punktów nieciągłości na drodze rozchodzącej się fali przepięciowej.

Modelując stację elektroenergetyczną wysokiego napięcia do celów analizy przepięć szybkozmiennych, odwzorowuje się jej aparaturę – wyłączniki, odłączniki, uziemniki, przekładniki oraz izolatory wsporcze – za pomocą zbioru pojemności. Na rysunku 4.13 przedstawiono przykładowy fragment pola liniowego rozdzielni wraz z odpowiednim schematem zastępczym.



Rys. 4.13. Ilustracja sposobu modelowania rozdzielni w zakresie przepięć atmosferycznych; *OL* – odłącznik liniowy, *PP* – przekładnik prądowy, *WL* – wyłącznik liniowy, *IW* – izolator wsporczy, *PA* – połączenie aparatowe

W sytuacji, gdy szyny zbiorcze i połączenia aparatowe reprezentowane są przez odcinki wieloprzewodowych linii długich, zasady i metody tworzenia ich modeli są analogiczne, jak w przypadku przęseł linii. Według publikacji [55] odcinki oszynowania rozdzielni o długości większej niż 3–15 m powinny być modelowane w postaci linii długich. Dla odcinków krótszych dopuszczalne jest przyjęcie ich modeli w postaci indukcyjności skupionych o wartości około 1 μH/m. Istotnym czynnikiem wpływającym na złożoność modelu stacji jest poziom napięcia znamionowego. Im wyższe napięcie znamionowe tym większy rozmiar struktury stacji, także w coraz większym zakresie staje się ona zbiorem elementów o stałych rozłożonych, pomiędzy którymi usytuowane są węzły nieciągłości.

Analiza wpływu poszczególnych aparatów i urządzeń stacyjnych zaprezentowana między innymi w [77, 79], wykazuje, że pomimo nieznacznego indywidualnego wpływu większości aparatów, poza pojemnościowymi przekładnikami napięciowymi, muszą one zostać uwzględnione, wziąwszy pod uwagę fakt, że na drodze propagacji fali może znajdować się ich znaczna liczba.

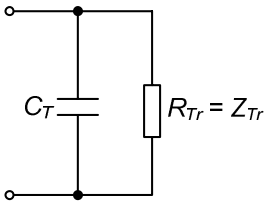
Między innymi od wartości poszczególnych pojemności na drodze propagującej fali zależy kształt i wartość maksymalna przepięć w rozdzielni. Typowe wartości pojemności doziemnych aparatury stacyjnej przedstawiono w tabeli 4.3.

Modele transformatorów i autotransformatorów zainstalowanych w stacjach powinny odwzorowywać zachodzące w nich efekty falowe. W analizie przepięć niewnikającej w zjawiska zachodzące w uzwojeniach transformatorów (np. [40]) istnieje możliwość zastosowania modeli uproszczonych, będących równoległym połączeniem rezystancji reprezentującej impedancję falową transformatora (wynoszącą około 5000 Ω) oraz pojemności doziemnych uzwojenia przyłączonego do rozważanej rozdzielni (rys. 4.14) [47, 55].

Tab. 4.3. Minimalne wartości pojemności doziemnej elementów wyposażenia stacji elektroenergetycznej

Wyposażenie	Pojemność doziemna, pF		
	115 kV	400 kV	765 kV
Odłącznik	100	200	160
Wyłącznik	100	150	600
Izolator wsporczy	80	120	150
Przekładnik napięciowy pojemnościowy	8000	5000	4000
Przekładnik napięciowy indukcyjny	500	550	600
Przekładnik prądowy	250	680	800
Autotransformator (pojemność zależna od mocy znamionowej)	3500	2700	5000

Z punktu widzenia analizy układu elektroenergetycznego zjawiska zachodzące na zaciskach transformatora są analogiczne, jak dla fali docierającej do końca nieobciążonej linii długiej.



Rys. 4.14. Uproszczony model transformatora w stacji elektroenergetycznej

Transformatory i autotransformatory usytuowane w stacjach stanowią ważne i kosztowne urządzenia, łączące rozdzielnie o różnych napięciach znamionowych. Ze względu na nieregenerującą się izolacją wewnętrzną, istotne jest właściwe rozpoznanie narażeń przepięciowych oraz redukcja ich poziomu przez zastosowanie właściwie dobranych ograniczników przepięć.

Ochronniki przepięciowe instalowane w układach elektroenergetycznych są środkami ochrony pośredniej układów izolacyjnych urządzeń i aparatów (na przykład [62, 97, 118]) polegającej na łagodzeniu skutków powstających przepięć. Obecnie podstawowymi urządzeniami instalowanymi w stacjach elektroenergetycznych, służącymi do

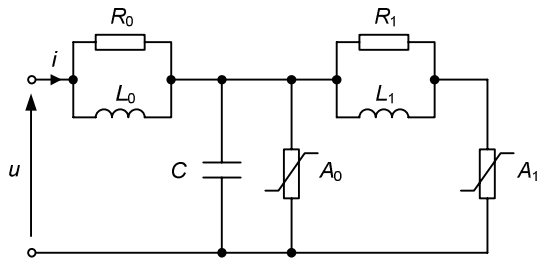
ochrony przepięciowej są poza iskiernikami liniowymi i aparatowymi – beziskiernikowe ograniczniki przepięć z warystorami na bazie tlenku cynku ZnO. W eksploatacji znajduje się jednak nadal wiele rodzajów ograniczników przepięć starszych konstrukcji m.in.: odgromniki wydmuchowe czy odgromniki zaworowe.

Iskierniki liniowe montowane są na izolatorach liniowych w postaci osprzętu ochronnego, natomiast aparatowe przede wszystkim na izolatorach przepustowych transformatorów i przekładników. Zadaniem osprzętu ochronnego jest lokalizacja przerw iskrowych w dostatecznie dużej odległości od izolatorów, aby wyładowanie łukowe nie uszkodziło izolatorów pod wpływem temperatury, a ponadto poprawa rozkładu napięcia na łańcuchu izolatorów kołpakowych oraz zmniejszenie intensywności ulotu elektrycznego.

W zakresie przepięć atmosferycznych ustalenie wartości napięcia zapłonu ochronnika wymaga znajomości charakterystyki udarowej iskiernika. Odpowiednie modele dynamiczne iskierników są więc modelami przerw iskrowych, które mogą być tworzone w oparciu o metodę *LDM*. Natomiast dla określenia napięcia zapłonu odgromników wydmuchowych i zaworowych wymagana jest ich charakterystyka udarowa.

Model matematyczny ograniczników ZnO odwzorowuje ich właściwości zaworowe, czyli zmniejszenie rezystancji przy wzroście napięcia na zaciskach ogranicznika. Przy szybkich zmianach napięcia, jakie występują w warunkach działania przepięć atmosferycznych, model ogranicznika tlenkowego nie zawiera tylko elementu rezystancyjnego nieliniowego jak w warunkach statycznych czy przepięć łączeniowych, lecz powinien uwzględniać złożone zjawiska fizyczne zachodzące w strukturze warystorów (na przykład [107]).

Jednym z modeli, który ma zastosowanie w obszarze przepięć atmosferycznych, jest model zaproponowany przez Grupę Roboczą 3.4.11 IEEE [56]. Jego schemat zastępczy przedstawia rysunek 4.15.



Rys. 4.15. Schemat modelu beziskiernikowego ogranicznika przepięć proponowany przez IEEE

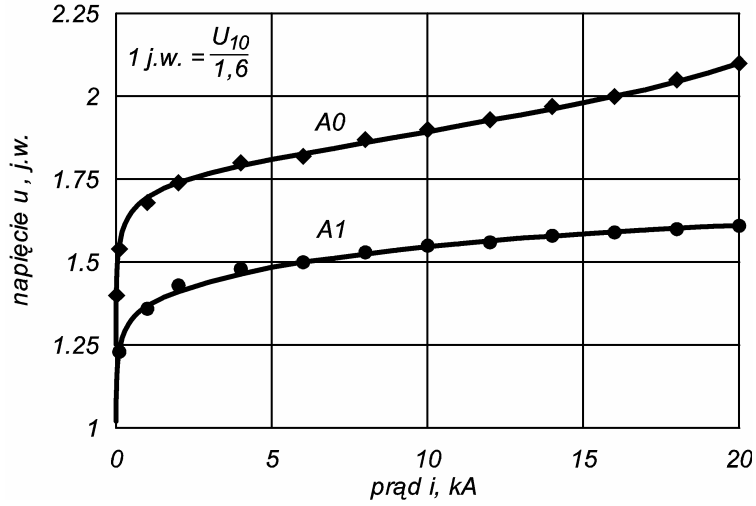
Schemat zastępczy ogranicznika zawiera dwa oporniki nieliniowe A_0 oraz A_1, pomiędzy którymi znajduje się równoległy dwójnik R_1L_1. Przy szybkich zmianach prądu, występujących przy ograniczaniu przepięć atmosferycznych, dwójnik R_1L_1 opóźnia zmiany prądu w oporniku A_1 w stosunku do opornika A_0, odwzorowując tym samym zależność napięcia obniżonego od szybkości zmian prądu. Przy wolnym

narastaniu napięcia, na przykład w warunkach przepięć dorywczych, filtr R_1L_1 posiada małą impedancje i można przyjąć, że elementy nieliniowe są połączone równolegle. Pojemność ogranicznika reprezentuje kondensator C, a pole magnetyczne indukcyjność L_1. Natomiast opornik R_0 zapewnia zbieżność i stabilność obliczeń numerycznych.

Aproksymowane na podstawie [56] charakterystyki prądowo-napięciowe oporników nieliniowych A_0 i A_1 przedstawia rysunek 4.16, przy czym napięcie wyrażone jest w wartościach względnych dla jednostki odniesienia:

$$1 \text{ j.w.} = \frac{U_{10}\,[\text{kV}]}{1{,}6} \tag{4.53}$$

gdzie U_{10} jest napięciem obniżonym wyrażonym kilowoltach, przy przepływie przez ogranicznik znamionowego prądu wyładowczego 8/20 μs o wartości szczytowej 10 kA.



Rys. 4.16. Charakterystyki prądowo-napięciowe oporników nieliniowych A_0 i A_1 [77]
U_{10} – napięcie obniżone w kV dla prądu wyładowczego 8/20 μs, 10 kA

Estymacja parametrów modelu stanowi złożony problem. Do jego rozwiązania, na przykład autorzy publikacji [68] proponują dopasowanie odpowiedzi czasowej ogranicznika z wykorzystaniem metod optymalizacjnych.

5. Analiza narażeń napięciowych układów elektroenergetycznych z uwzględnieniem odkształcenia i tłumienia fal przepięciowych

5.1. Estymacja parametrów σ_G i σ_C modelu ulotu elektrycznego

Parametry σ_G i σ_C występujące we wzorach (4.43) i (4.44) estymowane są na podstawie eksperymentalnych charakterystyk $q - u$. W proponowanej metodzie zakłada się, że dane są pary punktów (q_i, u_i), $i = 1, ..., n$, z otrzymanej eksperymentalnie krzywej $q - u$, a przebieg napięcia udarowego T_1/T_2 o wartości szczytowej U_m aproksymowany jest funkcją [38]:

$$u(t) = \frac{t}{at^2 + bt + c} \tag{5.1}$$

w której parametry a, b, c wyznaczane są z następujących wzorów:

$$a = \frac{T_2}{U_m (T_2 - T_1)^2} \tag{5.2}$$

$$b = \frac{(T_2 - T_1)^2 - 2T_1T_2}{U_m (T_2 - T_1)^2} \tag{5.3}$$

$$c = \frac{T_1^2 T_2}{U_m (T_2 - T_1)^2} \tag{5.4}$$

gdzie:

U_m – wartość szczytowa napięcia udarowego,

T_1 – czas czoła,

T_2 – czas do półszczytu.

Ładunek przestrzenny q_{SC} warstwy ulotowej jest różnicą całkowitego ładunku q oraz ładunku na powierzchni przewodu, którego wartość określona jest przez pojemność geometryczną C_s:

$$q_{SCi} = q_i - C_s u(t_i) \tag{5.5}$$

Podstawiając wzór (5.1) do (5.5) otrzymuje się:

$$q_{SCi} = q_i - C_s \frac{t_i}{at_i^2 + bt_i + c} \tag{5.6}$$

przy czym czasy t_i wyznaczane są dla kolejnych wartości napięć u_i z zależności odwrotnej do funkcji (5.1):

$$t_i(u_i) = \frac{1 - bu_i \mp \sqrt{(1 - bu_i)^2 - 4acu_i^2}}{2au_i} \tag{5.7}$$

Otrzymane pary danych (t_i, q_{SCi}), aproksymowane są funkcją:

$$q(t) = \int_0^t [i_G(z) + i_C(z)]dz = q_G(t) + q_C(t) \tag{5.8}$$

gdzie:

i_G – składowa upływnościowa impulsu prądowego (4.43),
i_C – składowa pojemnościowa impulsu prądowego (4.44),
q_G – ładunek związany z prądem i_G,
q_C – ładunek związany z prądem i_C.

Na podstawie wzorów (4.43), (4.44), (5.1) i (5.8) można zapisać, że:

$$q_G(t) = \left\{ \frac{1}{2} k_G U_0^2 az^2 - 2k_G U_0 z + k_G U_0^2 bz + k_G U_0^2 c \ln(z) + \right.$$
$$\left. + \frac{1}{2} \frac{k_G \ln(az^2 + bz + c)}{a} - \frac{k_G b \arctan\left[(2az + b)/\sqrt{4ac - b^2}\right]}{a\sqrt{4ac - b^2}} \right\} \Bigg|_{z=0}^{z=t} \tag{5.9}$$

$$q_C(t) = \left[2k_C U_0 \ln(z) + 2k_C U_0 \ln(az^2 + bz + c) + 2\frac{k_C z}{az^2 + bz + c} \right] \Bigg|_{z=0}^{z=t} \tag{5.10}$$

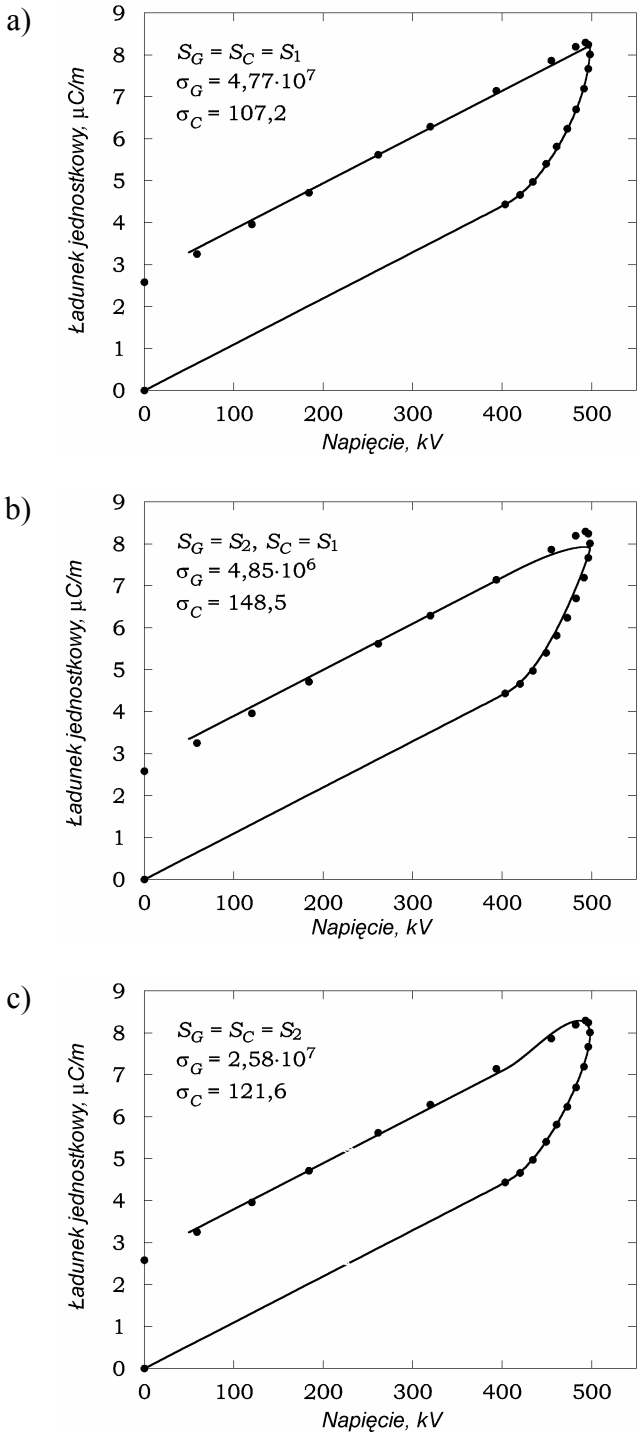
gdzie:

$$k_G = \sigma_G \sqrt{\frac{r}{2h}} \cdot 10^{-11} l_{ML} \tag{5.11}$$

$$k_C = \sigma_C \sqrt{\frac{r}{2h}} \cdot 10^{-11} l_{ML} \tag{5.12}$$

Wartości parametrów σ_G, σ_C wyznaczane są przy pomocy metody najmniejszych kwadratów, w której dla σ_G, σ_C poszukiwane jest minimum funkcji przy danych wartościach U_0, l_{ML}, r, h:

$$\sum_{i=1}^{n}\left[q_{SCi} - q_G\left(t_i, \sigma_G, \sigma_C\right) - q_C\left(t_i, \sigma_G, \sigma_C\right)\right]^2 = \min \tag{5.13}$$



Rys. 5.1. Aproksymacja krzywej $q - u$ dla różnych postaci funkcji załączających: a) $S_G = S_C = S_1$, b) $S_G = S_2$, $S_C = S_1$, c) $S_G = S_C = S_2$ (dane eksperymentalne • według [106])

Na rysunku 5.1 przedstawiono otrzymane przy zastosowaniu opracowanych w środowisku *MATLAB* programów, wyniki aproksymacji krzywej $q - u$ dla eksperymentalnej linii jednoprzewodowej o średnicy przewodu 46,3 mm, którą zarejestrowano [106] w warunkach dobrej pogody przy napięciu udarowym 2,5/60 μs biegunowości dodatniej. Rozpatrzono trzy przypadki, dla których przyjęto następujące założenia, co do funkcji załączających:

1) $S_G = S_C = S_1$ – przepływ zarówno prądu upływnościowego $i_G(t)$, jak i prądu pojemnościowego $i_C(t)$ uwarunkowany jest przekroczeniem przez napięcie $u(t)$ wartości początkowej ulotu U_0 oraz pochodną napięcia $du/dt > 0$,
2) $S_G = S_2$, $S_C = S_1$ – przepływ prądu $i_G(t)$ uwarunkowany jest tylko przekroczeniem wartości początkowej U_0, a przepływ prądu pojemnościowego $i_C(t)$ uwarunkowany jest $u(t) > U_0$ oraz $du/dt > 0$,
3) $S_G = S_C = S_2$ przepływ zarówno prądu $i_G(t)$, jak i prądu $i_C(t)$ uwarunkowany jest tylko przekroczeniem przez napięcie $u(t)$ wartości U_0.

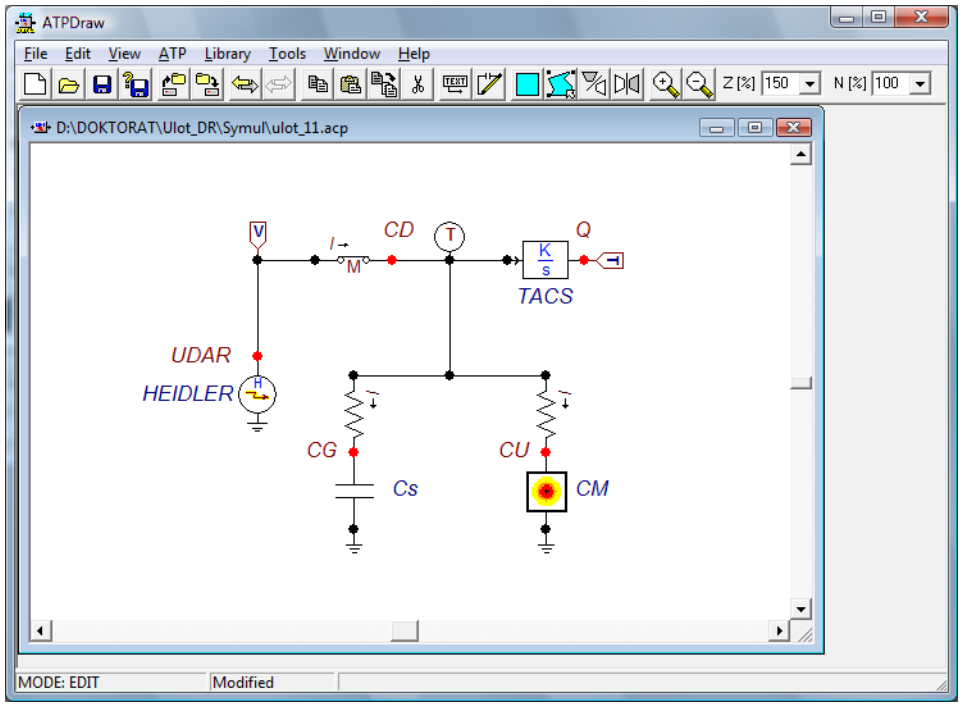
Najlepszą zgodność krzywej zmierzonej z krzywą aproksymującą otrzymano dla przypadku 1) oraz przypadku 3). Należy jednak oczekiwać, że dla przypadku 1) wystąpić mogą w trakcie procesu symulacji błędy rozwiązań w postaci tzw. oscylacji numerycznych, co wynika z dużej wrażliwości metod i algorytmów numerycznych na warunek $du/dt > 0$ [5].

5.2. Programowa forma realizacji modelu ulotu elektrycznego w programie *EMTP-ATP*

Na rysunku 5.2 przedstawiono przykładową realizację modelu w preprocesorze graficznym *ATPDraw* programu *EMTP-ATP*. Model stanowią następujące elementy:

- kondensator *Cs* o pojemności odpowiadającej pojemności geometrycznej odcinka linii, włączony pomiędzy węzeł *CG* a ziemię,
- aktywny dwójnik Thevenina typu 94 *CM* włączony pomiędzy węzeł *CU* a ziemię,
- przyłączone do węzła *UDAR* źródło napięcia udarowego *HEIDLER*, którego przebieg wyrażony jest funkcją Heidlera [50],
- blok *TACS* całkujący sygnał prądu z wyłącznika pomiędzy węzłem *UDAR* a węzłem *CD*, umożliwia uzyskanie przebiegu ładunku na wypadkowej pojemności dynamicznej.

Działanie bloku *CM* zdefiniowane zostało w wewnętrznym języku *MODELS* programu *EMTP-ATP*; w środowisku którego opracowano procedurę *CORONA* (rys. 5.3-5.5) dla trzech przypadków funkcji załączających przedstawionych w punkcie 5.1. Jednym z formalnych parametrów wejściowych jest napięcie gałęziowe na dwójniku, natomiast wielkością wyjściową wartość prądu $i_u(t)$ określonego wzorem (4.42). Dla procedury *CORONA* opracowano również stosowany interfejs graficzny dla preprocesora *ATPDraw* (rys. 5.6).



Rys. 5.2. Przykładowa realizacja modelu ulotu w preprocesorze *ATPDraw* programu *EMTP-ATP*

```
MODEL cor_11
DATA  n                -- number of node pairs
      n2 {dflt: n*n}   -- number of matrix elements
INPUT vth         -- Thev. voltage across terminals 1-2
      rth         -- Thev. resistance
      gth         -- inverse of rth
      v0          -- steady-state voltage across terminals 1-2
      i0          -- steady-state current into terminal 1
VAR   v           -- calculated voltage across terminals 1-2
      i           -- calculated current into terminal 1
OUTPUT i
DATA
   h, r, l, sigG, sigC, m, gwp
VAR
   iR, iC, vco, kR, kC
INIT
   histdef(v)  := vth
   histdef(i)  := 0.0
   histdef(iR) := 0.0
   histdef(iC) := 0.0
   vco  := r * 24.5 * m * gwp * (1+0.65/(gwp*r)**0.38) * ln(2*h*100/r) * 1000
   kR   := sigG * sqrt(r/(2*h*100)) * 1e-11 * l
   kC   := sigC * sqrt(r/(2*h*100)) * 1e-11 * l
ENDINIT
EXEC
   if v > vco and deriv(v) > 0 then
      COMBINE ITERATE {50} AS grupa1
         iR := kR   * (1 - vco/v)**2 * v
         iC := 2*kC * (1 - vco/v) * deriv(v)
         i  := iR + iC
         v  := vth - rth*i
      ENDCOMBINE
```

Rys.5.3. Procedura *CORONA* dla przypadku $S_G = S_C = S_1$ zrealizowana w języku *MODELS*

```
   else
      iR := 0.0
      iC := 0.0
      i  := iR + iC
      v  := vth
   endif
ENDEXEC
ENDMODEL
```

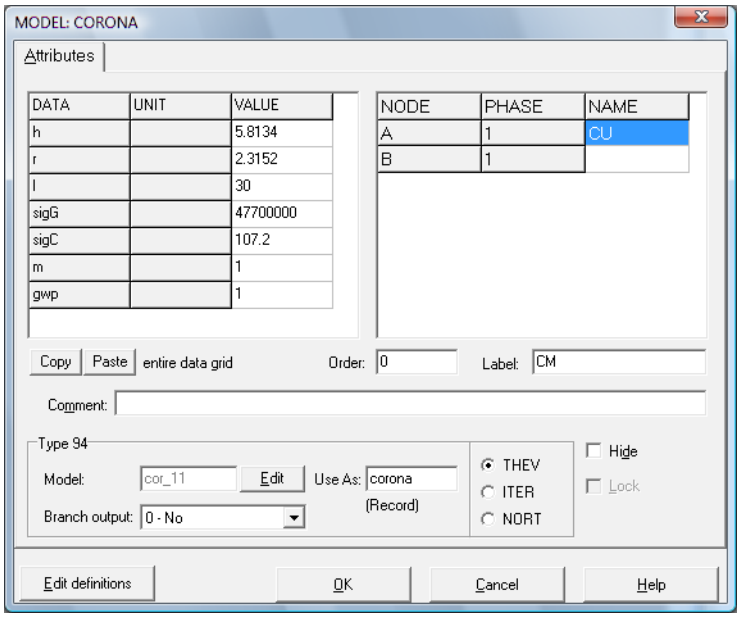
Rys.5.3. Cd.

```
MODEL cor_21
   . . . . . .
EXEC
   if v > vco and deriv(v) > 0 then
      COMBINE ITERATE {50} AS grupa1
         iR := kR   * (1 - vco/v)**2 * v
         iC := 2*kC * (1 - vco/v) * deriv(v)
         i  := iR + iC
         v  := vth - rth*i
      ENDCOMBINE
   elsif v > vco and deriv(v) <= 0 then
      COMBINE ITERATE {50} AS grupa2
         iR := kR   * (1 - vco/v)**2 * v
         iC := 0.0
         i  := iR + iC
         v  := vth - rth*i
      ENDCOMBINE
   else
      iR := 0.0
      iC := 0.0
      i  := iR + iC
      v  := vth
   endif
ENDEXEC
ENDMODEL
```

Rys.5.4. Procedura *CORONA* dla przypadku $S_G = S_2$, $S_C = S_1$ zrealizowana w języku *MODELS*

```
MODEL cor_22
   . . . . . .
EXEC
   if v > vco then
      COMBINE ITERATE {50} AS grupa1
         iR := kR   * (1 - vco/v)**2 * v
         iC := 2*kC * (1 - vco/v) * deriv(v)
         i  := iR + iC
         v  := vth - rth*i
      ENDCOMBINE
   else
      iR := 0.0
      iC := 0.0
      i  := iR + iC
      v  := vth
   endif
ENDEXEC
ENDMODEL
```

Rys.5.5. Procedura *CORONA* dla przypadku $S_G = S_C = S_2$ zrealizowana w języku *MODELS*

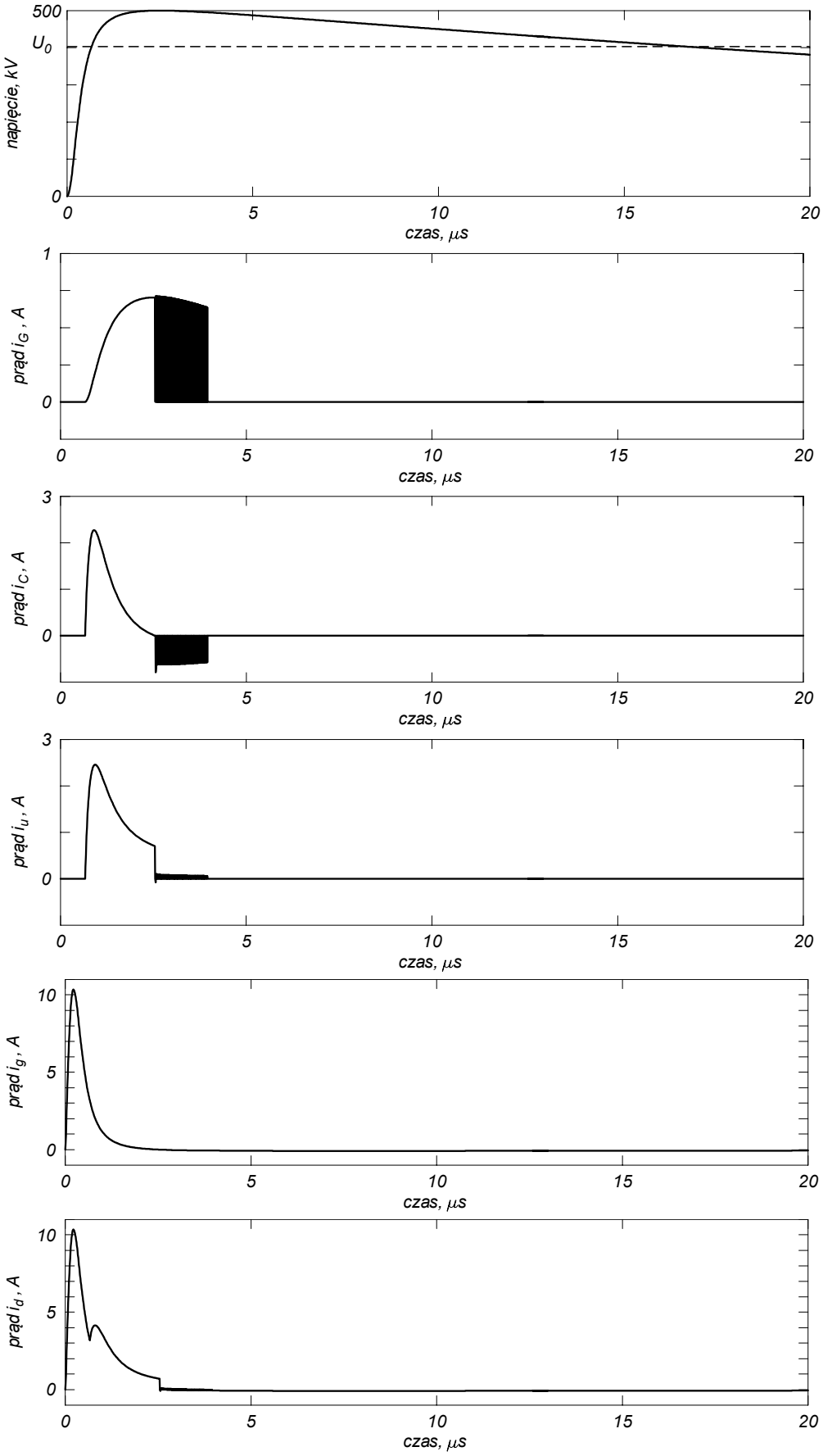


Rys.5.6. Interfejs graficzny procedury *CORONA* dla programu *ATPDRAW*

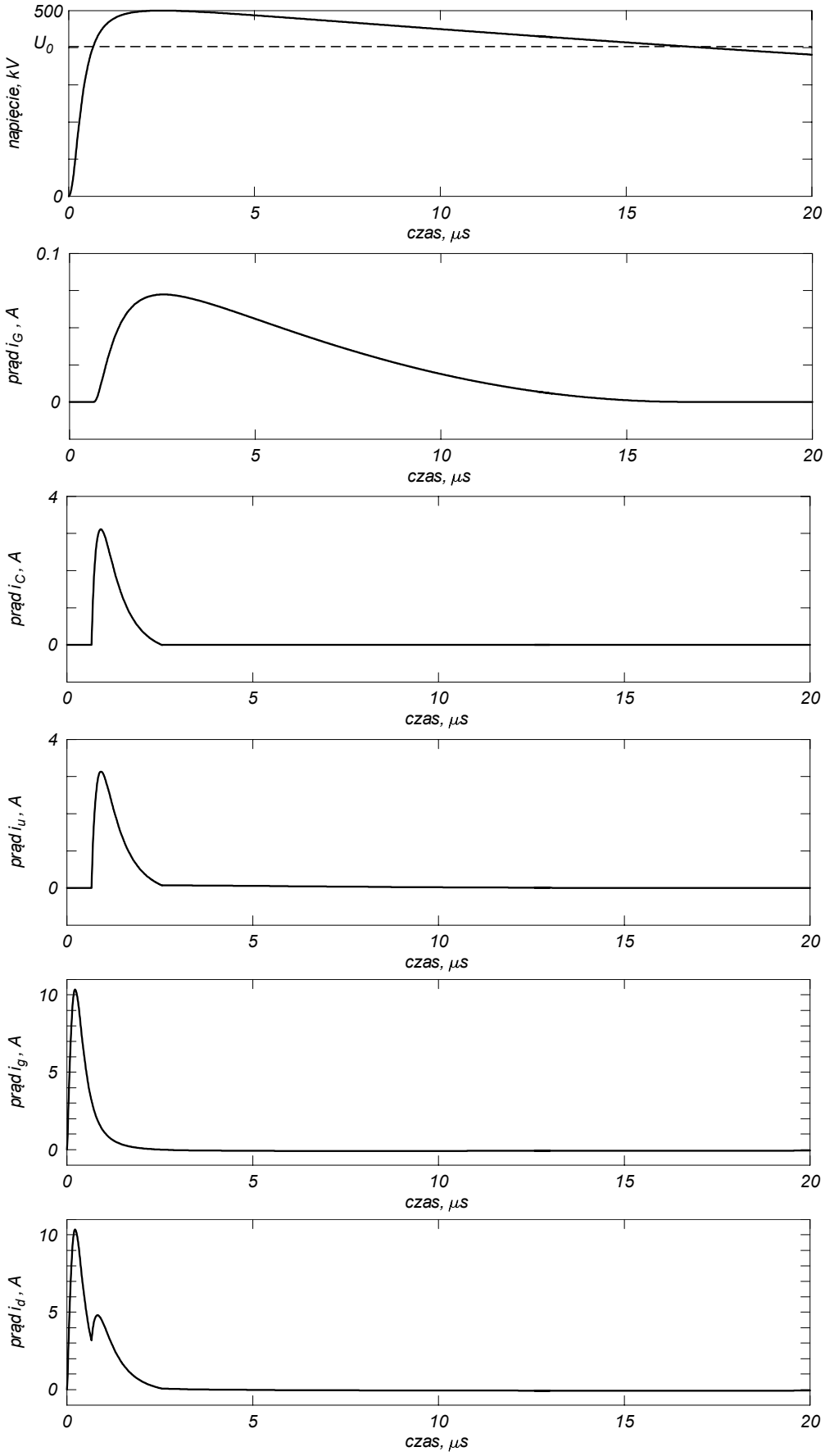
Na rysunku 5.7 przedstawiono przykładowe przebiegi czasowe napięć i prądów otrzymane dla modelu ulotu elektrycznego (rys. 5.2). Dotyczą one symulacji ulotu z jednoprzewodowej linii o średnicy przewodu 46,3 mm, w warunkach dobrej pogody, przy napięciu udarowym 2,5/60 μs biegunowości dodatniej i wartości szczytowej 500 kV. Parametry σ_C i σ_G wyznaczono na podstawie danych pomiarowych [106] przy użyciu metody przedstawionej w punkcie 5.1.

Po przekroczeniu przez napięcie wartości początkowej U_0 ulotu, w układzie zaczyna płynąć prąd składowej upływnościowej $i_G(t)$ oraz składowej pojemnościowej $i_C(t)$, których suma jest impulsem prądu ulotu $i_u(t)$. Ze względu na założenie, że funkcja załączająca $S_G = S_C = S_1$, przepływ prądu trwa do chwili $t = 2{,}5$ μs, w której pochodna napięcia $u(t)$ zmienia znak z dodatniego na ujemny. Charakterystyczną cechą jest wystąpienie po czasie $t = 2{,}5$ μs błędów rozwiązań przebiegów prądów $i_G(t)$ oraz $i_C(t)$ w postaci tzw. oscylacji numerycznych, wynikających z dużej wrażliwości na warunek $du/dt > 0$. Na rysunku 5.7 przedstawiono również przebieg prądu pojemności geometrycznej $i_g(t) = C_s \cdot du/dt$ oraz wypadkowego prądu $i_d(t)$ pojemności dynamicznej, stanowiącego sumę prądu $i_g(t)$ oraz $i_u(t)$.

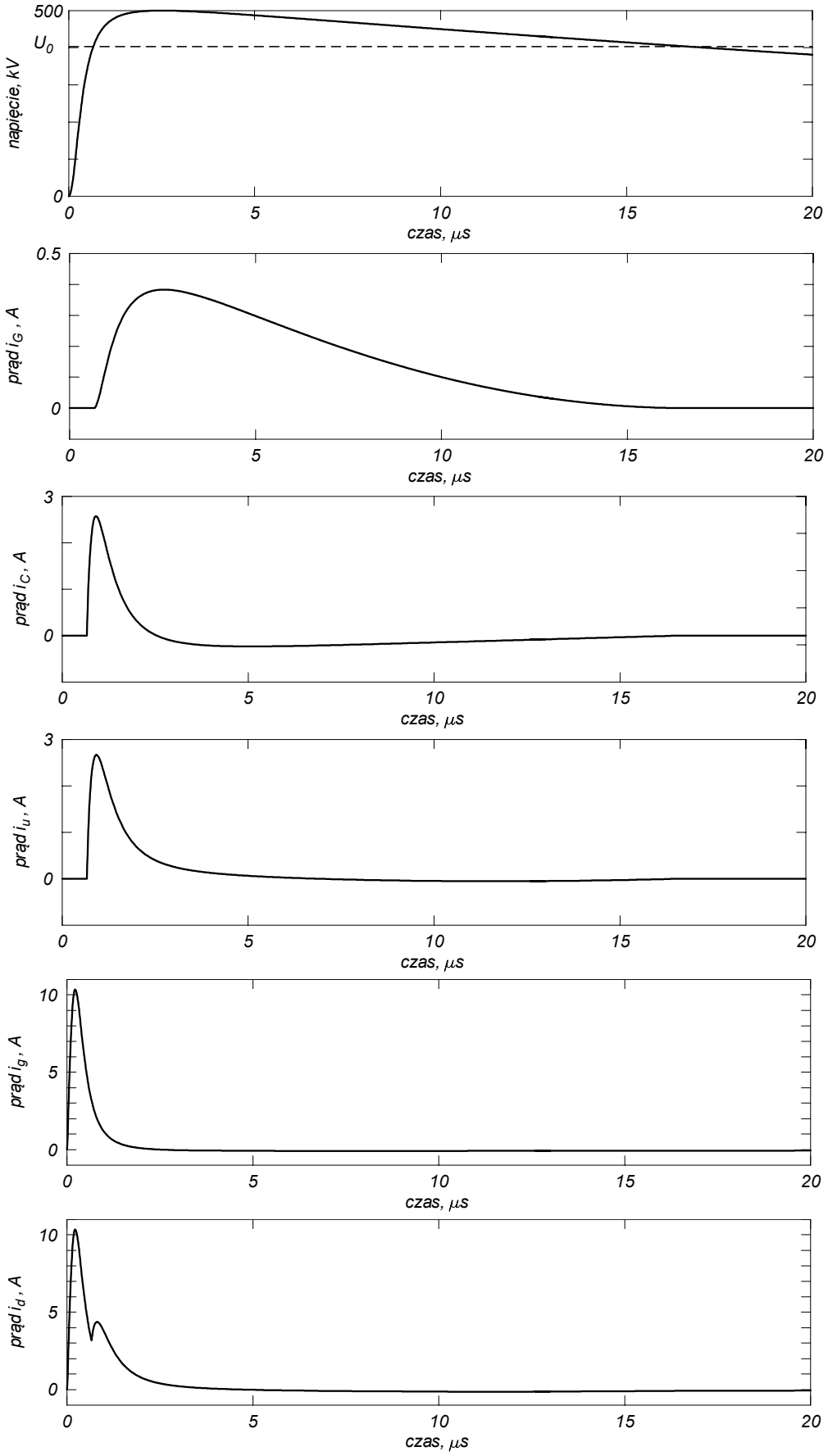
Błędy rozwiązań w postaci oscylacji numerycznych skłaniają do przyjęcia w wyrażeniach (4.43) i (4.44) postaci funkcji załączającej (4.45) i (4.46), która nie jest uzależniona od warunku du/dt. Na rysunku 5.8 i 5.9 przedstawiono przebiegi prądów i napięć dla funkcji załączających $S_G = S_2$, $S_C = S_1$ oraz $S_G = S_C = S_2$. Wyeliminowanie warunku $du/dt > 0$ tylko w wyrażeniu na prąd $i_G(t)$ powoduje, że rozwiązania nie są obarczone oscylacjami numerycznymi.



Rys.5.7. Przebiegi czasowe napięć i prądów dla modelu ulotu z rysunku 5.2
przy założeniu funkcji załączającej $S_G = S_C = S_1$



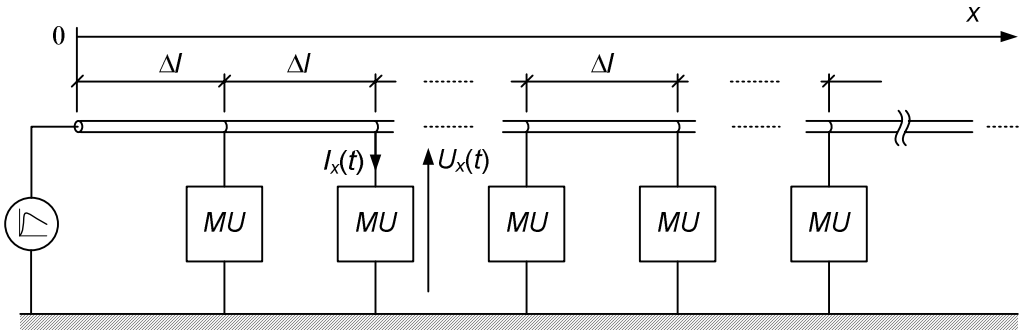
Rys.5.8. Przebiegi czasowe napięć i prądów dla modelu ulotu z rysunku 5.2 przy założeniu funkcji załączającej $S_G = S_2$, $S_C = S_1$



Rys.5.9. Przebiegi czasowe napięć i prądów dla modelu ulotu z rysunku 5.2
przy założeniu funkcji załączającej $S_G = S_C = S_2$

5.3. Analiza porównawcza efektywności modeli ulotu elektrycznego

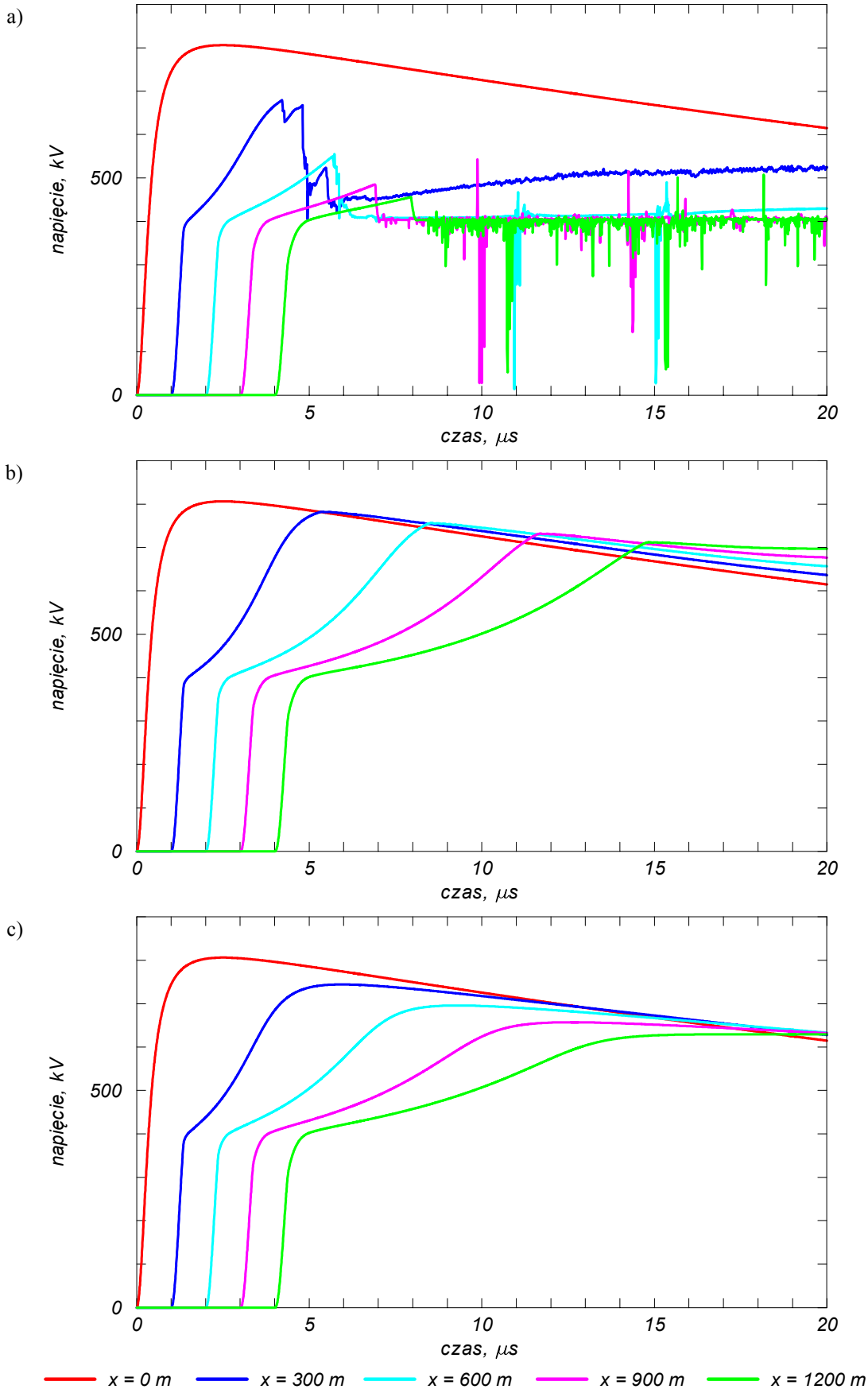
Analizę porównawczą efektywności modeli ulotu przeprowadzono dla układu na rysunku 5.10 reprezentującego jednoprzewodową linię długą o (praktycznie) nieskończonej długości, którą podzielono na połączone szeregowo odcinki o długości Δl. Odcinki te odwzorowano w programie *EMTP-ATP* przy pomocy linii długich. Pomiędzy nimi znajdują się skupione modele ulotu *MU*, a na początku linii przyłączone jest źródło napięcia udarowego. Celem analizy było określenie wrażliwości i dokładności rozwiązania numerycznego na obecność warunku $du/dt > 0$ w funkcjach załączających oraz dyskretyzację linii na odcinki o zmiennej długości Δl.



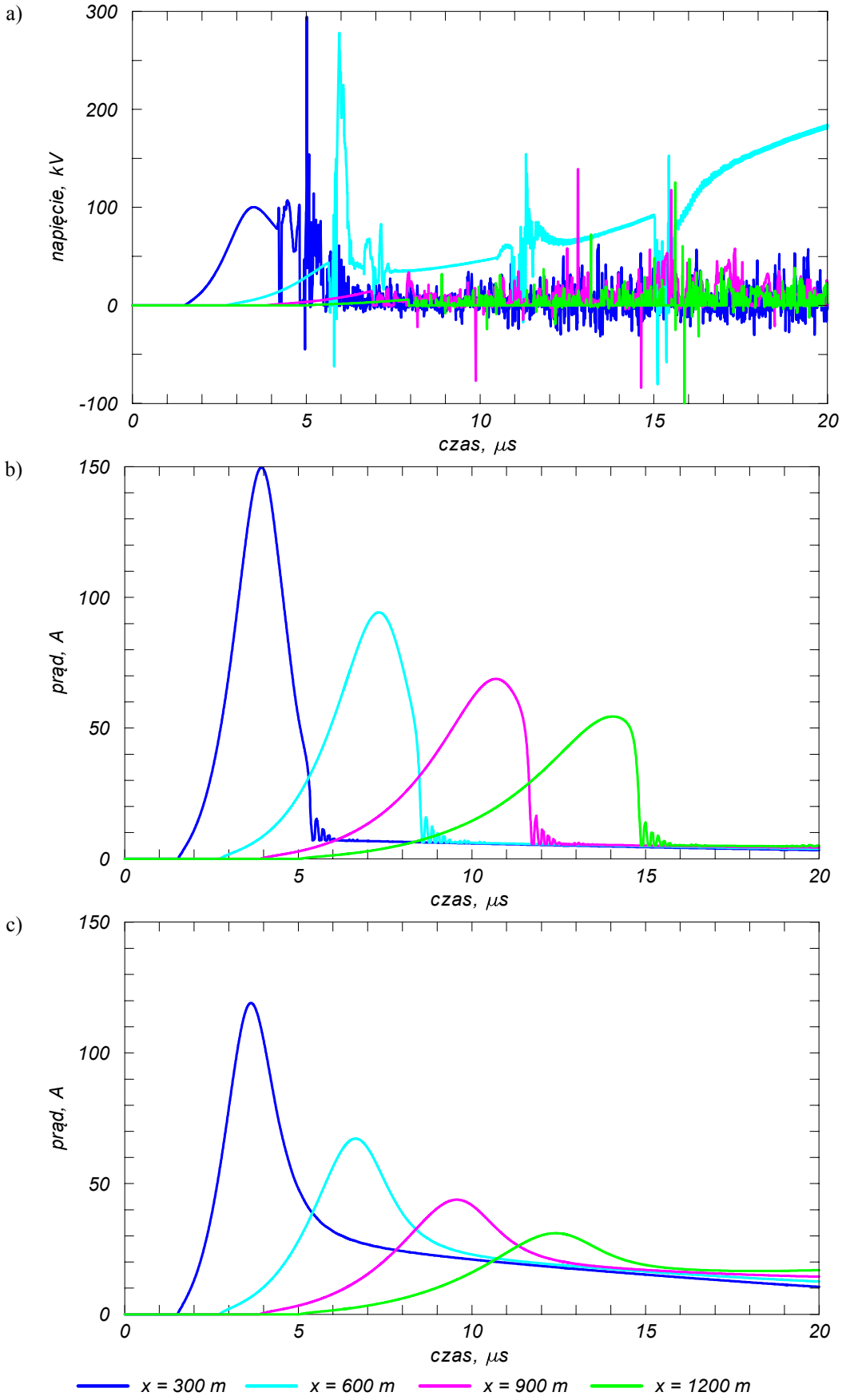
Rys. 5.10. Jednoprzewodowa linia długa

Obliczenia numeryczne potwierdziły dużą wrażliwość rozwiązania w przypadku, gdy przepływ prądu pojemnościowego $i_C(t)$ uwarunkowany jest nie tylko przekroczeniem przez napięcie $u(t)$ wartości początkowej ulotu U_0, ale także pochodną napięcia $du/dt > 0$. Ilustrują to oscylacje numeryczne w przykładowych przebiegach napięć i prądów dla funkcji załączających $S_G = S_C = S_1$, przedstawiono na rysunkach 5.11a) i 5.12a). Rysunki te dotyczą propagacji fali przepięciowej 2,5/60 μs o wartości szczytowej $2U_0$ = 806 kV w bezstratnej linii długiej, dla której parametry σ_G i σ_C dynamicznej charakterystyki $q - u$ przedstawione są na rysunku 5.1a).

Powyższe rozwiązania są całkowicie odmienne pod względem ilościowym i jakościowym od rozwiązań dla $S_G = S_2$, $S_C = S_1$ przedstawionych na rysunkach 5.11b) i 5.12b) oraz dla $S_G = S_C = S_2$ na rysunkach 5.11c) i 5.12c). Niewielkie oscylacje numeryczne uwidaczniają się tylko w przebiegach prądów na rysunku 5.12b), jednak nie skutkują one zaburzeniami w rozwiązaniach przebiegów napięć (rys. 5.11b). Przebiegi napięć na rysunkach 5.11b) i 5.11c) są pod względem kształtu zbliżone do siebie. Istotniejsze różnice występują dla wartości szczytowych, które są mniejsze w przypadku, gdy przepływ zarówno prądu $i_G(t)$ oraz $i_C(t)$ uwarunkowany jest tylko przekroczeniem przez napięcie wartości początkowej ulotu U_0.

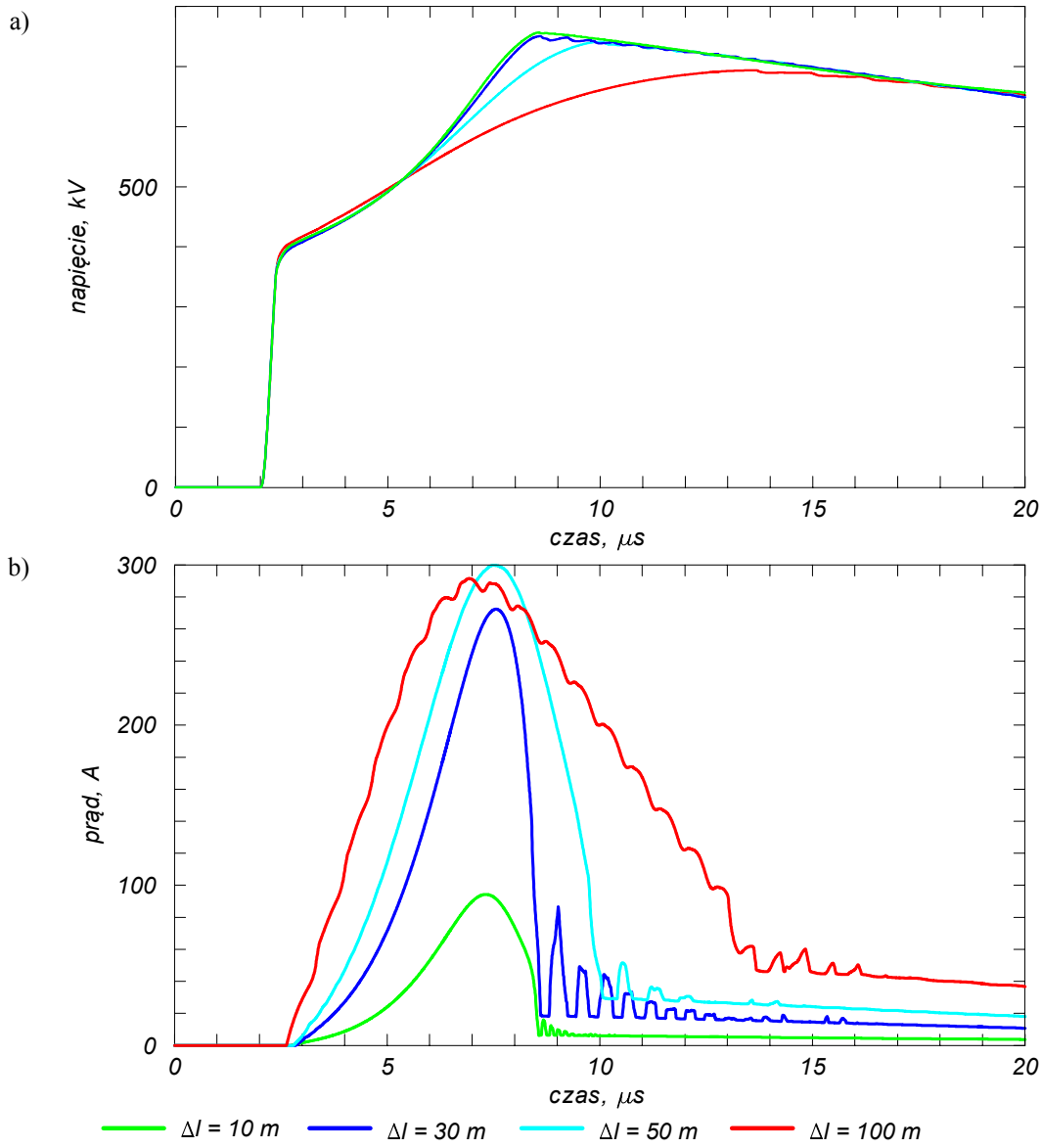


Rys. 5.11. Przebiegi czasowe napięć w wybranych punktach linii: a) $S_G = S_C = S_1$, b) $S_G = S_2$, $S_C = S_1$, c) $S_G = S_C = S_2$



Rys. 5.12. Przebiegi czasowe impulsów prądu ulotu w wybranych punktach linii: a) $S_G = S_C = S_1$, b) $S_G = S_2$, $S_C = S_1$, c) $S_G = S_C = S_2$

Dokładność rozwiązania zależna jest od długości Δl odcinków powstających w wyniku dyskretyzacji linii. Na rysunku 5.13 przedstawiono przykładowy wpływ długości odcinka Δl na przebiegi napięć i prądów w punkcie linii odległym o 600 m od jej początku. Uzyskanie większej dokładności wymaga gęstszego podziału, a tym samym większej liczby elementów reprezentujących ulot, co wpływa na komplikację i wydłużenie czasu symulacji. W przypadku przedstawionym na rysunku 5.13 można uznać, że długość Δl = 30 m zapewnia uzyskanie dostatecznie dokładnego rozwiązania przebiegów napięć. Jednak dla złożonych modeli rzeczywistych układów elektroenergetycznych, w których przyjmowane są również inne założenia upraszczające, uzasadnione może być zwiększenie Δl do 100 m, a nawet 300-500 m w przypadku linii stratnych.



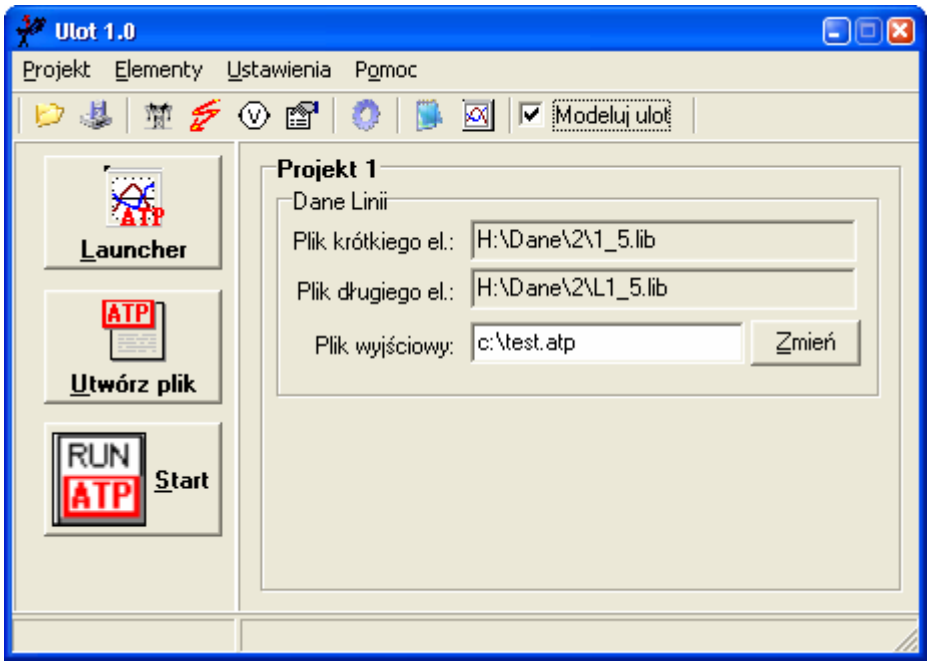
Rys. 5.13. Wpływ długości odcinka Δl na przebiegi czasowe przepięć (a) i prądów (b) w punkcie x = 600 m

5.4. Analiza propagacji fal przepięciowych w liniach elektroenergetycznych

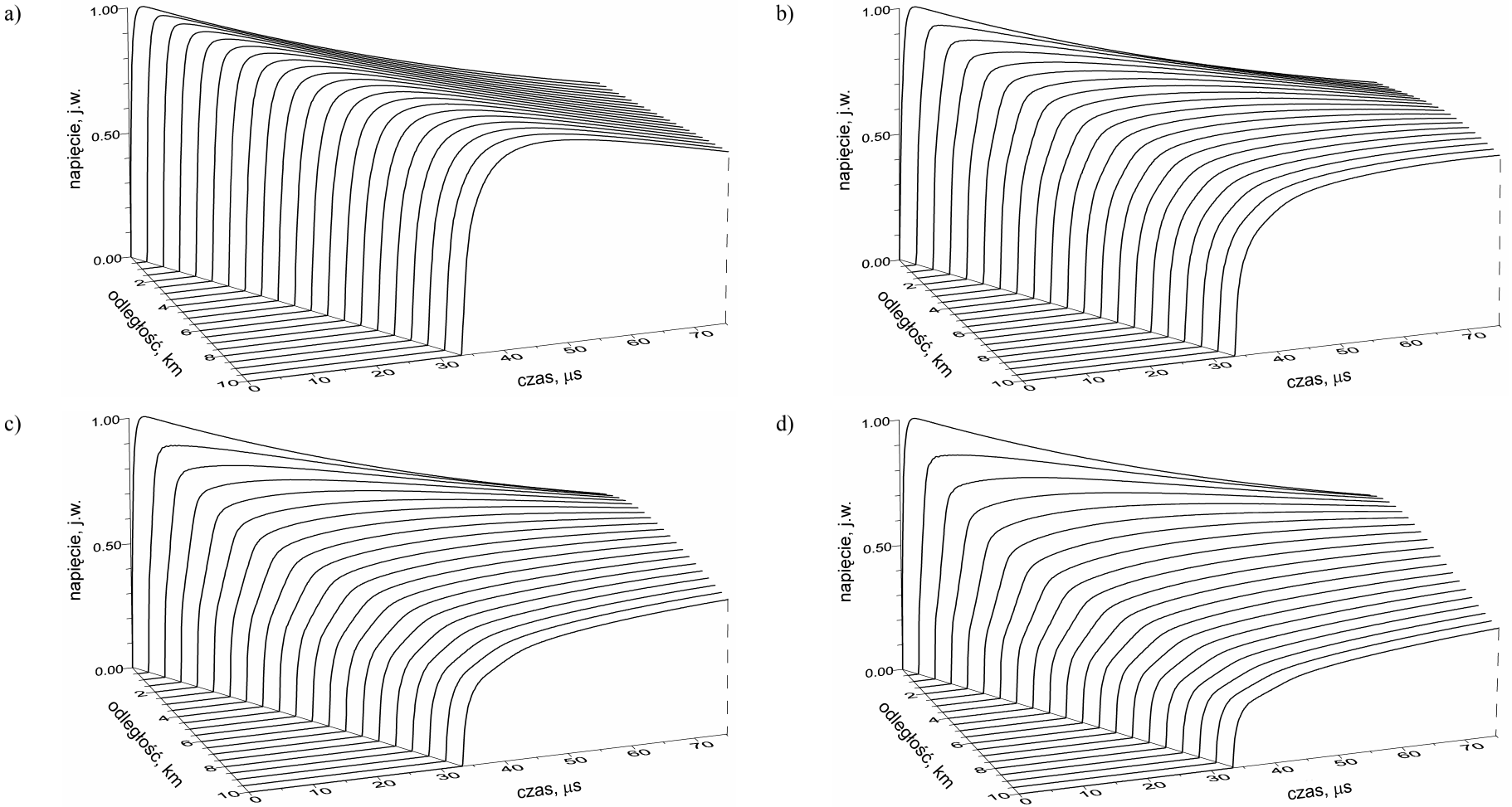
5.4.1. Jednotorowa linia przesyłowa o napięciu 400 kV

Opracowany model matematyczny ulotu elektrycznego zastosowano do badań propagacji przepięć atmosferycznych w jednotorowej linii 400 kV prowadzonej na konstrukcjach wsporczych typu Y25. Linia wyposażona jest w trzy przewody fazowe w postaci wiązek dwuprzewodowych, złożonych z pojedynczych przewodów o średnicy 31,5 mm i odstępie 400 mm, a także w dwa przewody odgromowe o średnicy 15 mm.

Podstawowym programem komputerowym, umożliwiającym właściwe odwzorowanie układów elektroenergetycznych i efektywne uzyskanie rozwiązań numerycznych w warunkach występowania szybkozmiennych zjawisk przejściowych, jest obecnie *program EMTP-ATP*. Dlatego w celu rozszerzenie zakresu zastosowania tego programu do modelowania wpływu zjawiska ulotu elektrycznego na propagację fal przepięciowych, opracowano autorski program *ULOT* [34] współpracujący z programem *EMTP-ATP* (rys. 5.14).



Rys. 5.14. Program *ULOT* współpracujący z programem *EMTP-ATP*



Rys.5.15. Obraz propagacji w jednotorowej linii 400 kV fali przepięciowej wartości szczytowej: a) $U_m = U_0$, b) $U_m = 2U_0$, c) $U_m = 3U_0$, d) $U_m = 4U_0$

Program *ULOT* stanowi preprocesor tekstowy programu *EMTP-ATP*, umożliwiający przygotowanie pliku danych do analizy propagacji fal w liniach elektroenergetycznych o nieskończonej długości. Program umożliwia wybór jednego z trzech zaimplementowanych w *EMTP-ATP* częstotliwościowo-zależnych modeli linii elektroenergetycznych wraz z niezbędnymi wielkościami charakterystycznymi. Parametry modelu wprowadzane są przez podanie standardowych danych konstrukcyjnych linii, stopnia dyskretyzacji oraz charakterystycznych parametrów ulotu elektrycznego. Należy również określić kształt i wartość szczytową wejściowego udaru napięciowego oraz wybrać punkty wzdłuż linii, w których będą obserwowane przebiegi czasowe fal przepięciowych.

Obliczenia przeprowadzono dla linii o długości 9 km, przy podziale na 10, 30 oraz 90 odcinków o długości odpowiednio 900, 300 oraz 100 m. Przeprowadzona analiza wykazała, że dla rozważanej linii o napięciu 400 kV wystarczające jest przyjęcie odcinka modelu liniowego *ML* o długości Δl wynoszącej 100 m.

Na rysunku 5.15 przedstawiono obrazy propagacji fali przepięciowej pochodzenia atmosferycznego, które stanowią rozkłady czasowo-przestrzenne względnych wartości napięć. Dotyczą one przepięcia o kształcie określonym modelem dwuwykładniczym i wartościach szczytowych $U_m = U_0$, $2U_0$, $3U_0$ oraz $4U_0$, gdzie U_0 jest napięciem początkowym ulotu.

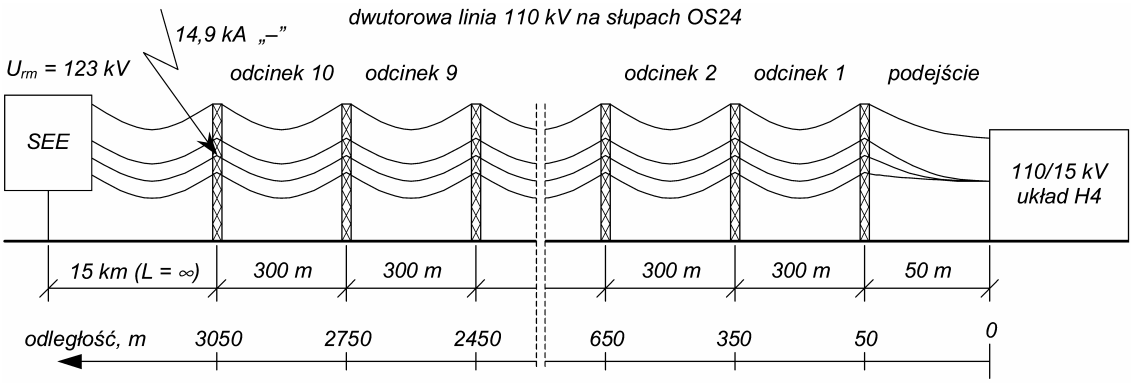
Otrzymane obrazy ilustrują zmniejszenie wartości szczytowej oraz złagodzenie stromości narastania fali przepięciowej po przekroczeniu napięcia początkowego ulotu. W przypadku gdy napięcie $U_m = U_0$ ulot nie występuje, a tłumienie fali ma charakter wyłącznie oporowy, wynikający ze zmiany impedancji wzdłużnych pętli ziemnopowrotnych w zmiennoczęstotliwościowym modelu linii. W pozostałych przypadkach uwidacznia się wpływ ulotu elektrycznego na tłumienie fali rozchodzącej się wzdłuż analizowanej linii, a większej wartości szczytowej udaru odpowiada wyższy stopień tłumienia.

5.4.2. Dwutorowa linia rozdzielcza o napięciu 110 kV

Przedmiotem badań numerycznych był układ elektroenergetyczny o napięciu 110 kV, którego schemat przedstawiono na rysunku 5.16. Układ ten składa się z dwóch zasadniczych części, jakimi są:

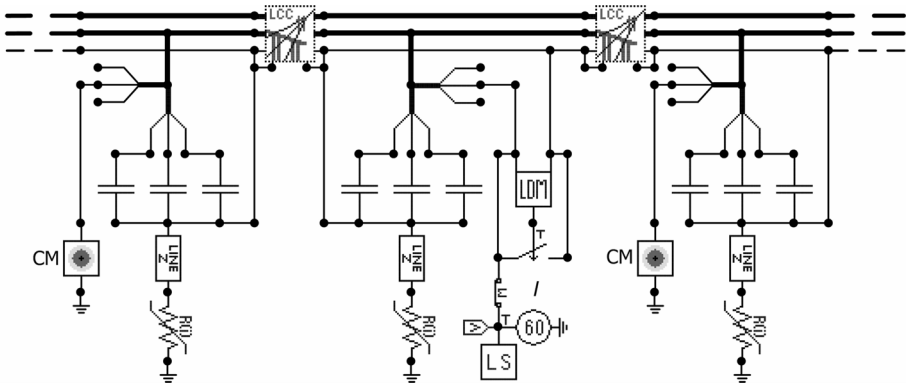
1) dwutorowa linia zasilająca 110 kV prowadzona na konstrukcjach wsporczych serii OS24,
2) stacja elektroenergetyczna o napięciu znamionowym 110 kV w układzie *H*4, wyposażona w dwa transformatory 110/15 kV.

Celem symulacji komputerowych było zbadanie wpływu ulotu elektrycznego na poziom przepięć propagujących wzdłuż linii i docierających do rozdzielni 110 kV, będących efektem wyładowania piorunowego do przewodu fazowego linii zasilającej.



Rys. 5.16. Schemat analizowanego układu elektroenergetycznego 110 kV

Kompleksowy model analizowanego układu elektroenergetycznego odwzorowano w programie *ATPDraw*, a fragment jego schematu w części dotyczącej linii przesyłowej przedstawiono na rysunku 5.17. W modelu wyodrębniono dziesięć trzystumetrowych odcinków, reprezentujących dziesięć przęseł przed wprowadzeniem linii do rozdzielni i jeden odcinek pięćdziesięciometrowy – reprezentujący podejście do stacji (rys. 5.16). Odcinki te odwzorowano jako wieloprzewodowe linie długie o parametrach zależnych od częstotliwości (bloki *LCC* na rys. 5.17).



Rys. 5.17. Fragment modelu dwutorowej linii 110 kV: *LCC* – odcinek wieloprzewodowej linii długiej o parametrach zależnych od częstotliwości; *LINE Z* – jednoprzewodowa, bezstratna linia długa; *R*(*i*) – nieliniowa rezystancja uziemienia; *LDM* – model udarowej wytrzymałości układu izolacyjnego; *CM* – model ulotu elektrycznego; *LS* – wyładowanie piorunowe

Do węzłów pomiędzy blokami *LCC* podłączone są następujące elementy:

— jednoprzewodowa, bezstratna linia długa (bloki *LINE Z*), reprezentująca zjawiska falowe w konstrukcji wsporczej,

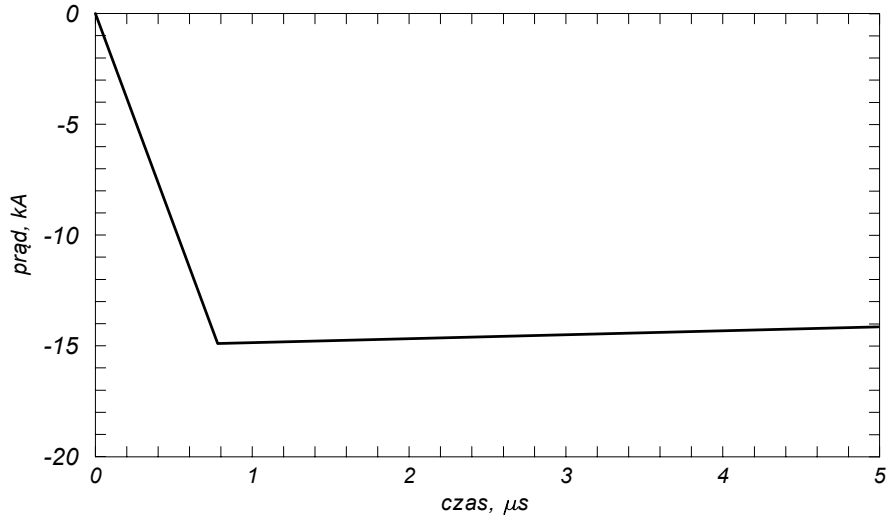
— model wytrzymałości udarowej izolacji linii (bloki *LDM*), zrealizowany w oparciu o metodę rozwoju lidera w języku *MODELS*,

— nieliniowa rezystancja *R*(*i*), reprezentująca udarowe właściwości uziemienia konstrukcji wsporczej,

— model ulotu elektrycznego – blok *CM*.

Integralną częścią układu jest model rozdzielni, który szczegółowo opisano w punkcie 5.5.

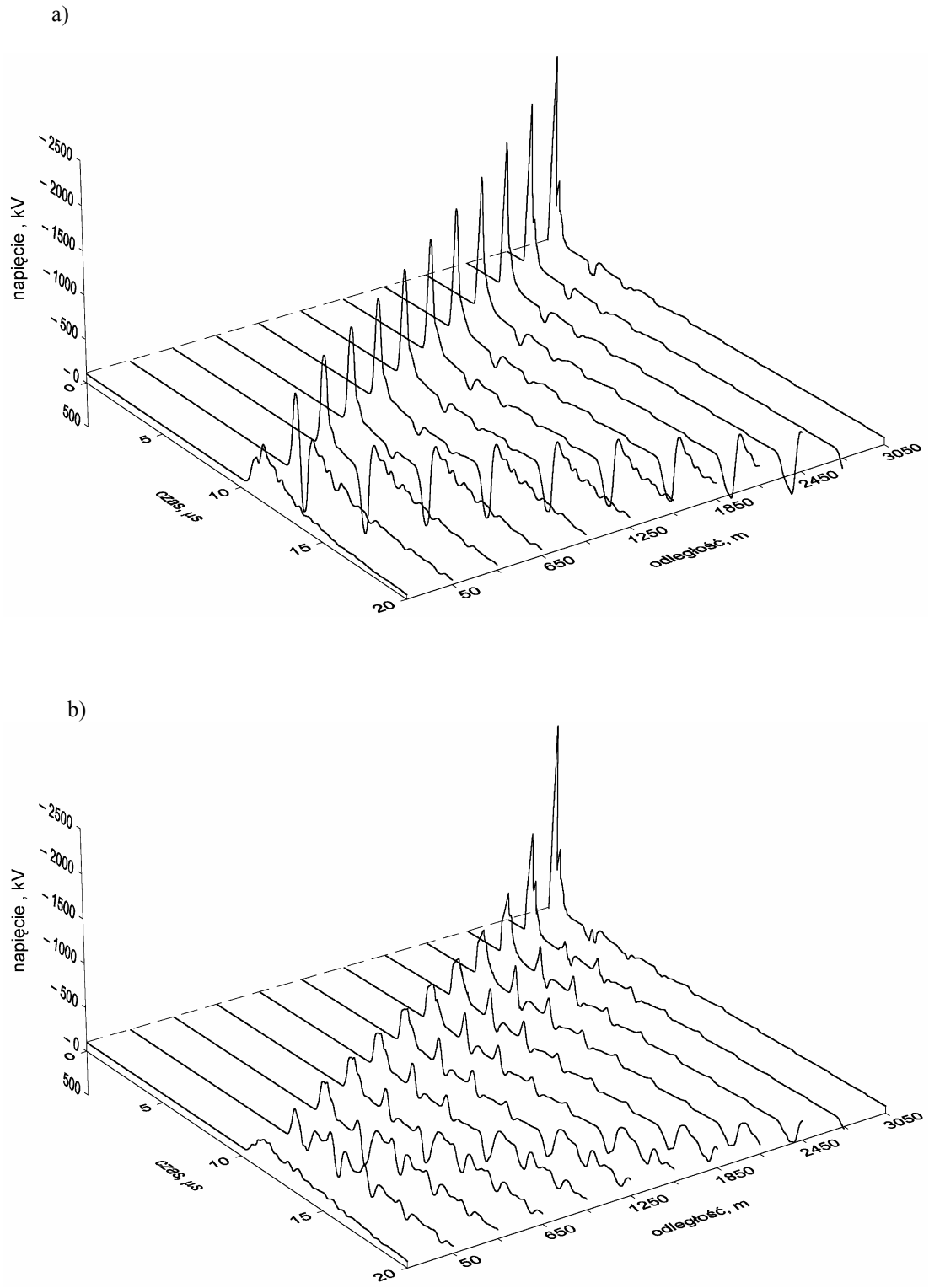
Wyładowanie piorunowe zostało przedstawione w postaci trójkątnego impulsu prądowego biegunowości ujemnej, przyłączonego do atakowanego przewodu fazowego (rys.5.18). Wartość szczytowa impulsu odpowiada krytycznej wartości szczytowej prądu pioruna, powyżej której – w myśl teorii elektrogeometrycznej – nie jest możliwe uderzenie pioruna w przewód fazowy linii. Przeprowadzona analiza stref ochronnych wykazała, że dla zastosowanych w liniach słupów OS24 konstrukcji mocnej, krytyczna wartość szczytowa prądu wynosi 14,9 kA. Wartości tej odpowiada równoważny czas trwania czoła 0,78 μs. Analiza wykazała również, że najbardziej narażona jest faza środkowa (faza B), która jest najbardziej odsunięta od osi linii.



Rys. 5.18. Zastępczy, trójkątny impuls pierwszej składowej biegunowości ujemnej prądu pioruna

Na rysunku 5.19a) przedstawiono przykładowe obrazy propagacji przepięć w atakowanej fazie linii 110 kV, otrzymane dla miejsca uderzenia pioruna w odległości 3050 m od rozdzielni. W obrazach tych nie uwzględniono tłumienia ulotowego, a jedynie tłumienie o charakterze oporowym, wynikające przede wszystkim ze zmian impedancji wzdłużnych pętli ziemnopowrotnych w zmiennoczęstotliwościowym modelu linii.

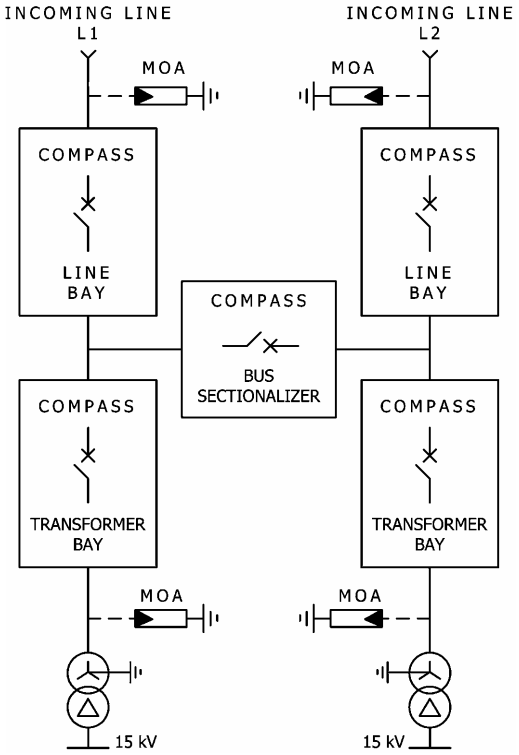
Na rysunku 5.19b) przedstawiono analogiczne obrazy propagacji, lecz przy uwzględnieniu tłumienia ulotowego. Tłumienie ulotowe zależy między innymi od promienia przewodu, jego wysokości nad powierzchnia ziemi oraz wartości szczytowej fali przepięciowej. Duże znaczenie ma także miejsce uderzenia pioruna.



Rys.5.19. Obrazy propagacji przepięć w linii 110 kV: a) bez ulotu, b) z ulotem

5.5. Analiza narażeń przepięciowych rozdzielni elektroenergetycznych

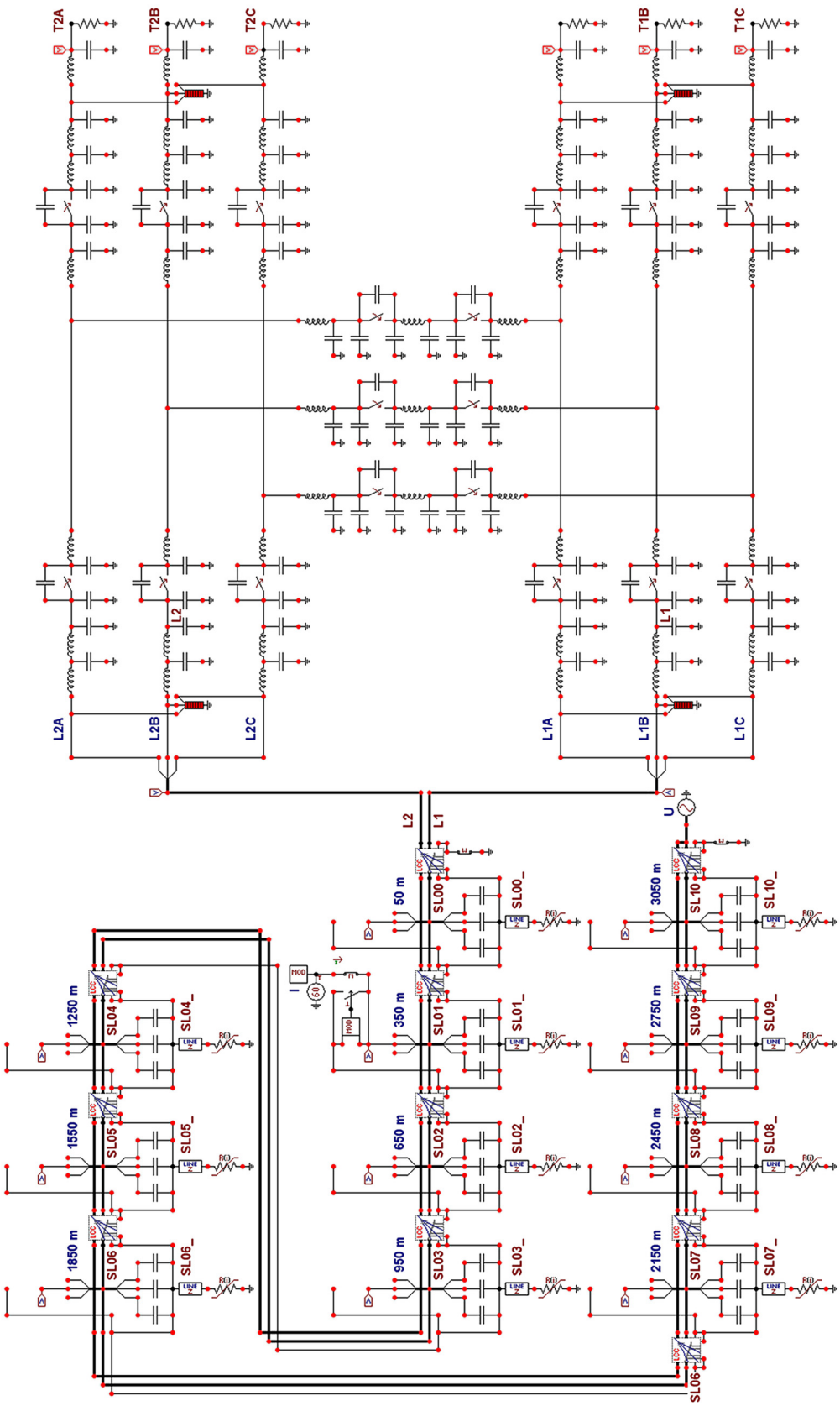
Przedmiotem analizy była rozdzielnia 110 kV stacji elektroenergetycznej, która zasilana jest z dwutorowej linii o napięciu 110 kV (rys. 5.16). Rozdzielnia wykonana jest w układzie *H*4 w oparciu o nowoczesne moduły typu *COMPASS*, zainstalowane w polach liniowych i transformatorowych. Uproszczony schemat rozdzielni przedstawiono na rysunku 5.20.



Rys.5.20. Schemat blokowy rozdzielni 110 kV z modułami COMPASS: *MOA* – beziskiernikowy ogranicznik przepięć

Celem symulacji komputerowych było zbadanie wpływu ulotu elektrycznego na poziom przepięć w charakterystycznych miejscach rozdzielni 110 kV, docierających do rozdzielni w wyniku wyładowania piorunowego do przewodu fazowego linii zasilającej (rys. 5.18). Model analizowanego układu odwzorowany został w programie *ATPDraw*, a jego schemat przedstawiono na rysunku 5.21. W rozważanym układzie wyodrębnić można dwie zasadnicze części.

Pierwszą z nich stanowi model rozdzielni w postaci zbioru elementów odwzorowujących jej istotne wyposażenie (rys. 4.13). Wyodrębniono w nim aparaty i urządzenia stanowiące węzły nieciągłości na drodze fal przepięciowych i określono, które odcinki szyn zbiorczych oraz połączenia międzyaparatowe będą reprezentowane jako obwody o parametrach rozłożonych, a które jako obwody skupione.



Rys.5.21. Schemat analizowanego układu 110 kV odwzorowany w programie *ATPDraw*

Ze względu na fakt, że w analizowanej rozdzielni długości odcinków szyn i połączeń nie przekraczają 15 metrów, odwzorowano je jako indukcyjności skupione o wartości jednostkowej 1 μH/m, pomiędzy którymi znajdują się pojemności doziemne poszczególnych aparatów.

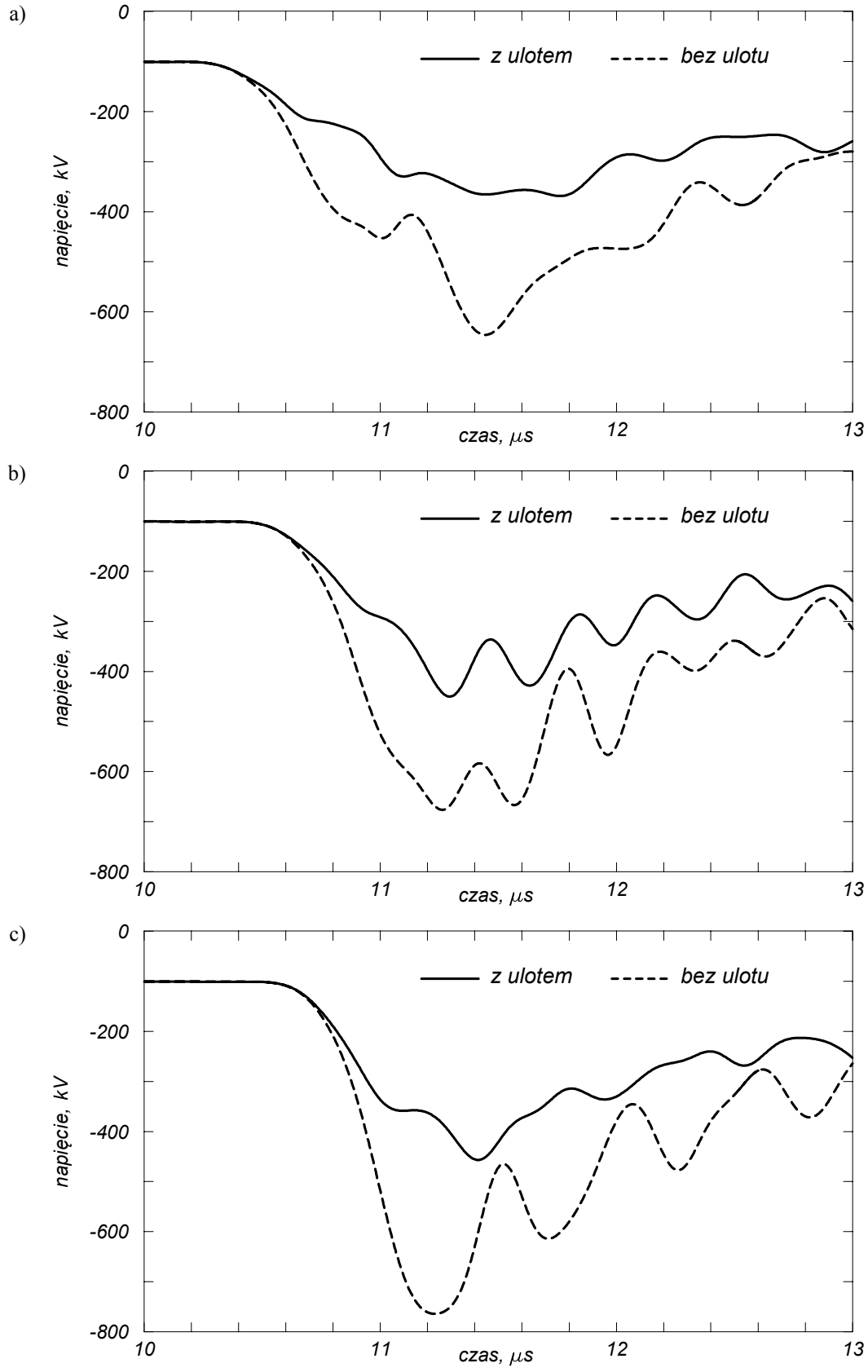
Pomimo złożonych zjawisk falowych w uzwojeniach transformatorów, zjawiska na ich zaciskach liniowych są analogiczne, jak na końcu nieobciążonej linii długiej. Konsekwencją tego jest możliwość zastosowania uproszczonych modeli będących równoległym połączeniem rezystancji reprezentującej impedancję falową transformatora oraz pojemności doziemnej uzwojenia (rys. 4.14). Zastosowany model ograniczników przepięć uwzględnia zjawiska dynamiczne przy szybkich zmianach napięcia i stanowi go struktura proponowana przez IEEE Working Group 3.4.11 (rys. 4.15). Do estymacji parametrów modelu ogranicznika wykorzystano program *ZnO – Model* [77], który daje możliwość utworzenia pliku bezpośrednio wykorzystywanego w programie *EMTP – ATP*.

Drugą część rozważanego układu stanowi kompleksowy model dwutorowej linii zasilającej 110 kV, który przedstawiono w punkcie 5.4.2.

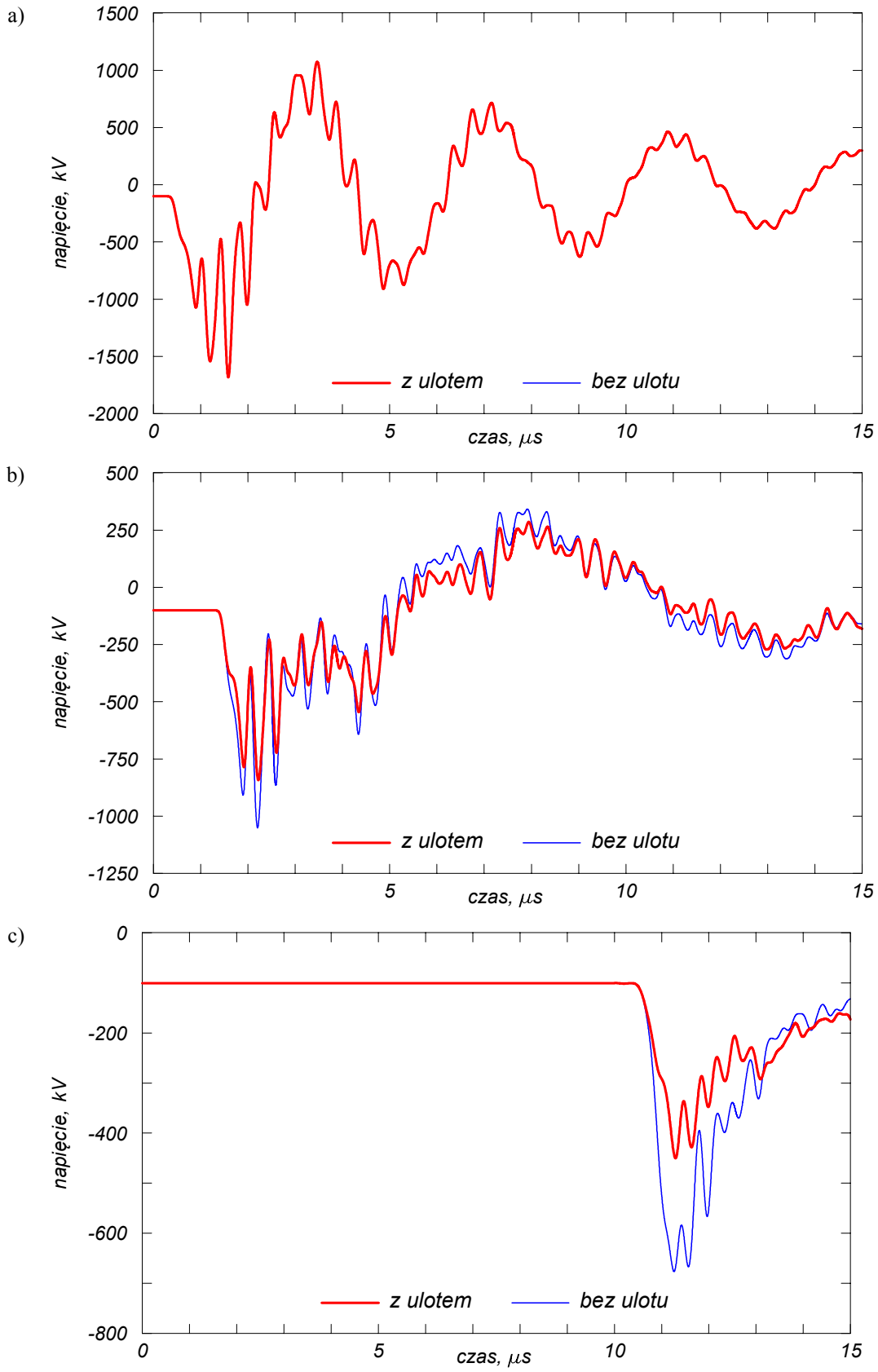
Analizę przepięć przeprowadzono wielowariantowo, rozważając możliwe w eksploatacji układy pracy rozdzielni. Założono, że atakowana jest faza B toru $L1$, przy czym miejsce uderzenia pioruna stanowiło jeden z parametrów analizy. Zgodnie z oczekiwaniami, przeprowadzone symulacje wykazały, że przy zasilaniu rozdzielni z dwóch torów linii $L1$ i $L2$ (rys. 5.21) największe poziomy przepięć w rozdzielni występują przy otwartej poprzeczce układu H. Analogiczna sytuacja ma miejsce również przy zasilaniu rozdzielni z jednego toru (np. $L1$), przy czym nie występują wówczas istotne różnice, niezależnie od tego, czy poprzeczka jest otwarta czy też pozostaje zamknięta.

Na rysunku 5.22 przedstawiono przykładowe przebiegi przepięć w wybranych punktach rozdzielni: w miejscu wprowadzenia toru $L1$ oraz na zaciskach transformatorów $T1$ i $T2$, otrzymane przy założeniu uderzenia pioruna w odległości 3050 m od rozdzielni i braku ochrony przeciwprzepięciowej. Przebiegi te wykazują zarówno złożone efekty falowe występujące w rozdzielni (zróżnicowanie przebiegów w poszczególnych punktach), jak i znaczną redukcję wartości szczytowych oraz złagodzenie stromości narastania przepięć w wyniku tłumienia ulotowego.

Efektywność tłumienia ulotowego zależna jest od wielu czynników, jak promień przewodu, jego wysokość czy stosunek wartości szczytowej fali przepięciowej w miejscu jej powstania do wartości napięcia początkowego ulotu. Istotnym czynnikiem jest również miejsce uderzenia pioruna (rys. 5.23), przy czym tłumienie jest tym większa im większa jest droga propagacji fali przepięciowej.



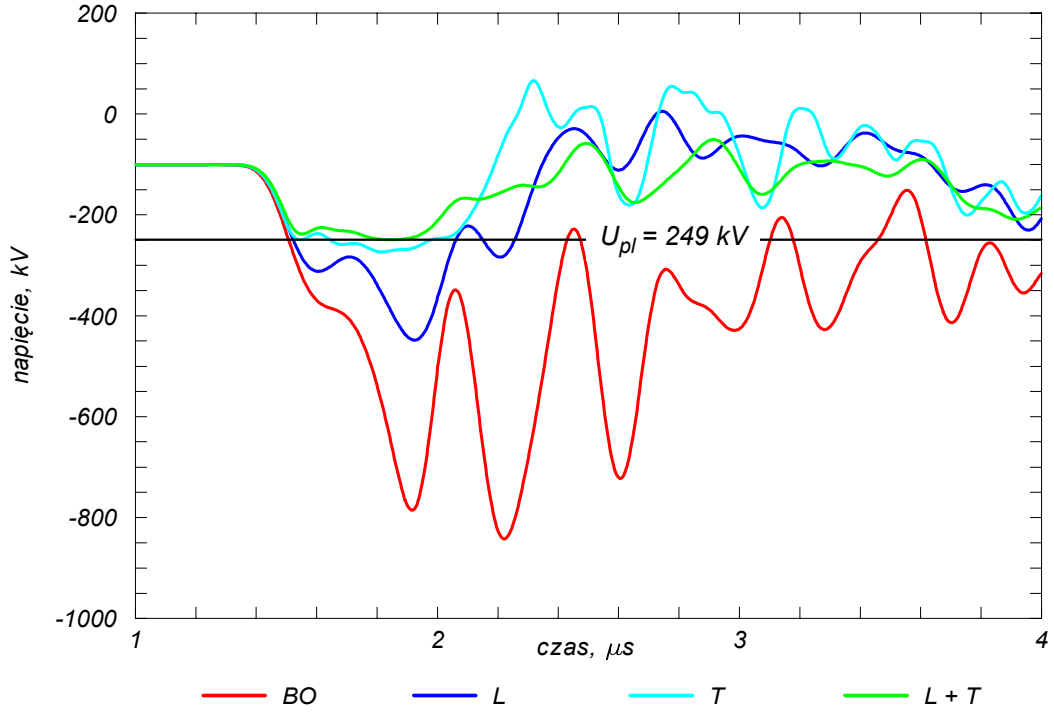
Rys.5.22. Wpływ ulotu na przepięcia w wybranych punktach rozdzielni 110 kV – zasilanie z toru *L*1, odległość uderzenia pioruna 3050 m: a) w miejscu wprowadzenia toru *L*1, b) na zaciskach transformatora *T*1, c) na zaciskach transformatora *T*2



Rys.5.23. Wpływ miejsca uderzenia pioruna na przepięcia na transformatorze *T*1:
a) 50 m, b) 350 m, c) 3050 m – zasilanie z toru *L*1

O kształcie przepięć i ich wartościach istotnie decyduje zastosowana ochrona przeciwprzepięciowa. Na rysunku 5.24 pokazano przykładowe przepięcia na transformatorze $T1$ wynikające z uderzeniem pioruna w odległości 350 m od rozdzielni, które otrzymano dla czterech wariantów ochrony:

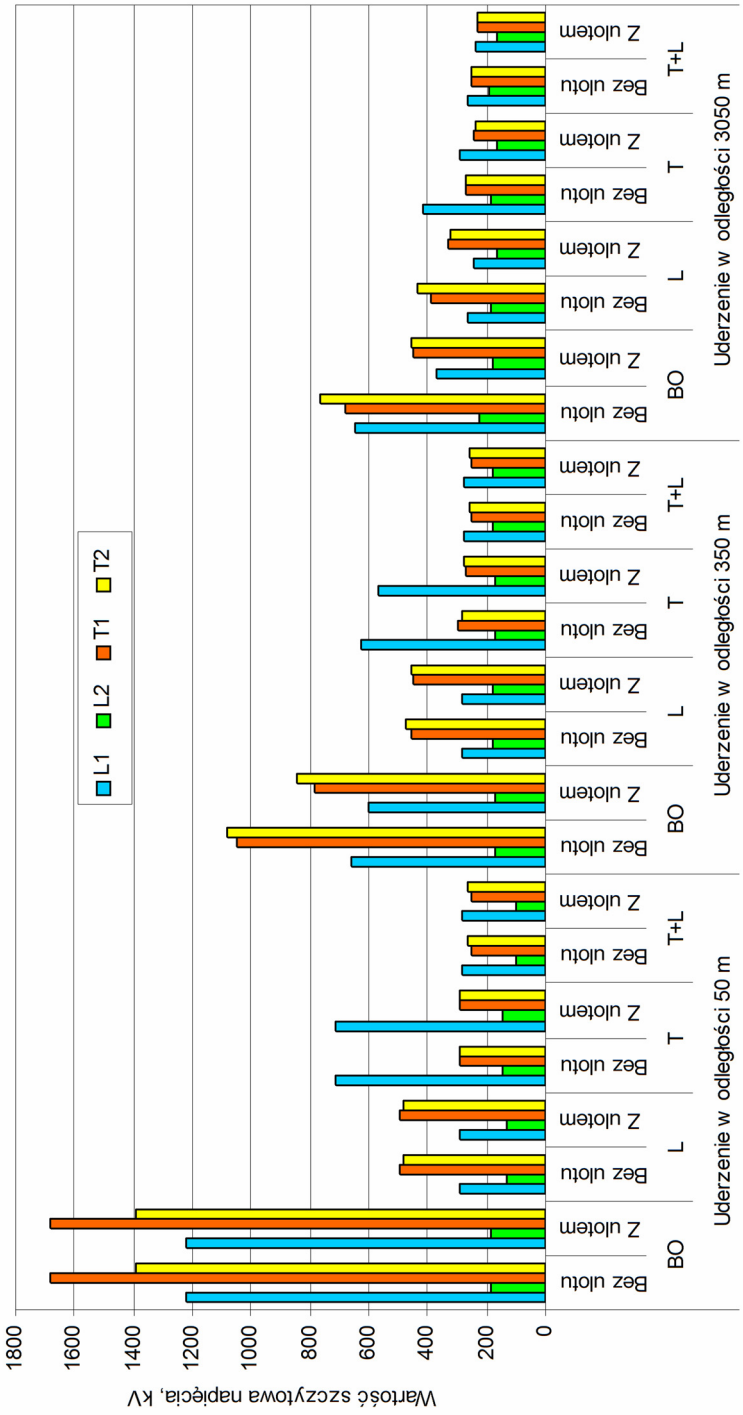
1) brak ograniczników przepięć (*BO*),
2) ograniczniki w punkcie przyłączenia linii (*L*),
3) ograniczniki w polach transformatorów (*T*),
4) ograniczniki w punkcie przyłączenia linii i w polach transformatorów (*L*+*T*). Na rysunku zaznaczono również piorunowy poziom ochrony U_{pl} = 249 kV dla znamionowego prądu wyładowczego 8/20 μs, 10 kA zastosowanych ograniczników



Rys.5.24. Wpływ ograniczników przepięć na przepięcia na transformatorze $T1$ – zasilanie z toru $L1$, odległość uderzenia pioruna 350 m

Na rysunku 5.25 zestawiono wyniki analizy, które pozwalają ocenić wpływ zjawiska ulotu, miejsca uderzenia pioruna oraz sposobu ochrony przeciwprzepięciowej, na wartości maksymalne przepięć, występujących w charakterystycznych punktach rozdzielni: początek toru nr 1 i toru nr 2 linii zasilającej ($L1$ i $L2$) oraz na zaciskach transformatorów ($T1$ i $T2$). Prezentowane wyniki zostały uzyskane dla miejsca uderzenia pioruna w linię w odległości 50, 350 oraz 3050 m od rozdzielni.

Największe wartości przepięć występują przy uderzeniu pioruna w pierwszy słup linii od strony rozdzielni (50 m od punktów $L1$ oraz $L2$) i w tym przypadku brak jest praktycznie tłumienia ulotowego, a o poziomie przepięć decyduje jedynie sposób rozwiązania ochrony przeciwprzepięciowej rozdzielni.



Rys. 5.25. Wartości szczytowe przepięć w wybranych punktach rozdzielni 110 kV – zasilanie z toru *L*1

Dla dalszych odległości uderzenia pioruna poziom przepięć ulega zmniejszeniu, a ich wartości szczytowe zależne są wówczas zarówno od sposobu ochrony, jak i dodatkowo od tłumienia ulotowego.

Skuteczność ochrony związana jest również z liczbą i rozmieszczeniem ograniczników w rozdzielni. Wskutek wewnętrznych zjawisk falowych, usytuowanie ograniczników tylko w miejscu przyłączenia linii skutkuje znacznym wzrostem poziomu przepięć na zaciskach transformatora. Analogicznie przedstawia się sytuacja przy lokalizacji ograniczników tylko w polach transformatorów, co prowadzi do intensyfikacji przepięć w polach liniowych. W obu tych przypadkach tłumienie ulotowe ma znaczący udział w redukcji przepięć w niechronionych częściach rozdzielni. Najlepszym wariantem ochrony przeciwprzepięciowej jest jednak zastosowanie ograniczników zarówno w polach liniowych, jak i w polach transformatorowych analizowanego układu *H* rozdzielni 110 kV.

6. Podsumowanie

Problematyka przedstawiona w rozprawie doktorskiej, w ogólnym ujęciu dotyczy niezawodności przesyłu i rozdziału energii elektrycznej, która uwarunkowana jest rozpoznaniem narażeń eksploatacyjnych, a w szczególności mających podstawowe znaczenie – narażeń przepięciowych. Dokonujący się w koordynacji izolacji postęp, wynika z rozwoju możliwości komputerowych symulacji spodziewanych narażeń przepięciowych, oddziałujących na układ izolacyjny w trakcie jego eksploatacji. Obliczeniowe metody rozpoznania tych narażeń, wykorzystujące modelowanie matematyczne i techniki informatyczne, są obecnie intensywnie rozwijanym obszarem badawczym – szczególnie w zakresie przepięć atmosferycznych.

Przedstawione w rozprawie modele matematyczne układów elektroenergetycznych wysokich napięć w warunkach oddziaływania przepięć atmosferycznych, opracowane dla doskonalenie metod badań narażeń przepięciowych oraz poszukiwanie nowych algorytmów ich numerycznej identyfikacji, wpisują się w powyższy obszar badawczy. Ich oryginalnym elementem jest jednoczesne uwzględnienie propagacji fal przepięciowych w wieloprzewodowych liniach długich, których parametry zależne są od częstotliwości oraz od napięcia po przekroczeniu wartości początkowej ulotu elektrycznego, a także zjawisk falowych i efektów nieliniowych w konstrukcjach wsporczych linii elektroenergetycznych oraz propagacji fal przepięciowych w rozdzielniach i stacjach elektroenergetycznych.

Pomimo przyjęcia nieuniknionych założeń upraszczających przy opracowywaniu modeli układów elektroenergetycznych w warunkach oddziaływania przepięć atmosferycznych, uwzględniać one będą zdecydowaną większość skomplikowanych zjawisk o charakterze falowym i nieliniowym powstających w wyniku wyładowań atmosferycznych do obiektów elektroenergetycznych. Rozwiązanie postawionego w rozprawie problemu pozwoliło na udoskonalenie modeli linii i stacji elektroenergetycznych wysokich oraz najwyższych napięć, mających zastosowanie do analizy spodziewanych narażeń przepięciowych wynikających z wyładowań atmosferycznych.

Praktycznym efektem rozprawy są wyniki analizy propagacji fal przepięciowych pochodzenia piorunowego w wysokonapięciowych układach przesyłowo-rozdzielczych w warunkach tłumienia wywołanego ulotem elektrycznym. Opracowane programy komputerowe i implementacja modeli w pakiecie *EMTP-ATP*, a także zastosowana metodyka badań numerycznych, mają bezpośrednie aplikacje w uściślaniu procedur projektowania oraz eksploatacji optymalnych pod względem technicznym i ekonomicznym układów elektroenergetycznych. Obecnie ma to istotne znaczenie nie tylko dla instytucji projektowych, ale również dla operatorów systemów przesyłowych oraz rozdzielczych wysokich i najwyższych napięć.

Literatura

[1] Al-Tai M. A., Elayyan H. S. B., German D. M., Haddad A., Harid N., Waters R. T.: *The simulation of surge corona on transmission lines*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 2, 1989, pp. 1360-1368

[2] Bajorek J.: *Własności linii elektroenergetycznych najwyższych napięć w warunkach przebiegów przejściowych*, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Nr 110, Elektrotechnika, z. 13, 1993, str. 57-71

[3] Bajorek J.: *Modelowanie matematyczne przepięć indukowanych wyładowaniami atmosferycznymi*, Materiały konferencyjne VIII Sympozjum nt. *Problemy eksploatacji układów izolacyjnych wysokiego napięcia*, Zakopane, 2001, str. 47–52

[4] Bajorek J.: *Analiza użyteczności symulatorów elektromagnetycznych w analizie zagrożeń przepięciowych*, Przegląd Elektrotechniczny, 1'2005, str. 6-9

[5] Bajorek J.: *Wybrane problemy modelowania ulotu z przewodów linii elektroenergetycznych*, Przegląd Elektrotechniczny, 3'2007, str. 9-13

[6] Bajorek J., Gamracki M.: *Effectiveness of mathematical modeling of lightning coupling to overhead conductors*, 26th International Conference on Lightning Protection, Poland – Cracow 2002, Proceedings, pp. 209–213

[7] Bajorek J., Mościszewski G.: *Parametry elektryczne linii elektroenergetycznych najwyższych napięć*, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Nr 110, Elektrotechnika, z. 13, 1993, str. 17-56

[8] Bajorek J, Włodek R.: *Modelowanie matematyczne linii elektroenergetycznych w warunkach przepięć indukowanych,* Materiały konferencyjne III Sympozjum nt. *„Metody matematyczne w elektroenergetyce"*, Zakopane, 1993, str. 69–74

[9] Bernardi M., Pigini A., Diendorfer G., Schulz W.: *Long term experience on lightning acquisition in Italy and Austria and data application to the improvement of lightning performance,* CIGRÈ 2002 Session, paper 33-205

[10] Carneiro Jr. S., Marti J.R., Dommel H.W., Barros H.M.: *An efficient procedure for the implementation of corona models in Electromagnetic Transients Program*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 2, 1994, pp. 849-855

[11] Carson J.R.: *Wave propagation on overhead wires with ground return*, BELL System Technical Journal 5, October 1926, pp.539-554

[12] Célia de Jesus, Correia de Barros M.T.: *Modelling of corona dynamics for surge propagation studies*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 3, 1994, pp. 1564-1569

[13] Chaston A.N., LaForest J.J., Ramirez A.R.: *Electrical characteristics of EHV-UHV conductors configurations and circuit*, Transmission Line Reference Book 345 kV and Above. Electric Power Research Institute, Palo Alto, California 1982

[14] Chisholm W. A., Chow Y. L., Srivastava K. D.: *Travel time of transmission towers,* IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS–104, 1985, pp. 2922–2928

[15] CIGRÉ Working Group 01 of Study Committee 36 (Interferences): *Interferences produced by corona effect of electrical systems*. *Description of phenomena*. *Practical guide for calculation*, Publication No. 20, 1974

[16] CIGRÉ Study Committee 33 (Overvoltages and Insulation Coordination): *Distortions and attenuation of travelling waves caused by transients corona*, Publication No. 55, 1989

[17] CIGRÉ Working Group 33–01 (Lightning) of Study Committee 33 (Overvoltages and Insulation Coordination): *Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines,* Publication No. 63, 1991

[18] CIGRÉ Working Group 36.01 (EMC Aspects of Corona, Electric and Magnetic Fields): *Interferences produced by corona effect of electrical systems*. *Description of phenomena and practical guide for calculation*. *Addendum to CIGRE Document No. 20 (1974)*, Publication No. 61, 1996

[19] Cinieri E., Muzi F.: *Lightning induced overvoltages. Improvement in quality of service in MV distribution lines by addition of shield wires*, IEEE Transactions on PWRD, Vol. 11, 1996, pp. 361–372

[20] Ciudad J.L., Alvira D., Soto F.: *Corona modelling for attenuation and distortion of lightning surges in transmission lines*, EEUG News August, 1997, pp. 47-52

[21] Corbett J., Gallagher T., Val Escudero M., Dudurych I.: *Statistical analysis and modeling of lightning performance of 110 kV and 220 kV overhead networks in Ireland*, CIGRÈ 2002 Session, paper 33-204

[22] Correia de Barros M.T.: *Identification of the capacitance coefficients of multiphase transmission lines exhibiting corona under transient conditions*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 3, 1995, pp. 1642-1648
[23] Correia de Barros M.T., Almeida M.E., Dubé L., Stein B.: *A general-purpose transmission line model and its interference witch an electromagnetic transients programme*, Electrical Power and Energy Systems, Vol. 19, No. 4, 1997, pp. 249-254
[24] Cortina R., de Michelis D., Rosa F., Yamaguti K.: *Results of measurements of corona effects (loss, radio interference, audible noise) on large bundles and large-diameter tubes*, CIGRÈ 1980 Session, paper 36-06
[25] Diendorfer G., Hadrian W., Hofbauer F., Mair M., Schulz W.: *Evaluation of lightning location data employing measurements of direct strikes to a radio tower strikes*, CIGRÈ 2002 Session, paper 33-206
[26] *Electromagnetic Transients Program. Theory Book.* Bonneville Power Administration, Portland, Oregon, 1995
[27] Engel Z., Wszołek T.: *Problematyka uciążliwości akustycznej linii elektroenergetycznych 110 – 400 kV w ocenach oddziaływania na środowisko*. II Konferencja Naukowo-Techniczna „Pola elektromagnetyczne, a energetyka i środowisko", Bielsko-Biała, 24-25.11.1994
[28] Flisowski Z.: *Trendy rozwojowe ochrony odgromowej budowli. Część I: Wyładowanie piorunowe jako źródło zagrożenia*, PWN, Warszawa 1986
[29] Flisowski Z.: *Technika wysokich napięć (wyd. 3)*, WNT, Warszawa 1995
[30] Florkowska B.: *Wytrzymałość elektryczna gazowych układów izolacyjnych wysokiego napięcia*, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2003
[31] Florkowska B., Florkowski M., Włodek R., Zydroń P.: *Mechanizmy, pomiary i analiza wyładowań niezupełnych w diagnostyce układów izolacyjnych wysokiego napięcia*, Wyd. IPPT PAN, Warszawa 2001
[32] Florkowska B., Florkowski M., Zydroń P.: *Analiza wyładowań ulotowych na podstawie obrazów fazowo-rozdzielczych*. VII Sympozjum *Problemy Eksploatacji Układów Izolacyjnych Wysokiego Napięcia*, Zakopane, 21-23 października 1999, str. 111-118
[33] Florkowska B., Moskwa Sz., Nowak W., Włodek R., Zydroń P.: *Modelowanie procedur diagnostycznych w eksploatacji układów izolacyjnych wysokiego napięcia*, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2006
[34] Florkowska B., Nowak W., **Tarko R.**: *Modelowanie ulotu elektrycznego dla analizy propagacji fal przepięciowych w liniach elektroenergetycznych wysokich napięć*, Przegląd Elektrotechniczny, 1'2004, str. 69-72
[35] Florkowska B., Nowak W., **Tarko R.**: *Model of the corona for the computer simulations of the overvoltage waves propagation*, 3rd International Scientific Symposium „Elektroenergetika 2005", Stará Lesná, Slovakia, paper B-6, 2005
[36] Florkowska B., Nowak W., **Tarko R.**: *Wpływ ulotu elektrycznego na poziom przepięć atmosferycznych w rozdzielni 110 kV*, Przegląd Elektrotechniczny, 1'2005, str. 180-183
[37] Florkowska B., Nowak W., **Tarko R.**: *Modelling of the corona for the analysis of the overvoltage waves propagation in the overhead high voltage transmission line*, Archives of Electrical Engineering, Vol.LVI-No 215-1/2006, pp. 47-62
[38] Florkowska B., Nowak W., **Tarko R.***: Modelling of corona for analysis of the lightning surges propagation in high voltage power systems*, XVth International Symposium on High Voltage Engineering, paper T-711, 2007
[39] Florkowska B., Nowak W., **Tarko R.***: Modelowanie ulotu elektrycznego dla oceny narażeń przepięciowych układów elektroenergetycznych*, Energetyka, Zeszyt Tematyczny XII, 2007, str. 84-88
[40] Furgał J.: *Analiza narażeń przepięciowych izolacji transformatora chronionego iskiernikowymi i bezis-kiernikowymi ogranicznikami przepięć*, Rozprawy i Monografie nr 118, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2003
[41] Gallagher T. J., Dudurych I. M.: *Model of corona for an EMTP study of surge propagation along HV transmission lines*, IEE Proc.-Gener. Trans. Distrib., Vol. 151, No. 1, 2004, pp. 61-67
[42] Ganesan L., Joy Thomas M.: *Studies on influence of corona on overvoltage surges*, Electric Power Systems Research, No. 53, 2000, pp. 97-103
[43] Gary C.: *Approche complète de la propagation multifilaire en haute fréquence par utilisation des matrices complexes*, EdF, Bulletin de la Dir. Des Etudes et Recherches. Serie B, No ¾, 1976, str. 5-20
[44] Gary C., Dragan G., Critescu D.: *Attenuation of travelling waves caused by corona*, Conf. Proc. Interantional Conference on Large High Electric Systems, paper No. 33-13, France, 1978
[45] Gary C., Dragan G., Lungu I.: *Several physical characteristics of impulse-corona discharge around conductors. Part 2: Onset voltage and delay time of corona dicharge*, IEE Proceedings, Vol. 136, Pt. A, No. 4, 1989, pp. 197-201

[46] Gary C., Dragan G., Lungu I., Colteanu M.: *Several physical characteristics of impulse-corona discharge around conductors. Part 1: Streamer length and speed*, IEE Proceedings, Vol. 136, Pt. A, No. 4, 1989, pp. 191-196
[47] Greenwood A.: *Electrical Transient in Power Systems*, John Wiley, New York 1991
[48] Guillier J.F., Poloujadoff M., Rioual M.: *Dumping model of traveling waves by corona effect along extra high voltage three phase lines*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 4, 1995, pp. 1851-1961
[49] Harid N., Waters R.T.: *Statistical study of impulse corona inception parameters on line conductors*, IEE Prpceedings-A, Vol. 138, 1991, pp. 161-168
[50] Heidler F., Cvetić J.M., Stanić B.V.: *Calculation of lightning current parameters*, IEEE Transactions on PWRD, Vol. 14, No. 2, April 1999, pp. 399-404
[51] http://www.euclid.org, 20. III. 2007
[52] http://www.imgw.pl/wl/internet/zz/wiedza/meteo/burze.html, 20. III. 2007
[53] Huang W.-G., Semlyen A.: *Computation of electro-magnetic transients on tree-phase transmission lines with corona and frequency dependent parameters*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-2, No. 3, 1987, pp. 887-898
[54] Hussein A.M., et al.: *Return-stroke current waveform parameters of lightning to the CN Tower (1992-2001)*, 26th International Conference on Lightning Protection, Poland – Cracow 2002, Proceedings, pp. 161–166
[55] IEEE Modeling and Analysis of System Transients Working Group: *Modeling guidelines for fast front transient*, IEEE Transactions on PWRD, Vol. 11, 1996, pp. 493–506
[56] IEEE Working Group 3.4.11: *Modeling of metal oxide surge arresters*, IEEE Transactions on PWRD, Vol. 7, 1992, pp. 302–309
[57] IEEE Working Group on Lightning Performance of Transmission Lines: *A simplified method for estimating lightning performance of transmission lines*, IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS–104, 1985, pp. 919–932
[58] IEEE Working Group on Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines: *Estimating lightning performance of transmission lines — Updates to analytical models*, IEEE Transactions on PWRD, Vol. 8, 1993, pp. 1254–1267
[59] Inoue A.: *Propagation of overvoltage surges with corona based upon charge versus voltage curve*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 3, 1985, pp. 955-662
[60] Ishii M., Kawamura T., Kouno T., Ohsaki E., Murotani K., Higuchi T.: *Multistory transmission tower model for lightning surge analysis*, IEEE Transactions on PWRD, Vol. 6, 1991, pp. 1327–1335
[61] Jakubowski J. L.: *Podstawy teorii przepięć w układach elektroenergetycznych*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1968
[62] Kosztaluk R., Flisowski Z.: *Dobór odgromników do pracy w sieciach elektrycznych*, Przegląd Elektrotechniczny 5/1998, str. 119–122
[63] Kozłowski M.: *Usługi eksploatacyjne świadczone na sieciach elektroenergetycznych NN przez PSE-POŁANIEC Sp. z o.o. na rzecz PSE S.A. i spółek dystrybucyjnych – przy użyciu śmigłowców*, VII Sympozjum *Problemy Eksploatacji Układów Izolacyjnych Wysokiego Napięcia*, Zakopane, 21-23 października 1999, s. 227-232
[64] Krakowski M.: *Obwody ziemnopowrotne*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1979
[65] Kudyan H.M., Shih C.H.: *A nonlinear circuit model for translission lines in corona*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 3, 1981, pp. 1420-1430
[66] Lebiediew N. N.: *Funkcje specjalne i ich zastosowanie*, PWN, Warszawa 1957
[67] Lee K.C., Hydro B.C.: *Non-linear corona models in an Electromagnetic Transients Program (EMTP)*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 9, 1983, pp. 2936-2940
[68] Li H.J., Birlasekaran S., Choi S.S.: *A parameter identification technique for metal-oxide surge arrester models*. IEEE Transactions on PWRD, Vol. 17, pp. 736–741, 2002
[69] Lidmanowski W.: *Zarys teorii wyładowań w dielektrykach*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1988
[70] Magnusson P.C.: *Travelling waves on multi-conductor open-wire lines – A numerical survey of the effects of frequency dependence of modal composition*, IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS–92, 1973, pp. 999–1008
[71] Marti J.R.: *The problem of frequency dependence in transmission line modelling*, Ph.D. thesis, The University British Columbia, Vancouver, Canada, 1981
[72] Miranda G.C., Saldahara R.R., Pissolato Filho J.: *Point-matched time domain finite element method for corona effects on transmission lines*, Conf. Proc. 9th ISH, Paper No. 8321, Austria, 1995
[73] Motoyama H.: *Experimental study and analysis of breakdown characteristics of long air gaps with short tail lightning impulse*, IEEE Transactions on PWRD, Vol. 11, No. 2, April 1996, pp. 972-979

[74] Mousa A. M.: *The soil ionization gradient associated with discharge of high currents into concentrated electrodes*, IEEE Transactions on PWRD, Vol. 9, No. 3, 1994, pp. 1669–1677
[75] Narita T., Yamada T., Mochizuki A., Zaima E., Ishii M.: *Observation of current waveshapes of lightning strokes on transmission towers*, IEEE Transactions on PWRD, Vol. 15, 2000, pp. 429–435
[76] Noda T., Ono T., Matsubara H., Motoyama H., Sekioka S., Ametani A.: *Charge-Voltage Curves of Surge Corona on Transmission Lines: Two Measurment Methods*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18, No. 1, 2003 , pp. 307-314
[77] Nowak W.: *Identyfikacja narażeń przepięciowych układów elektroenergetycznych wysokich napięć przy wyładowaniach atmosferycznych*, Rozprawy i monografie, zeszyt 139, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2005
[78] Nowak W.: *The analysis of backflashovers in high voltage overhead lines*, Archives of Electrical Engineering, Vol. LIV-No 213-3/2005, pp. 321-341
[79] Nowak W.: *Numerical modelling of lightning surges in high voltage substations*, Archives of Electrical Engineering, Vol.LV-No 215-1/2006, pp. 31-45
[80] Nowak W., **Tarko R.**: *Modelowanie ulotu elektrycznego w analizie narażeń przepięciowych układów elektroenergetycznych*, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej Nr 22, 2006, str. 135-142
[81] Nowak W., **Tarko R.**: *Ocena poziomu przepięć atmosferycznych w rozdzielni elektroenergetycznej 110 kV*, Przegląd Elektrotechniczny, 1'2006, str. 178-181
[82] Nowak W., **Tarko R.**: *Probabilistyczne symulacje narażeń przepięciowych w koordynacji izolacji linii elektroenergetycznych wysokich i najwyższych napięć*, Energetyka, Zeszyt Tematyczny XII, str. 81-84, 2007
[83] Nowak W., **Tarko R.**: *Komputerowe symulacje narażeń przepięciowych dla potrzeb wymiarowania odstępów izolacyjnych linii elektroenergetycznych wysokich i najwyższych napięć*, Przegląd Elektrotechniczny, 3'2007, str. 165-169
[84] Nowak W., **Tarko R.**: *Symulacje komputerowe w statystycznej ocenie narażeń przepięciowych układów elektroenergetycznych wysokich i najwyższych napięć (w druku)*, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, 2007
[85] Nowak W., **Tarko R.**, Jaglarz A., Kozioł J.: *Analiza warunków eksploatacyjnych linii Klikowa – Połaniec i Klikowa – Niziny w aspekcie oddziaływania elektromagnetycznego*, Energetyka, 2006, nr 2, str. 118-123
[86] Nowak W., **Tarko R.**, Jaglarz A., Kozioł J.: *Analysis of Overhead Lines Working Conditions - Case Study of Electromagnetic Coupling Effect*, 51st IWK – Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Germany, Ilmenau, September 11 - 15, 2006, paper 6.3.13
[87] Nowak W., **Tarko R.**, Zydroń P., Jaglarz A., Kozioł J: *Analiza warunków eksploatacyjnych linii napowietrznych – studium efektu sprzężeń elektromagnetycznych*, Przegląd Elektrotechniczny, 1'2005, str. 184-188
[88] Nucci S.A.: *Lightning induced voltages (invited lecture)*, 26th International Conference on Lightning Protection, Poland – Cracow 2002, Proceedings, pp. 20–32
[89] Nucci C.A., Guerrieri S., Correia de Barros M.T., Rachidi F.: *Influence of Corona on the Voltages Induced by Nearby Lightning on Overhead Distribution Lines*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 4, 2000, pp. 1265-1273
[90] Ovick N.L., Kusic G.L.: *Including corona effects for travelling waves on transmission lines*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 12, 1984, pp. 3643-3650
[91] Peek F.W.: *Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering.* Mc Graw-Hill, 1929
[92] PN-E-05118/A1:1998 *Przemysłowe zakłócenia radioelektryczne. Elektroenergetyczne linie i stacje wysokiego napięcia. Dopuszczalny poziom zakłóceń. Ogólne wymagania i badania terenowe*
[93] PN-EN 60071-1:2006 (U) *Koordynacja izolacji – Definicje, zasady i reguły*
[94] PN-EN 60071-2:2000 *Koordynacja izolacji – Przewodnik stosowania*
[95] PN-N-01339:2000 Hałas — Metody pomiaru i oceny hałasu linii elektroenergetycznych wysokiego napięcia
[96] Podporkin G.V., Sivaev A.D.: *Lightning impulse corona characteristics of conductors and bundles*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 4, 1997, pp. 1842-1847
[97] Pohl Z., Fleszyński J., Chrzan K.: *Zastosowanie tlenkowych ograniczników przepięć w napowietrznych sieciach elektroenergetycznych*, Materiały konferencyjne V Ogólnopolskie Sympozjum *„Inżynieria Wysokich Napięć"* IW-2000, Poznań–Kiekrz, 2000, str. 329–339
[98] Praca zbiorowa (Edited by V. Cooray): *The Lightning Flash*, The Institution of Electrical Engineers, London 2003
[99] Praca zbiorowa (red. Kosztaluk R.): *Technika badań wysokonapięciowych. Tom I.* WNT, Warszawa 1985

[100] Praca zbiorowa (red. Kosztaluk R.): *Technika badań wysokonapięciowych. Tom II.* WNT, Warszawa 1985
[101] Praca zbiorowa (red. Mościcka-Grzesiak H.): *Inżynieria wysokich napięć w elektroenergetyce. Tom 1*. Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 1998
[102] Praca zbiorowa (red. Siritinski L. I.): *Technika badań wysokonapięciowych. Tom I.* Państwowe Wydawnictwa Techniczne, Warszawa 1954
[103] Ramirez A., Naredo J.L., Moreno P., Guardado L.: *Electromagnetic transients in overhead lines considering frequency dependence and corona effect via the method of characteristics*, Electrical Power and Energy Systems, No. 23, 2001, pp. 179-188
[104] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 14 czerwca 2007 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów hałasu w środowisku (Dz. U. z dnia 5 lipca 2007 r.)
[105] Sarma Maruvada P.: *Corona performance of high-voltage transmission lines*, Research Studies Press LTD., England 2000
[106] Sarma Maruvada P., Menemenlis H., Malewski R.: *Corona characteristics of conductor bundles under impulse voltage*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-96, No. 1, 1977, pp. 102-116
[107] Schmidt A., Meppelink J., Richter B., Feser K., Kehl L., Qui D.: *Behaviour of MO-surge arrester blocks to fast transients*, IEEE Transactions on PWRD, Vol. 4, 1989, pp. 292–300
[108] Shindo T., Suzuki T.: *A new calculation method of breakdown voltage-time characteristic of long air gaps*, IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-104, 1985, pp. 1556-1563
[109] Schroeder M.A.O, Soares A., Visacro S., Cherchiglia L., Souza V.J.: *Lighting current statistical analysis: measurements of Morro do Cachimbo station – Brazil*, 26th International Conference on Lightning Protection, Poland – Cracow 2002, Proceedings, pp. 20–23
[110] Szpor S., Dzierżek H., Winiarski W.: *Technika wysokich napięć*, Wydawnictwa Naukowo-techniczne, Warszawa 1978
[111] Szpor S., Samuła J.: *Ochrona odgromowa. Tom 1*, WNT, Warszawa 1983
[112] **Tarko R.**, Nowak W.: *Implementacja modelu ulotu elektrycznego w programie EMTP – ATP dla analizy propagacji fal przepięciowych w układach elektroenergetycznych*, Przegląd Elektrotechniczny, 3'2007, str. 247-251
[113] Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. – Prawo Ochrony Środowiska (Dz. U. z 2006 r. Nr 129, poz. 902, z późn. zm.)
[114] Włodek R., Abugalia A: *Matlab simulation of corona influence on the wave propagation along a segment of transmission line*, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kwartalnik Elektrotechnika, Tom 16, Zeszyt 4, 1997, str. 179-187
[115] Wszołek T.: *Prognozowanie poziomu L_{DWN} hałasu ulotu w liniach elektroenergetycznych WN*, Przegląd Elektrotechniczny, 1/2006, str. 283-286
[116] Xiao-rong Li, Malik O.P., Zhi-da Zhao: *Computation of transmission line transients including corona effects*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 3, 1989, pp. 1816-1822
[117] Xiao-rong Li, Malik O.P., Zhi-da Zhao: *A practical mathematical model of corona for calculation of transients on transmission lines*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 2, 1989, pp. 1145-1152
[118] Zanetta L.C., de Morais Pereira C.E.: *Application studies of line arresters in partially shielded 138-kV transmission lines*, IEEE Transactions on PWRD, Vol. 18, 2003, pp. 95–100