

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI  
WARSZAWA-MIEDZESZYN

BIBLIOTEKA  
Instytutu Łączności

PROBLEMY

ŁĄCZNOŚCI

121

1974

MINISTERSTWO ŁĄCZNOŚCI

---

# PROBLEMY ŁĄCZNOŚCI



---

ROK 14

WARSZAWA 1974

NR 121

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI

Branżowy Ośrodek  
Informacji Naukowo-Technicznej i Ekonomicznej

Redakcja Problemów Łączności

---

Redaktor Naczelny - mgr inż. Jerzy Rutkowski

Redaktorzy działów:

mgr inż. Władysław Cetner, doc. mgr inż. Adam Moniuszko,  
mgr inż. Józef Możejko

Adres Redakcji:

Instytut Łączności

Branżowy Ośrodek

Informacji Naukowo-Technicznej i Ekonomicznej  
Warszawa-Miedzeszyn, ul. Szachowa 1

NA PRAWACH RĘKOPISU - DO UŻYTKU SŁUŻBOWEGO

Redaktor: J. Borkowska

Montaż tekstu: B. Drabik

---

Dział Wydawniczy Instytutu Łączności  
Format B5. Nakład 570. Wpłynęło do  
Działu Wydawniczego 12.06.1974 r.  
Druk ukończono w październiku 1974 r.

# P R O B L E M Y   Ł Ą C Z N O Ś C I

## NOWOCZESNE METODY PROGNOZOWANIA ŁĄCZNOŚCI JONOSFERYCZNEJ

### SPIS TREŚCI

Str.

Wacław Lisicki

#### WSPÓŁCZESNE MOŻLIWOŚCI PROGNOZOWANIA ŁĄCZNOŚCI JONOSFERYCZNEJ W ZAKRESIE FAL DEKAMETROWYCH 1

Stefan Borowski, Wacław Lisicki

#### WYBÓR OPTYMALNYCH CZĘSTOTLIWOŚCI ROBOCZYCH

1. Wstęp	4
2. Współczesne poglądy na maksymalną częstotliwość użyteczną i optymalną częstotliwość roboczą	5
3. Prognozy jonosferyczne	11
Wykaz literatury	19

Wacław Lisicki

#### METODY OBLICZANIA TRAS KRÓTKOFALOWEJ ŁĄCZNOŚCI JONOSFERYCZNEJ

1. Wstęp	26
2. Rodzaje obliczeń	27

	Str.
3. Metody obliczania natężenia pola	30
4. Szumy i zakłócenia odbioru	44
5. Kryteria jakości odbioru i ochrony sygnału użytecznego przed zakłóceniami	54
6. Zakres częstotliwości roboczych i najmniejsza wymagana moc promieniowana	61
7. Niezawodność łączności	63
8. Wpływ wielodrogowości sygnału na warunki łączności jonosferycznej	67
9. Obliczanie tras łączności jonosferycznej dla różnych służb radiokomunikacyjnych	68
Wykaz literatury	73

Andrzej Duszeński

#### MAPY NUMERYCZNE CHARAKTERYSTYK JONOSFERYCZNYCH

1. Wprowadzenie	80
2. Rys historyczny	81
3. Charakterystyka danych	85
4. Metoda analizy danych	88
5. Analiza wstępna	92
6. Analiza właściwa	96
7. Przykład wykorzystania map numerycznych	99
Wykaz literatury	101

NOWOCZESNE METODY PROGNOZOWANIA  
ŁĄCZNOŚCI JONOSFERYCZNEJ

Wacław Lisicki

WSPÓŁCZESNE MOŻLIWOŚCI PROGNOZOWANIA  
ŁĄCZNOŚCI JONOSFERYCZNEJ W ZAKRESIE FAL DEKAMETROWYCH

Pomimo postępującego rozwoju łączności satelitarnej i konkurencji ze strony kabli podmorskich, wykorzystanie fal dekametrowych do łączności jonosferycznej jest wciąż jeszcze bardzo intensywne. W IFRB<sup>1/</sup> nadal notuje się nadmiar zgłoszeń częstotliwości w porównaniu z możliwościami zapewnienia bezzakłóceniowej pracy łączny jonosferycznych. Ze względu na duże koszty łączności satelitarnej tradycyjne systemy łączności za pośrednictwem jonosfery mają szanse dalszej egzystencji, zwłaszcza na trasach o małej i średniej długości. Nie zanoszą się też na razie na rezygnację z nadawania krótkofalowych programów radiofonicznych przeznaczonych dla odbiorców zagranicznych. Należy zatem liczyć się z dalszym intensywnym wykorzystaniem jonosfery w zakresie fal dekametrowych i trudnościami uzyskania niezakłóconej łączności.

Pogłębiający się stan wiedzy o jonosferze i warunkach propagacji jonosferycznej oraz udoskonalanie metod prognozowania tych warunków pozwalają coraz skuteczniej usprawniać łączność krótkofalową. Metody prognozowania, w miarę ich uściślenia, dają wyniki stopniowo zbliżające się do rzeczywistych warunków propagacji. Obliczenia stawały się jednak

---

<sup>1/</sup> International Frequency Registration Board - Międzynarodowa Izba Rejestracji Częstotliwości.

coraz bardziej złożone i długotrwałe. Wzrastająca pracochłonność udoskonalanych metod zaczęła nawet w pewnym okresie ograniczać ich stosowanie w praktyce inżynierskiej. Bariere pracochłonności obaliło zastosowanie elektronicznej techniki obliczeniowej, którą od szeregu już lat w niektórych zaawansowanych technicznie krajach, a ostatnio i w Polsce, wdraża się do prognozowania warunków propagacji jonosferycznej.

W związku z prowadzonymi w Instytucie Łączności pracami nad wdrożeniem ETO do prognozowania warunków łączności jonosferycznej, aktualne stało się dokonanie przeglądu nowoczesnych metod prognozowania. Używany w potocznym języku technicznym termin "prognozy jonosferyczne" kojarzy się zazwyczaj z określeniem spodziewanych maksymalnych i tzw. optymalnych częstotliwości roboczych /MUF i FOT/. Należy zaznaczyć, że pojęcie prognozowania warunków łączności jonosferycznej daleko wykracza poza określanie MUF i FOT, które jest tylko fragmentem opracowania prognozy całości kształtu warunków pracy łącza jonosferycznego. Ponadto trzeba nadmienić, że i samo pojęcie optymalnej częstotliwości roboczej nie jest jednoznaczne i w nowoczesnym ujęciu bynajmniej nie utożsamia się z FOT.

Prognozowanie warunków łączności jonosferycznej nie ogranicza się zresztą do określania wyłącznie warunków propagacyjnych. Oczywiście, przewidywane warunki propagacji są podstawą określenia całości kształtu warunków pracy łącza. Tak zwane kompleksowe obliczanie tras radiokomunikacyjnych, oprócz obliczeń MUF i natężenia pola, obejmuje również okreś-

lenie LUF<sup>1/</sup> względnie LRRP<sup>2/</sup>, albo obliczenie niezawodności łączności. W tych obliczeniach kryje się np. określenie wymaganej jakości łączności i poziomu zakłóceń przemysłowych, czego nie można zaliczyć do propagacji. Do obliczania trasy radiokomunikacyjnej mogą też wchodzić elementy obliczeń antenowych.

Na łączności jonosferycznej w zakresie fal dekametrowych opiera się dalekosiężna radiokomunikacja stała, radiokomunikacja ruchoma morska i częściowo lotnicza oraz radiofonia krótkofalowa. Wprawdzie znaczenie radiokomunikacji stałej, jako służby dla potrzeb publicznych, zmniejszyło się w Polsce ostatnio, ale dla różnych celów profesjonalnych łączność jonosferyczna "Point-to-point" jest szeroko stosowana. Pozostałe ww. służby, a szczególnie radiokomunikacja morska i radiofonia krótkofalowa w pełni jeszcze korzystają z jonosfery. Dla wszystkich tych służb prognozowanie warunków łączności jonosferycznej ma podstawowe znaczenie zarówno w aspekcie projektowania łączy, jak i ich eksploatacji. Współczesna wiedza o jonosferze i propagacji jonosferycznej w połączeniu z techniką elektroniczną oferują w tym zakresie wielkie możliwości. Powinny one być wykorzystywane nie tylko pod kątem widzenia racjonalnego rozwoju i bieżącej eksploatacji urządzeń, ale również w aspekcie perspektywnego planowania efektywnego wykorzystania widma fal radiowych.

---

<sup>1/</sup> Lowest Useful Frequency - najmniejsza częstotliwość użyteczna.

<sup>2/</sup> Lowest Required Radiated Power - najmniejsza wymagana moc promieniowana.



Stefan Borowski

Wacław Lisicki

## WYBÓR OPTYMALNYCH CZĘSTOTLIWOŚCI ROBOCZYCH

### 1. WSTĘP

W zakresie fal dekametrowych występuje silnie zaznaczająca się zależność absorpcji jonosferycznej od częstotliwości. Ponieważ absorpcja maleje ze wzrostem częstotliwości, natężenie pola rośnie aż do chwilowej wartości MUF, a następnie, powyżej tej wartości szybko spada do zera, gdyż fala zasadniczo nie odbija się już od jonosfery, jeżeli pominąć zjawisko rozproszenia. MUF jest losowo zmienna w funkcji czasu. Zmiany są krótkookresowe oraz z dnia na dzień. Aby uniknąć wpływu tych zmian, należy stosować częstotliwości robocze odpowiednio mniejsze od medialnych wartości MUF. Z drugiej strony częstotliwości robocze nie powinny być zbyt niskie, gdyż wtedy natężenie pola jest silnie stłumione i zbyt mały może być stosunek sygnału użytecznego do zakłóceń. Na tym tle powstaje więc zagadnienie wyboru częstotliwości roboczych.

Warunki refrakcji oraz absorpcja są zależne od stanu jonosfery, który ulega nieustannym zmianom dobowym, sezonowym i długookresowym, związanym z cyklicznością aktywności słonecznej. W konsekwencji zmienne są w funkcji czasu parametry jonosfery decydujące o wyborze optymalnych częstotliwości roboczych. Stan jonosfery jest zmienny również przestrzennie. Warunki refrakcji i absorpcja zależne są ponadto od kąta padania fali na jonosferę, co jest znów związane z długością

trasy. Wybór częstotliwości roboczych musi być zatem dokonywany w zasadzie indywidualnie dla każdej trasy i zależy zarówno od jej długości, jak i od współrzędnych geograficznych punktów końcowych.

Częstotliwości robocze można dobierać na podstawie wyników bieżących sondowań ukośnych lub sondowań wykorzystujących rozproszenie wsteczne, o ile dysponuje się odpowiednią aparaturą. Dla bardzo krótkich tras mogą być pomocne nawet sondowania pionowe. Jednakże nie zawsze dysponuje się wynikami sondowań, a ponadto z różnych względów jest pożądane planowanie częstotliwości roboczych ze znacznym wyprzedzeniem czasowym. Powszechne zastosowanie przy wyborze częstotliwości roboczych mają zatem prognozy jonosferyczne.

Rozróżnia się prognozy podstawowe, w których podawany jest przestrzenno-czasowy rozkład niektórych parametrów jonosferycznych w skali światowej oraz prognozy szczegółowe opracowywane dla określonych tras na podstawie prognoz podstawowych.

Prognozy podstawowe opracowywane są na kolejne miesiące i są publikowane periodycznie. Oprócz nich istnieją prognozy uniwersalne w postaci atlasów charakterystyk jonosferycznych.

## 2. WSPÓŁCZESNE POGLĄDY NA MAKSYMALNĄ CZĘSTOTLIWOŚĆ UŻYTECZNĄ I OPTYMALNĄ CZĘSTOTLIWOŚĆ ROBOCZĄ

### 2.1. Ewolucja pojęcia MUF

Początkowo istniało tylko jedno pojęcie MUF jako maksymalnej częstotliwości, na której możliwa jest łączność jonosferyczna na określonej trasie w określonych warunkach jonosfe-

rycznych. Uważano, że fale o częstotliwościach przewyższających MUF są nieużyteczne, ponieważ nie odbijają się od jonosfery. Gdy propagację jonosferyczną zaczęto traktować w kategoriach statystycznych, pod terminem MUF rozumiano maksymalną częstotliwość fali, odbijającej się od jonosfery o danej godzinie w przeciągu 50% dni w miesiącu.

W końcu lat pięćdziesiątych zaczęto rozróżniać następujące pojęcia [1]:

- a. MUF klasyczną /classical MUF/,
- b. MUF roboczą /operational MUF/,
- c. MUF znormalizowaną /standard MUF/,
- d. MUF teoretyczną /theoretical MUF/,
- e. MUF doświadczalną /experimental MUF/.

MUF klasyczna jest to MUF odpowiadająca propagacji fali jonosferycznej tylko za pomocą refrakcji fal w jonosferze. MUF klasyczną można zdefiniować jako częstotliwość, przy której promień dolnokątny pokrywa się z promieniem górnokątnym.

MUF robocza odpowiada częstotliwości przewyższającej do około 20-40% MUF klasyczną. Łączność na MUF roboczej jest możliwa dzięki rozproszeniu fali w jonosferze. Moc fali odbitej w zakresie częstotliwości od MUF klasycznej do MUF roboczej jest mniejsza niż moc przy MUF klasycznej, ponieważ tylko część energii powraca na Ziemię. Jednocześnie jednak absorpcja niedewiacyjna /w obszarze D jonosfery/ maleje ze wzrostem częstotliwości, co w pewnej mierze kompensuje zmniejszenie natężenia pola w punkcie odbioru.

MUF znormalizowana jest to wartość MUF określona poprzez zastosowanie do wyników pionowego sondowania jonosfery kla-

sycznych krzywych transmisyjnych lub współczynnika odległościowego. Wartość MUF znormalizowanej jest zbliżona do wartości MUF klasycznej.

Wartości MUF teoretycznej i doświadczalnej, jak same nazwy wskazują, określa się na podstawie bądź analizy teoretycznej, bądź wyników pomiarów. Terminy te obecnie na ogół nie są używane. Aktualne zalecenia terminologii i definicje pojęć MUF są omówione w następnym punkcie.

Międzynarodowe organizacje CCIR i URSI ustaliły terminologię i opracowały definicje poszczególnych pojęć MUF. CCIR nadal stosuje termin MUF. URSI jednak wprowadziło nowe terminy, które w skróceniu brzmią JF i EJF.

Ponieważ jednak używane przez CCIR i URSI terminy dotyczą tych samych pojęć, celowe jest przy podaniu definicji MUF podać również odpowiedniki nazw proponowane przez URSI..

2.2.1. Termin MUF robocza lub po prostu MUF oznacza największą częstotliwość, która umożliwia zadowalającą łączność pomiędzy danymi punktami, w danym czasie i w określonych warunkach roboczych.

2.2.2. Termin MUF klasyczna oznacza największą częstotliwość odpowiadającą propagacji refrakcyjnej fal pomiędzy określonymi punktami nadawczymi i odbiorczymi. MUF klasyczna może być wyznaczona doświadczalnie jako częstotliwość, przy której fala górno- i dolnokątna tworzą jeden promień. Dlatego URSI proponuje zamiast terminu MUF klasyczna termin "częstotliwość połączenia /Junction Frequency w skróceniu JF/".

A więc MUF klasyczna /wg CCIR/ = JF /wg URSI/.

2.2.3. Termin MUF znormalizowana /standard MUF/ powinien oznaczać aproksymację MUF klasycznej, uzyskaną przez zastosowanie konwencjonalnej krzywej transmisyjnej do częstotliwości krytycznej lub przez zastosowanie współczynnika odległościowego. URSI proponuje zamiast terminu MUF znormalizowana termin "oszacowana częstotliwość połączenia" /Estimated Junction Frequency - w skróceniu EJF/. A więc MUF znormalizowana = EJF /wg URSI/.

2.2.4. Termin MOF /Maximum Observed Frequency - największa częstotliwość obserwowana/ powinien oznaczać największą częstotliwość, która może być wyznaczona z jonogramu przy ukośnym sondowaniu jonosfery.

Termin MOF nie powinien być używany do opisywania największej częstotliwości użytecznej w określonych warunkach na trasach radiokomunikacyjnych. Termin MOF odnosi się jedynie do ukośnego sondowania jonosfery.

### 2.3. Możliwość propagacji fal o częstotliwościach większych od MUF

Już z definicji MUF podanej uprzednio wynika wniosek, że łączność radiowa możliwa jest również i na częstotliwościach większych od MUF klasycznej. Należy pamiętać jednak, że im częstotliwość jest większa od MUF, tym prawdopodobieństwo łączności na tej częstotliwości jest mniejsze. Teoretyczne rozważania dotyczące łączności na częstotliwościach ponadmufowych zostały potwierdzone obserwacjami. Oprócz wspomnianych

nego już mechanizmu rozproszenia fal w jonosferze, również mechanizm zwany "galerią szepczącą" lub sposobem propagacji bez odbić pośredniczących od Ziemi pozwala na stosowanie większych częstotliwości od MUF klasycznej.

#### 2.4. Współczesne pojęcia FOT i HPF

FOT oznacza optymalną częstotliwość roboczą. Jest to częstotliwość zakresu krótkofalowego /fal decymetrowych/, dla której istnieje na określonej trasie i w określonych warunkach prawdopodobieństwo przejścia fali równe 0,9. Przy obliczeniach propagacyjnych przyjmuje się: dla warstwy E -  $FOT = MUF$ ; dla warstwy F1 -  $FOT = 0,95 MUF$  [2]. Dla warstwy F2 przyjmowano do niedawna, że  $FOT = 0,85 MUF$ . Jednakże najnowsze badania [3] wykazały, że FOT zależy od szeregu czynników, a mianowicie:

- a/ od aktywności słonecznej,
- b/ od szerokości geograficznej,
- c/ od pory roku,
- d/ od godziny doby.

W publikacji [3] podano tablice rozkładu dobowych wartości MUF znormalizowanych w stosunku do ich medialnych wartości miesięcznych w postaci stosunku decyli górnego i dolnego do tej wartości medialnej dla danej pory roku, danego poziomu aktywności słonecznej, 4-godzinnych przedziałów czasu lokalnego w punkcie środkowym trasy oraz dla każdego  $10^{\circ}$  szerokości geograficznych północnych i południowych, zmieniających się od  $10^{\circ}$  do  $80^{\circ}$ . A więc mediana miesięczna MUF znormalizowanej pomnożona przez decyl dolny określa FOT w nowym ujęciu.

Z omawianej tablicy wynika, że FOT w zasadzie nie jest równy 0,85 MUF, a zmienia się w dość szerokich granicach zależnie od wyżej wzmiankowanych parametrów od 0,6 MUF do 0,9 MUF. A więc  $FOT = F_1$ . MUF znormalizowana, gdzie  $F_1$  - decyl dolny.

W powyższej tablicy decyle górne określają największą prawdopodobną częstotliwość, to jest taką, przy której prawdopodobieństwo przejścia fali wynosi 0,1. Z analizy powyższej tablicy wynika, że decyle górne leżą w granicach od 1,48 do 1,09.

Analogicznie do FOT, częstotliwość HPF =  $F_u$ . MUF znormalizowana, gdzie  $F_u$  - decyl górny.

Częstotliwość HPF nie ma praktycznego znaczenia przy wyborze częstotliwości dla sygnału użytecznego, a jedynie z punktu widzenia zakłócania łączności na innych niż robocze relacjach.

## 2.5. Częstotliwość odpowiadająca maksymalnej niezawodności łączności

Fala jonosferyczna o częstotliwości równej MUF zapewnia przejście fali w 50% czasu. W praktyce taka łączność jest niewystarczająca. Aby prawdopodobieństwo odbioru było większe, należy pracować na częstotliwościach mniejszych od MUF. Na ogół wymaga się zapewnienia łączności w przeciagu co najmniej 90% czasu, co przy braku zakłóceń daje praca nadajnika przy częstotliwości FOT. Zmniejszenie częstotliwości poniżej MUF zabezpiecza łączność przed zanikami granicznymi, ale pociąga za sobą zmniejszenie natężenia pola, a co za tym idzie

zmniejszenie stosunku sygnału do zakłóceń. Obniżenie poniżej FOT powinno zabezpieczyć łączność w okresie powyżej 90% czasu nadawania. Jednak zmniejszony stosunek sygnału do zakłóceń powoduje pogorszenie łączności przez obniżenie zrozumiałości transmisji. Wynika stąd, że istnieje pewna częstotliwość zapewniająca maksymalną niezawodność łączności. Ta maksymalna niezawodność jest wynikiem kompromisu pomiędzy ciągłością transmisji a jej zrozumiałością. Oczywiście jest to słuszne w założeniu, że tak wybrana optymalna częstotliwość robocza jest wolna od zakłóceń interferencyjnych.

### 3. PROGNOZY JONOSFERYCZNE

#### 3.1. Ogólne informacje o prognozowaniu optymalnych częstotliwości roboczych

Obecnie istnieje na świecie szereg ośrodków opracowujących podstawowe prognozy jonosferyczne. Prognozy takie sporządza się w zasadzie z wyprzedzeniem trzymiesięcznym, z tym że specjalne metody pozwalają poprawić te prognozy na 5 dni, a nawet na 12 godzin przed datą i godziną, dla której zostały sporządzone. Prognozy długoterminowe z wyprzedzeniem trzymiesięcznym dawniej z reguły opracowywano dla każdego miesiąca, co jeszcze jest praktykowane m.in. w ZSRR [2].

W Stanach Zjednoczonych od kilku lat przestano wydawać prognozy miesięczne, natomiast wydano atlas do prognozowania dla dowolnego okresu w cyklu słonecznym. Wszystkie metody prognozowania optymalnych częstotliwości roboczych mają za podstawę dane z wieloletnich rejestracji parametrów jonosferycznych w obserwatoriach znajdujących się w liczbie prze-



szo 100 na kuli ziemskiej. Wyniki obserwacji zapisywane w postaci jonogramów są interpretowane przez odpowiednio wyszkolony personel i przesyłane w postaci tablic do Światowych Centrów Danych /ZSRR, Stany Zjednoczone, Japonia, Wielka Brytania/, gdzie podlegają dalszej obróbce.

Prognozy podawane są zazwyczaj w postaci map jonosferycznych /F2 - 0 - MUF i F2 - 4000 - MUF/ dla parzystych godzin doby danego miesiąca, w postaci wykresów, nomogramów i wzorów dla warstw regularnych E i F1 i dla warstwy sporadycznej E<sub>s</sub> dla różnych wartości plam słonecznych R lub R<sub>12</sub> /0, 10, 100, 125/. /R - średnia miesięczna prognozowana liczba plam słonecznych przez obserwatorium w Zurychu lub w Pułkowie w ZSRR; R<sub>12</sub> - średnia ślizgowa miesięczna liczba plam słonecznych prognozowana w obserwatorium w Zurychu i publikowana przez CCIR /specjalny biuletyn/ i w wydawnictwie UIT pt. "Telecommunication Journal". Omawiane prognozy dotyczą fal dekametrowych w zakresie od 2 do 30 MHz, które w normalnych warunkach odbijają się od jonosfery.

Od szeregu lat w krajach technicznie zaawansowanych prognozy jonosferyczne opracowuje się w postaci map numerycznych w celu wykorzystania ich przy pomocy ET0 /elektronicznej techniki obliczeniowej/.

### 3.2. Prognozy IZMIRAN

IZMIRAN /Instytut Ziemijskiego Magnetyzmu Jonosfery i Propagacji Fal Radiowych Akademii Nauk ZSRR/ wydaje od szeregu lat Miesięczne Prognozy Propagacji Fal [2] w zakresie dekametrowym. Prognozy te sporządzane obecnie częściowo /warstwa 2/ za pomocą EMC /elektronicznych maszyn cyfrowych/ po-

zwalają na obliczanie wielu parametrów jonosferycznych, a m.in. interesujących nas MUF i FOT. Prognozy IZMIRAN wydawane są z wyprzedzeniem trzymiesięcznym. Zawierają one mapy jonosferyczne i wykresy przewidywanych na dany miesiąc MUF dla warstw regularnych F2, F1 i E oraz wykresy  $N/h/$  i  $h'f$   $N/h/$  - zależność gęstości elektronowej w jonosferze od wysokości rzeczywistej,  $h'f$  - wysokość pozorna odbicia fali od jonosfery w zależności od częstotliwości  $f/$ .

Prognozy MUF dotyczą medialnych wartości dla niezaburzonych stanów jonosfery.

Za podstawę maszynowego programowania MUF dla warstwy F2 przyjęto analityczną metodę opisaną przestrzenno-czasowego rozkładu parametrów  $f_oF2$  /częstotliwość krytyczna dla warstwy F2/ i  $F2 - M - 3000$  /współczynnik transmisyjny dla warstwy F2 na odległości 3000 km/ oraz zależności tych parametrów od aktywności słonecznej. MUF dla warstwy F2 zmienia się znacznie z miesiąca na miesiąc, wskutek czego wartości MUF dla początku i końca miesiąca mogą się dość znacznie różnić. Dla uzyskania większej dokładności prognozy dla początku i końca miesiąca należy obliczać MUF jako wartości średnie z 2 wartości MUF - bieżącego i sąsiedniego miesiąca. Jest to szczególnie ważne w okresach równonocnych /marzec, kwiecień, wrzesień, październik/, kiedy to sezonowe zmiany MUF dla warstwy F2 są bardzo duże.

Mapy MUF dla warstwy F2 sporządzane są na konturowych mapach świata dla parzystych godzin czasu moskiewskiego, dla odległości zerowej / $F2 - 0 - MUF/$  i dla odległości 4000 km /największa średnia długość skoku/ / $F2 - 4000 - MUF/$ .

Mapy MUF dla warstwy F1 i E podane są w czasie lokalnym w miejscu odbicia fali od jonosfery.

Prognoza MUF dla warstwy F1 i E podawana jest za pomocą map MUF dla maksymalnego skoku każdej warstwy, a mianowicie F1 - 3000 - NUF i E - 2000 - MUF.

Na mapach tych zaznaczono jednocześnie wartości częstotliwości krytycznych warstw E i F1.

Prognozy częstotliwości krytycznych warstw F1 i E oparte są na wzorach doświadczalnych.

Warstwa F1, jak wiadomo, objawia się regularnie jedynie w godzinach dziennych w lecie.

W prognozie IZMIRAN zamieszczone są oprócz map jonosferycznych również wykresy dobowych zmian MUF dla warstw F2, F1 i E dla południka 105°E dla różnych szerokości geograficznych półkuli północnej /dla obszaru ZSRR/.

Wykresy MUF podaje się w funkcji czasu lokalnego w miejscu odbicia fali od jonosfery dla odległości od zera do maksymalnej dla jednego skoku poprzez odpowiednią warstwę. Na wykresach F2 MUF podane są również krzywe foF2.

Jako wartości foF1 można przyjąć wartości F1-0-MUF. Wykresy MUF dla każdej warstwy podane są na oddzielnych rysunkach. Odległości podane są nad każdą krzywą dobowych zmian MUF. MUF dla pośrednich odległości określa się metodą interpolacji. MUF dla warstwy F2 zaznacza się krzywą ciągłą /———/, dla warstwy F1 - kropkowaną /...../, a dla warstwy E - przerywaną /-----/. Częstotliwości podawane są, jak wiadomo, w MHz.

Na każdym wykresie u góry podane są zakresy szerokości geograficznych, dla których obowiązuje dany wykres oraz wartości standardowych odchyień F2 - MUF od wartości medialnych, wyrażone w procentach. Wielkości te charakteryzują rozrzuty z dnia nadzień F2 - MUF.

Odchylenia MUF od wartości medialnych oznaczają, że w ciągu 70% dni miesiąca wartości MUF w oddzielne dni nie odchylają się więcej niż o przytoczoną wartość. Wielkości powyższych odchylenia standardowych odnoszą się do spokojnych warunków w jonosferze. W okresach zaburzeń jonosferyczno-magnetycznych odchylenia parametrów jonosferycznych od wartości medialnych mogą być znacznie większe od normalnych; oprócz tego powstają dodatkowe zjawiska /zwiększone pochłanianie, rozproszenie fal/ powodujące zaburzenia w łączności radiowej.

W okresach zaburzeń jonosferyczno-magnetycznych łączność radiowa na częstotliwościach obliczonych na podstawie "Miesięcznych prognoz" może być utrudniona lub nawet całkowicie przerwana. W takich przypadkach dla wyboru częstotliwości roboczych należy posługiwać się prognozami krótkoterminowymi opracowanymi z wyprzedzeniem 12-godzinnym i ogłaszanymi w komunikatach niektórych radiostacji ZSRR.

Należy wspomnieć, że IZMIRAN podaje 5, 10, 15, 25 i 30 lub 31 dnia każdego miesiąca skorygowane prognozy na 5 dni naprzód, które w zakodowanej postaci ogłaszane są przez radiostacje ZSRR.

Do prognozowania MUF i FOT metodą stosowaną w IZMIRAN i zalecaną również przez CCIR należy określić długość trasy i współrzędne punktów odbicia lub punktów kontrolnych.

Do określenia długości trasy i ww. współrzędnych służy "Mapa świata" i "Mapa wielkich kół"; obie te mapy podawane są w jednakowej skali. W każdym styczniowym numerze "Miesięcznej prognozy" wydawanej przez IZMIRAN znajdują się oprócz map jonosferycznych również "Mapy świata" i "Mapy wiel-

kich kóń" /rys. 1/<sup>x/</sup> i odpowiednie nomogramy, służące do przejścia od wartości F2-0-MUF i F2 - 4000 - MUF /rys. 2/ do wartości MUF dla dowolnej długości trasy w zakresie od 0 do 4000 km, jak również nomogramy służące do przejścia od wartości E - 2000 - MUF /rys. 3/ i F1-3000-MUF do wartości MUF dla dowolnej trasy w zakresie od 0 do 2000 km, względnie od 0 do 3000 km.

W styczniowych numerach "Miesięcznej prognozy" podany jest sposób obliczania MUF i FOT dla dowolnych tras. Ze względów praktycznych dzieli się trasy na dwie grupy: do 4000 km i powyżej 4000 km.

Jeżeli fala przy odbiciu od dowolnej warstwy jonosferycznej może przebyć trasę jednym skokiem /do 4000 km przy odbiciu od warstwy F2, do 3000 km - F1 i do 2000 km - E/, to MUF i FOT oblicza się dla środkowego punktu trasy. Jeżeli wyżej wskazane długości trasy przy odbiciach od odpowiednich warstw są większe, to wartości MUF oblicza się dla punktów kontrolnych znajdujących się w pobliżu obu końców trasy, w odległości od nich odpowiednio: 2000 km przy odbiciu od warstwy F2, 1500 km - przy odbiciu od warstwy F1 i 1000 km przy odbiciu od warstwy E. Z dwóch wartości MUF, obliczonych dla obu końców trasy z uwzględnieniem możliwych odbić od wszystkich warstw, wybiera się wartość mniejszą.

### 3.3. Atlas CCIR charakterystyk jonosferycznych

Atlas CCIR charakterystyk jonosferycznych [4, 5] zawiera zestawienie podstawowych parametrów pozwalających na progra-

---

<sup>1/</sup>Rysunki są zamieszczone na końcu artykułu.

mowanie warunków propagacji jonosferycznej. Treść atlasu oparta jest na wynikach wieloletnich obserwacji jonosferycznych.

Atlas ten mógł być zrealizowany i wykorzystany dzięki rozwojowi numerycznych metod sporządzania map jonosferycznych<sup>1/</sup> i dzięki rozpowszechnieniu elektronicznych maszyn cyfrowych /EMC/.

Atlas ten traktowany jest jako prowizoryczny, gdyż nie są jeszcze dokładnie poznane charakterystyki jonosfery i mechanizmy propagacji fal jonosferycznych. W miarę postępu badań w powyższej dziedzinie planowane jest publikowanie nowych, ulepszonych wydań tego atlasu.

Atlas sporządzony jest w dwóch postaciach, a mianowicie w postaci numerycznych współczynników funkcji służących do sporządzania map parametrów jonosferycznych i w postaci graficznej.

Numeryczne współczynniki funkcji do sporządzania map jonosferycznych podane są w atlasie w postaci tablic, oddzielnie do obliczania częstotliwości krytycznej dla warstwy F2, foF2, i oddzielnie do obliczania współczynników transmisji M/3000/F2. Do obliczeń maszynowych stosuje się karty perforowane z zakodowanymi wartościami omawianych współczynników. Pełny zestaw tych kart stanowi właściwie trzecią postać atlasu charakterystyk jonosferycznych.

Prognozowanie warunków propagacji jonosferycznej w zakresie fal dekametrowych z wykorzystaniem współczynników numerycznych dla foF2 i M/3000/F możliwe jest tylko przy użyciu

---

<sup>1/</sup>A. Dusiński: Mapy numeryczne charakterystyk jonosferycznych.

EMC, dla których układane są programy obliczeń. Na podstawie danych z atlasu CCIR [4] opracowano również w Instytucie Łączności uproszczony program MUF i FOT pod nazwą MUFO.

Druga część atlasu [4] zawiera mapy jonosferyczne E<sub>JF</sub> /zero/ F2 i E<sub>JF</sub>/4000/F2 w MHz dla wszystkich miesięcy roku, dla parzystych godzin czasu uniwersalnego i dla 2 wartości  $R_{12} = 0$  i  $R_{12} = 100$ . Graficzna część atlasu przydatna jest w przypadku braku dostępu do EMC.

Karty perforowane ze współczynnikami numerycznymi foF2 i M/3000/F2 mogą być rewidowane i dostosowywane do najnowszych wyników badań przy małych nakładach kosztów, podczas gdy publikacje map jonosferycznych są pracochłonne i kosztowne. Dlatego też karty perforowane mogą zawierać więcej najnowszych informacji, niż mapy jonosferyczne. Już obecnie istnieje zrewidowany zestaw kart perforowanych [6]. Można też oczekiwać dalszych rewizji.

W atlasie [4] najwięcej miejsca zajmują parametry warstwy F2, gdyż wartość ta ma największe znaczenie w dalekosiężnej łączności jonosferycznej na falach dekametrowych. Również dla odpowiedniego zilustrowania kompleksowych geograficznych, dobowych i sezonowych oraz zależnych od cyklu słonecznego zmian parametrów warstwy F2 niezbędna jest duża liczba map jonosferycznych.

Do określenia parametrów regularnej warstwy E służą zamieszczone w atlasie [4] wykresy kąta zenitalnego /rys. 4/ Słońca dla każdego miesiąca na siatce szerokość geograficzna - czas lokalny w godzinach oraz 2 nomogramy. Na podstawie jednego nomogramu /rys. 5/ określa się E<sub>JF</sub>/2000/E w MHz, jeżeli znany kąt zenitalny Słońca i  $R_{12}$  dla danego miesiąca.

Drugi nomogram pozwala wyznaczyć EJP dla danej długości trasy przy danej wartości EJP/2000/E.

W publikacji [5] znajdują się materiały pozwalające wyznaczyć EJP dla warstwy F1.

Podano tu szereg wzorów, nomogramów i wykresów. Wzory do prognozowania  $f_oF1$  /częstotliwość krytyczna dla warstwy F1/ oparte są na danych uzyskanych w latach 1954-1966 z 39 stacji jonosferycznych rozmieszczonych na obu półkulach.

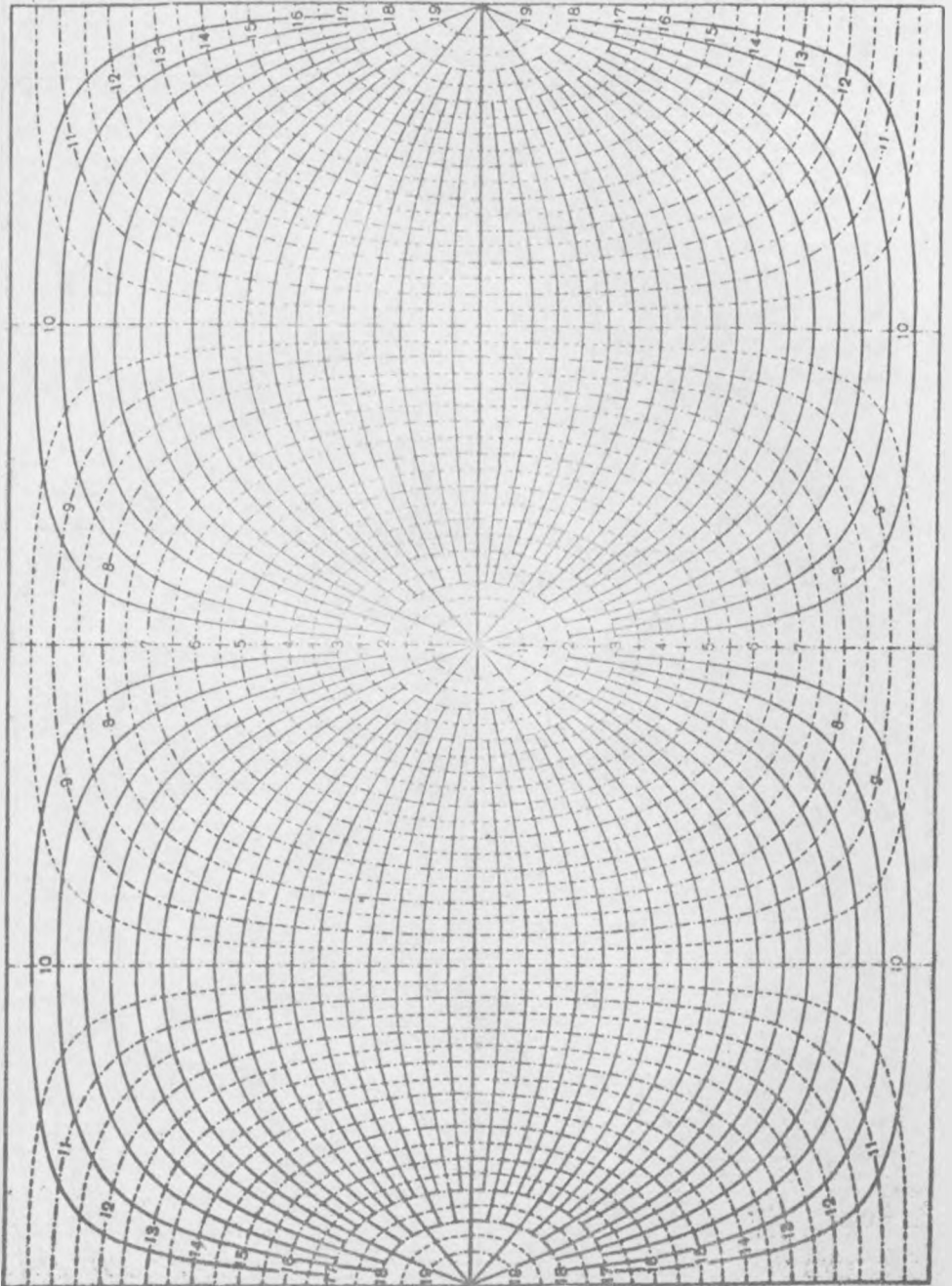
Parametry warstwy F1 uzależnione są od kąta zenitalnego Słońca, szerokości geomagnetycznej w punkcie środkowym trasy i  $R_{12}$ . Po obliczeniu  $f_oF1$  dla środka trasy wyznacza się za pomocą wzorów lub wykresów współczynnik EJP, przez który należy pomnożyć  $f_oF1$ , aby otrzymać EJP dla warstwy F1 dla danej trasy. Warstwa F1 odgrywa rolę na odległościach od 2000 do 3000 km w dzień z reguły w porze letniej.

#### WYKAZ LITERATURY

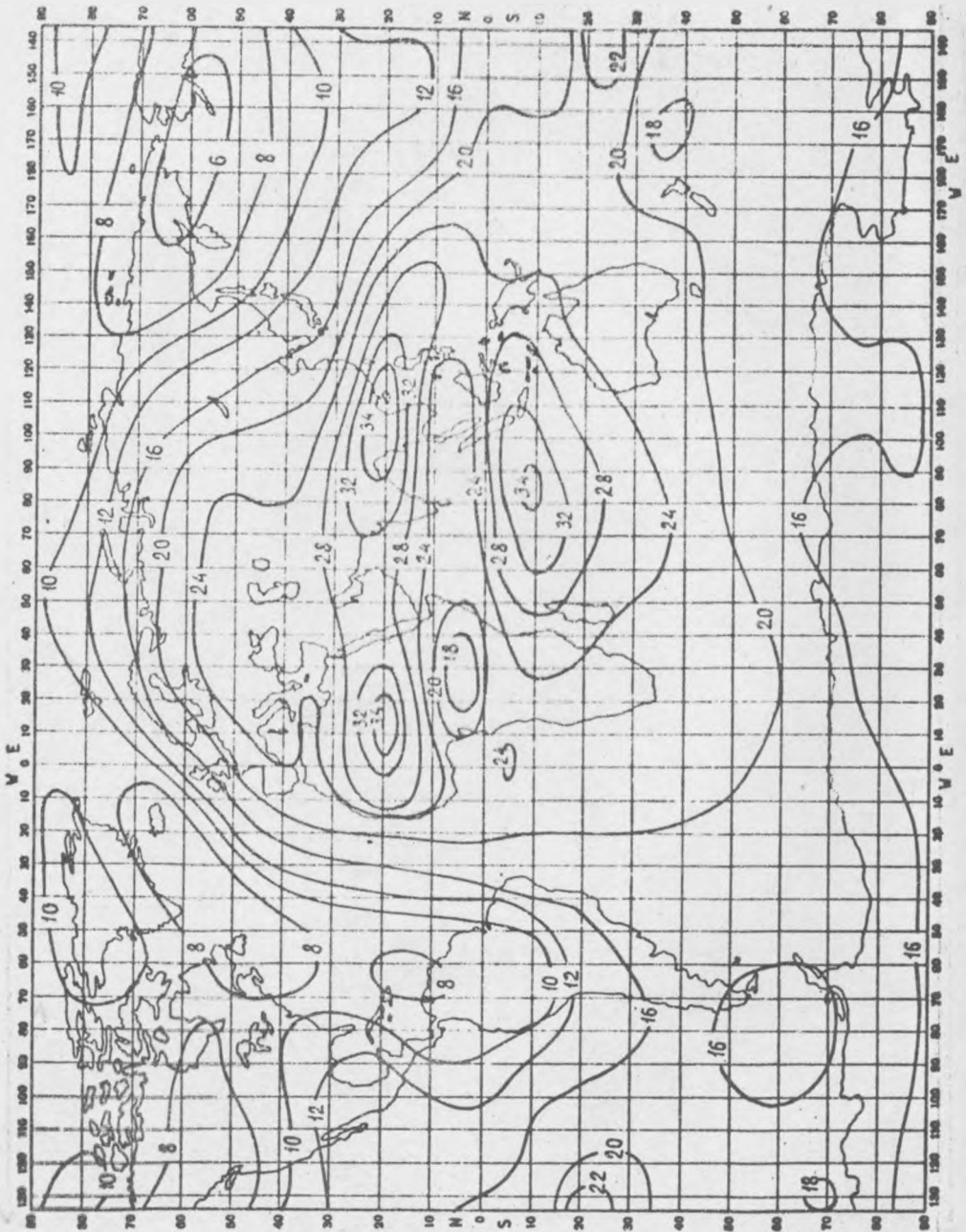
1. CCIR - Documents of the XI-th Plenary Assembly, Oslo, 1966 - Volume II - Propagation - s. 217-219. Wyd. UIT /ITU/, Genewą, 1967 r.
2. Miesięczny prognoz rozprostranienia radiowołn, janwar, 1974, Wyd. IZMIRAN, Moskwa 1973.
3. Barghausen A.F., Finney J.W., Proctor L.L., Schultz L.D.: Predicting Long - Term Operational Parameters of High - Frequency Sky-Wave Telecommunication Systems. ESSA - Technical Report. Research Laboratories. ERL 110-ITS 78 s.33-34. May, 1969, Boulder, Colorado.



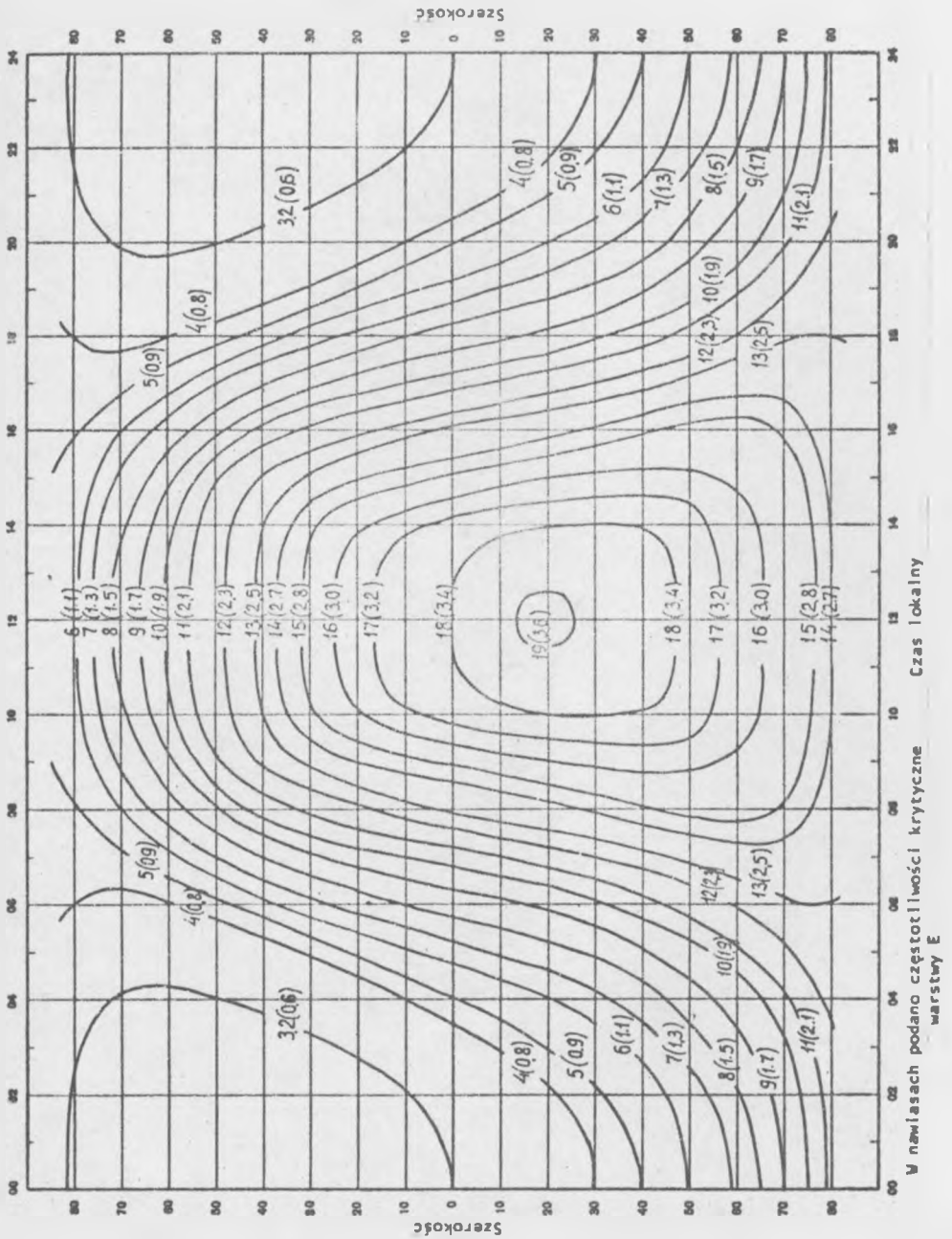
4. CCIR. Oslo, 1966. Report 340. CCIR. Atlas of Ionospheric Characteristics. Wyd. UIT /ITU/, Genewa 1967.
5. CCIR. New Delhi, 1970. Supplement No 1 to Report - 340. CCIR. Atlas of Ionospheric Characteristics. UIT /ITU/, Genewa 1971.
6. CCIR. Conclusions of the Interim Meeting of Study Group 6 /Ionospheric Propagation/, Genewa, 5-18 kwietnia 1972 r., s. 88-102. Wyd. UIT /ITU/, Genewa 1972.
7. CCIR. Avis 373-2 /Rev. 74/, .doc. 6/1026, Genewa 1974.



Rys. 1. Mapa wielkich kół

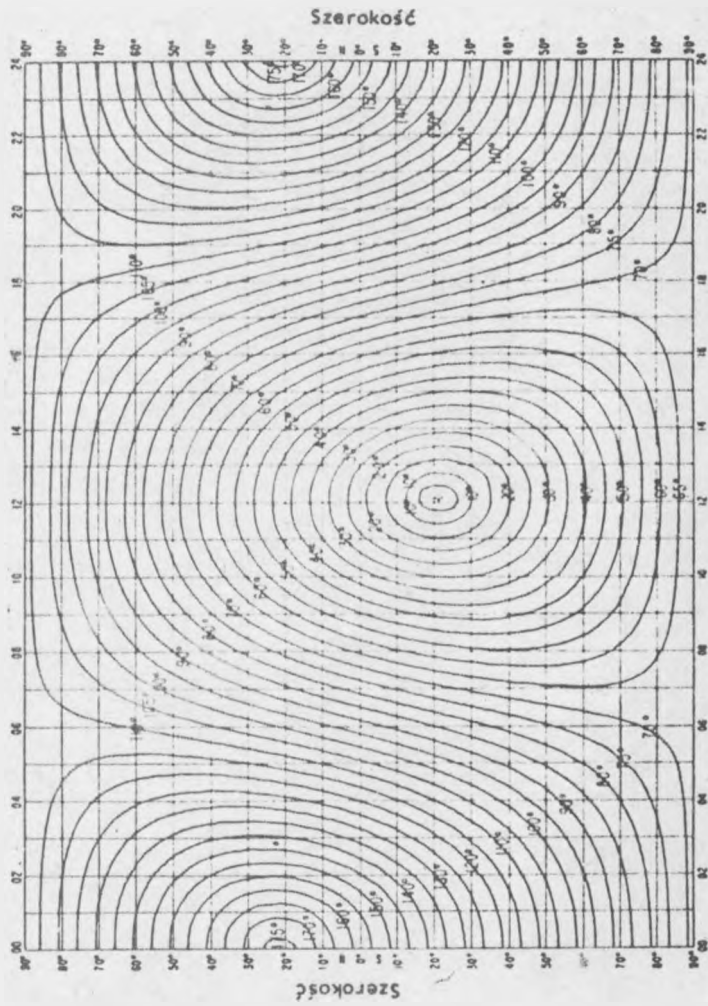


lys. 2. Mapa F2-4000-MUF dla godz. 12 czasu moskiewskiego w styczniu 1974 r.

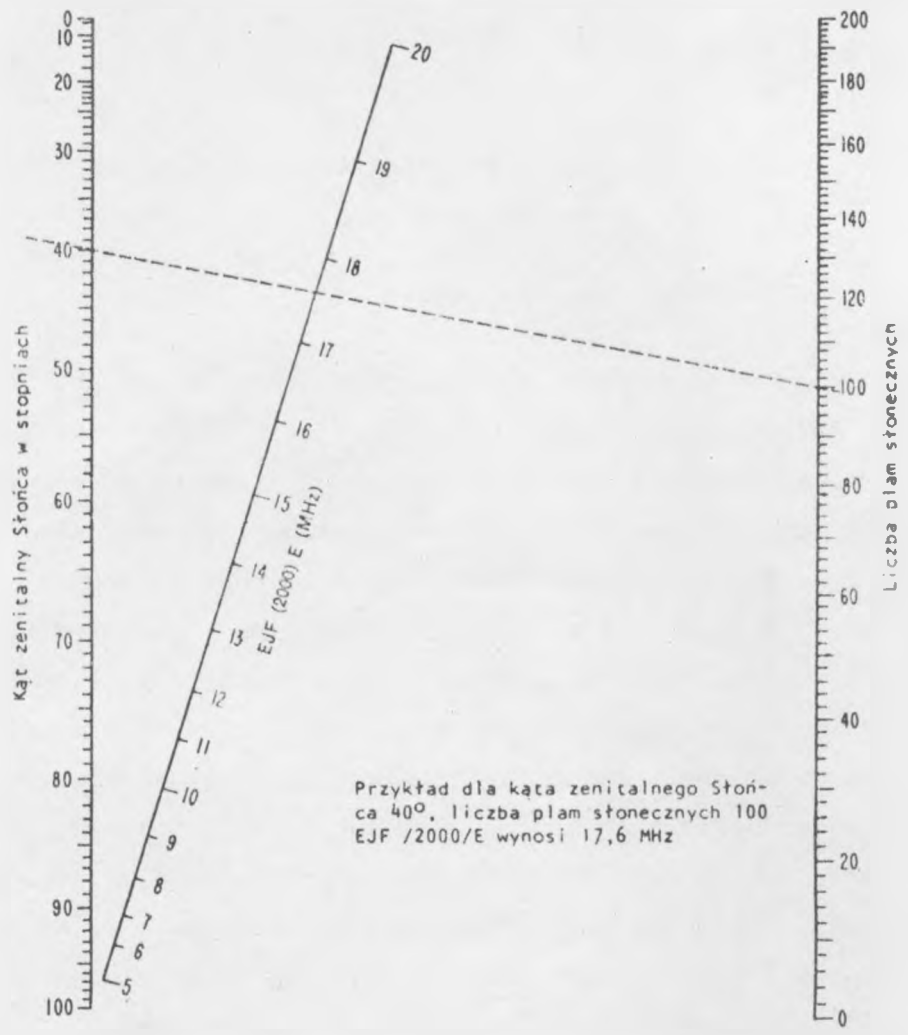


Rys. 3. Mapa E-2000 MUF dla stycznia 1974 r.

W nawiasach podano częstotliwości krytyczne warstwy E



Rys. 4. Kąt zenitalny Słońca dla stycznia



Przykład dla kąta zenitalnego Słońca 40°, liczba plam słonecznych 100 E/JF /2000/E wynosi 17,6 MHz

Rys. 5. Nomogram do wyznaczania E/JF/2000/E, gdy dany jest kąt zenitalny Słońca i R<sub>12</sub>

Wacław Lisicki

## METODY OBLICZANIA TRAS KRÓTKOFALOWEJ ŁĄCZNOŚCI JONOSFERYCZNEJ

### 1. WSTĘP

Prognozy warunków łączności jonosferycznej przedstawia się, zależnie od potrzeby, w różnych postaciach. Jako końcowy wynik opracowania prognozy można na przykład podać przebiegi dobowe zakresu częstotliwości zawartego pomiędzy FOT i LUF, w którym prawdopodobieństwo istnienia łączności o wymaganej jakości jest co najmniej równe lub większe od  $0,9 \times 0,9 = 0,81$ . Niekiedy potrzebne bywa określenie najmniejszej wymaganej mocy promieniowanej LRRP, również w przebiegu dobowym, aby na tej podstawie ustalić moc nadajnika oraz zyski anten po stronie nadawczej i odbiorczej. Obecnie, gdy stosowanie ETO pozwala na szybkie wykonywanie dużej liczby obliczeń, zaczął się przyjmować sposób przedstawiania warunków łączności na wybranych częstotliwościach w całym zakresie fal dekametrowych lub jego części, bez ograniczania z góry wartością MUF. Taki sposób przedstawiania daje pełny obraz sytuacji na danej trasie radiokomunikacyjnej i jest podstawą odpowiednich ustaleń eksploatacyjnych względnie projektowych, odnośnie częstotliwości roboczych i parametrów trasy.

Sporządzenie prognozy warunków łączności jonosferycznej wymaga wykonania szeregu obliczeń. Całość tych obliczeń nazywamy potocznie obliczeniem trasy radiokomunikacyjnej lub bardziej ściśle obliczeniem trasy krótkofalowej łączności jo-

nosferycznej. Bez względu na sposób przedstawiania wyników, w skład obliczeń wchodzi zazwyczaj określenie MUF, obliczenie natężenia pola, określenie poziomu zakłóceń i ustalenie wymagań jakościowych w sensie określenia warunków ochrony sygnału użytecznego. Są to obliczenia podstawowe. Metodyka obliczeń tras krótkofalowej łączności jonosferycznej jest dostosowana do celu prognozowania i nieco różni się w zależności od służby radiokomunikacyjnej, której ma służyć. Każda metodyka zawiera obliczenia podstawowe w układzie podporządkowanym celowi obliczeń.

Oprócz obliczeń podstawowych, często wykonuje się jeszcze obliczenia dodatkowe. Do nich należy obliczanie azymutów, odległości ortodromowych, kątów elewacji anten itp. Niekiedy przeprowadza się również obliczenia efektów wielodrogowości sygnału, co nabiera coraz większego znaczenia w związku ze wzrostem prędkości przesyłania informacji.

## 2. RODZAJE OBLICZEŃ

### 2.1. Obliczenia projektowe

Obliczenia tras łączności jonosferycznej stanowią podstawę wyjściową do określenia parametrów urządzeń radiokomunikacyjnych względnie nadawczych urządzeń radiofonii krótkofalowej, decydujących o warunkach łączności. Projektowanie ośrodków radiokomunikacyjnych, nadawczych ośrodków radiofonii krótkofalowej, nowych relacji radiokomunikacyjnych i anten z reguły poprzedza się obliczeniami tras. Jednym z celów obliczeń jest również wstępne zorientowanie inwestora w zakresie przewidywanych efektów eksploatacyjnych.



Z punktu widzenia określenia podstawowych parametrów urządzeń nadawczych potrzebne jest obliczenie w przebiegu dobowym i sezonowym /z uwzględnieniem okresowej zmienności aktywności słonecznej/ zakresu częstotliwości roboczych i najmniejszej wymaganej mocy promieniowanej. Obliczenia propagacyjne mają najważniejsze znaczenie dla projektowania anten. Wyniki tych obliczeń są podstawą do określania zakresu częstotliwości, zysku energetycznego, rozwartości głównej wiązki promieniowania w płaszczyźnie poziomej i pionowej oraz kątów elewacji. Na podstawie wyników obliczeń propagacyjnych dokonuje się wyboru typów anten, określa się niezbędną ich liczbę, parametry i wymiary.

Charakterystyczną cechą obliczeń projektowych jest prognozowanie warunków łączności jonosferycznej na czas nieokreślony. W związku z tym obliczenia przeprowadza się w zasadzie dla pełnego cyklu aktywności słonecznej. Aby uchwycić zmienność warunków w okresie cyklu 11-letniego, trzeba wykonać obliczenia przynajmniej dla czterech quasi-ekstremalnych faz cyklu, mianowicie:

- grudzień, minimum aktywności słonecznej,
- czerwiec                    - " -
- grudzień, maksimum aktywności słonecznej,
- czerwiec,                    - " -

W pewnych przypadkach pożądanym jest wykonanie obliczeń również dla okresu równonocy /marzec lub wrzesień/ i ewentualnie dla średniej aktywności słonecznej. W szczególności rozszerzenie obliczeń jest wskazane dla bardzo długich tras łączących punkty leżące po obu stronach równika na dużych szerokościach i znacznie różniących się od siebie długościach geograficznych.

## 2.2. Obliczenia eksploatacyjne

Prognostyczne obliczenia propagacyjne często ograniczają się do wyznaczenia dobowego przebiegu miesięcznej mediany FOT, określonej jako 0,85 MUF. Obecnie pojęcie MUF nie jest jednoznaczne, zaś stosunku FOT do MUF nie traktuje się już jako wielkości nieziennej w czasie i przestrzeni<sup>1/</sup>. Ponadto określenie MUF i FOT nie daje jeszcze ostatecznego pojęcia o całości warunków łączności na trasie.

W dobie obecnej prognozowanie warunków łączności jonosferycznej traktuje się przede wszystkim od strony niezawodności łączności. Obliczenia niezawodności wykonuje się dla wybranych częstotliwości lub w wybranym zakresie częstotliwości, na przykład co 1 MHz. Wyboru częstotliwości roboczych dokonuje się na podstawie wyników tych obliczeń, które ułatwiają jednocześnie wybór mocy nadajnika i wybór anteny względnie pozwalają przewidzieć efektywność nadawań przy ustalonych z góry parametrach trasy.

Oparcie się na wynikach obliczeń niezawodności łączności daje szczególne korzyści w przypadku możliwości swobodnego wyboru jednej z wielu dostępnych częstotliwości. Z punktu widzenia efektywności wykorzystania widma fal radiowych wybór częstotliwości oparty na kryterium niezawodności zapobiega nadmiernemu skupianiu się częstotliwości roboczych różnych użytkowników w pobliżu klasycznej FOT, dzięki czemu zmniejszają się wzajemne zakłócenia interferencyjne. Ujawnia-

---

<sup>1/</sup>S. Borowski i W. Lisicki: Wybór optymalnych częstotliwości roboczych.

ją się również możliwości wykorzystywania częstotliwości leżących w pewnym zakresie powyżej MUF.

Obliczenia niezawodności łączności są bardzo pracochłonne i permanentne prognozowanie częstotliwości roboczych na tej podstawie jest w praktyce możliwe tylko przy korzystaniu z maszyn cyfrowych.

W odróżnieniu od obliczeń projektowych, obliczenia eksploatacyjne wykonuje się dla określonego miesiąca i określonej wartości wskaźnika aktywności słonecznej. Możliwe jest też doraźne określanie częstotliwości roboczych w oparciu o wyniki sondowań jonosferycznych, przynajmniej na niewielkie odległości. Dla tras dalekosiężnych trzeba by dla tego celu dysponować wynikami aktualnych sondowań z większej liczby obserwatoriów znajdujących się w pobliżu trasy lub wynikami sondowań ukośnych względnie sondowań z rozproszeniem wstecznym. Jeśli dysponuje się wynikami sondowań bezpośrednio z trasy, to prognozy stają się w dużej mierze zbędne.

### 3. METODY OBLICZANIA NATĘŻENIA POŁA

#### 3.1. Ogólny przegląd metod stosowanych bez pomocy ETO

W ciągu kilkudziesięcioletniego okresu wykorzystywania fal dekametrowych dla dalekosiężnej łączności jonosferycznej opracowano pokaźną liczbę różnych metod obliczania natężenia pola. Poniżej krótko omówimy kilka metod, które najbardziej rozpowszechniły się w praktyce inżynierskiej i są jeszcze obecnie stosowane w obliczeniach wykonywanych bez pomocy EMC.

Jedną z najwcześniej, ale i najgruntowniej opracowanych metod, niekiedy stosowaną jeszcze i teraz, jest amerykańska

metoda NBS<sup>1/</sup>, opisana w Circular 462 NBS z roku 1948 [1].  
Wg metody NBS natężenie pola w ogólnym przypadku jest iloczynem trzech czynników:

$$E = E_o P_{pr} e^{-\alpha} \quad /3-1/$$

gdzie:  $E_o$  - natężenie pola fali nieabsorbowanej zależne tylko od długości trajektorii fali;

$P_{pr}$  - moc promieniowana;

$\alpha$  - wskaźnik absorpcji jonosferycznej.

Wskaźnik absorpcji  $\alpha$  jest określony przez następujący iloczyn:

$$\alpha = JQKS \quad /3-2/$$

gdzie: J = współczynnik zmienności sezonowej;

Q = współczynnik aktywności słonecznej;

K = współczynnik zmienności dobowej;

S = funkcja częstotliwości i odległości.

Rozkłady wartości poszczególnych parametrów w funkcji czasu i szerokości geograficznej względnie odległości i częstotliwości są przedstawione w postaci wzorów empirycznych lub wykresów. W Circular 462 NBS zamieszczone są ponadto nomogramy ułatwiające obliczenia oraz podana jest metoda obliczania dodatkowej absorpcji w strefach zorzy polarnej.

Opracowana przez Laitinena i Haydona w 1950 r. metoda RPU-9 [2] stanowiła dalsze rozwinięcie metody NBS. W odróżnieniu od tej ostatniej, która właściwie składa się z trzech odrębnych metod dla odległości poniżej 400 km, od 400 do 3200 i powyżej 3200 km, metodę RPU-9 cechuje jednolitość

<sup>1/</sup> National Bureau of Standards - Państwowe Biuro Norm.

i ciągłość w funkcji odległości. Metoda RPU-9 była stosowana w USA przez okres około 1 1/2 cykła aktywności słonecznej i dopiero w 1966 roku została poddana rewizji przez Lucasa i Haydona. W Polsce metoda RPU-9 nie znalazła szerszego zastosowania, gdyż przed rokiem 1956 nie była dostępna, a później istniała już Norma B-1 IFRB [3], zawierająca uniwersalne krzywe natężenia pola, dogodne do stosowania w praktyce inżynierskiej. Stosowanie metody RPU-9, aczkolwiek dającej możliwość wykonywania znacznie dokładniejszych obliczeń, było hamowane przez ich nadmierną pracochłonność.

W ZSRR została opracowana przez Kazancewa [4] w 1947 roku, a następnie udoskonalona w 1956 i 1957 roku, metoda oparta na geometrycznym sumowaniu pól od fal przychodzących po różnej liczbie odbić od jonosfery. Współczynnik osłabienia natężenia pola wzdłuż trasy uwzględnia zarówno straty przy kolejnych odbiciach fali od Ziemi, jak i absorpcję w poszczególnych obszarach jonosfery. Współczynnik absorpcji dla danego obszaru określa się wzorem:

$$\Gamma = \Gamma_{f_{kro}} \left( \frac{f_{kr}}{f_{kro}} \right)^2 \quad /3-3/$$

gdzie:  $f_{kr}$  - aktualna częstotliwość krytyczna;

$f_{kro}$  - częstotliwość krytyczna odniesienia;

$\Gamma_{f_{kro}}$  - współczynnik absorpcji przy częstotliwości  $f_{kro}$ .

Wartości  $\Gamma_{f_{kro}}$  określa się z wykresów opracowanych dla poszczególnych obszarów jonosfery. Dla obszaru D, dla którego nie można określić częstotliwości krytycznej, Kazancew poda-

je krzywe współczynnika absorpcji w funkcji długości fali, przy różnych wartościach kąta padania fali na jonosferę.

Metoda Kazancewa jest nadal w użyciu w Związku Radzieckim [5] również i przy zastosowaniu ETO.

Poza wyżej omówionymi metodami, pewne zastosowanie znalazły jeszcze metody: Rawera z 1952 roku [6], Piggotta z 1959 r. [7], Beckmanna z lat 1958, 1960 i 1967 [8], indyjska, australijska i inne.

Większość metod obliczania natężenia pola była opracowana w ramach szerszej metodyki obliczania warunków łączności jonosferycznej.

### 3.2. Prowizoryczna metoda CCIR

Powołana w łonie 6 Komisji Studiów CCIR Międzynarodowa Grupa Robocza VI/1 od kilkunastu lat zajmuje się przygotowaniem do powszechnego użytku metody obliczania natężenia pola fali jonosferycznej w zakresie częstotliwości od 1,5 do 40 MHz. W ostatnich latach Grupa Robocza VI/1 wypracowała prowizoryczną metodę, która jest treścią sprawozdania 252-2 CCIR [9]. Metoda jest dosyć złożona i przewidziana w zasadzie do użytku za pomocą maszyn cyfrowych. Główną podstawę prowizorycznej metody CCIR stanowią prace Lucasa i Haydona z 1966 roku [10] oraz Barghausena z 1969 roku [11]. Obie prace zostały opublikowane w postaci sprawozdań technicznych ESSA<sup>1/</sup>/USA/ i od niedawna dopiero są w Polsce dostępne.

Podstawowa zależność określająca natężenie pola fali jonosferycznej przedstawia się następująco:

<sup>1/</sup> Environmental Science Services Administration.

$$E = 107,2 + 20 \log f + P_n + G_n - L_p \quad \left[ \text{dB} / \frac{\mu\text{V}}{\text{m}} \right] \quad /3-4/$$

gdzie:  $f$  - częstotliwość robocza w MHz;

$P_n$  - moc dostarczana do anteny w dB/W/;

$G_n$  - zysk anteny nadawczej w kierunku trajektorii fali, w odniesieniu do anteny izotropowej, w dB;

$L_p$  - podstawowe tłumienie transmisji w dB.

Dla mocy 1 kW wypromieniowanej przez dipol półfalowy w wolnej przestrzeni  $E_1 = 222 \frac{\text{mV}}{\text{m}}$  w odległości 1 km od anteny/ natężenie pola jest równe:

$$E = 139,4 + 20 \log f - L_p \quad \left[ \text{dB} / \frac{\mu\text{V}}{\text{m}} \right] \quad /3-5/$$

Jak widać, obliczenie natężenia pola sprowadza się głównie do określenia wartości podstawowego tłumienia transmisji  $L_p$ . Zgodnie z definicją podstawowe tłumienie transmisji jest to tłumienie występujące na trasie między anteną nadawczą i anteną odbiorczą, jeżeli te obie anteny są izotropowe i bezstratne.

Podstawowe tłumienie transmisji składa się z następujących członów:

$$L_p = L_{wp} + L_j + L_z + Y_L \quad [\text{dB}] \quad /3-6/$$

gdzie:  $L_{wp}$  - podstawowe tłumienie transmisji w wolnej przestrzeni w dB;

$L_j$  - tłumienie spowodowane przez absorpcję jonosferyczną w dB;

$L_z$  - tłumienie spowodowane przez odbicia fali od powierzchni Ziemi w dB;

$Y_L$  - tzw. nadwyżka tłumienia w dB.

Podstawowe tłumienie transmisji w wolnej przestrzeni jest określone następującą zależnością:

$$L_{wp} = 32,44 + 20 \log f + 20 \log D \quad [\text{dB}] \quad /3-7/$$

gdzie:  $f$  - częstotliwość w MHz;

$D$  - długość trajektorii fali w km.

Obliczając  $L_{wp}$ , trzeba mieć na uwadze, że jako  $D$  przyjmuje się nie długość trasy /tzn. odległość ortodromową od nadajnika do odbiornika/, a długość trajektorii, czyli drogi fali od powierzchni Ziemi do jonosfery i z powrotem, ewentualnie kilkakrotnej, jeżeli fala przebywa trasę kilkoma skokami.

Tłumienie wywołane absorpcją niedewiacyjną oblicza się wg sprawozdania 252-2 w sposób następujący:

$$L_j = \frac{677,2 \sec \theta}{/f + f_H/^{1,98} + 10,2} \sum_{i=1}^n I_i \quad [\text{dB}] \quad /3-8/$$

gdzie:  $\theta$  - kąt padania fali na jonosferę na wysokości 100 km;

$f$  - częstotliwość robocza w MHz;

$f_H$  - częstotliwość żyromagnetyczna na wysokości 100 km w MHz;

$n$  - liczba skoków fali;

$$I_i = /1 + 0,0037 R_{12}/ /\cos 0,881\psi_i/^{1,3}$$



przy czym:  $R_{12}$  - wskaźnik aktywności słonecznej /tzw. średnia ślizgowa/,

$\psi_1$  - kąt zenitalny Słońca w obszarze absorpcji.

Ponieważ absorpcja nie zanika całkowicie w porze nocnej, należy więc przyjmować, że wartość  $I_1$  nie może być mniejsza niż 0,1.

Istnieją już propozycje modyfikacji wzoru /3-8/.

Trzeci składnik podstawowego tłumienia transmisji  $L_z$  obejmuje straty powstające przy odbiciach fali od powierzchni Ziemi, a więc występuje wtedy, gdy transmisja jest co najmniej dwuskokowa. Tłumienie strat przy odbiciach fali od powierzchni Ziemi oblicza się wg zależności:

$$L_z = 10 \log \frac{2}{|R_v|^2 + |R_h|^2} \quad [\text{dB}] \quad /3-9/$$

przy czym:

$$R_v = \frac{n^2 \sin \beta - \sqrt{n^2 - \cos^2 \beta}}{n^2 \sin \beta + \sqrt{n^2 - \cos^2 \beta}} \quad /3-10/$$

$$R_h = \frac{\sin \beta - \sqrt{n^2 - \cos^2 \beta}}{\sin \beta + \sqrt{n^2 - \cos^2 \beta}} \quad /3-11/$$

$$n^2 = \epsilon_r - j \frac{18\sigma}{f} \quad /3-12/$$

gdzie:  $\beta$  - kąt elewacji fali;

$\epsilon_r$  - względna przenikalność dielektryczna;

- $\sigma$  - konduktywność gruntu w miejscu odbicia fal w  $\frac{mS}{m}$ ;  
 $f$  - częstotliwość w MHz.

Nadwyżka tłumienia  $Y_L$  została określona na podstawie statystycznej i obejmuje wszystkie inne wpływy, które nie zostały ujęte w trzech pierwszych składnikach podstawowego tłumienia transmisji. Wchodzą tu w rachubę straty wynikające ze zmniejszenia zysku anteny na skutek wahań kąta elewacji, straty spowodowane przez absorpcję dewiacyjną, ogniskowanie, wielodrogowość itp. W sprawozdaniu 252-2 zamieszczone są tablice wartości medialnych i decylogowych nadwyżki tłumienia dla odległości poniżej i powyżej 2500 km, w zależności od sezonu, godziny i szerokości geograficznej.

Obliczenie podstawowego tłumienia transmisji wymaga określenia trajektorii fali. W tym celu trzeba określić charakterystyki jonosfery wzdłuż trasy, mianowicie: częstotliwości krytyczne, wysokości maksymalnej gęstości elektronowej i wysokości podstawy obszaru F. Charakterystyki jonosfery wyznacza się w przypadku tras krótszych od 2000 km tylko dla środka trasy, a w przypadku tras długich - jeszcze dla punktów odbicia fali w obszarach E i F, po stronie nadajnika i po stronie odbiornika. Częstotliwości krytyczne można określić z atlasu charakterystyk jonosferycznych CCIR [12]. Wysokość maksymalnej gęstości elektronowej warstwy F2 znajduje się ze wzoru Shimazaki [13]:

$$h_{\max} = \frac{1490}{M/3000/F2} - 176 \quad [\text{km}] \quad /3-13/$$

gdzie  $M/3000/F2$  określa się z odpowiednich map światowych.

Wysokość pozorną dolnego krańca obszaru F określa się również z map światowych [14] względnie, jeśli są dostępne dane co do półgrubości warstwy F2, można ją znaleźć jako różnicę wysokości maksymalnej gęstości elektronowej i półgrubości warstwy. Zasadniczo powinno się uwzględnić wpływ warstwy E przez odjęcie od wysokości maksymalnej gęstości elektronowej, jak i od wysokości dolnego krańca obszaru F, tzw. opóźnienia  $\Delta h$ . Chodzi tu o to, że trajektoria fali ulega ugięciu przy przejściu przez niżej zalegającą warstwę /rys. 3-1/<sup>1/</sup>, na skutek czego wydłuża się czas przebiegu impulsu sondującego i odczytane z jonogramów wysokości odbicia fal są większe, niż w rzeczywistości, o pewną wielkość  $\Delta h$  odpowiadającą wydłużeniu czasu przebiegu impulsu. Wartość opóźnienia oblicza się ze wzoru:

$$\Delta h = y_E \left[ Z \cdot \ln \frac{Z+1}{Z-1} - 2 \right] \quad [\text{km}] \quad /3-14/$$

gdzie:

$$Z = 0,834 \frac{f_{oF2}}{f_oE}$$

$y_E$  - półgrubość warstwy E w km.

Dla obszaru E przyjmuje się wysokość podstawy 90 km, a wysokość maksymalnej gęstości elektronowej 110 km. W celu uwzględnienia wpływu jonizacji pomiędzy obszarami E i F w przypadku, gdy fala przenika obszar E, przyjmuje się w pierwszym przybliżeniu półgrubość warstwy E  $y_E = 30$  km [15].

Trajektorię fali w jonosferze określa się w oparciu o mo-

<sup>1/</sup> Rysunki są zamieszczone na końcu artykułu.

del warstwy parabolicznej. Określenie trajektorii wymaga obliczenia kąta elewacji i wysokości pozornej odbicia fali dla danej częstotliwości  $f$ . Podstawą obliczeń jest prawo sekansa:

$$f = f_v k \sec \phi \quad /3-15/$$

gdzie:  $f_v$  - częstotliwość fali wypromieniowanej pionowo i odbijającej się od jonosfery na tej samej wysokości, co fala o częstotliwości  $f$  padająca na warstwę jonosferyczną pod kątem  $\phi$  ;

$k$  - współczynnik korekcyjny uwzględniający krzywiznę jonosfery.

Współczynnik  $k$  oblicza się ze wzoru:

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{2/h' - h/}{r_0 + h} \operatorname{tg} \phi}} \quad /3-16/$$

gdzie:  $h'$  - wysokość pozorna odbicia fali /rys. 3-2/

$h$  - wysokość rzeczywista szczytowego punktu trajektorii fali;

$r_0$  - 6370 km - promień Ziemi;

$\phi$  - kąt padania fali na warstwę jonosferyczną w punkcie pozornej odbicia /patrz rys. 3-2/.

Wysokość pozorną  $h'$  oblicza się ze wzoru:

$$h' = h_0 + y_m x \operatorname{ar} \operatorname{tgh} x \quad [\text{km}] \quad /3-17/$$

gdzie:  $h_0$  - wysokość dolnego krańca czynnej warstwy jonosferycznej w km;

$y_m$  - półgrubość czynnej warstwy w km;

$x = \frac{f_v}{f_{kr}}$ ;  $f_{kr}$  - częstotliwość krytyczna czynnej warstwy.

Wysokość rzeczywistą  $h$  oblicza się ze wzoru:

$$h = h_0 + y_m / 1 - \sqrt{1 - x^2} / \quad /3-18/$$

Wreszcie kąt  $\phi$  oblicza się z następującej zależności:

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{\sin \frac{d}{2}}{1 - \cos \frac{d}{2} + \frac{h'}{r_0}} \quad /3-19/$$

gdzie:  $d$  - długość skoku fali wzdłuż ortodromy, określona kątowno.

Współzależność wielkości  $f_v$ ,  $x$ ,  $k$ ,  $h'$  i  $\phi$  oraz innych występujących we wzorach /3-15/ : /3-19/ wymaga zastosowania metody iteracyjnej. W wyniku obliczeń otrzymuje się  $h'$  i  $\phi$ , a mając  $h'$  można znaleźć kąt elewacji  $\beta$  ze wzoru:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\cos \frac{d}{2} - \frac{r_0}{r_0 + h'}}{\sin \frac{d}{2}} \quad /3-20/$$

Wyznaczenie trajektorii fali komplikuje się dość znacznie, gdy uwzględnia się ugięcie fali przy jej przenikaniu przez obszar E, podczas gdy odbicie następuje w obszarze F /patrz rys. 3-1/. Rzeczywisty kąt elewacji w modelu dwuwarstwowym jest większy od kąta elewacji w modelu jednowarstwowym, przy

zachowaniu tej samej długości skoku fali. W sprawozdaniu 252-2 podane są wzory na obliczenie kąta ugięcia fali.

Jak wiadomo, na trasie łączności jonosferycznej mogą występować różne sposoby propagacji /tzw. "mody"/. Zależą one od długości trasy i aktywności poszczególnych obszarów jonosfery. W ogólności, o sposobie przejścia fali jonosferycznej decydują przede wszystkim pionowe rozkłady gęstości elektronowej wzdłuż trasy. Metoda CCIR pomija poziomą niejednorodność jonosfery, aczkolwiek jej wpływ też jest istotny. W metodzie CCIR proponuje się rozważyć następujące sposoby propagacji, zależne od długości trasy:

- poniżej 2000 km: 1E, 1F, 2F;
- od 2000 do 4000 km: 2E, 1F, 2F, 1E + 1F;
- od 4000 do 6000 km: 3E, 2F, 3F, 1E + 1F, 2E + 1F;
- od 6000 do 8000 km: 4E, 2F, 3F, 1E + 2F, 2E + 1F;
- od 8000 do 10000 km: 3F, 4F, 1E + 2F, 2E + 2F.

Dla odległości powyżej 10 tys. km nie podano, jakie mody należy rozpatrywać. Przy wstępnym omówieniu metody w sprawozdaniu 252-2 nadmieniono, że dla odległości znacznie większych od 10 tys. km prowizoryczna metoda CCIR może nie dawać zadowalających rezultatów.

W sprawozdaniu 252-2 opisana jest jeszcze metoda określania prawdopodobieństwa istnienia danej trajektorii fali w danych warunkach za pomocą rozkładu "chi kwadrat"<sup>1/</sup>. Zaleco-

---

<sup>1/</sup>Przez "chi kwadrat" oznacza się w statystyce matematycznej sumę stosunków kwadratów odchyłek wartości pewnej zmiennej losowej od jej wartości oczekiwanej. Rozkład statystyczny  $\chi^2$  określa prawdopodobieństwo przekroczenia danej warto-

no brać pod uwagę i obliczać tłumienie transmisji dla wszystkich trajektorii /czyli wszystkich sposobów propagacji/, dla których prawdopodobieństwo istnienia w danych warunkach jest równe co najmniej 0,05. Następnie zalecono wybrać najmniejsze obliczone tłumienie transmisji, jako tłumienie transmisji trasy. W związku z tym nasuwa się wątpliwość co do słuszności takiego postawienia zagadnienia z punktu widzenia niezawodności łączności. Wydaje się bowiem, że trajektoria fali dająca małe tłumienie trasy przy jednoczesnym małym prawdopodobieństwie przejścia fali może być mniej zadowalająca od trajektorii dającej nieco większe tłumienie, ale za to znacznie większe prawdopodobieństwo przejścia fali.

Jak widać, metoda CCIR jest dosyć złożona. Biorąc pod uwagę konieczność wykonywania obliczeń w przebiegu dobowym dla kilku modów i kilku lub nawet kilkunastu częstotliwości, trudno sobie wyobrazić stosowanie metody CCIR bez pomocy ET0.

W sprawozdaniu 252-2 zamieszczony jest program obliczeń maszynowych HFML0SS opracowany w języku FORTRAN IV. Program ten wchodzi w skład szerszego programu umożliwiającego kompleksowe obliczenie tras łączności jonosferycznej [16]. Program ten wymaga bardzo dużej pojemności pamięci operacyjnej

---

c.d. <sup>1/</sup> ze str. 41

ści  $\chi^2$ . Jest on zależny od liczby stopni swobody, czyli liczby niezależnych obserwacji, którymi rozporządza się do obliczenia  $\chi^2$ .

Określenie prawdopodobieństwa istnienia trajektorii fali w danych warunkach propagacyjnych i dla danej częstotliwości wymaga znalezienia odpowiedniego rozkładu  $\chi^2$  /dla odpowiedniej liczby stopni swobody/, najbliższego rozkładowi wartości MUF w tych warunkach. Rozkład MUF określa się na podstawie mediany i wartości decylogowych podanych w odpowiednich tablicach [9].

maszyny, w związku z czym w momencie przystąpienia do prac wdrożeniowych w tym zakresie nie było jeszcze w Polsce możliwości wykorzystania istniejących za granicą programów. W tej sytuacji przystąpiono w Instytucie Łączności do opracowania własnego uproszczonego programu obliczania natężenia pola, który ma być przekazany do użytkowania w drugiej połowie 1974 roku.

### 3.3. Metoda radziecka

Jak wspomniano w p. 3.1, w ZSRR stosuje się do obliczania natężenia pola metodę Kazancewa, której ogólne zarysy zostały przedstawione. Niezależnie od innych różnic zachodzących między metodą CCIR i metodą Kazancewa, która jest prostsza, ale nie uwzględnia w takim stopniu wpływu różnych czynników, jak metoda CCIR, radzieckie metody obliczeń propagacyjnych odznaczają się zwiększeniem dokładności przy określaniu charakterystyk jonosfery.

Po pierwsze, metoda IZMIRAN-u [5] uwzględnia poziomą niejednorodność jonosfery. Po drugie, charakterystyki jonosfery są wyznaczone co 1000 km, a więc dla dłuższych tras znacznie dokładniej, niż w metodzie CCIR. Ten sposób wyznaczania charakterystyk jonosfery, z pewną modyfikacją natury rachunkowej, został przyjęty w uproszczonym algorytmie obliczania natężenia pola opracowanym w Instytucie Łączności, o którym wspomniano w p. 3.2.



## 4. SZUMY I ZAKŁÓCENIA ODBIORU

### 4.1. Rodzaje szumów i zakłóceń

W zakresie fal dekametrowych minimalne natężenie pola niezbędne dla odbioru o wymaganej jakości może być uwarunkowane przez następujące rodzaje szumów:

- 1/ atmosferyczne,
- 2/ galaktyczne,
- 3/ własne odbiorników,
- 4/ pochodzenia przemysłowego.

Trzy pierwsze rodzaje szumów występują wszędzie, bez względu na lokalizację punktu odbiorczego. Człowiek nie ma żadnego wpływu na źródła szumów atmosferycznych oraz galaktycznych, a może jedynie w ograniczonym stopniu zmniejszyć ich oddziaływanie na odbiór sygnału użytecznego. Na szumy własne odbiorników człowiek może wpływać w pewnym zakresie możliwości technicznych poprzez odpowiednią konstrukcję i procesy technologiczne. Znaczny postęp techniki odbiorczej sprawił, że czułość odbiornika dość rzadko bywa czynnikiem warunkującym poziom chronionego natężenia pola. Charakterystyczną cechą szumów pochodzenia przemysłowego jest, w odróżnieniu od wszechobecności poprzednio wspomnianych rodzajów szumów, możliwość niewystępowania ich w ogóle na pewnych obszarach. Natomiast w dużych skupiskach ludności, a szczególnie na terenach przemysłowych, często szumy przemysłowe, czy raczej, jak częściej się określa, radioelektryczne zakłócenia przemysłowe, dominują nad pozostałymi rodzajami zakłóceń.

Zakłócenia są pojęciem w pewnym ujęciu szerszym od szumów, gdyż obejmują np. również i sygnały innych radiostacji, potocznie nazywane zakłóceniami interferencyjnymi. Jednakże nie każdy sygnał innej radiostacji /nawet współkanałowej/ jest sygnałem zakłócającym. Podobnie nie każdy szum działa zakłócająco na sygnał odbierany. Ogólnie zatem zakłóceniami nazywamy wszelkie szумы i sygnały mające potencjalną możliwość zakłócenia odbioru sygnału użytecznego. Jeśli więc, na przykład, mówimy o zakłóceniach atmosferycznych, to mamy na myśli szумы atmosferyczne o poziomie zdolnym w pewnych okolicznościach wywołać zakłócenia odbioru.

#### 4.2. Współczynniki szumów własnych i zewnętrznych

W każdym przewodniku, znajdującym się w środowisku o temperaturze większej od zera bezwzględnego, występuje napięcie szumów cieplnych, które przy założeniu, że oporność przewodnika jest niezależna od częstotliwości, określa się wzorem:

$$U_N = \sqrt{k T R b} \quad [V] \quad /4-2/$$

gdzie:

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/}^{\circ}\text{K}$  - stała Boltzmanna;

$T$  - temperatura w stopniach Kelvina;

$R$  - oporność w omach;

$b$  - szerokość pasma częstotliwości w Hz.

Stąd moc szumów cieplnych będzie równa:

$$P_N = k T b \quad [W] \quad /4-3/$$

Przyjmując średnią temperaturę otoczenia  $t = 15^{\circ}\text{C}$ , czyli  $T = 273 + 15 = 288^{\circ}\text{K}$ , i przechodząc na postać logarytmiczną wzoru /4-3/ otrzymujemy:

$$P_N = -204 + 10 \log b \quad \text{dB/W/} \quad /4-4/$$

Antena odbiornika jest również przewodnikiem, w którym szumy cieplne określa się w powyższy sposób. W odbiorniku rzeczywistym powstają szumy cieplne i inne szumy pochodzenia wewnętrznego, które wszystkie razem składają się na szumy własne odbiornika. Współczynnik szumów odbiornika określa się następująco:

$$F_{\text{oddb}} = 10 \log \frac{\frac{P_{s1}}{P_{N1}}}{\frac{P_{s2}}{P_{N2}}} \quad [\text{dB}] \quad /4-5/$$

gdzie:  $P_{s1}$  - moc sygnału na wejściu odbiornika,  
 $P_{s2}$  - moc sygnału na wyjściu odbiornika;  
 $P_{N1}$  - moc szumów na wejściu odbiornika;  
 $P_{N2}$  - moc szumów na wyjściu odbiornika.

Od współczynnika szumów zależy czułość użytkowa odbiornika, zdefiniowana jako najmniejszy poziom sygnału wejściowego, umożliwiający uzyskanie normalnej mocy wyjściowej przy utrzymaniu określonego stosunku  $n$  poziomu sygnału do poziomemu szumu:

$$n = 10 \log \frac{P_S}{P_N} \quad [\text{db}] \quad /4-6/$$

Czułość użytkowa odbiorników zazwyczaj jest podawana w postaci wymaganego minimalnego napięcia /lub SEM/ na wejściu odbiornika. Od czułości odbiornika i współczynnika antenowego anteny odbiorczej zależy minimalne natężenie pola niezbędne dla odbioru o jakości określonej czułością danego typu odbiornika, o ile szumy własne dominują nad innymi rodzajami zakłóceń.

Na wejściu odbiornika pojawiają się ponadto szumy pochodzenia zewnętrznego: szumy atmosferyczne, galaktyczne i przemysłowe. Współczynnik szumów zewnętrznych jest określony jako stosunek mocy tych szumów do mocy szumów cieplnych anteny:

$$F_z = 10 \log \frac{P_z}{k T_0} \quad /4-7/$$

lub w postaci logarytmicznej:

$$F_z = P_z + 204 \quad [\text{dB/W}] \quad /4-8/$$

### 4.3. Zakłócenia atmosferyczne

Elektryczne wyładowanie atmosferyczne objawia się w odbiorniku radiowym w postaci trzasku. Jeżeli wyładowania występują w odległości bliskiej od odbiornika, jak to się dzieje podczas burzy lokalnej, to odbiór jest silnie zakłócany przez sporadyczne trzaski. Szczytowa wartość poziomu takich zakłóceń jest stosunkowo bardzo wysoka, ale ponieważ prawdopodobieństwo ich występowania w długim okresie czasu jest niewielkie, przy określaniu minimalnego niezbędnego natężenia pola sygnału użytecznego nie bierze się pod uwagę zakłóceń atmosferycznych pochodzących od wyładowań lokalnych.

Każde wyładowanie atmosferyczne jest źródłem zaburzenia elektromagnetycznego, które rozchodzi się na duże nawet odległości, podlegając prawom propagacji fal radiowych. Ponieważ na obszarze całego świata wyładowania atmosferyczne zachodzą nieustannie, koncentrując się szczególnie w rejonach tropikalnych, w odbiorniku pojawiają się w dużej liczbie trzaski o znacznie mniejszej amplitudzie od trzasków pochodzenia lokalnego. Dają one efekt ciągłego szumu o charakterze fluktuacyjnym. Szumy atmosferyczne, pochodzące z odległych obszarów, mają podstawowe znaczenie dla określania poziomu chronionego natężenia pola w przypadkach, gdy dominują nad innymi rodzajami zakłóceń.

Poziom szumów atmosferycznych jest zmienny w szerokich granicach w funkcji częstotliwości, czasu i szerokości geograficznej. Ogólnie, poziom szumów atmosferycznych maleje ze wzrostem częstotliwości i na ogół powyżej 20 MHz są one do pominięcia. Szumy atmosferyczne są na ogół największe w godzinach wieczornych i nocnych, a najmniejsze w godzinach rannych. Zachodzą też znaczne zmiany sezonowe poziomu szumów atmosferycznych. Ponieważ o poziomie szumów w zakresie fal dekametrowych w znacznej mierze decydują warunki propagacji jonosferycznej, zależności sezonowe i dobowe są powiązane z zależnościami częstotliwościowymi i przestrzennymi. Na ogół poziom szumów atmosferycznych maleje ze wzrostem szerokości geograficznej, ponieważ zwiększa się odległość punktu odbiorczego od obszarów najbardziej intensywnych wyładowań atmosferycznych.

Ponieważ poziom szumów atmosferycznych ma charakter fluktuacyjny i wykazuje dużą zmienność dobową i sezonową, warto-

ści jego traktuje się statystycznie. Zgodnie z /4-8/ poziom szumów atmosferycznych określa się wartością współczynnika szumów. Przyjęto podawać medianę godzinową współczynnika szumów atmosferycznych, określaną w następujący sposób:

$$\bar{F}_{am} = \bar{P}_{Na} + 204 \quad [\text{dB/W}] \quad /4-9/$$

gdzie  $\bar{P}_{Na}$  - mediana mocy szumów atmosferycznych w dB/W/.

Informacje na temat rozkładu szumów atmosferycznych na kuli ziemskiej są zebrane w sprawozdaniu 322 CCIR [17]. Jako podstawowy parametr jest tam użyta mediana godzinowa  $\bar{F}_{am}$  współczynnika szumów, odniesionego do mocy szumów w krótkiej antenie pionowej. Natężenie pola szumów atmosferycznych określa się wzorem:

$$\bar{E}_{am} = \bar{F}_{am} - 65,5 + 20 \log f \quad \left[ \text{dB}/\frac{\mu\text{V}}{\text{m}} \right] \quad /4-10/$$

gdzie:  $f$  - częstotliwość w MHz.

Obliczony wg /4-10/ poziom natężenia pola szumów atmosferycznych odniesiony jest do szerokości pasma 1 kHz.

#### 4.4. Zakłócenia galaktyczne

W zakresie fal dekametrowych pojawiają się również szumy pochodzenia pozaziemskiego. Ich źródłem jest głównie nasza galaktyka, zwana w potocznym języku Drogą Mleczną.

Szumy galaktyczne pojawiają się na większych częstotliwościach zakresu fal dekametrowych, ponieważ w zakresie mniejszych częstotliwości są one ekranowane przez jonosferę.

Jedynie w strefach polarnych, zwłaszcza podczas często występujących tam zaburzeń jonosferycznych, gdy częstotliwości krytyczne spadają stosunkowo bardzo nisko, a szумы atmosferyczne są słabe, szумы galaktyczne dominują nawet w dolnej części zakresu fal dekametrowych.

Lucas i Haydon [10] podają następujący wzór na obliczenie poziomu szumów galaktycznych:

$$\bar{P}_{Ng} = -165 - 9,555 \ln \frac{f}{3} \quad [\text{dB/W}] \quad /4-11/$$

gdzie:  $\bar{P}_{Ng}$  - spodziewana mediana mocy szumów w pasmie 1 Hz;  
 $f$  - częstotliwość w MHz.

Wahania w czasie poziomu szumów galaktycznych zawierają się w granicach  $\pm 2$  dB. Znaczniejsze wahania poziomu szumów na wejściu odbiornika zachodzą przy odbiorze kierunkowym na skutek względnej zmiany położenia źródeł szumów galaktycznych w konsekwencji ruchów obrotowych Ziemi. Ekranowanie jonosferyczne szumów galaktycznych jest określone przez częstotliwość krytyczną warstwy F2.

#### 4.5. Zakłócenia przemysłowe

Radioelektryczne zakłócenia przemysłowe charakteryzują się wielką liczbą i różnorodnością źródeł zakłóceń. Znaczne skupienia tych źródeł występują w obiektach przemysłowych, ale również źródłami zakłóceń są różnego rodzaju urządzenia i aparaty elektryczne, będące produktami przemysłu i stąd raczej pochodzi nazwa zakłóceń przemysłowych<sup>1/</sup>.

<sup>1/</sup> Omawiany rodzaj zakłóceń bardzo trafnie określa angielski termin: "man-made noise" - zakłócenia wytwarzane przez człowieka.

Źródła zakłóceń przemysłowych są zatem rozsięgnięte wszędzie, gdzie mieszkają i pracują ludzie, a obecnie w dobie postępującej elektryfikacji gospodarstw wiejskich i domowych nawet wieś nie jest wolna od potencjalnych źródeł zakłóceń. Prowadzona w wielu krajach m.in. i w Polsce walka z zakłóceniami, przestrzeganie przez przemysł ustalonych norm i stosowanie niezbędnych zabezpieczeń oraz wykrywanie i likwidacja źródeł zakłóceń przez organa Państwowej Inspekcji Radiowej, zapobiegają nadmiernemu wzrostowi zakłóceń przemysłowych. Tym niemniej zakłócenia te istnieją i można określić ich poziom na podstawie badań statystycznych.

Barghausen [11], powołując się na Zacharisena i Jonesa [18], podaje następujący wzór i wartości parametrów określające moc zakłóceń przemysłowych w pasmie 1 Hz:

$$\bar{P}_{Np} = \bar{P}_{No} + b \log \left( \frac{f}{3} \right) \quad [\text{dB/W}] \quad /4-12/$$

gdzie:  $\bar{P}_{No}$  i  $b$  podane w tabl. 4-1,

$f$  - częstotliwość w MHz.

W tabelicy 4-1 obszar miejski oznacza śródmiejskie dzielnice dużych miast, obszar podmiejski - bądź podmiejskie dzielnice dużych miast, bądź małe miasta, zaś obszar wiejski - obszary odległe od miejsc zamieszkałych. Według sprawozdania 322 CCIR [17] zakłócenia przemysłowe z miejsc o bardzo dużym skupieniu źródeł zakłóceń /np. z wielkich miast/ mogą rozchodzić się nawet na większe odległości poprzez jonosferę. W sprawozdaniu 322 podana jest krzywa poziomu zakłóceń przemysłowych w funkcji częstotliwości dla miejsc tzw. spokojnych, czyli dla obszarów wiejskich.



Tablica 4-1

Parametry  $\bar{P}_{No}$  i b we wzorze /4-12/

Obszar	f [MHz]	$\bar{P}_{No}$ [dB/W/]	b	Odchylenia decylowe od mediany [dB]
Miejski	$f < 10$	-136,5	-27,1	4,2
	$10 \leq f \leq 20$	-150,2	- 1,0	5,8
	$f > 20$	-132,5	-22,5	7,4
Podmiejski	$f < 10$	-148,6	-29,4	5,8
	$10 \leq f \leq 20$	-167,5	+ 6,6	8,8
	$f > 20$	-142,2	-24,0	11,8
Wiejski	$f < 10$	-165,6	-34,3	10,0
	$10 \leq f \leq 20$	-196,5	+24,9	7,1
	$f > 20$	-155,4	-25,0	4,2

Podane w tabl. 4-1 odchylenia decylowe są określone przy założeniu log-normalnego rozkładu wartości poziomu zakłóceń. Oznaczają one odchylenia od mediany  $P_{No}$ , odpowiednio w górę i w dół dla 10 i 90% czasu.

#### 4.6. Sprawozdanie 322 CCIR

Sprawozdanie 322 zawiera sumę aktualnych informacji na temat światowego rozkładu szumów atmosferycznych, ich zależności od częstotliwości i rozkładu statystycznego. Ponadto w sprawozdaniu 322-1 podane są krzywe poziomu zakłóceń galaktycznych i zakłóceń przemysłowych w miejscach tzw. "spokojnych" oraz wskazówki dotyczące obliczania wymaganego poziomu natężenia pola sygnału użytecznego.

Mapy światowego rozkładu współczynnika szumów atmosferycznych  $\bar{F}_{am}$  dla częstotliwości 1 MHz, krzywe zależności od częstotliwości i krzywe wartości decylowych zostały sporządzone dla 24 czterogodzinnych bloków czasowych /4 sezony trzymiesięczne - w każdym sezonie doba podzielona na 6 odcinków czterogodzinnych/. Na wykresach obrazujących zależność  $\bar{F}_{am}$  od częstotliwości podano również krzywe wartości współczynnika szumów galaktycznych i przemysłowych w miejscach spokojnych. Na wykresach obrazujących zależność od częstotliwości wartości decylowych odchylenia współczynnika szumów atmosferycznych od mediany / $D_u$  - wartość decylowa górna,  $D_l$  - wartość decylowa dolna/, podano jeszcze następujące krzywe zależności od częstotliwości:

$\sigma F_{am}$  - odchylenie standardowe rozkładu  $F_{am}$ ,

$\sigma D_u$  i  $\sigma D_l$  - odchylenia standardowe rozkładu wartości decylowych,

$V_{dm}$  - współczynnik stosowany przy obliczaniu stosunku sygnał/szum w łączności dalekopisowej.

Sprawozdanie 322 zawiera ponadto krzywe i nomogramy pomocnicze, jak np. nomogram do przeliczania współczynnika szumów  $F_{am}$  na natężenie pola  $E_{am}$  wg wzoru /4-10/.

#### 4.7. Jednoczesne występowanie różnych rodzajów zakłóceń

Szumy atmosferyczne, galaktyczne i przemysłowe mogą występować jednocześnie /wszystkie trzy rodzaje lub dwa z nich/.

Jeżeli poziom jednego z szumów jest wyższy o co najmniej 6 dB od każdego z pozostałych, to te pozostałe szumy można

w obliczeniach pomijać. Jeżeli jednak poziom jednego lub obu rodzajów słabszych szumów różni się od najsilniejszego o mniej niż o 6 dB, to należy je uwzględnić. W tabelicy 4-2 podane są wartości współczynników w dB, które należy dodać do najwyższego poziomu szumów w zależności od różnicy  $\Delta P_{N1}$ , między najwyższym i drugim z rzędu poziomem przy danej różnicy  $\Delta P_{N2}$  między poziomem drugim z rzędu a poziomem najniższym.

Tabela 4-2

Udział szumów o niższych poziomach w sumarycznym poziomie szumów

$\Delta P_{N1}$ [dB] \ $\Delta P_{N2}$ [dB]	0,1	0,1÷3,0	3,0÷6,0	6,0
6,0	3,0	1,8	1,0	0,0
3,0 ÷ 6,0	3,5	2,4	1,8	-
0,1 ÷ 3,0	4,0	3,0	-	-
0,1	4,8	-	-	-

## 5. KRYTERIA JAKOŚCI ODBIORU I OCHRONY SYGNAŁU UŻYTECZNEGO PRZED ZAKŁÓCENIAMI

### 5.1. Minimalny niezbędny poziom sygnału użytecznego

Jako kryterium jakości odbioru sygnału użytecznego przyjmuje się na ogół:

- w radiotelegrafii: względną liczbę błędów /przekłamań/;
- w radiotelefonii: wyrazistość zgłoskową.

W radiofonii istotne jest wierne i pozbawione zakłóceń odtworzenie po stronie odbiorczej nadawanych audycji. Jednakże w aktualnej praktyce przeważającą część godzin nadawań dla zagranicy wypełnia program informacyjny, dla którego odpowiednim kryterium jakościowym jest również wyrazistość zgłoskowa. Wymagania stawia się w radiofonii normalnie wyższe niż w radiotelefonii.

Zarówno względna ilość przekłamań, jak i wyrazistość zgłoskowa zależą od stosunku poziomu sygnału użytecznego do poziomu zakłóceń. Wymagany dla danej jakości odbioru stosunek poziomu sygnału użytecznego do poziomu zakłóceń nazywamy współczynnikiem ochronnym. Jeżeli poziom sygnału użytecznego i poziom zakłóceń są stałe w funkcji czasu, to minimalne niezbędne napięcie sygnału użytecznego na wejściu odbiornika obliczamy:

$$U_{\min} = U_z + A \quad [\text{dB}/\mu\text{V}] \quad /5-1/$$

gdzie:  $U_z$  - napięcie wejściowe przebiegu /sygnału/ zakłócającego w dB / $\mu\text{V}$ /,

$A$  - współczynnik ochronny w dB.

Jeżeli poziom sygnału użytecznego i poziom zakłóceń są zmienne w funkcji czasu, to współczynnik ochronny należy zwiększyć o pewną wartość, zwaną potocznie /ale niezbyt prawidłowo/ marżą przeciwzanikową  $C$ :

$$U_{\min} = \bar{U}_z + A + C \quad [\text{dB}/\mu\text{V}] \quad /5-2/$$

W równości 5-2 występuje mediana zmiennego w czasie poziomu  $\bar{U}_z$ . Sumę / $A+C$ / nazywa się niekiedy dynamicznym współczynnikiem ochronnym.

## 5.2. Współczynniki ochronne

W zależności od rodzaju zakłóceń współczynniki ochronne odnoszą się do poziomu szumów własnych odbiornika lub atmosferycznych i innych albo do poziomu sygnałów zakłócających pochodzących od innych radiostacji.

Dla telegrafii A1 i F1 wartość współczynnika ochronnego można określić z charakterystyki szumowej /procent błędów w funkcji stosunku poziomów mocy sygnału i szumu na wejściu odbiornika/, z uwzględnieniem szerokości pasma odpowiadającego danej szybkości telegraficznej. W łączności jonosferycznej poziom sygnału użytecznego jest zmienny w czasie. Montgomery [19, 20] sporządził charakterystyki szumowe z uwzględnieniem zaników wg rozkładu Rayleigha, które należy w tym przypadku stosować /rys. 5-1/.

Dla telefonii można posługiwać się również charakterystykami szumowymi  $\frac{P_s}{P_N \text{ wyj}}$  =  $f \frac{P_s}{P_N \text{ wej}}$  [20], gdzie  $\frac{P_s}{P_N \text{ wyj}}$  i  $\frac{P_s}{P_N \text{ wej}}$  oznaczają odpowiednio stosunek poziomu mocy sygnału do poziomu mocy szumów na wyjściu i na wejściu odbiornika. Wymagany stosunek  $\frac{P_s}{P_N \text{ wyj}}$  znajduje się z krzywych zależności wyrazistości zgłoskowej od głośności sygnału i poziomu szumu /rys.5-2/ [20].

Powyżej opisano ogólne zasady wyznaczania współczynników ochronnych, które mogą posłużyć do przybliżonego określania ich wartości w braku odpowiednich danych i możliwości pomiarowych. Dokładniejsze określenie wartości współczynników ochronnych jest bardziej skomplikowane. Na przykład dla łączności dalekopisowej stosuje się metodę opartą na znajomości rozkładu

prawdopodobieństwa amplitud zakłóceń /APD - Amplitude - probability distribution/. Wyrazistość może być określana w sposób wyżej podany dla zakłóceń szumowych addytywnych. W układach nieliniowych występują dodatkowe zjawiska związane ze składowymi Intermodulacji sygnału i szumu.

W literaturze i w dokumentach międzynarodowych są podane wartości współczynników ochronnych oraz odstępów wymaganych ze względu na zaniki. M.in. wartości wymaganego stosunku sygnału do szumu podane są w zaleceniu 339-1 CCIR [21]. Wartości dodatkowych odstępów przeciwzanikowych podane są w zaleceniu 340 CCIR [22]. W zaleceniu 240 CCIR [23] zamieszczona jest tablica wartości współczynników ochronnych oraz wartości odstrojeń, przy których sygnał zakłócający może być równy sygnałowi użytecznemu lub przewyższać go o 6 względnie 30 dB. Wartości te podane są dla poziomów stałych w czasie, dla telegrafii A1 i F1 z szybkością telegraficzną 50 i 100 bodów oraz dla przypadku zakłócania emisji F1 z szybkością 50 bodów przez emisję radiofoniczną.

Norma A1 IFRB [24] określa wartości współczynników ochronnych dla różnych emisji telegraficznych, dla telefonii i dla radiofonii, m.in. dla zakresu częstotliwości 3,5 : 28 MHz, stosowane przez IFRB przy badaniu notyfikowanych częstotliwości.

### 5.3. Minimalne niezbędne natężenie pola sygnału użytecznego

Wartość minimalnego niezbędnego natężenia pola sygnału użytecznego określa się, biorąc pod uwagę szumy atmosferyczne, galaktyczne i przemysłowe lub te z nich, które w rozpa-

trywanym przypadku są znaczące. Jeżeli poziomy wszystkich wymienionych szumów są tak niskie, że dominują szumy własne odbiornika, wówczas kryterium granicznym dla określania minimalnego niezbędnego natężenia pola staje się czułość użytkowa odbiornika.

Jeżeli sygnał użyteczny i szumy zakłócające przychodzą z tego samego kierunku względnie antena odbiorcza jest dookólna, to w zasadzie można uważać, iż stosunek natężenia pola sygnału użytecznego do natężenia pola szumów jest taki sam, jak stosunek napięć wejściowych. Minimalne niezbędne natężenie pola obliczamy analogicznie:

$$E_{\min} = \bar{E}_z + A + C \quad \left[ \text{dB} / \left( \frac{\mu\text{V}}{\text{m}} \right) \right] \quad /5-3/$$

gdzie:  $\bar{E}_z$  - mediana poziomu zakłóceń w  $\text{dB} / \left( \frac{\mu\text{V}}{\text{m}} \right)$ .

Jeżeli źródła szumów można zlokalizować, to przy zastosowaniu anteny kierunkowej po stronie odbiorczej i ograniczeniu efektu antenowego jej toru zasilającego można uzyskać pewną dyskryminację szumów w porównaniu z sygnałem użytecznym. Wówczas minimalne natężenie pola oblicza się w następujący sposób:

$$E_{\min} = \bar{E}_z + A + C - G_s + G_z \quad \left[ \text{dB} / \left( \frac{\mu\text{V}}{\text{m}} \right) \right] \quad /5-4/$$

gdzie:  $G_s$  - zysk anteny odbiorczej w kierunku przychodzenia sygnału użytecznego w dB;

$G_z$  - zysk anteny odbiorczej w kierunku przychodzenia zakłóceń w dB.

Brak jest dotąd dostatecznie miarodajnych danych, które by pozwoliły uwzględniać kierunkowość przychodzenia zakłóceń

atmosferycznych. Jest wiadomo, że na świecie występuje kilka obszarów o szczególnie intensywnych wyładowaniach atmosferycznych. Należą do nich przede wszystkim: obszar morza Karaibskiego i dorzecza Amazonki, środkowa Afryka, Indie i Indonezja. Jednakże i na innych obszarach Ziemi generowane są nieustannie szumy atmosferyczne, aczkolwiek poziom ich jest na ogół mniejszy i maleje w miarę oddalania się od strefy międzyzwrotnikowej. W sprawozdaniu 322 CCIR jest powiedziane, iż wpływ kierunkowości anten odbiorczych na zakłócenia atmosferyczne wyraża się, jak się wydaje, zmiennością względnego ich poziomu na wejściu odbiornika w granicach 6 dB. W obliczeniach tras łączności jonosferycznej normalnie nie uwzględnia się kierunkowej dyskryminacji zakłóceń atmosferycznych, aczkolwiek przy projektowaniu rozpatruje się to zagadnienie przynajmniej w kategoriach jakościowych.

Nie uwzględnia się również dyskryminacji kierunkowej szumów galaktycznych ze względu na względne przemieszczanie się źródeł tych szumów wskutek obrotu Ziemi. Natomiast ewentualne obniżenie poziomu zakłóceń przemysłowych zależy od rozpoznania rozmieszczenia źródeł zakłóceń i jest możliwe w przypadku skupienia tych źródeł w jednym obszarze, poza sektorem objętym przez główny listek charakterystyki anteny odbiorczej.

Zasadnicza rola przypada kierunkowej antenie odbiorczej, jeśli chodzi o dyskryminację sygnałów zakłócających pochodzących od obcych radiostacji. Dlatego jest bardzo istotna w kierunkowych antenach odbiorczych minimalizacja listków bocznych i stosowanie kabli współosiowych, jako doprowadzeń do odbiorników.



Inna jeszcze i najważniejsza jest funkcja kierunkowej anteny odbiorczej w przypadku, gdy nad zakłóceniami zewnętrznymi dominują szumy własne odbiornika. Minimalne niezbędne natężenie pola sygnału użytecznego ogólnie wyraża się następującą zależnością od czułości odbiornika:

$$E_{\min} = U_w \cdot k \quad \left[ \frac{\mu V}{m} \right] \quad /5-5/$$

gdzie:  $U_w$  - czułość użytkowa odbiornika /napięciowa/ w  $\mu V$ ;

$k$  - współczynnik określający dla danej anteny stosunek natężenia pola do napięcia wejściowego odbiornika.

W praktyce można minimalne niezbędne natężenia pola obliczyć w następujący sposób:

$$E_{\min} = U_w - 10 \log \eta - G + 20 \log f - 33,1 \quad \left[ dB / \left( \frac{\mu V}{m} \right) \right] \quad /5-6/$$

gdzie:  $U_w$  - czułość użytkowa odbiornika w  $dB/\mu V$ ;

$\eta$  - sprawność układu antenowego z torem zasilającym;

$G$  - zysk anteny w stosunku do dipola półfalowego w wolnej przestrzeni w  $dB$ ;

$f$  - częstotliwość w  $MHz$ .

Czasami, zwłaszcza przy uzgodnieniach międzynarodowych, używane jest pojęcie chronionego napięcia pola. Jest to minimalne niezbędne natężenie pola zapewniające odbiór niezakłócony przez szumy w określonych odcinkach czasu, które powinno być chronione przed zakłóceniami interferencyjnymi.

Wartości chronionego natężenia pola dla niektórych rodzajów emisji można określić na podstawie Normy A2 IFRB [25].

## 6. ZAKRES CZĘSTOTLIWOŚCI ROBOCZYCH I NAJMNIEJSZA WYMAGANA MOC PROMIENIOWANA

### 6.1. Określanie LUF

Jak wiadomo, absorpcja niedewiacyjna maleje ze wzrostem częstotliwości /patrz p. 3.2./. Natężenie pola sygnału  $E_s$  rośnie więc w miarę zwiększania częstotliwości. Minimalne niezbędne natężenie pola sygnału użytecznego  $E_{min}$  w ogólnym przypadku jest też zmienne w funkcji częstotliwości. Wykreślając w funkcji częstotliwości przebiegi  $E_s$  i  $E_{min}$  znajdujemy punkt ich przecięcia  $E_s = E_{min}$  przy pewnej częstotliwości  $f = LUF$  /rys. 6-1/.

Wartość LUF jest zależna nie tylko od zmienności  $E_s$  i  $E_{min}$  w funkcji częstotliwości, ale również od poziomów tych wielkości, uwarunkowanych przez moc promieniowaną jeśli chodzi o poziom sygnału użytecznego oraz przez rodzaj emisji, jej parametry i wymagania jakościowe, jeśli chodzi o poziom minimalnego niezbędnego natężenia pola. Określając przebieg minimalnego niezbędnego natężenia pola w funkcji częstotliwości, trzeba brać pod uwagę wszystkie rodzaje zakłóceń. Często np. w zakresie mniejszych częstotliwości dominują szумы atmosferyczne, zaś powyżej 15 - 20 MHz na ogół odbiór jest ograniczony przez szумы galaktyczne lub szумы własne odbiornika. Wykres przebiegu  $E_{min}$  wygląda wówczas, jak na rys.6-2.

Jeżeli w zakłóceniach dominują szумы atmosferyczne, to LUF wyznacza się dla czterogodzinnych bloków czasowych, dla których podawane są wartości współczynnika szumów atmosferycznych. Poziom zakłóceń przemysłowych na ogół przyjmuje się,

jako stały w dłuższych okresach czasu. Brak jest również podstaw do różnicowania w czasie poziomu zakłóceń galaktycznych.

## 6.2. Zakres częstotliwości roboczych

Powszechnie przyjęto tak ustalać wartość dynamicznego współczynnika ochronnego, aby sygnał użyteczny był zabezpieczony przed zakłóceniami typu szumowego w ciągu 90% czasu, czyli z prawdopodobieństwem 0,9. Częstotliwość FOT zapewnia zabezpieczenie sygnału użytecznego przed zanikami granicznymi również z prawdopodobieństwem 0,9. Jeżeli zatem wykreśli się dobowe przebiegi LUF i FOT /rys. 6-3/, to częstotliwości zawarte między nimi zapewniają zabezpieczenie z prawdopodobieństwem co najmniej  $0,9 \times 0,9 = 0,81$  przed zakłóceniami typu szumowego i przed zanikami granicznymi jednocześnie. Można zatem uważać zakres częstotliwości pomiędzy FOT i LUF jako zakres najkorzystniejszych częstotliwości roboczych.

## 6.3. Określanie LRRP

Procedura określania LRRP oparta jest również na przebiegach w funkcji częstotliwości natężenia pola sygnału użytecznego i minimalnego niezbędnego natężenia pola. Natężenie pola sygnału użytecznego  $E_{s1}$  oblicza się dla mocy promieniowanej 1 kW. Sposób obliczania  $E_{min}$  jest identyczny, jak przy określaniu LUF. Jak podano w p. 6.2, zabezpieczenie sygnału użytecznego przed zakłóceniami z prawdopodobieństwem 0,9 ma miejsce, gdy  $E_{min} = E_s$ . Ale  $E_s = E_{s1} + /LRRP/$ . Stąd:

$$/LRRP/ = E_s - E_{s1} = E_{min} - E_s \quad \text{dB/kW/} \quad /6-1/$$

Obliczając LRRP w funkcji częstotliwości i powtarzając to obliczenie dla wszystkich bloków czasowych, otrzymujemy obraz rozkładu wartości LRRP w funkcji czasu i częstotliwości /rys. 6-4/. Ograniczając obliczenia do założonego z góry zakresu częstotliwości /np. zakresu częstotliwości nadajnika, zakresu obejmującego podzakresy regulaminowe/, możemy na podstawie powyższych obliczeń dobrać wartość mocy promieniowanej, którą odpowiednio dzielimy się na moc nadajnika i zysk anteny, z uwzględnieniem strat w torze zasilającym. Na podstawie rozpoznania rozkładu wartości LRRP w zależności od czasu i częstotliwości można zróżnicować moc promieniowaną w różnych sezonach i godzinach. Takie postępowanie jest celowe nie tylko z punktu widzenia oszczędności energii elektrycznej, ale przede wszystkim ze względu na zmniejszenie zakłóceń interferencyjnych dla innych relacji.

## 7. NIEZAWODNOŚĆ ŁĄCZNOŚCI

### 7.1. Pojęcie niezawodności łączności i prawdopodobieństwa służby

Niezawodność łączności<sup>1/</sup> definiuje się jako frakcję dni w miesiącu, w którym o danej godzinie i na danej częstotliwości można spodziewać się zadowalającej łączności. Pojęcie to, aczkolwiek ilościowo określane w kategoriach prawdopodobieństwa, nie jest równoznaczne z prawdopodobieństwem dotrzymania wartości współczynnika ochronnego w określonym procencie krótkiego okresu czasu.

<sup>1/</sup>Circuit reliability - niezawodność relacji, niezawodność łączności.

Prawdopodobieństwo zabezpieczenia służby<sup>1/</sup> definiuje się jako prawdopodobieństwo dotrzymania kryteriów jakościowych w określonym czasie działania łącząca. Na przykład, niezawodność łączności wynosi 0,95. To oznacza, że w 0,95 dni w miesiącu /tzn. w zaokrągleniu 28 dni/, o danej godzinie można spodziewać się istnienia łączności. Natomiast w ciągu krótkiego odcinka czasu współczynnik ochronny może być dotrzymany np. z prawdopodobieństwem 0,7. Prawdopodobieństwo zabezpieczenia służby zależy więc od przyjętej wartości współczynnika ochronnego dynamicznego.

Należy tu zauważyć, że jeśli postawi się wysokie wymagania odnośnie prawdopodobieństwa zabezpieczenia służby, to będzie musiała być odpowiednio duża wartość  $E_{\min}$ . Wtedy, o ile nie podwyższy się odpowiednio mocy promieniowanej lub nie ograniczy zakłóceń, zmniejszy się niezawodność łączności. Innymi słowy, jakość łączności będzie lepsza, ale niezawodność gorsza. łącząca jonosferyczne trzeba tak projektować, aby zachować rozsądną równowagę między jakością i niezawodnością.

## 7.2. Obliczanie niezawodności łączności

Metoda obliczania niezawodności łączności obejmuje:

1/ obliczenie MUF, 2/ obliczenie prawdopodobieństwa  $q_f$  zabezpieczenia sygnału użytecznego przed długookresowymi zanikami granicznymi, 3/ obliczenie rozkładu statystycznego stosunku sygnał/zakłócenia, 4/ określenie prawdopodobieństwa  $q_{s/N}$ , że stosunek sygnał/zakłócenia przewyższa wartość współczynnika

---

<sup>1/</sup>Service probability - prawdopodobieństwo służby, prawdopodobieństwo zabezpieczenia służby.

ochronnego dynamicznego, 5/ obliczenie iloczynu  $q_f \cdot q_{S/N}$

Prawdopodobieństwo  $q_f$  oblicza się na podstawie rozkładu wartości MUF z dnia na dzień o tej samej godzinie, stosując test "chi-kwadrat" [11]. Podobnie należy obliczać prawdopodobieństwo  $q_{S/N}$ . Do wykonania tych obliczeń potrzebna jest znajomość wartości odchyień standardowych w rozkładzie MUF oraz w rozkładach natężenia pola sygnału użytecznego i szumów. Niezawodność łączności znajdujemy jako iloczyn:

$$q = q_f \cdot q_{S/N} \quad /7-1/$$

Lucas i Haydon [10] podają nieco przybliżoną, ale i prostszą metodę obliczania niezawodności. Zakładają mianowicie /co nie jest ściśle/ rozkład normalny rozrzutu MUF dokoła jej mediany miesięcznej. Prawdopodobieństwo  $q_f$  oblicza się wówczas z całki Gaussa:

$$q_f = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^{\infty} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad /7-2/$$

gdzie:

$$z = \frac{|f - MUF_\beta|}{\sigma_{MUF_\beta}}$$

$f$  - częstotliwość w MHz.

$MUF_\beta$  - MUF dla fali wypromieniowanej pod kątem elewacji równym  $\beta$ , w MHz

$\sigma_{MUF_\beta}$  - odchylenie standardowe w rozkładzie MUF w MHz.

Wartości odchylenia standardowego określa się w przybliżeniu /zakładając skośność rozkładu równą 0/ z tablicy wartości de-

cyłowych MUF zamieszczonej w sprawozdaniu 252-2 CCIR, dla danej szerokości geograficznej, godziny sezonu i wskaźnika aktywności słonecznej.

Prawdopodobieństwo  $q_{S/N}$  oblicza się wg Lucasa i Haydona również z całki Gaussa:

$$q_{S/N} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad /7-3/$$

gdzie:

$$t = \frac{|A+C| - |\bar{S} - \bar{N}|}{\sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_N^2}}$$

$|A+C|$  - współczynnik ochronny dynamiczny w dB;

$\bar{S}$  - mediana poziomu sygnału na wejściu odbiornika w dB;

$\bar{N}$  - mediana poziomu szumu na wejściu odbiornika w dB;

$\sigma_S$  - odchylenie standardowe w rozkładzie poziomu sygnału w dB;

$\sigma_N$  - odchylenie standardowe w rozkładzie poziomu szumów w dB.

Wartości  $\bar{N}$  i  $\sigma_N$  określa się na podstawie sprawozdania 322 CCIR, zaś  $\sigma_S$  - na podstawie Dodatku C w [10].

Opisana metoda nadaje się do stosowania zarówno dla warstwy F2, jak i dla warstw E, E<sub>s</sub> i F<sub>1</sub> pod warunkiem dysponowania odpowiednimi danymi. MUF dla warstwy E wykazuje bardzo małe wahania, wobec czego można przyjmować dla  $f > E_{MUF}$   $q_f = 0$ , a dla  $f < E_{MUF}$   $q_f = 1$ .

## 8. WPŁYW WIELODRGOWOŚCI SYGNAŁU NA WARUNKI ŁĄCZNOŚCI JONOSFERYCZNEJ

Wielodrogowość sygnału nabiera bardzo istotnego znaczenia przy dużych szybkościach przesyłania informacji. Opóźnienia sygnałów przychodzących do anteny odbiorczej po dłuższych trajektoriach powodują przekłamania w łączności dalekopisowej i innych systemach pracujących z dużą szybkością przesyłania informacji.

W instrukcji IZMIRAN-u podany jest wzór na obliczenie czasu przebiegu sygnału przy propagacji jonosferycznej:

$$t = 42,4 \frac{\sin d}{\cos/d+\beta/} \quad [\text{ms}] \quad /8-1/$$

gdzie:

$d$  - długość trasy określona kątowno /kąt odpowiadający stosunkowi długości skoku fali do długości wielkiego koła kuli ziemskiej/,

$\beta$  - kąt elewacji.

Obliczając wg wzoru /8-1/ czasy przebiegu sygnału po dwóch trajektoriach, możemy znaleźć opóźnienie, jako różnicę tych czasów.

Jednym ze sposobów wyeliminowania wielodrogowości sygnału jest praca w pobliżu MUF. Wówczas bowiem fala przechodzi sposobem odpowiadającym MUF dla trasy, zaś wszystkie inne sposoby przejścia fali nie są możliwe, gdyż częstotliwość robocza przewyższa częstotliwości graniczne poszczególnych modów. Można również zmniejszać skutki wielodrogowości przez stoso-



wanie anten nadawczych i odbiorczych o stosunkowo wąskich głównych listkach charakterystyki pionowej. Sygnał opóźniony przestaje być szkodliwy, jeżeli jego poziom jest dostatecznie niższy od poziomu sygnału wyprzedzającego.

## 9. OBLICZANIE TRAS ŁĄCZNOŚCI JONOSFERYCZNEJ DLA RÓŻNYCH SŁUŻB RADIOKOMUNIKACYJNYCH

### 9.1. Radiokomunikacja stała

Ośrodki odbiorcze radiokomunikacji stałej normalnie lokalizuje się w miejscach, gdzie poziom zakłóceń przemysłowych jest niski. Ośrodki takie są na ogół wyposażone w anteny kierunkowe i urządzenia do odbioru zbiorczego dla obsługi dalekosiężnych relacji. W tych warunkach minimalne niezbędne natężenie pola jest zazwyczaj określone przez szumy atmosferyczne w zakresie częstotliwości do kilkunastu MHz, a powyżej przez szumy galaktyczne, rzadziej przez czułość odborników.

W ramach projektowania ośrodków radiokomunikacji stałej, nowych relacji lub nowych anten dla ośrodków już istniejących, przeprowadza się obliczenia co najmniej dla 4 quasi-ekstremalnych warunków jonosferycznych. Na podstawie obliczeń MUF i LUF określa się zakresy częstotliwości, które powinny być pokryte przez nadajniki i anteny nadawcze. Przydatne są obliczenia LRRP, na podstawie których wnioskuje się, jakie są potrzebne moce nadajników i zyski anten. Ponieważ do obliczeń LUF jest potrzebne założenie wartości mocy promieniowanej, wnioskowanie o ostatecznych wartościach mocy i zysków może odbywać się również w oparciu o wyniki obliczeń

LUF. Obliczenia LUF muszą być jednak powtarzane, jeżeli wstępne założenia wartości mocy promieniowanej nie okazały się trafne.

Do służby stałej zalicza się również takie relacje profesjonalne, które wprawdzie łączą ze sobą dwa punkty stałe, ale ze względów organizacyjnych lokalizacje tych punktów, względnie jednego z nich, nie mogą być wybrane pod kątem widzenia minimalizacji zakłóceń oraz brak jest miejsca na budowę anten kierunkowych. W takich warunkach minimalne niezbędne natężenie pola może być określone raczej przez zakłócenia przemysłowe, niż przez zakłócenia atmosferyczne i galaktyczne. Zakres i bieg obliczeń jest zasadniczo taki sam jak powyżej opisano, z tą różnicą, że inaczej oblicza się  $E_{\min}$ .

Jeżeli chce się uzyskać przejrzysty obraz spodziewanych warunków łączności jonosferycznej na wybranych częstotliwościach, korzystne jest obliczenie niezawodności łączności na tych częstotliwościach.

## 9.2. Radiokomunikacja ruchoma morska

Po stronie stacji nabrzeżnej, zarówno w ośrodku nadawczym jak i odbiorczym, mogą i powinny być spełnione wszelkie warunki optymalnej lokalizacji, jeżeli chodzi o możliwości rozmieszczenia anten kierunkowych, odbiór zbiorczy i minimalizację zakłóceń przemysłowych. Warto przy tym nadmienić, że relacje dalekosiężne w pasmach u i z wcale nie wymagają lokalizacji ośrodków stałych na wybrzeżu i termin stacja nabrzeżna jest tu zwyczajowo umowny.

Po stronie stacji pokładowej nie ma, oczywiście, dostatecznych warunków na instalacje anten kierunkowych. Na wielkich jednostkach pływających można by nawet niekiedy znaleźć miejsce, ale z natury rzeczy azymut anteny stałej byłby zawsze zależny od kursu statku. Można więc brać pod uwagę anteny obrotowe, co jest do pomyślenia przy rozwiniętej obecnie technice anten logarytmiczno-periodycznych, ale ze względów konstrukcyjnych w warunkach jednostki pływającej bardzo utrudnione<sup>1/</sup>. Należy zatem zakładać w obliczeniach trasy brak zysku anteny. Jeżeli na statku przedsięwzięto wszelkie środki zapobiegawcze, to można przyjąć, że zakłócenia typu przemysłowego są do pominięcia. Warunki odbioru pod tym względem są więc zbliżone do warunków na stacji nabrzeżnej, jedynie z powodu braku kierunkowości anteny wzrasta rola czułości odbiornika. Ponieważ trasy rejsów w znacznym stopniu przechodzą przez obszary tropikalne, należy liczyć się z wysokim poziomem zakłóceń atmosferycznych na stacji pokładowej. Z tego powodu wskazane jest obliczać trasy radiokomunikacji morskiej przede wszystkim w kierunku ląd-statek, a następnie sprawdzać w kierunku odwrotnym.

Obliczenia trasy łączności jonosferycznej w radiokomunikacji morskiej prowadzi się dla wybranych punktów reprezentatywnych na liniach regularnych oraz na najbardziej uczęszczanych szlakach żeglugi trampowej. Zakres obliczeń jest podobny jak dla radiokomunikacji stałej.

---

<sup>1/</sup>Ostatnio są czynione próby zastosowania anteny pokładowej o charakterystyce kierunkowej sterowanej elektrycznie. Antena ta została opracowana w Oddziale Wrocławskim Instytutu łączności.

### 9.3. Radiofonia krótkofalowa

Charakterystyczną cechą radiofonii, w odróżnieniu od radiokomunikacji stałej i ruchomej, jest jednostronne nadawanie sygnału w celu pokrycia programem obszaru docelowego, zazwyczaj położonego poza granicami własnego kraju. W radiofonii krótkofalowej powszechnie przyjęta się, niestety zresztą z obiektywnego punktu widzenia, zasada równoległego nadawania tego samego programu na kilku podzakresach fal dekametrowych. Prognozowanie eksploatacyjne w tej sytuacji traci na znaczeniu. Tym niemniej zachowuje swoją niezbędną rolę prognozowanie warunków łączności jonosferycznej na etapach planowania rozwojowego służby i projektowania ośrodków nadawczych, ich rozbudowy i modernizacji.

Ponieważ w radiofonii krótkofalowej chodzi o doprowadzenie programu do możliwie największej liczby słuchaczy, uwaga projektanta skierowana jest przede wszystkim na wielkie miasta i ośrodki przemysłowe w obszarach docelowych. W związku z tym często przyjmuje się w obliczeniach jako punkt reprezentatywny stolicę kraju docelowego lub inne wielkie aglomeracje. Parametry stacji nadawczej dobiera się jednak w taki sposób, aby w całym obszarze panowało natężenie pola większe niż minimalnie niezbędne.

Audycje dla poszczególnych obszarów są różnej długości. Często są to półgodzinne lub godzinne odcinki programu. Istnieje wtedy możliwość dobrania optymalnych częstotliwości w oparciu o obliczenia niezawodności, jeżeli nadawania nie są zwielokrotnione na kilku podzakresach. Dla długich tras można na drodze obliczeniowej znaleźć godziny optymalnych warun-

ków propagacji. Jednakże nie zawsze mogą one być wykorzystane jako nieodpowiednie z uwagi na tryb życia słuchaczy.

Przy obliczaniu tras łączności jonosferycznej dla radiofonii krótkofalowej zakłada się po stronie docelowej parametry statystycznej instalacji odbiorczej. Dla punktu reprezentatywnego, na który skierowana jest główna wiązka promieniowania anteny nadawczej, przyjmuje się na ogół wysoki poziom zakłóceń przemysłowych, taki jak dla centrów dużych miast. Trzeba mieć na uwadze, że słuchacz dysponuje najczęściej obecnie odbiornikiem tranzystorowym z anteną ferrytową, zwłaszcza w krajach przemysłowo zaawansowanych. Słuchacz w rejonie wiejskim może mieć odbiór ograniczony przez zakłócenia atmosferyczne lub czułość odbiornika. Minimalne niezbędne natężenie pola w rejonie wiejskim jest więc na ogół znacznie mniejsze niż w dużych miastach. Charakterystyki promieniowania anten nadawczych dla radiofonii krótkofalowej są zazwyczaj w płaszczyźnie poziomej /ściśle: w płaszczyźnie kąta elewacji/ na tyle szerokie, aby mogły objąć obszar docelowy. Punkt reprezentatywny często jest przesunięty względem środka tego obszaru. Obliczenia trasy powinny być prowadzone zarówno dla punktu reprezentatywnego, jak i dla krańców obszaru docelowego. Jeżeli obliczenia są wykonywane na maszynie matematycznej, to pożądane jest je przeprowadzić dla szeregu punktów wybranych na obszarze docelowym w taki sposób, aby uzyskać przybliżony przestrzenny rozkład niezawodności o danej godzinie i na danej częstotliwości.

Należy jeszcze wspomnieć o poważnej negatywnej roli zakłóceń interferencyjnych w radiofonii krótkofalowej. Uwzględnienie tych zakłóceń na drodze obliczenia natężenia pola sy-

gnałów zakłócających jest utrudnione, gdyż na ogół nie dysponuje się dostatecznie dokładnymi danymi stacji zakłócających. Przy pewnych uproszczeniach można by takie obliczenia też wykonywać, oczywiście przy pomocy ETO ze względu na ich ogromną pracochłonność.

#### WYKAZ LITERATURY

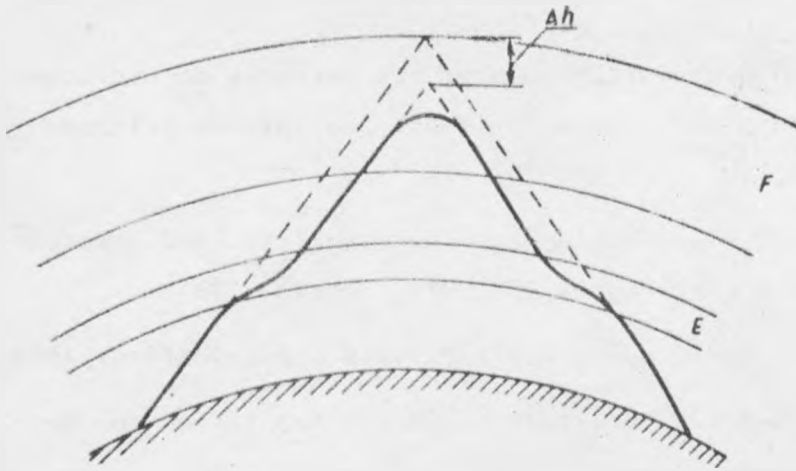
1. NBS: Ionospheric radio propagation. National Bureau of Standards Circular 462, Washington, 1948.
2. Laitinen P.O., Haydon G.W.: Analysis and prediction of sky-wave field intensities in the high frequency band. Technical Report 9. U.S. Army Signal Radio Propagation Agency, Ft. Monmouth, N.J., 1950.
3. IFRB: Technical Standards B-1. UIT, Geneva, 1955.
4. Kazancew A.N.: Razwitiye metoda rasčota napriazennosti električeskogo pola kōrotkich radiowołn. Trudy IRE AN SSSR, 1956 nr 2, 134.
5. Kowalewskaja E.M., Kerblaj T.C.: Rasčot rasstojanija skačka, MPCz, ugłow prichoda radiowołny s učotom gorizontalnoj neodnorodnosti jonosfery, instrukcja, IZMIRAN, Moskwa, 1971.
6. Rawer K.: Calculation of sky-wave field strength. Wireless Engineer, 29, 287, 1952.
7. Piggot W.R.: The calculation of the median sky-wave field strength in tropical regions. Radio Research Special Report nr 27 H.M.S.O. Londyn, 1959.

8. Beckmann B.: Notes on the relationship between the receiving-end field strength and the limits of the transmission frequency range MUF-LUF. NTZ-CJ, 6, 37-47, 1967.
9. CCIR: CCIR Interim Method for Estimating Sky-Wave Field Strength and Transmission Loss at Frequencies Between the Approximate Limits of 2 and 30 MHz. Report 252-2 CCIR, UIT, Geneva, 1970.
10. Lucas D.L., Haydon G.W.: Predicting Statistical Performance Indexes for High Frequency Ionospheric Telecommunications Systems. ESSA Tech. Report IER 1-IISA 1, Boulder, 1966.
11. Barghausen A.F.: Predicting Long-term Operational Parameters of High-Frequency Sky-Wave Telecommunication Systems. ESSA Tech. Report ERL 110-ITS 78, Boulder, 1969.
12. CCIR: Atlas of ionospheric characteristics. Report 340, UIT, Geneva, 1967.
13. Shimazaki T.: World-wide daily variations in the height of the maximum electron density of the ionospheric F2 layer. J. Radio Res. Lab. Japan, No 7, 2, 85-97, 1955.
14. Leftin M.: Numerical maps of monthly median h'F for solar cycle minimum and maximum, 1969 /niepublikowane/.
15. Bibl K. i inni: An improved method for the calculation of the field-strength of waves reflected by the ionosphere. Nature, 169, 147-150, 1952.
16. Herbstreit J.W., Joachim M. et Glinz C.: Un programme d'ordinateur permettant la prevision a long terme des

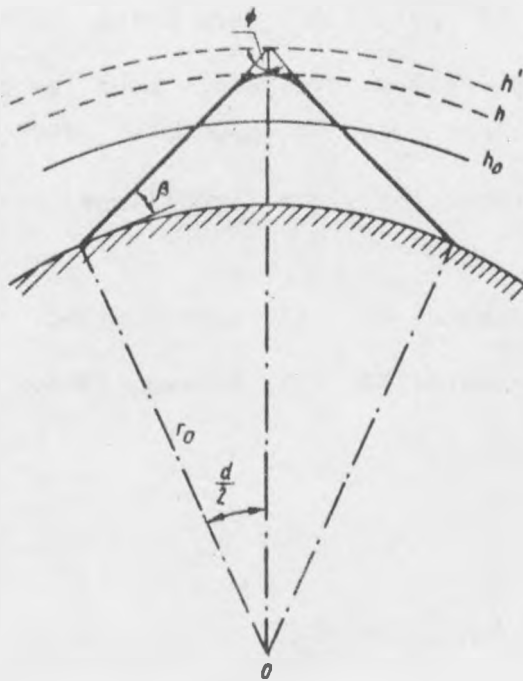
parametres d'exploitation pour les services de radiocommunication a ondes decametriques. Journal des telecommunications, vol. 37, 696-703, 10/1970.

17. CCIR: World Distribution and Characteristics of Atmospheric Radio Noise. Report 322, UIT, Geneva, 1963.
18. Zacharisen D.H., Jones W.B.: Private Communication. 1969.
19. Montgomery A.C.: Amplitude and Angle Modulation for Narrow Band Communication. PIRE, No 2, 453, 1954.
20. Hahn S.: Podstawy Radiokomunikacji.
21. CCIR: Largeurs de bande et rapports signal/bruit dans l'ensemble du circuit. Avis 339-1, New Delhi, 1970.
22. CCIR: Marges contre les evanouissements pour les diverses classes d'emission. Avis 340, New Delhi, 1970.
23. CCIR: Rapport de protection signal/brouillage. Avis 240-1, New Delhi, 1970.
24. IFRB: Technical Standards A1. UIT, Geneva, 1968.
25. IFRB: Technical Standards A2. UIT, Geneva, 1968.

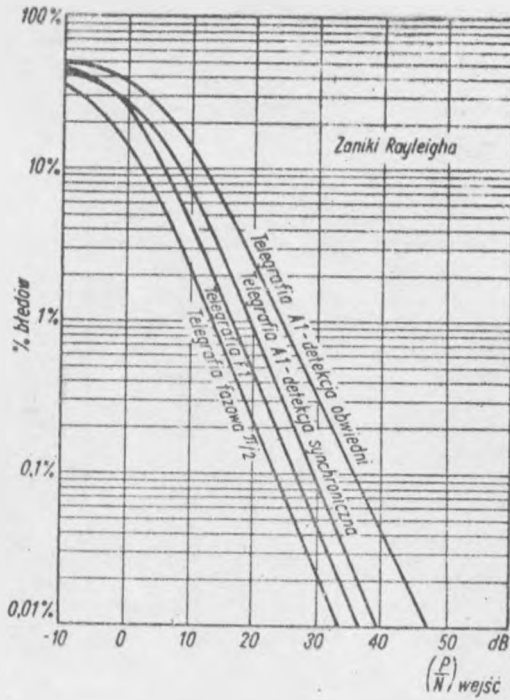




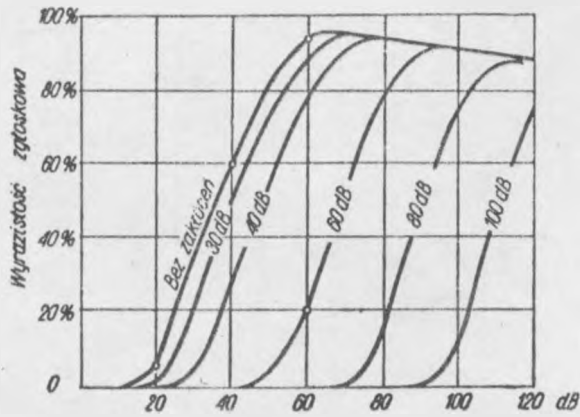
Rys. 3-1. Ugięcie trajektorii fali w obszarze E



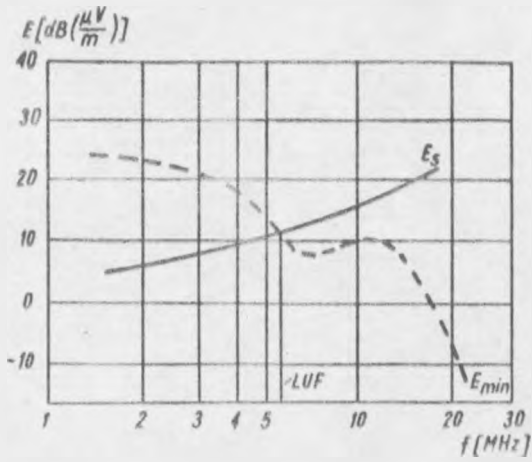
Rys. 3-2. Załamanie fali w jednowarstwowym modelu jonosfery



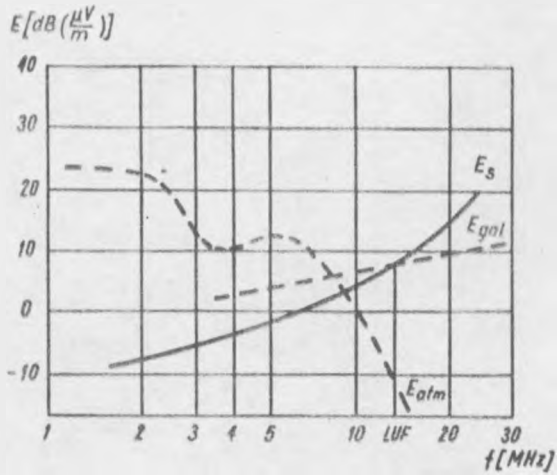
Rys. 5-1. Charakterystyki szumowe telegrafii przy zanikach wg rozkładu Rayleigha



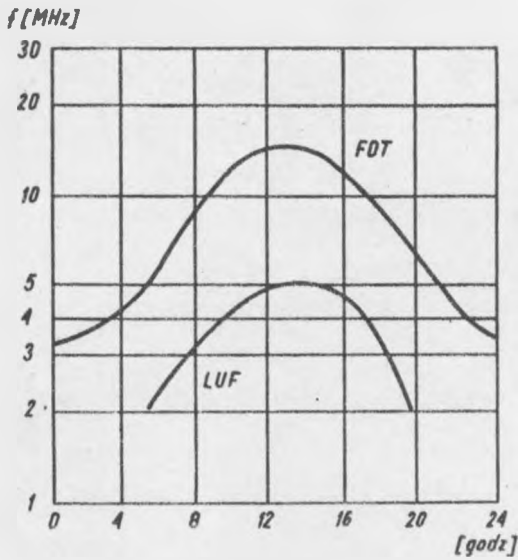
Rys. 5-2. Zależność wyrazistości zgłoszkowej od głośności sygnału i poziomu szumu w telefonii



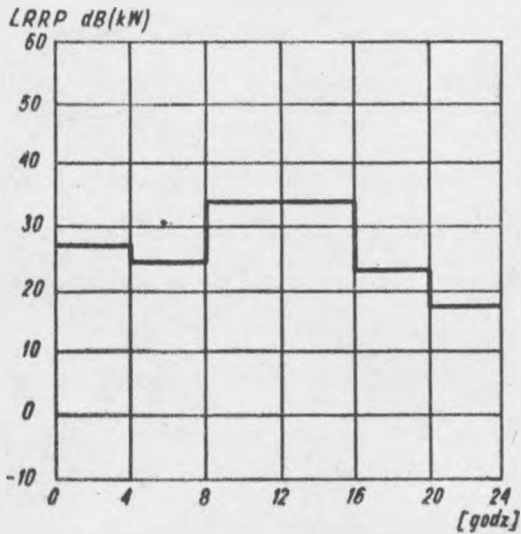
Rys. 6-1. Wyznaczenie LUF przy szumach atmosferycznych



Rys. 6-2. Wyznaczenie LUF z uwzględnieniem szumów atmosferycznych i galaktycznych



Rys. 6-3. Zakres częstotliwości roboczych FOT - LUF



Rys. 6-4. Rozkład wartości LRRP w ciągu doby przy częstotliwościach roboczych optymalnych

Andrzej Dusiński

## MAPY NUMERYCZNE CHARAKTERYSTYK JONOSFERYCZNYCH

### 1. WPROWADZENIE

Jednym z założeń opracowania map charakterystyk jonosfery było wykorzystanie ich do rozwiązywania niektórych zagadnień propagacji krótkofalowej za pomocą elektronicznych maszyn cyfrowych /emc/, m.in. do obliczeń prognostycznych.

Opracowane mapy spełniają te założenia i noszą nazwę map numerycznych charakterystyk jonosfery. Nazwa ta wynika z faktu wykorzystania metod numerycznych do analizy danych, na podstawie których opracowano wspomniane mapy, oraz z faktu istnienia tablic współczynników numerycznych jako danych wejściowych dla programów obliczeniowych.

Przez mapy numeryczne charakterystyk jonosfery rozumie się funkcję  $\Omega / \lambda, \theta, T, m, R_{12} /$  łącznie z tablicami zawierającymi zbiór numerycznych współczynników związanych z rozkładem przestrzenno-czasowym określonego parametru jonosfery, gdzie:  $\lambda$  - szerokość geograficzna,  $\theta$  - długość geograficzna,  $T$  - czas uniwersalny,  $m$  - numer miesiąca i  $R_{12}$  - wskaźnik aktywności słonecznej.

W związku z tym, że w praktyce każdy z parametrów jonosfery ma dla każdego miesiąca osobne tablice numerycznych współczynników dla dwóch różnych wartości wskaźnika aktywności słonecznej  $R_{12}$ , przez nazwę "mapa numeryczna" będzie określana dalej funkcja trzech zmiennych  $\Omega / \lambda, \theta, T /$  łącznie z

dwoma tablicami współczynników numerycznych dla danego miesiąca.

W [1] opublikowano tablice współczynników numerycznych reprezentujących dwa parametry jonosfery: częstotliwość krytyczną  $f_oF_2$  warstwy  $F_2$  i współczynnik  $M/3000/F_2$ . Należy przy okazji wspomnieć, że przedstawione w [1] mapy konturowe  $f_oF_2$  i  $M/3000/F_2$  powstały z map numerycznych w wyniku obliczeń na emc.

Oprócz wspomnianych wyżej współczynników numerycznych reprezentujących  $f_oF_2$  i  $M/3000/F_2$  istnieją również tablice współczynników numerycznych innych parametrów jonosfery [2,3].

Istniejące mapy numeryczne są wykorzystywane między innymi w programach CCIR przeznaczonych do prognozowania za pomocą emc parametrów jonosfery i sygnałów oraz obliczeń systemów antenowych dla potrzeb służb łączności radiowej [2,4].

W Instytucie łączności wykorzystywane są mapy numeryczne  $f_oF_2$  i  $M/3000/F_2$  w programach do obliczeń takich parametrów, jak MUF, FOT, kąt elewacji, natężenie pola sygnału w miejscu odbioru [5].

## 2. RYS HISTORYCZNY

Pierwsze programy prognozowania parametrów łączności radiowej na falach krótkich za pomocą emc zostały opracowane w USA i były wykorzystywane już w 1957 roku [3]. Natomiast po raz pierwszy zastosowano współczynniki numeryczne reprezentujące przestrzenno-czasowy rozkład parametrów jonosfery w programie opracowanym w Central Radio Propagation Laboratory w National Bureau of Standards w Boulder. Pierwsza publikacja na temat opracowania i zastosowania współczynników nume-

rycznych charakterystyk foF2 ukazała się w 1960 roku [6].

Jej pojawienie poprzedzone było aktywnymi studiami, których wyniki przedstawiane były również przez CCIR [7,8]. Określały one wymagania, jakie powinny spełniać mapy charakterystyk jonosfery oraz jakich trudności należy się spodziewać przy ich opracowaniu.

Mapy charakterystyk jonosfery powinny w sposób ciągły reprezentować zmiany poszczególnych parametrów jonosfery w trójwymiarowej przestrzeni o współrzędnych  $\lambda, \theta, t$ , tzn. szerokości geograficznej, długości geograficznej i czasu. Zachowanie ciągłości zmian we wspomnianej przestrzeni każdego z parametrów jonosfery wynika z ciągłości zmian procesów fizycznych zachodzących w jonosferze. Rozróżnia się dwa rodzaje procesów fizycznych zachodzących w czasie, a mianowicie zmiany krótkotrwałe - godzinne zmiany w czasie doby, których nazwa pochodzi od częstotliwości wykonywanych pomiarów, oraz zmiany długotrwałe - zmiany sezonowe i związane z cyklem aktywności słonecznej. Byłoby również pożądane, aby mapy charakterystyk parametrów jonosfery uwzględniały nie tylko ich zmiany w czasie, ale również zmiany w przestrzeni związane z efektami ziemskiego pola magnetycznego.

Materiał wyjściowy do opracowania map charakterystyk jonosfery stanowią wyniki pionowych sondowań jonosfery, przeprowadzane przez stacje jonosferyczne rozmieszczone na całej kuli ziemskiej. Nierównomierne rozmieszczenie tych stacji stanowiło jedną z pierwszych poważnych trudności napotkanych przy opracowywaniu map numerycznych. Wykorzystanie do reprezentacji charakterystyk jonosfery w skali światowej typowej metody stosowanej do reprezentacji zmian geograficznych i meteo-

rologicznych, a mianowicie metody analizy sferycznych harmonicznych [9,10,11], wymagało posiadania regularnej siatki pozycji punktów pomiarowych. Trudność tę pokonano rysując ręcznie, na podstawie posiadanych danych, mapy konturowe charakterystyk danego parametru. Interesujące dla analizy wartości parametru odczytywano w węzłach regularnej siatki naniesionej na tę mapę konturową, w układzie dwuwymiarowej przestrzeni o współrzędnych prostokątnych  $\lambda, \theta$ . Metoda okazała się niedokładną z powodu istnienia możliwości dwukrotnego generowania błędów, a mianowicie przy rysowaniu i przy odczytywaniu. Poza tym była to metoda bardzo niewygodna ze względu na dużą pracochłonność. Lepszą metodą analizy danych okazała się metoda wykorzystująca funkcje ortogonalne [12] na zbiorze punktów dwuwymiarowej przestrzeni, stanowiących pozycje geograficzne stacji jonosferycznych. Dokładny opis metody wykorzystywanej przy opracowywaniu map jonosferycznych podany został przez Jonesa i Galleta w 1962 roku [9].

Niektóre elementy wspomnianej metody uległy z czasem pewnym modyfikacjom, wynikającym przede wszystkim z doświadczeń uzyskanych przy tworzeniu pierwszych map [13]. Jedną z takich modyfikacji było wprowadzenie zmodyfikowanej inklinacji magnetycznej jako argumentu pewnych funkcji występujących w funkcjach reprezentujących zmiany geograficzne, zwanych dalej "funkcjami współrzędnych" i oznaczonych przez  $G_k / \lambda, \theta /$ . Drugą istotną zmianą było wprowadzenie czasu uniwersalnego. Pierwsze współczynniki numeryczne reprezentujące charakterystyki parametrów jonosfery były bowiem obliczane jako funkcje czasu lokalnego.

Do opracowania pierwszych współczynników numerycznych foF2



i M/3000/F2 wykorzystano dane pomiarowe w postaci miesięcznych median z lat 1954 - 1958, tzn. z lat, kiedy zmiany aktywności słonecznej przebiegały od najmniejszej do maksymalnej. Każdy z parametrów foF2 i M/3000/F2 posiada dla każdego miesiąca po dwie tablice współczynników numerycznych - jedna dla wskaźnika aktywności słonecznej  $R_{12} = 0$ , druga dla  $R_{12} = 100$ . Obliczenie współczynników numerycznych dla wartości z przedziału 0-150 następuje przy założeniu liniowej interpolacji i extrapolacji wskaźnika aktywności słonecznej. Z tego samego przedziału czasu wykorzystano dane dotyczące zmian krytycznej częstotliwości warstwy sporadycznej E. Do opracowania współczynników numerycznych foEs wzięto wyniki sondowań z każdego miesiąca w roku o najmniejszej aktywności słonecznej 1954 oraz z każdego miesiąca roku o maksymalnej aktywności słonecznej 1958 r. Powstały trzy oddzielne tablice współczynników numerycznych reprezentujących górne decyle, medianę i dolne decyle foEs.

Numeryczne współczynniki reprezentujące częstotliwość krytyczną foE warstwy E zostały opracowane na podstawie miesięcznych median tego parametru pochodzących z innego przedziału czasu, a mianowicie z lat 1958 - 1964. Przedział ten charakteryzował się również maksymalnymi zmianami aktywności słonecznej w zakresie od maksimum w 1958 roku do minimum w 1964 roku. Współczynniki numeryczne opracowano dla dwóch wartości wskaźnika aktywności słonecznej  $R_{12} = 10$  i  $R_{12} = 150$ . Wartości pośrednie są liczone, podobnie jak dla foF2 i M/3000/F2, przy założeniu liniowej interpolacji.

Oprócz wymienionych wyżej charakterystyk jonosfery zostały opracowane przy użyciu opisanej w [9] metody charaktery-

styki innych parametrów jonosfery, takich jak wysokości pozorowanej  $h'F$  warstwy F, maksymalnej gęstości elektronowej  $N_{max}$ , wysokości maksymalnej gęstości elektronowej  $H_{max}$ , czwartej części grubości warstwy [3,14].

### 3. CHARAKTERYSTYKA DANYCH

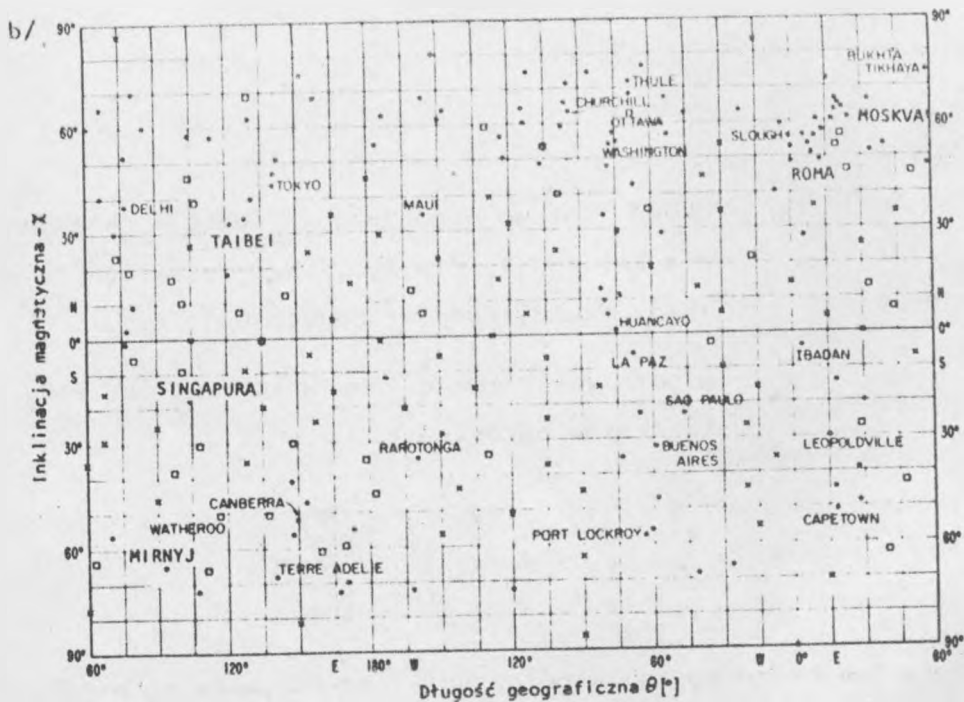
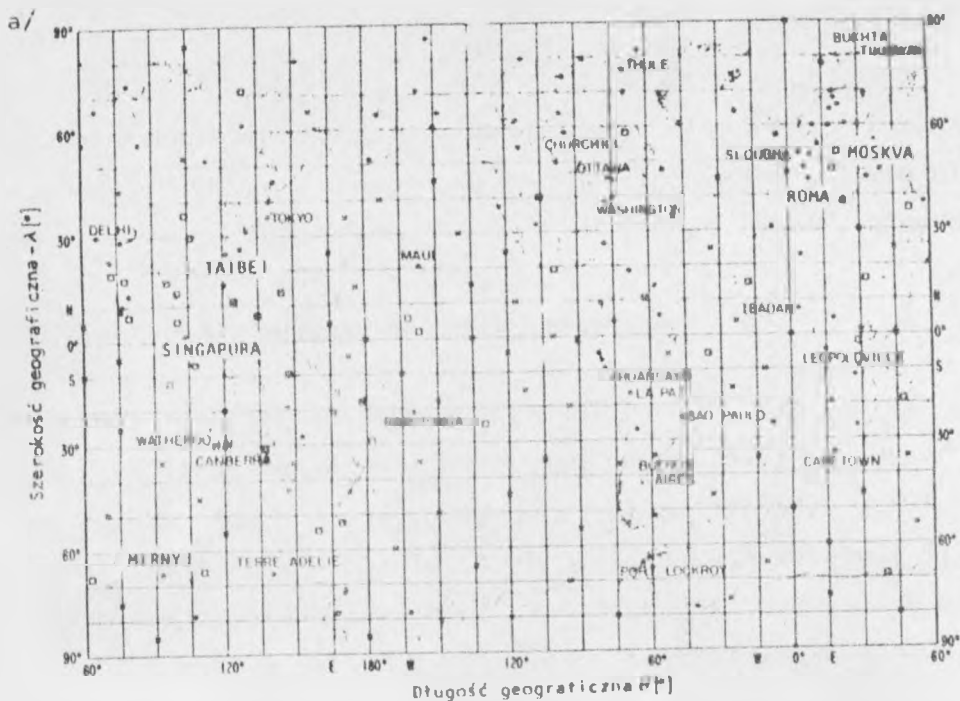
Dane, które wykorzystywano do analiz przeprowadzanych w trakcie tworzenia współczynników numerycznych, były w większości przypadków medianami miesięcznymi wyników pionowych sondowań jonosfery. Wyniki tych sondowań pochodziły od wszystkich stacji jonosferycznych pracujących na świecie w określonym czasie. Dane te są obciążone wieloma błędami pochodzącymi z różnych źródeł, a które podobnie jak dla analogowego zakłóconego sygnału będą dalej nazwane "szumami".

Podstawowymi źródłami szumów były błędy związane z niedokładnością aparatury pomiarowej, błędy wynikające z zaokrągleń danych przy ich rejestracji oraz zakłócenia wynikające z fluktuacji wytworzonych przez zjawiska fizyczne zachodzące w jonosferze. Dużymi niedogodnościami z punktu widzenia stosowanych metod były: nierównomierne rozmieszczenie stacji jonosferycznych w dwuwymiarowej przestrzeni oraz ciągłe zmiany liczby tych stacji i zmiany ich położenia. Nierównomierne rozmieszczenie stacji jonosferycznych stanowiło również źródło szumów wytwarzanych w procesie analizy danych. Podstawowym zadaniem było zatem znalezienie metody eliminującej te szумы i dającej możliwość analitycznego przedstawienia charakterystyk jonosfery. Jednocześnie metoda powinna wykorzystywać dane pochodzące bezpośrednio z pomiarów. Rozwiązaniem tego zadania jest aproksymacja średniokwadratowa funkcji o wartościach znanych

jedynie na dyskretnym zbiorze nierówno oddalonych argumentów  $x = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$  gdzie  $N$  jest liczbą punktów pomiarowych. Chodzi tu o metodę najmniejszych kwadratów, która pozwala otrzymać z zakłóconych wartości funkcji "gładką" funkcję przybliżającą [15,16].

Dane, które wykorzystano do analizy, w wyniku której powstały współczynniki numeryczne, podzielono na trzy klasy A, B i C. Dane klasy A to wyniki pomiarów stacji jonosferycznych. Dane klasy B otrzymano z charakterystyk jonosfery na drodze interpolacji w czasie przeprowadzonych dla każdej stacji, od której nie otrzymano danych dla danego miesiąca, a która była czynna w rozpatrywanym przedziale czasu wcześniej lub też później. Dane B są więc wynikami interpolacji w czasie dla punktów o ustalonych współrzędnych. Dane klasy C są wynikami interpolacji w przestrzeni dla ustalonego czasu w celu uzupełnienia zbioru danych w wybranych punktach tych rejonów kuli ziemskiej, w których nie było stacji jonosferycznych, jak np. ocean. Rys. na str.87 przedstawia dla przykładu mapę stacji reprezentowanych przez dane klasy A i B oraz punktów reprezentowanych przez dane klasy C /marzec 1958 r./. W związku z powyższym proces wytwarzania współczynników numerycznych danego parametru jonosfery składał się z dwóch rodzajów analiz danych. Pierwszą analizą, zwaną dalej "analizą wstępną", była analiza danych należących do klas A i B, której celem było wytworzenie danych klasy C. Natomiast druga analiza, zwana dalej "analizą właściwą", której celem było wytworzenie współczynników charakterystyki danego parametru jonosfery, wykorzystywała dane wszystkich trzech klas.

Obie analizy wykorzystują metodę najmniejszych kwadratów,



• — dane klasy A   □ — dane klasy B   x — dane klasy C

Porównanie map stacji jonosferycznych z marca 1958 r. w układzie współrzędnych  $\lambda, \theta$  rys. a i  $X, \theta$  rys. b

której krótki opis będzie podany w następnym rozdziale w celu przedstawienia niektórych oznaczeń i określeń używanych w dalszych opisach.

#### 4. METODA ANALIZY DANYCH

Niech  $f/x/$  będzie funkcją przedstawiającą rzeczywistą charakterystykę danego parametru jonosfery. Jeśli  $\{x_i\} /i = 1, 2, \dots, N/$  jest zbiorem punktów, np. o współrzędnych stacji jonosferycznych a  $\{y_i\}$  jest zbiorem wartości tej funkcji zmierzonych w tych punktach, to przybliżeniem średniokwadratowym funkcji  $f/x/$  na zbiorze  $\{x_i\}$  będzie wyrażenie:

$$Y_K/x/ = \sum_{k=0}^K a_k \varphi_k \quad /4-1/$$

gdzie:

$\varphi_k/x/$  - układ liniowo niezależnych funkcji określonych dla każdego  $x_i /i=1, 2, \dots, N/$ ; tutaj będzie to zbiór funkcji współrzędnych  $G/\lambda, /, \theta$

$a_k$  - współczynniki określone w ten sposób, żeby suma kwadratów odchyłeń  $R_i$

$$E_k = \sum_{i=1}^N \left[ y_i - Y_i/x_i/ \right]^2 = \sum_{i=1}^N R_i^2 \quad /4-2/$$

była jak najmniejsza; współczynniki te nazywane są współczynnikami rozwinięcia funkcji  $f/x/$  względem układu funkcji  $\{\varphi_k/x/\}$ . Dla wygody rachunków zakłada się, że funkcje  $\{\varphi_k\}$  są ortogonalne na zbiorze  $\{x_i\}$ ,  $/i=1, 2, \dots, N/$ , tzn. że ilo-

czyn skalarny tych funkcji zdefiniowany jako

$$\langle \varphi_m, \varphi_n \rangle = \sum_{i=1}^N \varphi_m(x_i) \varphi_n(x_i), \quad /4-3/$$

$$/m, n = 1, 2, \dots, K/$$

jest równy

$$\langle \varphi_m, \varphi_n \rangle = 0, \text{ dla } m \neq n \quad /4-4/$$

Jako przykład układu funkcji ortogonalnych na zbiorze równo-oddalonych punktów  $\{x_i\}$ ,  $/i=1, 2, \dots, N/$  z domkniętego przedziału  $[-180^\circ, 180^\circ]$  stanowią funkcje trygonometryczne

$$1, \sin /kx_i/, \cos /kx_i/, \quad /k = 1, 2, \dots, K/, \quad /4-5/$$

ponieważ:

$$\sum_{i=1}^N \sin/jx_i/ \sin/kx_i/ = \frac{N}{2} /\delta_{jk} - \delta_{j0} \delta_{k0}/ \quad /4-6/$$

$$\sum_{i=1}^N \cos/jx_i/ \cos/kx_i/ = \frac{N}{2} /\delta_{jk} + \delta_{j0} \delta_{k0}/ \quad /4-7/$$

$$\sum_{i=1}^N \sin/jx_i/ \cos/kx_i/ = 0 \text{ dla wszystkich } j \text{ i } k, \quad /4-8/$$

gdzie:  $\delta_{jk}$  - delta Kroneckera

$$\delta_{jk} = \begin{cases} 1 & \text{dla } j = k \\ 0 & \text{dla } j \neq k. \end{cases}$$

Funkcje te były wykorzystywane jako funkcje współrzędnych  $G_k/x/$  do analizy miesięcznych median godzinowych wartości określonego parametru jonosfery. Zbiorem równooddalonych punktów jest wówczas zbiór wszystkich godzin doby wyrażonych w mierze kątowej:

$$\{x_i: x_i = 15^{\circ}t - 180^{\circ}, t = 1, 2, \dots, 24\} \quad /4-9/$$

Natomiast przybliżenie /4-1/ przyjmuje postać

$$Y_k x = \sum_{k=0}^K a_k G_k/x/ \quad /4-10/$$

zaś współczynniki  $a_k$  dają się przedstawić w prostej postaci

$$a_k = \frac{/y, G_k/}{/G_k, G_k/}, k = 0, 1, \dots, K \quad /4-11/$$

gdzie

$$/y, G_k/ = \sum_{i=1}^N y_i G_k /x_i/ \quad /4-12/$$

W przypadku gdy funkcje  $G_k$  są liniowo niezależne, układ funkcji ortogonalnych uzyskuje się stosując proces ortogonalizacji Schmidta [12, 16], w wyniku którego mamy:

$$\varphi_0/x/ = G_0/x/ \quad /4-13/$$

$$\varphi_k/x/ = \sum_{p=0}^{k-1} a_{kp} \varphi_p/x/ + G_k/x/, \text{ dla } k=1, 2, \dots, K$$

gdzie:

$$a_{kp} = \frac{\langle G_k, \varphi_p \rangle}{\langle \varphi_p, \varphi_p \rangle} \quad /4-14/$$

Dla tego przypadku współczynniki równania /4-1/ mają postać:

$$a_k = \frac{\langle \gamma, \varphi_k \rangle}{\langle \varphi_k, \varphi_k \rangle}, \quad k=0,1,\dots,K. \quad /4-15/$$

Jeżeli zbiór funkcji  $\{g_i\}$ ,  $i=1,2,\dots,N$  jest ortonormalnym na zbiorze punktów  $\{x_i\}$ , tzn. gdy

$$\langle g_n, g_n \rangle = 1 \quad \text{dla } n=1,2,\dots,K \quad /4-16/$$

wtedy przybliżenie poszukiwanej funkcji ma postać:

$$Y_K(x) = \sum_{k=0}^K d_k g_k(x), \quad /4-17/$$

gdzie:

$$d_k = \langle \gamma, g_k \rangle \quad k=0,1,\dots,K \quad /4-18/$$

$$E_k = E_{k-1} - d_k^2 \quad /4-19/$$

Funkcje ortonormalne są produktem procesu normalizacji funkcji ortogonalnych [9,12]:

$$g_k(x) = \sum_{p=0}^{k-1} d_{kp} g_p(x) + d_{kk} \varphi_k(x) \quad /4-20/$$



gdzie:

$$d_{kp} = a_{kp} \sqrt{\frac{|\varphi_p \cdot \varphi_p'|}{|\varphi_k \cdot \varphi_k'|}} \quad 0 \leq p \leq k-1 \quad /4-21/$$

$$d_{kp} = \frac{1}{\sqrt{\varphi_k \cdot \varphi_k'}} \quad /4-22/$$

Ostatecznie współczynniki  $d_k$ , które są współczynnikami Fouriera rozwinięcia funkcji  $f(x)$  w szereg  $\sum_{k=0}^{\infty} d_k g_k(x)$  według układu ortonormalnego  $\{g_i\}$ , mają postać:

$$d_k = a_k \sqrt{\varphi_k \cdot \varphi_k'} \quad /4-23/$$

Przybliżenie /4-17/ wykorzystano do analizy zmian przestrzennych charakterystyk jonosfery.

## 5. ANALIZA WSTĘPNA

Analiza wstępna rozpoczyna się analizą Fouriera miesięcznych median określonego parametru jonosfery dla wszystkich godzin doby, w strefowym czasie lokalnym. Dane są wartości  $\{y_i\}$ ,  $i=1,2,\dots,24$  określonego parametru jonosfery, np. foF2 na zbiorze punktów /4-2/ określonym w poprzednim rozdziale. Poszukiwaną funkcję opisującą zmiany określonego parametru w ciągu doby znajdujemy stosując aproksymację średniokwadratową /4-10/. Przyjmując zbiór funkcji trygonometrycznych /4-5/ jako zbiór funkcji ortogonalnych otrzymuje się przybliżenie poszukiwanej funkcji w postaci rozwinięcia funkcji w sumę szeregu Fouriera:

$$Y/x/ = \alpha_0 + \sum_{j=1}^H \left[ \alpha_j \cos /jx/ + \beta_j \sin /jx/ \right] \quad /5-1/$$

gdzie współczynniki rozwinięcia funkcji określone wzorem /4-11/ mają postać:

$$\alpha_0 = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^{24} y_i \quad /5-2/$$

$$\alpha_j = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{24} y_i \cos /jx_i/$$

$$\beta_j = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{24} y_i \sin /jx_i/ , j=1,2,\dots,H.$$

W ten sposób zmiany miesięcznych median w ciągu doby były rozkładane na H harmonicznym postaci:

$$c_j \cos (jx - \phi_j) \quad /5-3/$$

gdzie:

$$c_j = \sqrt{\alpha_j^2 + \beta_j^2} \quad /5-4/$$

$$\phi_j = \text{arc tg } \frac{\beta_j}{\alpha_j} . \quad /5-5/$$

W praktyce liczba harmonicznym H była równa 11.

Składowe Fouriera były korygowane względem średniego czasu lokalnego. Korekcja była wykonywana przez przesunięcia kątów fazy  $\phi_j$ . Przesunięcia te określa się przez różnicę między ak-

tualną długością geograficzną stacji  $\theta$  a długością odniesienia danej strefy czasu  $\theta_R$ :

$$\psi_j = \phi_j + j \cdot (\phi - \phi_R) / \dots \quad /5-6/$$

Wówczas dobowe zmiany parametru jonosfery dla każdej stacji są określone wzorem postaci:

$$U_{2H+1} / t / = a_0 + \sum_{i=1}^H [a_j \cos / jt / + b_j \sin / jt /] \quad /5-7/$$

gdzie:

$$a_0 = a_0, \quad a_j = c_j \cos / \psi_j /, \quad b_j = c_j \sin / \psi_j /, \quad /5-8/$$

$$t = 15^\circ / \text{LMT} / - 180^\circ / \text{LMT} - \text{Local Mean Time} - \text{średni czas lokalny} /.$$

Następnym krokiem było przeprowadzenie separacji szumów z sumy przybliżającej /5-7/ przez odrzucenie tych harmoniczných, które reprezentowały znaczny wpływ szumów. Harmoniczne, które pozostawały, reprezentowały podstawowe zmiany fizyczne parametru. Miejsce odcięcia zostało określone metodami statystycznymi, a mianowicie przez testowanie zerową hipotezą statystyczną [15,18]. Ustalono, że dla wszystkich stacji liczba harmoniczných będzie wynosiła 8.

Następnym krokiem analizy wstępnej było przedstawienie każdego z ośmiu współczynników  $a_j$ ,  $b_j$  przez przybliżenie /4-10/,

$$a_j / x /, \quad / b_j \ x / = \sum_{k=0}^K D_k G_k / x / \quad /5-9/$$

gdzie funkcje  $G_k$  / $k=0,1,\dots,K$ / mogą być funkcjami potęg  $x$ ,  $\sin x$  lub innych funkcji. Funkcje te powinny reprezentować zasadnicze zmiany geograficzne parametrów jonosfery. Ponieważ główną zmianą charakterystyk jonosfery jest zmiana o kierunku południków, zwana dalej "zmianą szerokościową", funkcje  $G_k$  były zmiennymi szerokości geograficznej  $\lambda$ , a następnie  $\sin \lambda$ . W wyniku wnikliwych badań [13] ustalono, że główna zmiana geograficzna zachodzi w kierunku zmian zmodyfikowanej inklinacji magnetycznej:

$$\chi = \text{arc.tg} \frac{I}{\sqrt{\cos \lambda}}, \quad /5-10/$$

gdzie  $I$  jest inklinacją magnetyczną

$$I = \text{arc tg} \frac{-Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \quad /5-11/$$

gdzie  $X, Y, Z$  są składowymi pola magnetycznego odpowiednio północną, wschodnią i pionową skierowaną w dół [10,5].

Współczynniki  $D_k$  we wzorze /5-9/ określone były ze wzoru /4-11/. Liczbę  $K$  ustalono w wyniku obliczeń na emc, stosując test Studenta. Ostatecznie charakterystyka określonego parametru jonosfery jest następującej postaci:

$$\Gamma /x, t/ = a_0 /x/ + \sum_{j=1}^8 a_j /x/\cos /jx/ + b_j /x/\sin /jx/ \quad /5-12/$$

gdzie współczynniki  $a_j$  i  $b_j$  są również funkcjami zmodyfikowanej inklinacji magnetycznej  $x$ .

## 6. ANALIZA WŁAŚCIWA

Analiza ta, jak już wspomniano wyżej, była przeprowadzana na danych wszystkich trzech klas A, B, C. Stanowi ona ulepszenie wyników analizy wstępnej. Jej zadaniem jest wyeliminowanie szumów powstałych w wynikach analizy wstępnej. Dotyczy to szczególnie danych klasy C, otrzymanych dla punktów położonych w rejonach pozbawionych stacji jonosferycznych. Efektem końcowym tej analizy są mapy numeryczne charakterystyk określonego parametru jonosfery. Analiza właściwa przebiega w odwrotnym porządku niż miało to miejsce w analizie wstępnej. W pierwszej kolejności wykonywana jest analiza zmian geograficznych miesięcznych median danego parametru dla poszczególnych godzin czasu uniwersalnego UT.

Zmodyfikowana inklinacja magnetyczna jest wykorzystana tu w postaci szczególnej współrzędnej zamiast  $\lambda$ . Jej zastosowanie powoduje zmiany odległości między stacjami i punktami w postaci prostokątnych współrzędnych  $\chi, \theta$  /rys. na str. 87 /.

Analiza właściwa korzysta z przybliżenia określonego wzorem /4-17/. Potrzebny układ funkcji ortonormalnych uzyskuje się w wyniku procesu normalizacji funkcji ortogonalnych /4-20/. Zakładając zbiór funkcji współrzędnych geograficznych  $G_k / \lambda, \theta /$ , zdefiniowanych w tabl. na str. 97 otrzymuje się zbiór funkcji ortonormalnych, będących liniowymi kombinacjami tej funkcji:

$$g_k / \lambda, \theta / = \sum_{j=1}^{k-1} d_{jk} g_j / \lambda, \theta / + d_{kk} G_k \quad /6-1/$$

Funkcje współrzędnych geograficznych  $G_k / \lambda, \theta$

$k$	Główna zmiana w kierunku południkowym	$k$	Pierwszy rząd zmian $G_k$ w kierunku długościowym	$k$	Drugi rząd zmian $G_k$ w kierunku długościowym	...	$k$	$m$ -ty rząd zmian $G_k$ w kierunku długościowym
0	1	$k_0+1$	$\cos \lambda \cos \epsilon$	$k_1+1$	$\cos^2 \lambda \cos 2\theta$	...	$k_{m-1}+1$	$\cos^m \lambda \cos m \epsilon$
1	$\sin \chi$	$k_0+2$	$\cos \lambda \sin \epsilon$	$k_1+2$	$\cos^2 \lambda \cos 2\theta$	...	$k_{m-1}+2$	$\cos^m \lambda \sin m \epsilon$
2	$\sin^2 \chi$	$k_0+3$	$\sin \chi \cos \epsilon$	$k_1+3$	$\sin \chi \cos^2 \lambda \cos 2\epsilon$	...	$k_{m-1}+3$	$\sin \chi \cos^m \lambda \sin m \epsilon$
.	.	$k_0+4$	$\sin \chi \sin \epsilon$	$k_1+4$	$\sin \chi \sin^2 \lambda \sin 2\theta$	...	$k_{m-1}+4$	$\sin \chi \cos^m \lambda \sin m \epsilon$
.	.							
$k_0$	$\sin^{q_0} \chi$	$k_1+1$	$\sin^{q_1} \chi \cos \lambda \cos \theta$	$k_2-1$	$\sin^{q_2} \chi \cos^2 \lambda \cos 2\theta$	...	$k_{m-1}$	$\sin^{q_m} \chi \cos^m \lambda \cos m \theta$
		$k_1$	$\sin^{q_1} \chi \cos \lambda \sin \theta$	$k_2$	$\sin^{q_2} \chi \cos^2 \lambda \sin 2\theta$	...	$k_m$	$\sin^{q_m} \chi \cos^m \lambda \sin m \theta$

Brak na liście argumentów funkcji  $G_k$  zmiennej  $\chi$  tłumaczy się zależnością inklinacji magnetycznej od  $\lambda$  i  $\theta$ .

Określenie najwyższego wykładnika  $q$  funkcji  $\sin \chi$ , dla każdego rzędu zmian w kierunku równoleżnikowym, zwanych dalej "zmianami długościowymi" /tabl. na str. 97/ zostało określone przy użyciu testu Studenta.

Między najwyższymi potęgami  $q$  a wskaźnikiem wiersza  $k_r$ , w którym ta potęga ma miejsce, istnieje następująca zależność:

$$q_0 = k_0$$

$$q_r = \frac{1}{2} /k_r - k_{r-1}/ - 1, \quad /r = 1, 2, \dots, m/ \quad /6-2/$$

gdzie  $m$  jest najwyższym rzędem długościowym.

Zmiany dobowe są określone, podobnie jak w analizie wstępnej, przez analizę Fouriera ortogonormalnych współczynników  $d_k$  otrzymywanych z analizy zmian geograficznych parametru jonosfery. Analiza jest przeprowadzana dla 24 godzin czasu uniwersalnego. W wyniku tej analizy współczynniki otrzymują postać:

$$d_k / T/ = a_0 /k/ + \sum_{j=1}^H \left[ a_j /k/ \cos /jT/ + b_j /k/ \sin /jT/ \right] \quad /6-3/$$

gdzie:

$T$  - czas uniwersalny wyrażony w mierze kątowej,  
 $-180^\circ \leq T \leq 180^\circ$ .

Liczba harmoniczných  $H$  jest określona dla każdego parametru jonosfery osobno. Dla foF2  $H$  wynosi 6, zaś dla M/3000/F2 wynosi 4.

W wyniku analizy właściwej została określona postać mapy numerycznej:

$$\Omega / \lambda, \theta, T / = \sum_{k=0}^K D_k / T / G_k / \lambda, \theta / \quad /6-4/$$

gdzie:

$$D_k / T / = U_{0,k} + \sum_{j=1}^H \left[ U_{2j,k} \cos / jT / + U_{2j-1,k} \sin / jT / \right] \quad /6-5/$$

zaś współczynniki  $U_{s,k}$ ,  $s=0, 2j, 2j-1$ ;  $j=1, 2, \dots, H$ ;  $k=0, 1, \dots, K$  są współczynnikami numerycznymi przedstawionymi w postaci tabelic w [1].

Tak zdefiniowane mapy mogą być wykorzystywane do rozwiązywania zagadnień łączności za pomocą emc.

## 7. PRZYKŁAD WYKORZYSTANIA MAP NUMERYCZNYCH

Jako przykład przedstawiony będzie sposób wyznaczenia foF2 dla dowolnego punktu na kuli ziemskiej o współrzędnych  $\lambda, \theta$ , w dowolnym miesiącu dla dowolnej godziny  $h$  czasu UT i wartości wskaźnika  $R_{12} = W$ .

Obliczenia przebiegają według następującego schematu:

1. Obliczenie inklinacji magnetycznej według wzoru /5-11/, którego szczegółowe omówienie i uzupełnienia można znaleźć między innymi w [5,11];

2. Obliczenie sinusa zmodyfikowanej inklinacji magnetycznej według wzoru



$$\sin \chi = \frac{1}{\sqrt{1^2 + \cos \lambda}} \quad /7-1/$$

potrzebnego do obliczenia wartości funkcji  $G_k/\lambda, \theta/$ ;

3. Przedstawienie czasu w mierze kątowej:

$$T = 15 \text{ h} - 180^\circ. \quad /7-2/$$

4. Obliczenie foF2 dla dwóch wartości wskaźnika aktywności słonecznej  $R_{12} = 0$  i 100, a właściwie wyznaczenie z odpowiednich map numerycznych określonych wzorami /6-4/ i /6-5/ i odpowiednimi tablicami współczynników numerycznych  $U_{s,k}$  [1]. Dla celów praktycznych wzory /6-4/ i /6-5/ można przedstawić w postaci:

$$\Omega/\lambda, \theta, T/ = \sum_{k=0}^K U_{0,k} G_k/\lambda, \theta/ + \sum_{j=1}^H \left[ \left( \sum_{k=0}^K U_{2j,k} G_k/\lambda, \theta/ \right) \cos/jT/ + \left( \sum_{k=0}^K U_{2j-1,k} G_k/\lambda, \theta/ \right) \sin/jT/ \right] \quad /7-3/$$

Dla obliczenia potrzebnych tu wartości funkcji  $G_k$  /tabl. na str. 97/ niezbędne są wartości wskaźników  $k_r$  /rozd. 6/, które dla współczynników numerycznych foF2 wynoszą:  $k_0=11$ ,  $k_1=35$ ,  $k_2=53$ ,  $k_3=63$ ,  $k_4=67$ ,  $k_5=69$ ,  $k_6=71$ ,  $k_7=73$ ,  $k_8=75$ , zaś związane z nimi wartości najwyższego wykładnika potęgi sinusa /6-2/ wynoszą:  $q_0=11$ ,  $q_1=11$ ,  $q_2=4$ ,  $q_3=4$ ,  $q_4=1$ ,  $q_5=q_6=q_7=q_8=0$ .

W wyniku obliczeń otrzymujemy:

$$foF2_0 = \Omega / \lambda, \theta, T/, \text{ dla } R_{12} = 0,$$

$$foF2_{100} = \Omega / \lambda, \theta, T/, \text{ dla } R_{12} = 100.$$

5. Obliczenie spodziewanej miesięcznej mediany foF2 według następującego wzoru:

$$foF2 = foF2_0 + 0,01 \text{ foF2}_{100} - foF2_0 \text{ W.} \quad /7-4/$$

W przypadku wykorzystywania innych map schemat postępowania jest identyczny.

#### WYKAZ LITERATURY

1. CCIR: Oslo, 1966, Report 340. CCIR atlas of ionospheric characteristics. Geneve, UIT 1967.
2. CCIR: New Delhi, 1970. Report 252-2. CCIR interim method for estimating sky-wave field strength and transmission loss at frequencies between the approximate limits of 2 and 30 MHz. Geneve, UIT 1970.
3. Barghausen A.F., Finney J.W., Proctor L.L., Schultz L.D.: Predicting long-term operational parameters of high-frequency sky-wave telecommunication systems. Boulder, Institute for Telecommunication Sciences 1969, s. 290, ESSA Technical Report ERL 110-ITS 78.
4. Herbstreit J.W., Joachim M., Glinz C.: Computer programme to predict long-term operational parameters for high-frequency radia services. Telecom. J. 1970, t. 37, nr 10, s. 696-698.

5. Borowski S., Lisicki W., Dusiński A.: Wdrożenie elektronicznej techniki obliczeniowej w zakresie krótkofalowej radiofonii i radiokomunikacji. Sprawozdanie z pracy naukowo-badawczej nr 102-06.01.02. Etap b. Warszawa lł 1973.
6. Jones W.B., Gallet R.M.: Ionospheric mapping by numerical methods. Journal UIT 1960 nr 12, s. 260e-264e.
7. CCIR: Basic prediction information for ionospheric propagation, Report 161. Documents of the IX-th Plenary Assembly, Los Angeles 1959 t. 2, Geneve, UIT 1959.
8. CCIR: Choice of a basic index for ionospheric propagation, Report 161. Document of the IX-th Plenary Assembly, Los Angeles 1959 t. 2, Geneve, UIT 1959.
9. Jones W.B., Gallet R.M.: The representation of diurnal and geographic variations of ionospheric data by numerical methods. Telecom. J. 1962 t. 29 nr 5, s. 129-149.
10. Fougere P.F.: Spherical harmonics analysis. A new method and its verification. Journal of Geophysical Research 1963 t. 68 nr 4, s. 1131-1139.
11. Sneddon I.N.: Special functions of mathematical physics and chemistry. Edinburgh and London: Oliver and Boyd , 1956.
12. Sikorski R.: Funkcje rzeczywiste. Warszawa: PWN 1959 t.2.
13. Jones W.B., Graham R.P., Leftin M.: Advances in ionospheric mapping by numerical methods. NBS Technical Note No 337. U.S. Department of Commerce National Bureau of Standards 1966, s. 71.

14. Jones W.B., Gallet R.M.: Methods for applying numerical maps of ionospheric characteristics. Journal of Research of the National Bureau of Standards. D-Radio Propagation 1962 t. 66D nr 6, s. 649-662.
15. Ralston A.: Wstęp do analizy numerycznej. Warszawa PWN 1971.
16. Gončarov V.L.: Teorija interpolirovanija i približenije funkcij. Moskva GUTTŁ, 1954.
17. Jones W.B., Gallet R.M.: Representation of diurnal and geographic variations of ionospheric data by numerical methods. Telecom. J. 1965 t. 32 nr 1, s. 18-28.
18. Fisz M.: Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna. Warszawa PWN, 1958.

