

INSTYTUT ENERGOELEKTRYKI POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ

Raport serii PREPRINTY Nr 204

Na prawach rękopisu

WPŁYW POLA ELEKTRYCZNEGO
O CZĘSTOTLIWOŚCI 50 Hz
NA WYBRANE REAKCJE FIZJOLOGICZNE
ORGANIZMU LUDZKIEGO

Marek Szuba

Słowa kluczowe:
pole elektryczne,
czas reakcji

Wrocław 1981

Mgr inż. Marek SZUBA

INSTYTUT ENERGOELEKTRYKI POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ

WPŁYW POLA ELEKTRYCZNEGO O CZĘSTOTLIWOŚCI 50 Hz
NA WYBRANE REAKCJE FIZJOLOGICZNE ORGANIZMU
LUDZKIEGO

Rozprawa doktorska
przedstawiona do oceny Radzie Naukowo-Dydaktycznej
Instytutu Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej

Promotor:

Prof.dr hab.inż. Zdzisław Teresiak

Wrocław 1981

Mgr inż. Marek Szuba
Instytut Energoelektryki
Politechniki Wrocławskiej
pl. Grunwaldzki 13
50 - 377 Wrocław

W pracy przedstawiono wyniki badań reakcji fizjologicznych w szczególności czasu reakcji u ludzi poddawanych działaniu pola elektrycznego o częstotliwości 50 Hz. Na podstawie statystycznej analizy wyników badań oceniono wpływ tego pola na organizm ludzki.

Raport wpłynął do Redakcji Instytutu Energoelektryki
Politechniki Wrocławskiej w październiku 1981 r.

SPIS TREŚCI	str.
1. WSTĘP	5
2. PROBLEMATYKA ZAGROŻENIA ORGANIZMÓW ŻYWYCH POŁEM ELEKTROMAGNETYCZNYM O CZĘSTOTLIWOŚCI 50 Hz	6
2.1. Dotychczasowe ustalenia w zakresie wpływu pól elektromagnetycznych o częstotliwości 50 Hz na organizmy żywe	6
2.2. Cel i zakres rozprawy	11
3. CHARAKTERYSTYKA POŁA ELEKTROMAGNETYCZNEGO W OTOCZENIU URZĄDZEŃ ELEKTROENERGETYCZNYCH WYSOKIEGO NAPIĘCIA	13
3.1. Wielkości podstawowe	13
3.2. Metody wyznaczania składowych elektrycznej i mag- netycznej poła elektromagnetycznego o częstotli- wości 50 Hz	14
3.2.1. Uwagi wstępne	14
3.2.2. Obliczanie natężenia poła elektrycznego ..	14
3.2.3. Pomiar natężenia poła elektrycznego	18
3.2.4. Obliczanie indukcji magnetycznej	24
3.3. Rozkład natężenia poła elektrycznego w otoczeniu obiektów elektroenergetycznych wysokiego napięcia ..	25
3.4. Rozkład indukcji magnetycznej w otoczeniu linii przesyłowych wysokiego napięcia	33
4. BADANIA WPŁYWU POŁA ELEKTRYCZNEGO O CZĘSTOTLIWOŚCI 50 Hz NA ORGANIZM LUDZKI W WARUNKACH LABORATORYJNYCH..	42
4.1. Opis stanowiska pomiarowego	42
4.2. Metodyka wykonywania badań eksperymentalnych z udziałem ludzi poddanych działaniu zewnętrznego poła elektrycznego oraz prądu elektrycznego	49
4.2.1. Pomiar prądu elektrycznego płynącego przez człowieka umieszczonego w polu elek- trycznym	49
4.2.2. Badania czasu reakcji prostej	51
4.2.3. Badania poziomu hemoglobiny i składu krwi ..	55
4.2.4. Badania wpływu prądu elektrycznego na czas świadomej reakcji	55
4.3. Wyniki badań eksperymentalnych	58

4.3.1. Prąd pojemnościowy płynący przez czoł- wieka umieszczonego w polu elektrycznym o częstotliwości 50 Hz	58
4.3.2. Czas reakcji u osób poddanych działaniu pola elektrycznego o częstotliwości 50 Hz..	63
4.3.3. Hemoglobina i składniki krwi	71
4.3.4. Czas reakcji u osób poddanych działaniu prądu elektrycznego	72
5. OGÓLNA OCENA WPŁYWU POLA ELEKTRYCZNEGO NA ORGANIZM LUDZKI	75
5.1. Ocena wyników pomiarów prądu pojemnościowego ...	75
5.2. Statystyczna analiza wyników pomiarów czasu reakcji	79
5.3. Analiza wyników badań krwi	86
5.4. Analiza wyników pomiarów czasu reakcji u osób poddanych działaniu prądu rażeniowego	91
6. WNIOSKI OGÓLNE	95
7. LITERATURA	96

1. WSTĘP

Stały wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną oraz względy ekonomiczne przy przesyłaniu jej na znaczne odległości powodują, że w wielu krajach eksploatowane są linie elektroenergetyczne o napięciu powyżej 700 kV (EHV) a w stadium projektowania lub prób są linie o napięciu powyżej 1400 kV (UHV). Obecność napowietrznych linii przesyłowych oraz rozdzielni wysokiego napięcia w naturalnym środowisku człowieka pociąga za sobą możliwość ich oddziaływania na to środowisko. Budowa tych obiektów powoduje ujemne skutki w gospodarce terenowej i krajobrazowej, stwarza niebezpieczeństwo porażenia elektrycznego, powoduje powstawanie zakłóceń radiowych i telewizyjnych, hałasu oraz wytwarzania znacznych ilości gazów (tlen, ozon, wodór).

Na skutek wytwarzania przez wspomniane urządzenia, w ich otoczeniu, pól elektromagnetycznych o częstotliwości 50 Hz¹⁾, istnieje możliwość szkodliwego ich wpływu na znajdujące się w środowisku organizmy żywe, w tym szczególnie na człowieka. Spośród możliwych negatywnych skutków oddziaływania tego rodzaju pól na przedmioty i organizmy żywe w nim umieszczone, wymienić należy: powstawanie wyładowań iskrowych, wywoływanie szoku w organizmach żywych, zakłócenia w działaniu stymulatorów pracy serca oraz efekty natury biologicznej.

W ostatnich latach, na skutek coraz większych natężeń pól istniejących w otoczeniu eksploatowanych linii i rozdzielni, dużego znaczenia nabrało zagadnienie możliwych biologicznych efektów wywołanych przez te pola. Bezpośrednią przyczyną szerokiego zainteresowania tą tematyką był referat Korobkovej [39], wygłoszony na sesji CIGRE w 1972 roku, w którym przedstawiła ona wyniki radzieckich badań nad wpływem pól elektromagnetycznych, występujących w otoczeniu urządzeń wysokiego napięcia, na pracowników zatrudnionych przy obsłudze tych urządzeń. Ta przyczynkowa praca oraz doniesienia innych autorów [2, 11, 37, 47, 75, 88] ujawniły szkodliwy wpływ pola elektromagnetycznego o częstotliwości

1) Przedstawione w pracy rozważania odnoszą się również do pola elektromagnetycznego o częstotliwości 60 Hz, generowanego przez urządzenia przesyłowo-rozdzielcze eksploatowane w USA.

50 Hz na organizm człowieka, objawiający się między innymi zaburzeniami w centralnym systemie nerwowym oraz niedomaganiem układu sercowo-naczyniowego. Te niepokojące obserwacje stały się bodźcem do podjęcia w wielu krajach badań w tej dziedzinie. Celem tych badań było wnikliwe zbadanie wpływu tego rodzaju pól na organizmy żywe, a w szczególności, ze zrozumiałych względów, określenie ewentualnej szkodliwości pól pochodzących od linii i rozdzielni wysokiego napięcia, gdyż w wielu krajach opracowano projekty lub podjęto budowę linii ultra wysokich napięć [67,90], lub innych urządzeń generujących pola elektromagnetyczne o częstotliwości 50 Hz (Sanquine Project [7]).

2. PROBLEMATYKA ZAGROŻENIA ORGANIZMÓW ŻYWYCH POLEM ELEKTROMAGNETYCZNYM O CZĘSTOTLIWOŚCI 50 Hz

2.1. Dotychczasowe ustalenia w zakresie wpływu pól elektromagnetycznych o częstotliwości 50 Hz na organizmy żywe

Podjęmowane w ostatnich latach przez różne ośrodki naukowe w świecie badania wpływu pól elektromagnetycznych o częstotliwości 50 Hz na organizmy żywe charakteryzowały się różnorodnym programem, materiałem badawczym, czasem trwania eksperymentu i na ogół odmienną metodyką ich wykonywania. Badania te prowadzono zarówno w warunkach naturalnych (obiekt badań umieszczony w polu wytworzonym przez pracującą linię lub rozdzielnię wysokiego napięcia [2,41,83]), jak też w warunkach laboratoryjnych (pole wytwarzane w sposób sztuczny [5,8,21,44,45]). W eksperymentach prowadzonych w laboratorium generowano wyłącznie składową elektryczną pola, za wyjątkiem badań prowadzonych przez Hauia [30], w których uwzględniono również składową magnetyczną pola elektromagnetycznego. Zdaniem wielu badaczy [27,28,51,61] istotne znaczenie w oddziaływaniu pola elektromagnetycznego o częstotliwości 50 Hz na organizmy żywe ma tylko składowa elektryczna tego pola, choć spotyka się też opinie o decydującym wpływie składowej magnetycznej [92]. Eksperymenty prowadzono na zwierzętach doświadczalnych (szczury [28,31,50,52,78,79], maszty [8,37,47,49,53], koty [18,78,79], świnki morskie [56,57] i inne [20,53,93]),

jak też z udziałem ludzi [2,29,31,35,38,41,83]. Czasy trwania tych eksperymentów były bardzo różne. Wykonywano badania krótkotrwałe - do 3 dni [29,31,38,47] oraz długotrwałe o czasie trwania nawet do 6 lat [41,49,50,62]. w obu przypadkach czas ekspozycji polem obiektu badanego był również bardzo różny.

W tabelicy 2.1 zestawiono niektóre dane wraz z wynikami, dotyczące najważniejszych badań eksperymentalnych w dziedzinie oddziaływania pola elektromagnetycznego o częstotliwości 50 mHz na organizmy żywe.

Analizując wyniki tych badań należy stwierdzić, że nie są one jednoznaczne, a w niektórych przypadkach nawet sprzeczne co do oceny wpływu pól elektromagnetycznych na organizmy żywe. Dokładne studia prac badawczych, przytoczonych w tabelicy 2.1, w odniesieniu do zrealizowanego programu, warunków polowych i środowiskowych eksperymentów oraz uzyskanych wyników badań prowadzą do następujących wniosków:

1. W przypadku badań laboratoryjnych nie zostały ściśle określone (lub dokładnie opisane) warunki polowe eksperymentu tzn., że pole elektromagnetyczne działające na obiekt badany nie zostało precyzyjnie opisane (zazwyczaj autorzy prac podają wartość natężenia pola na stanowisku pomiarowym przed wprowadzeniem obiektu w obszar pola, przy czym nie wiadomo o jego rozkładzie przestrzennym).

2. W badaniach przeprowadzonych w warunkach rzeczywistych nie uwzględniono wpływu dodatkowych czynników środowiskowych takich jak: hałas czy zanieczyszczenia chemiczne.

3. Wyników wielu badań prowadzonych na mało licznych materiałach doświadczalnych nie można traktować jako statystycznie reprezentatywnych.

4. Tylko w nielicznych pracach cytowanych w tabelicy 2.1 dokonano statystycznej analizy wyników badań.

5. Znaczna liczba dolegliwości stwierdzanych u ludzi poddanych działaniu pola miała charakter subiektywny i nie została opisana w sposób ilościowy.

Niejasności i uchybienia natury metodologicznej oraz metrologicznej jakie można stwierdzić w pracach z tej dziedziny utrudniają lub wręcz uniemożliwiają porównywanie wyników badań. W konsekwencji jednoznaczna ocena ewentualnej szkodliwości zdrowotnej

Tablica 2.1

Zestawienie wyników dotychczasowych badań oddziaływania pola elektromagnetycznego o częstotliwości 50 Hz na organizmy żywe

Autor badań	Natężenie pola	Obiekt badań	Czas trwania badań	Wyniki badań	Uwagi
1	2	3	4	5	6
Asanova [2]	różne wartości	ludzie	kilka miesięcy	Zaburzenia w centralnym układzie nerwowym oraz w układzie sercowo-naczyniowym	Badania na pracownikach obsługujących linie i rozdzielnie w.n.
Bankoske [5]	20-80 kV/m	kurczęta	14-20 dni	Zmiany w aktywności motorycznej oraz przyspieszony wzrost w pierwszej fazie eksperymentu. Zmiany w zapisie EEG	Stosowano kolejno wartości pola: 20, 40, 60 i 80 kV/m
Blanchi [8]	100 kV/m	myszy	1000 godzin	Zmiany w zapisie EKG (wydłużenie przedziału PR, czasu trwania fali R i czasu trwania kompleksu QRS).	
Effert, Silny [18, 78, 79, 80]	20 kV/m	szczury koty	1 rok	Spadek amplitudy i częstotliwości fal EEG, zakłócenia w termoregulacji oraz zmiany w rytmie serca	
Gann [21]	200-600 kV/m	komórki	7 dni	Zniszczenie kolonii komórek	
Gann [22]	15 kV/m	psy	5 godzin	Zakłócenia w funkcjonowaniu centralnego systemu nerwowego, zmiany w obrazie krwi oraz inne zaburzenia fizjologiczne	

c.d. tablicy 2.1

1	2	3	4	5	6
Giarola Krueger [23]	3,5 kV/m	kurczęta	2 m-ce	Spadek masy ciała po 28 dniach ekspozycji	
Giarola Krueger [42]	1,6 kV/m	kury nioski	16 tygodni	Spadek produkcji jaj w pierwszej fazie eksperymentu	
Hauf [29]	20 kV/m	ludzie	3 godz.	Nieznaczne zmiany fizjologiczne mieszczące się w ramach dopuszczalnej zmienności osobniczej	
Hauf [31]	1-20 kV/m	ludzie	3 godz.	Brak zmian	
Johansson [35]	100 kV/m	ludzie	75 minut	Zmiany wyników testów psychofizjologicznych	
Knickerbocker [37]	157,5 kV/m	myszy	10 miesięcy	Spadek masy ciała zwierząt eksponowanych. Spadek masy ciała potomstwa zwierząt eksponowanych	Łączny czas ekspozycji polem wynosił 1500 godzin
Koepen [38]	7,5-27 kV/m	ludzie	30 minut	Brak zmian	Wykonywano tylko EKG
Kouwenhoven [41,83]	różne wartości	ludzie	6 lat	Brak zmian o charakterze patologicznym	Badania prowadzono na pracownikach obsługujących linie i rozdzielnie w.n.
Kühne [44]	100 kV/m	szczury	1 rok	Zmiany w biochemii krwi	
LeBars [45]	50 kV/m	szczury króliki	6 m-cy	Podwyższenie liczby leukocytów i inne nieznaczne zmiany w składzie krwi	
Mamontov [47]	20 kV/m	myszy	4 godz.	Zmiany histologiczne w narządach wewnętrznych	

c.d. tablicy 2.1

1	2	3	4	5	6
Marsh [53]	0,31- 0,42 kV/m	owady	10 dni	Zmiany fizjologiczne	
Marino [49]	15 kV/m	myszy	105 dni	Spadek masy ciała zwierząt eksponowanych oraz zmiany w zachowaniu	Badano grupę myszy oraz ich potomstwo
Marino [50,52]	10 kV/m	szczury	6 m-cy	Zakłócenia w gospodarce enzymami oraz zmiany w zachowaniu	
Matherson [54,55]	100 V/m	szczury	28 dni	Zmiany ilościowe w morfologii krwi	
Meda [56,57,58]	100 kV/m	myszy szczury świnki morskie	kilka miesięcy	Zmiany natury fizjologicznej oraz zakłócenia w kompleksie QRS w EKG	
Milmer [63]	50 kV/m	szczury	10 dni	zmiany w zachowaniu badanych zwierząt	
Moos [64]	1 kV/m	myszy	10-50 dni	Zmiany fizjologiczne	
Riesen [71]	155 V/m	kurczęta, koty	1 godz.	Utrata funkcji biochemicznych mitochondrii niektórych komórek	
Sazonova [73]	30-40 kV/m	króliki	18 godz.	Ogólny spadek aktywności ruchowej badanych zwierząt	
Sieron [76,77]	200 kV/m	szczury	32 godz.	Zmiany w morfologii krwi. Zmiany w procentowym udziale poszczególnych frakcji białkowych krwi. Patologiczne zmiany w niektórych gruczołach dokrewnych	Ekspozycja w systemie: 8 godz. ekspozycji, 8 godz. przerwy itd.
Solovev [84]	500 kV/m	myszy owady	kilka- naście godz.	Śmierć	

c.d. tablicy 2.1

1	2	3	4	5	6
Spittka [86]	50 kV/m	szczury	kilka- naście minut	Zmiany w zachowa- niu badanych zwierząt	
Strumza [89]	17 kV/m	szczury	4-23 m-cy	Brak zmian o cha- akterze patolo- gicznym	
Warnke [93]	11 kV/m	pszczo- ły	kilka- naście dni	Zmiany w aktywnoś- ci motorycznej owadów	

pól elektromagnetycznych działających na organizmy żywe, na podstawie dotychczas uzyskanych wyników badań nie jest możliwa.

Na konieczność prowadzenia dalszych badań, w oparciu o bardziej dopracowane, szczególnie pod względem metrologicznym, programy badawcze, wskazują autorzy ostatnio publikowanych prac analitycznych z tej dziedziny [3,10,12,51,68].

W przyszłych badaniach konieczne będzie stworzenie takich warunków polowych eksperymentu, aby rozkład pola na stanowisku pomiarowym w dostatecznym stopniu odpowiadał rozkładowi występującemu w warunkach naturalnych. Niezbędna staje się więc identyfikacja rozkładu pola poprzez określenie wartości natężenia niezakłóconego pola elektrycznego w otoczeniu jego źródeł, a następnie zamodelowanie tego rozkładu w warunkach laboratoryjnych. Celowość takiego postępowania uzasadnia fakt, że z biofizycznego punktu widzenia, czynnikiem oddziałującym na narządy wewnętrzne organizmów żywych może być pole elektryczne panujące w ich wnętrzu, a indukowane na skutek obecności pola zewnętrznego.

Można przyjąć, że rozkład pola elektrycznego przy powierzchni organizmu żywego określa w sposób pośredni pole w jego wnętrzu.

2.2. Cel i zakres rozprawy

Jak już wykazano (rozdz.2.1) dotychczas przeprowadzone badania eksperymentalne w zakresie wpływu pól elektromagnetycznych o częstotliwości 50 Hz na organizm człowieka nie pozwalają na

jednoznaczne stwierdzenie tego oddziaływania.

Istnieją liczne sugestie badaczy dotyczące ewentualnego wpływu tego rodzaju pól na centralny system nerwowy jako układ o dużej czułości na bodźce pochodzenia elektrycznego, wyposażony w różnego rodzaju receptory. Wpływ ten może objawiać się zmianą czasu reakcji u ludzi poddanych działaniu zewnętrznego pola elektrycznego.

Jedynym niekwestionowanym skutkiem przebywania człowieka w polu elektrycznym jest zjawisko przepływu prądu elektrycznego o charakterze pojemnościowym przez jego ciało. Zdaniem autora ilościowy opis tego zjawiska podawany w literaturze [13,15,32,40,74] budzi liczne zastrzeżenia, a jak można przypuszczać ma istotne znaczenie przy próbach wyjaśniania mechanizmów wpływu pola elektrycznego na organizmy żywe.

Uwzględniając sugestie i uwagi badaczy, dotychczas zajmujących się tymi problemami oraz uwzględniając wnioski wypływające z analizy dotychczasowych prac badawczych z tej dziedziny, przedstawione w rozdz. 2.1, postanowiono wykonać wybrane badania wpływu pola elektrycznego o częstotliwości 50 Hz na organizm człowieka, które byłyby reprezentatywne i w sposób właściwy uwzględniałyby rzeczywiste warunki zagrożenia ludzi, występujące w praktyce.

Teza rozprawy jest następująca:

Pole elektryczne, wytwarzane przez elektroenergetyczne urządzenia przesyłowo-rozdzielcze wysokiego napięcia, ma istotny wpływ na organizm człowieka - w szczególności na jego reakcje fizjologiczne.

W celu sprawdzenia słuszności tezy postanowiono w pracy zwrócić szczególną uwagę na:

- a) wpływ pola elektrycznego na czas świadomej reakcji człowieka,
- b) rolę prądu pojemnościowego, indukowanego w organizmie człowieka w odniesieniu do charakterystycznych reakcji fizjologicznych oraz korelację tego oddziaływania z wpływem prądu elektrycznego przy rażeniu bezpośrednim,
- c) wpływ pola elektrycznego na hemoglobinę i skład morfologiczny krwi obwodowej oraz ciśnienie i tętno.

3. CHARAKTERYSTYKA POLA ELEKTROMAGNETYCZNEGO W OTOCZENIU URZĄDZEŃ ELEKTROENERGETYCZNYCH WYSOKIEGO NAPIĘCIA

3.1. Wielkości podstawowe

Urządzenia elektroenergetyczne wysokiego napięcia pracujące przy częstotliwości 50 Hz są źródłem pól elektromagnetycznych o parametrach zależnych od wartości napięcia i prądu i o rozkładzie przestrzennym zależnym od konfiguracji torów prądowych tych urządzeń. Pole elektromagnetyczne rozprzestrzenia się w postaci fal elektromagnetycznych charakteryzowanych przez: długość fali λ , częstotliwość f i prędkość rozprzestrzeniania się v . Wielkości te związane są zależnością

$$\lambda = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon\mu}}, \quad (3.1)$$

w której:

$c = 3 \cdot 10^8$ m/s - prędkość rozchodzenia się światła w próżni,

ϵ - względna przenikalność elektryczna ośrodka,

μ - względna przenikalność magnetyczna ośrodka.

Przyjmując dla powietrza $\epsilon = \mu \approx 1$, długość fali przy częstotliwości $f = 50$ Hz wynosi $\lambda = 6 \cdot 10^6$ m.

Obszar, w którym jak można przypuszczać istnieje oddziaływanie pola elektromagnetycznego na organizmy żywe, znajduje się w bezpośredniej bliskości kilku lub kilkudziesięciu metrów od źródła pola, czyli w odległości od źródła znacznie mniejszej niż długość fali λ . Oznacza to, że pole elektromagnetyczne o częstotliwości 50 Hz spełnia w odniesieniu do organizmów żywych w nim umieszczonych warunek pomijalności efektów falowych określony zależnością

$$x \ll \lambda, \quad (3.2)$$

w której:

x - liniowy wymiar obiektu umieszczonego w polu.

Niewielka odległość rozpatrywanego obszaru od źródła pola powoduje, że znajduje się on w strefie indukcji pola, w której wektory natężenia pola elektrycznego $\vec{E}$ i natężenia pola magnetycznego $\vec{H}$ są przesunięte w fazie, ich amplitudy maleją ze wzrostem odległości od źródła.

W polu elektromagnetycznym o częstotliwości 50 Hz panującym w otoczeniu urządzeń elektroenergetycznych wysokiego napięcia, wartość pochodnej potencjału wektorowego, związanego bezpośrednio z natężeniem prądu płynącego w torze prądowym urządzenia, jest pomijalna w stosunku do potencjału skalarnego, który decyduje o wartości natężenia pola elektrycznego $\vec{E}$. W związku z tym dopuszczalne jest stosowanie praw elektrostatyki i magnetostatyki w celu wyznaczenia obu składowych: elektrycznej i magnetycznej pola elektromagnetycznego o częstotliwości 50 Hz.

3.2. Metody wyznaczania składowych elektrycznej i magnetycznej pola elektromagnetycznego o częstotliwości 50 Hz

3.2.1. Uwagi wstępne

Jak stwierdzono w rozdziale 2.1, znaczne rozbieżności w wynikach badań nad oddziaływaniem pola elektromagnetycznego o częstotliwości 50 Hz na organizmy żywe mogą być spowodowane niejednakowymi warunkami polowymi w poszczególnych eksperymentach. Zagadnienie poprawnej identyfikacji rozkładu pola w otoczeniu istniejących jego źródeł ma w tym względzie zasadnicze znaczenie. W przypadku źródeł pola jakimi są urządzenia elektroenergetyczne wysokiego napięcia, identyfikacja warunków polowych w ich otoczeniu polega na wyznaczeniu przestrzennego rozkładu natężenia pola elektrycznego oraz natężenia pola magnetycznego (lub indukcji magnetycznej). W praktyce rozkłady takie uzyskiwane drogą obliczeń lub pomiarów przedstawia się w postaci wykresów obrazujących zmienność składowej poziomej i pionowej wektorów $\vec{E}$ i $\vec{B}$ w otoczeniu źródła pola.

3.2.2. Obliczanie natężenia pola elektrycznego

Wyznaczenie rozkładu **natężenia** pola elektrycznego w otoczeniu obiektów elektroenergetycznych wysokiego napięcia jest zagadnieniem obliczeniowo skomplikowanym, ze względu na zwykle złożoną strukturę przestrzenną tych obiektów. Podawane w literaturze [26,33,36,81,82,85,87,91] procedury obliczeniowe dotyczą najczęściej konkretnych obiektów elektroenergetycznych, zazwyczaj o wyróżnionej symetrii geometrycznej. Procedury te cechuje bardzo złożony tok obliczeń, wymagający zastosowania elektronicznej techniki obliczeniowej. Jednocześnie prezentowane w tych metodach zależności mają charakter bardzo skomplikowany, a jednocześnie na tyle ogólny, że nie nadają

się do bezpośredniego wykorzystania w konkretnych przypadkach obliczeń.

Dla potrzeb związanych z zakresem rozprawy opracowano metodę obliczeń umożliwiającą dokonywanie niezbędnej identyfikacji natężenia pola elektrycznego, występującego w praktyce elektroenergetycznej.

Przedstawiona metoda obliczeń natężenia pola elektrycznego w otoczeniu linii i rozdzielni wysokiego napięcia oparta jest na następujących założeniach upraszczających:

- a) w rozpatrywanej przestrzeni brak jest wolnych ładunków;
- b) przenikalność elektryczna powietrza jest równa przenikalności elektrycznej próżni;
- c) ziemia jest w porównaniu z powietrzem przewodnikiem idealnym.

Uwzględniając powyższe założenia oraz korzystając z klasycznej teorii pola elektrostatycznego [17] można napisać równanie potencjałów dla poszczególnych przewodów rozważanego układu, w postaci macierzowej

$$[V] = [A][T], \quad (3.3)$$

gdzie:

[V] - kolumnowa macierz potencjałów,

[T] - macierz reprezentująca liniową gęstość ładunku w każdym przewodzie układu,

[A] - macierz współczynników, które zależą od kształtu, wymiarów i odległości pomiędzy przewodami oraz od przenikalności elektrycznej powietrza.

Elementy α_{ij} macierzy [A] można wyznaczyć korzystając z następujących zależności:

$$\alpha_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_{ij}}{d_{ij}} \quad \text{dla } i \neq j \quad (3.4)$$

gdzie D_{ij} jest odległością odbicia zwierciadlanego i-tego przewodu od j-tego przewodu układu, a d_{ij} jest odległością pomiędzy przewodami i oraz j (rys.3.1) natomiast ϵ_0 jest przenikalnością elektryczną powietrza:

$$\alpha_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h_i}{R_i} \quad (3.5)$$

gdzie h_1 jest wysokością zawieszenia 1-tego przewodu nad ziemią, a R_1 jest jego zastępczym promieniem. Dla pojedynczego przewodu R_1 jest równe promieniowi przewodu, a w przypadku wiązki przewodów wartość R_1 oblicza się z zależności

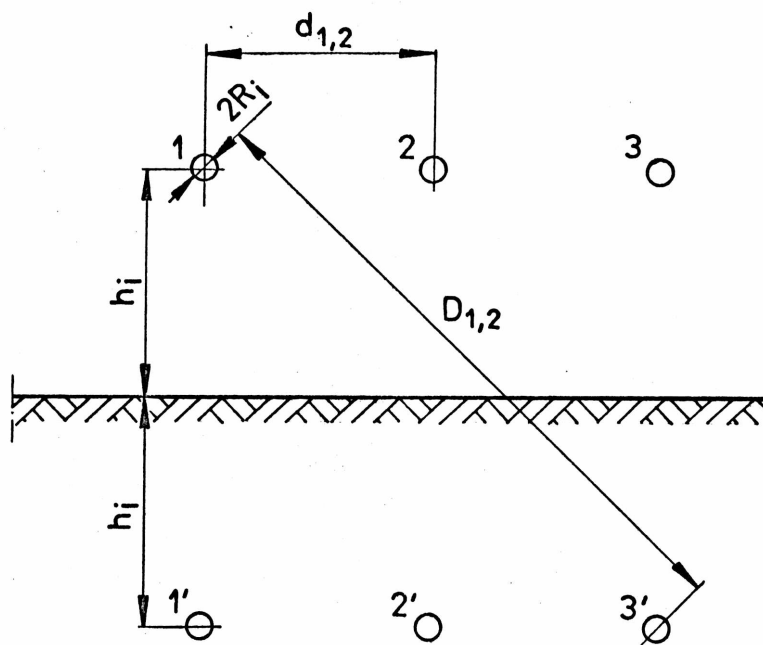
$$R_1 = \sqrt[n^2]{(r_1 r_2 \dots r_n)(d_{12} d_{13} \dots d_{1n})(d_{21} d_{23} \dots d_{2n}) \dots (d_{n1} d_{n2} \dots d_{n(n-1)})}, \quad (3.6)$$

w której:

r_n - promień n-tego przewodu w wiązce,

d - odległość między przewodami w wiązce (rys.3.2),

n - liczba przewodów w wiązce.



Rys.3.1. Określenie elementów α_{1j} macierzy $[A]$

1,2,3 - przewody fazowe; 1', 2', 3' - odbicia zwierciadlane przewodów fazowych

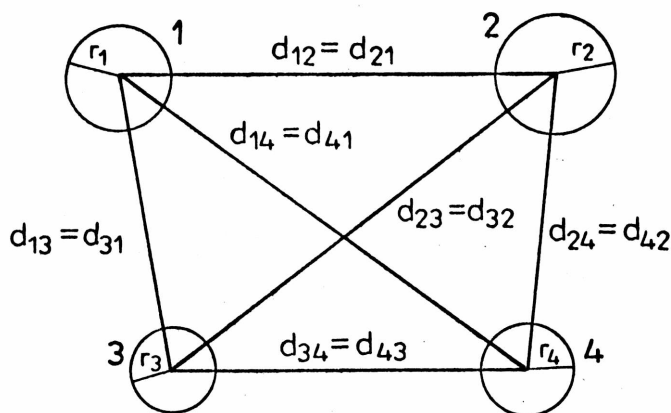
W przypadku wiązki symetrycznej wzór (3.6) redukuje się do postaci

$$R_1 = \sqrt[n]{r (d_{12}d_{13} \dots d_{1n})} \quad (3.7)$$

gdzie r jest promieniem przewodu, a d jest odległością między przewodami w wiązce.

Znając wartości potencjałów i ich wzajemne przesunięcia fazowe w poszczególnych przewodach układu, wyznacza się liniową gęstość ładunku w każdym przewodzie po uprzednim przekształceniu zależności (3.3) do postaci

$$[T] = [A]^{-1} [V] \quad (3.8)$$



Rys.3.2. Sposób wyznaczania R_1 dla wiązki przewodów

Natężenie pola elektrycznego w dowolnym punkcie P na powierzchni ziemi wyznacza się, po uwzględnieniu warunku brzegowego o zaniku składowej poziomej wektora $\vec{E}$ na powierzchni ziemi, z zależności

$$\vec{E} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{\tau_i}{r_i} \vec{r}_i, \quad (3.9)$$

w której:

τ_i - liniowa gęstość ładunku i-tego przewodu układu,
 r_i - odległość i-tego przewodu układu od punktu P,
 $\vec{r}_i$ - wektor jednostkowy w kierunku r,
 n - liczba przewodów układu.

Przy obliczaniu natężenia pola w dowolnym punkcie ponad powierzchnią ziemi należy korzystać z zależności (3.9), przy czym w tym przypadku, składowa pozioma natężenia pola nie równa się zeru. Zachodzi wtedy konieczność obliczania obu składowych tego wektora: pionowej i poziomej.

Za pomocą przedstawionej metody wykonano obliczenia natężenia pola elektrycznego w otoczeniu linii elektroenergetycznych wysokiego napięcia różnych typów. Wyniki obliczeń zostaną przedstawione w rozdziale 3.3.

3.2.3. Pomiary natężenia pola elektrycznego

Weryfikacji obliczeń rozkładu natężenia pola elektrycznego w otoczeniu obiektów elektroenergetycznych wysokiego napięcia dokonuje się w oparciu o wyniki pomiarów. W przypadku urządzeń o nieregularnej strukturze geometrycznej, określenie rozkładu pola jest możliwe wyłącznie przez dokonanie odpowiednich pomiarów.

Pomiaru natężenia pola elektrycznego o częstotliwości 50 Hz można dokonać przez umieszczenie w tym polu sondy dipolowej lub pojemnościowej, połączonej z urządzeniem pomiarowym. Dokładny opis konstrukcyjny sond pomiarowych znaleźć można w odpowiedniej literaturze [60].

Stosowane przez różnych badaczy metody pomiaru nie gwarantują jednak należytych wyników, które częstokroć obciążone są znacznym błędem metody. Dotyczy to zwłaszcza najczęściej stosowanej metody opartej na zjawisku przepływu prądu przez kondensator pomiarowy (sondę) umieszczony w polu elektrycznym. Natężenie tego prądu jest proporcjonalne do natężenia pola elektrycznego E zgodnie ze wzorem

$$I_s = 2 \pi f \epsilon_0 S E, \quad (3.10)$$

w którym:

I_s - natężenie prądu płynącego przez kondensator pomiarowy,

$f = 50 \text{ Hz}$ - częstotliwość pola,

ϵ_0 - przenikalność elektryczna powietrza,

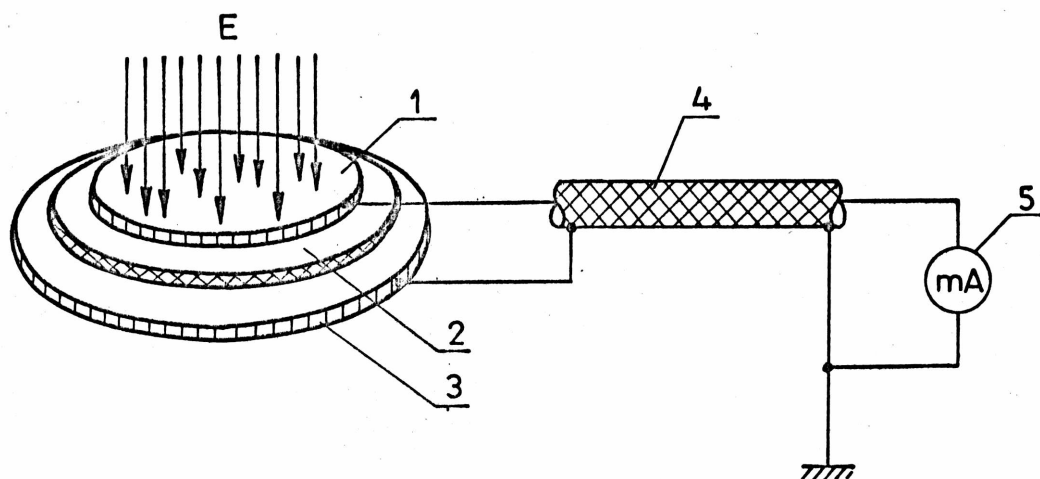
S - pole powierzchni elektrody kondensatora pomiarowego.

Prąd I_s wywołuje na pojemności sondy C_s spadek napięcia, który wynosi

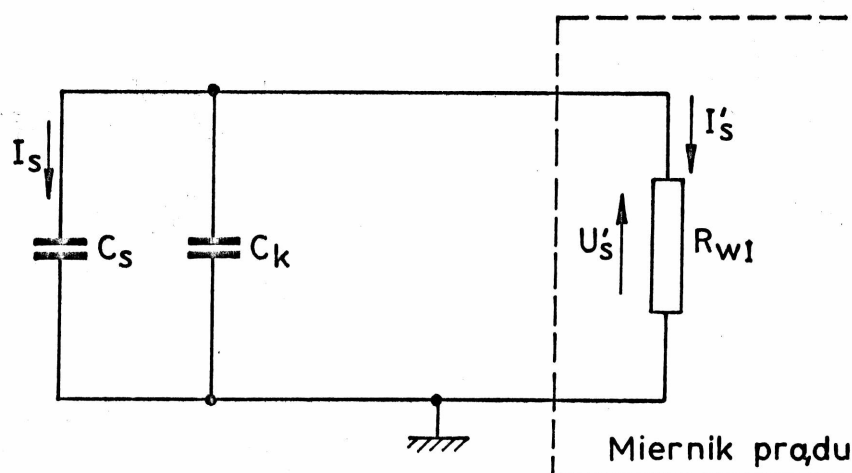
$$U_s = \epsilon_0 S \frac{E}{C_s} . \quad (3.11)$$

Ze wzorów (3.10) i (3.11) wynika, że natężenie pola elektrycznego jest mierzone pośrednio poprzez pomiar prądu I_s lub napięcia U_s .

Widok typowej sondy pojemnościowej wraz z układem do pomiaru I_s przedstawiono na rysunku 3.3, a odpowiadający temu obwód elektryczny na rysunku 3.4.



Rys.3.3. Widok typowej sondy pojemnościowej do pomiaru natężenia pola elektrycznego na powierzchni ziemi
1,3 - elektrody sondy: 2 - dielektryk: 4 - przewód koncentryczny: 5 - miernik prądu



Rys.3.4. Obwód elektryczny odpowiadający metodzie pomiaru natężenia pola elektrycznego poprzez pomiar I_s
 C_s - pojemność sondy; C_k - pojemność przewodu;
 R_{wI} - rezystancja wejściowa miernika prądu

Analizując obwód elektryczny z rysunku 3.4, należy stwierdzić, że gdy $R_{wI} \rightarrow 0$ to $I'_s \rightarrow I_s$. W warunkach rzeczywistych wartość R_{wI} jest większa od zera, wtedy przechodząc na symboliczną metodę oznaczeń, otrzymuje się równanie obwodu

$$\underline{I}_s - \underline{I}'_s = \underline{U}'_s [j\omega (C_s + C_k)], \quad (3.12)$$

przy czym:

$\underline{I}'_s$ - wartość zespolona prądu płynącego przez miernik prądu,

$\underline{I}_s$ - wartość zespolona prądu płynącego w sondzie,

$\underline{U}'_s$ - wartość zespolona spadku napięcia na rezystancji R_{wI} ,

ω - pulsacja,

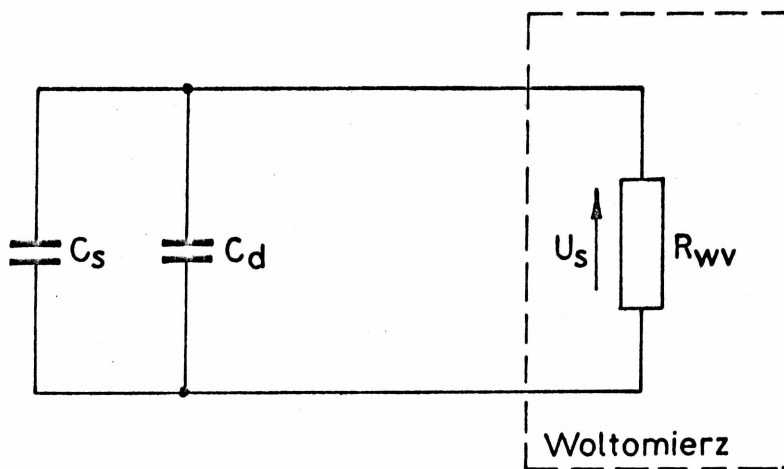
$j = \sqrt{-1}$ - jednostka urojona.

Przyjmując, że błąd metody nie może przekroczyć pewnej z góry przyjętej wartości $N\%$, co oznacza, że $\underline{I}_s / \underline{I}'_s \leq 1 + 0,01 N$, z zależności (3.12) otrzymuje się wyrażenie

$$R_{wI} \leq \frac{\sqrt{N^2 + 200 N}}{100\omega (C_s + C_k)} \quad (3.13)$$

pozwalające wyznaczyć, ze względu na założoną dokładność pomiaru, wymaganą wartość rezystancji wejściowej miernika prądu, przy danym typie sondy (C_s) i kabla (C_k).

Wykonywanie pomiarów natężenia pola elektrycznego ponad powierzchnią ziemi wymaga zastosowania sondy pojemnościowej nieuziemionej, przyłączonej do wejścia woltomierza. Schemat obwodu elektrycznego dla tego przypadku przedstawia rysunek 3.5.



Rys.3.5. Obwód elektryczny odpowiadający metodzie pomiaru natężenia pola elektrycznego poprzez pomiar U_s
 C_s - pojemność sondy; C_d - pojemność dodatkowa;
 R_{wv} - rezystancja wejściowa woltomierza.

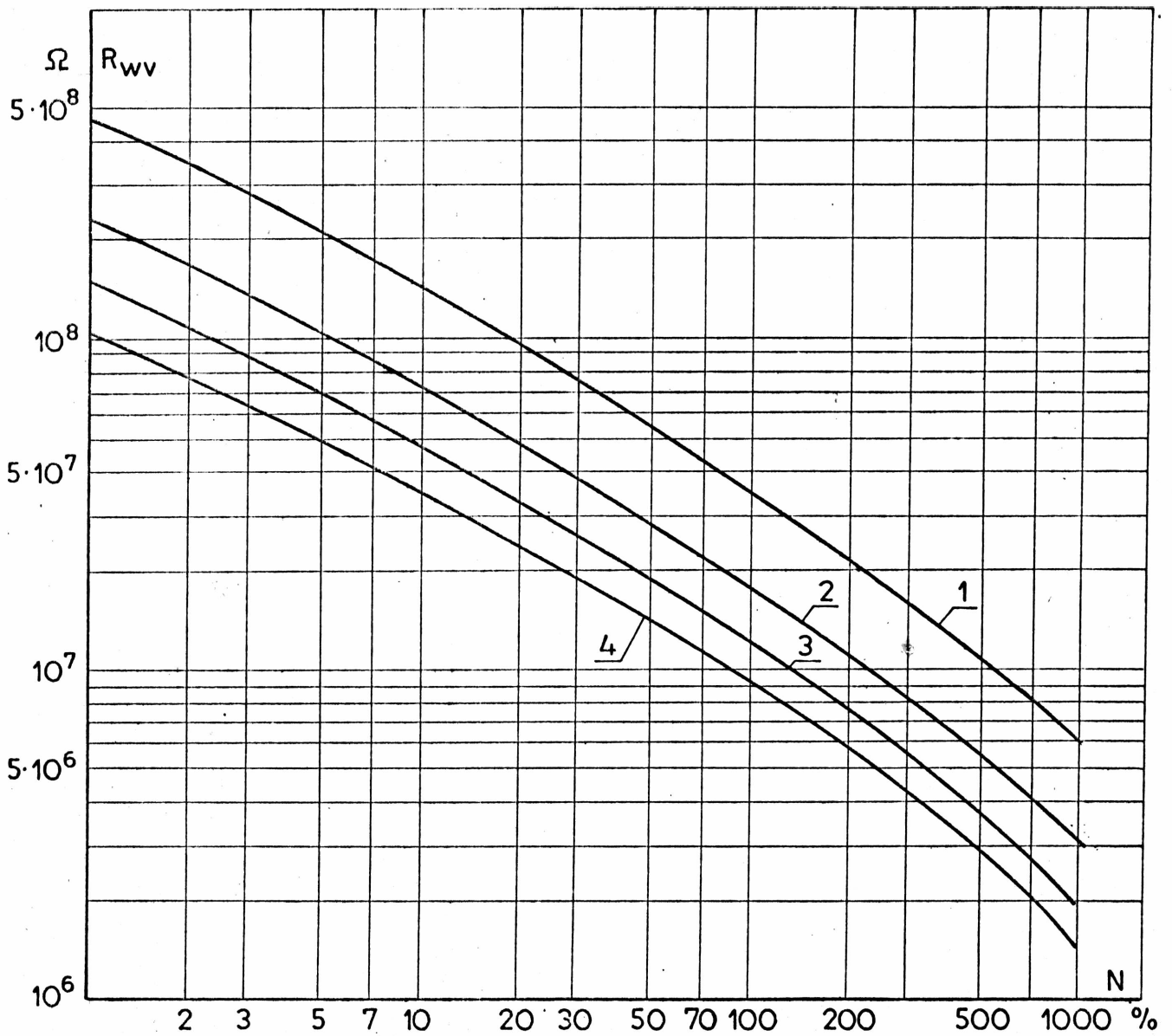
Analiza obwodu z rysunku 3.5 pozwala na określenie wymaganej rezystancji wejściowej woltomierza, przy danych wartościach C_s i C_d . Aby błąd metody nie przekroczył $N\%$, rezystancja wejściowa woltomierza musi spełniać warunek

$$R_{wv} \gg \frac{100}{\omega (C_s + C_d) \sqrt{N^2 + 200N}}. \quad (3.14)$$

Zależność $R_{wv} = f(N)$, wykreślona w skali logarytmicznej, dla kilku typowych wartości ($C_s + C_d$), przedstawiono na rysunku 3.6.

W sytuacji gdy rezystancja wejściowa miernika nie spełnia warunku określonego zależnością: (3.13) - w przypadku miernika prądu lub (3.14) - w przypadku woltomierza, błąd pomiaru może

osiągać tak znaczne wartości (rys.3.6), że wykonywanie pomiarów staje się niecelowe.



Rys.3.6. Zależność $R_{wv} = f(N)$, dla kilku typowych wartości

$(C_s + C_d)$

1 - $(C_s + C_d) = 50 \text{ pF}$; 2 - $(C_s + C_d) = 100 \text{ pF}$; 3 - $(C_s + C_d) = 150 \text{ pF}$; 4 - $(C_s + C_d) = 200 \text{ pF}$

Trudności techniczne w realizacji układów pomiarowych spełniających wymagania określone zależnościami (3.13) lub (3.14) powodują, że w chwili obecnej do pomiaru natężenia pola elektrycznego stosowane są wyłącznie układy sond pomiarowych, współpracujących z miernikiem prądu lub napięcia, cechowane indywidualnie w znanym polu elektrycznym.

Istotną wadą obecnie stosowanych metod pomiaru natężenia pola elektrycznego stanowi zjawisko zniekształcania mierzonego pola, spowodowane obecnością w nim sondy pomiarowej. Wprowadzenie sondy w obszar mierzonego pola powoduje ekwipotencjalizację powierzchni pierwotnie nieekwipotencjalnych, a ponadto zniekształcenia pola na skutek efektu krawędziowego. Dodatkowe zniekształcenia mierzonego pola mogą wystąpić na skutek przenoszenia w obszar pomiaru potencjałów obcych.

Zmniejszenie wpływu czynników zakłócających pomiar osiągnąć można przez odpowiednią konstrukcję sond pomiarowych, a przede wszystkim przez ich miniaturyzację, co jednak powoduje konieczność zwiększenia czułości mierników.

W chwili obecnej brak jest fabrycznych urządzeń do pomiaru natężenia pola elektrycznego o częstotliwości 50 Hz. Wykonywanie takich pomiarów w fazie przygotowawczej badań eksperymentalnych, związanych z zakresem rozprawy było konieczne ze względów, o których wspomniano w rozdziale 2.1. W związku z tym wykonano urządzenie do pomiaru natężenia pola elektrycznego o częstotliwości 50 Hz oraz kilkanaście sond pomiarowych, przeznaczonych do współpracy z tym urządzeniem. Zestawem tym, którego parametry metrologiczne określone zależnościami (3.13)-i (3.14) zostały spełnione, przy założonym błędzie metody nie przekraczającym wartości 1%, wykonywano niezbędne pomiary w warunkach laboratoryjnych.

Z przedstawionych rozważań wynika jak ważną rolę w identyfikacji rozkładu pola elektrycznego odgrywa właściwy dobór elementów układu pomiarowego. Szczegółowa analiza prac różnych autorów [8,22,50,52,76] wykazuje, że wymaganiom tym nie poświęcali oni dostatecznej uwagi. Wydaje się, że może to być przyczyną różbieżnych ustaleń w różnych pracach z tej dziedziny.

3.2.4. Obliczanie indukcji magnetycznej

Pole magnetyczne w otoczeniu linii przesyłowej zależy od płynącego przez nią prądu. Aby umożliwić porównanie wyników obliczeń dla różnych typów linii przeprowadzono je, stosując do obliczeń prąd wynikający z obciążenia linii impedancją falową Z_F , która wynosi

$$Z_F = \sqrt{X_L X_C}, \quad (3.15)$$

przy czym:

X_L - reaktancja indukcyjna linii na jednostkę długości,

X_C - reaktancja pojemnościowa linii na jednostkę długości.

Impedancja falowa jest wielkością charakterystyczną dla konkretnej linii przesyłowej i zależy od jej budowy (rodzaj i układ przewodów, układ faz itd.). W zależności od rodzaju linii wartość Z_F zawiera się w granicach od 200Ω dla linii z przewodami wiązkowymi do 400Ω dla linii o przewodach drutowych.

Moc dostarczona do obciążenia linii równego Z_F wynosi

$$P_{nat} = \frac{U^2}{Z_F}, \quad (3.16)$$

gdzie:

U - napięcie linii,

P_{nat} - moc naturalna linii.

Z zależności (3.16) wynika bezpośrednio, że natężenie prądu I_{ZF} , płynącego w linii obciążonej impedancją Z_F wynosi

$$I_{ZF} = \frac{\sqrt{2} U}{\sqrt{3} Z_F}. \quad (3.17)$$

Jak wynika z prawa Ampera, indukcja magnetyczna $\vec{B}$ w odległości r od długiego prostoliniowego przewodnika, przez który przepływa prąd I wynosi

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I \vec{r}}{2 \pi r}, \quad (3.18)$$

przy czym:

μ_0 - przenikalność magnetyczna ośrodka,

$\vec{1}_r$ - wektor jednostkowy w kierunku r .

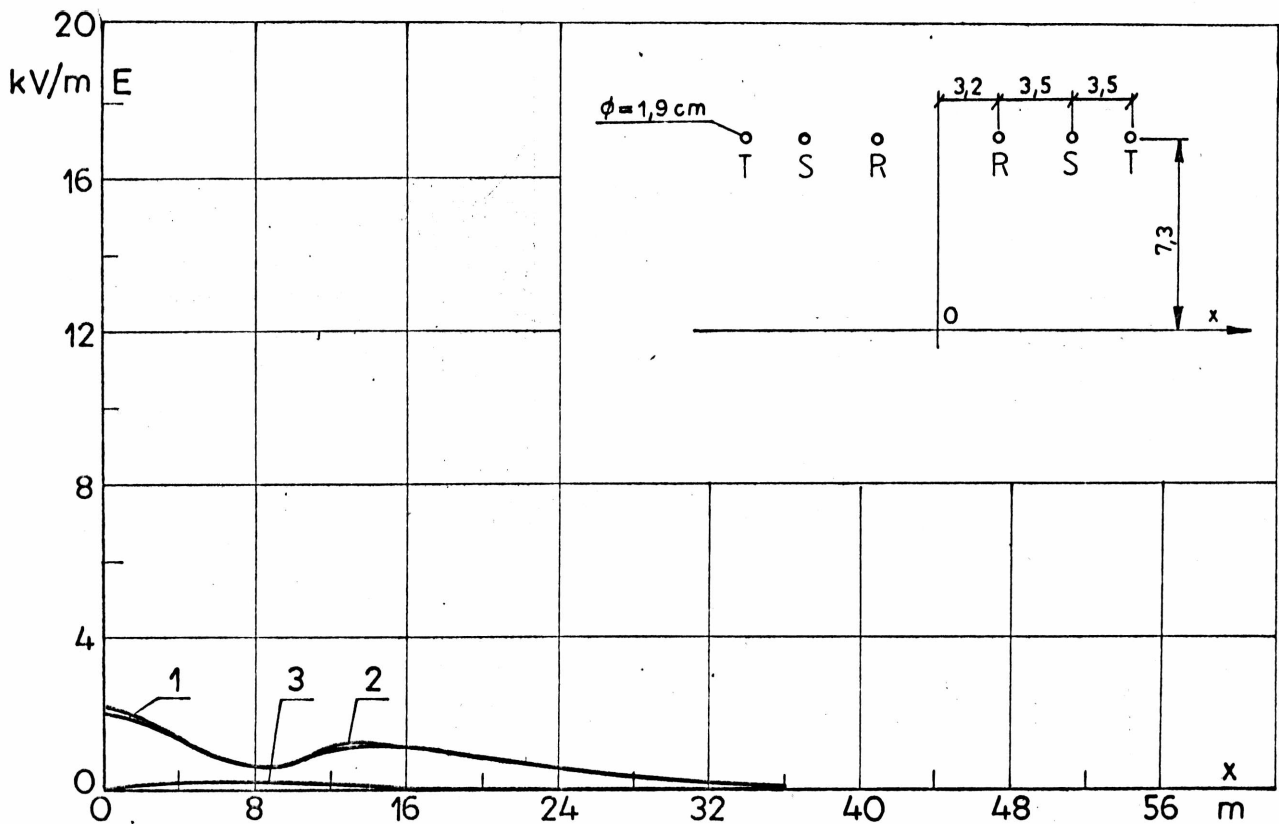
Aby zależność tę wykorzystać do obliczenia indukcji magnetycznej w otoczeniu linii przesyłowej wysokiego napięcia, przez którą przepływa prąd I , należy zastosować ją do każdego przewodu linii oddzielnie, a otrzymane wyniki zsumować zgodnie z zasadą liniowej superpozycji. Postępując w ten sposób, po uwzględnieniu zależności przestrzennych i czasowych przy wyznaczaniu wypadkowego wektora indukcji, obliczono maksymalne wartości indukcji magnetycznej na poziomie ziemi, 1 m i 2 m ponad ziemią. Wartości te obliczono w punktach leżących na osi prostopadłej do trasy linii, w miejscu maksymalnego zwisu przewodów. Obliczenia przeprowadzono podstawiając we wzorze (3.18) w miejsce prądu I wartość I_{ZF} wyznaczoną dla konkretnie rozważanej linii. Wyniki obliczeń oraz ich omówienie przedstawiono w rozdziale 3.4.

3.3. Rozkład natężenia pola elektrycznego w otoczeniu obiektów elektroenergetycznych wysokiego napięcia

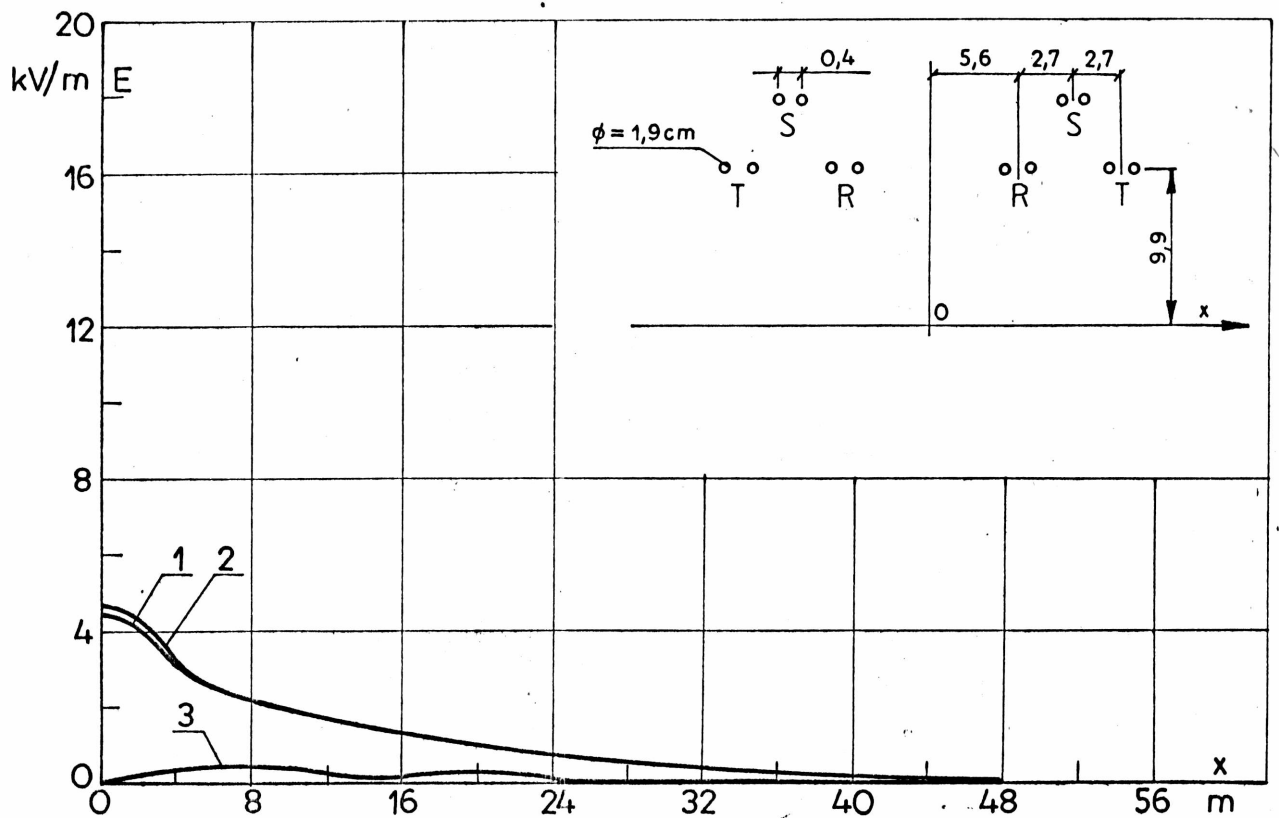
W celu ilościowego opisu pola elektrycznego, pod działaniem którego mogą znaleźć się organizmy żywe, w tym także i człowiek, wykonano obliczenia (według metody przedstawionej w rozdz. 3.2.2) natężenia pola elektrycznego w otoczeniu elektroenergetycznych linii przesyłowych o różnych napięciach. Rysunki 3.7-3.11 przedstawiają obliczone rozkłady składowych: poziomej i pionowej wektora $\vec{E}$ w kierunku prostopadłym do trasy linii. Obliczenia wykonano dla punktów leżących na powierzchni ziemi (składowa pionowa) oraz 2 metry nad powierzchnią ziemi (składowa pionowa i pozioma).

Przykładowe rozkłady natężenia pola elektrycznego, występujące w rozdzielniach wysokiego napięcia przedstawiono na rysunkach 3.12-3.14. Wykresy te sporządzono w oparciu o pomiary wykonane przez Groszko [25].

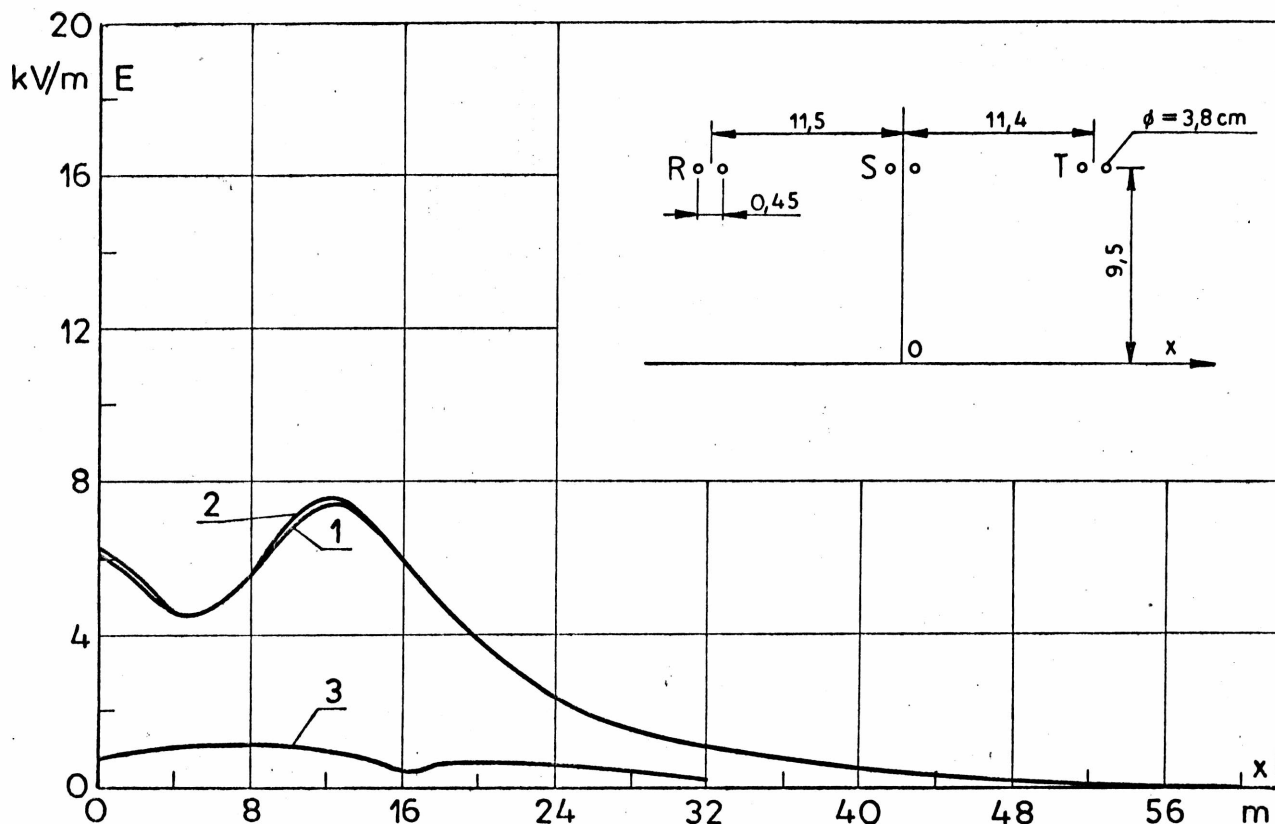
Rozpatrując pole elektryczne jako czynnik oddziałujący szkodliwie na środowisko, istotne staje się ustalenie maksymalnych wartości natężenia tego pola w otoczeniu urządzeń już eksploatowanych, bądź będących w trakcie budowy czy projektowania.



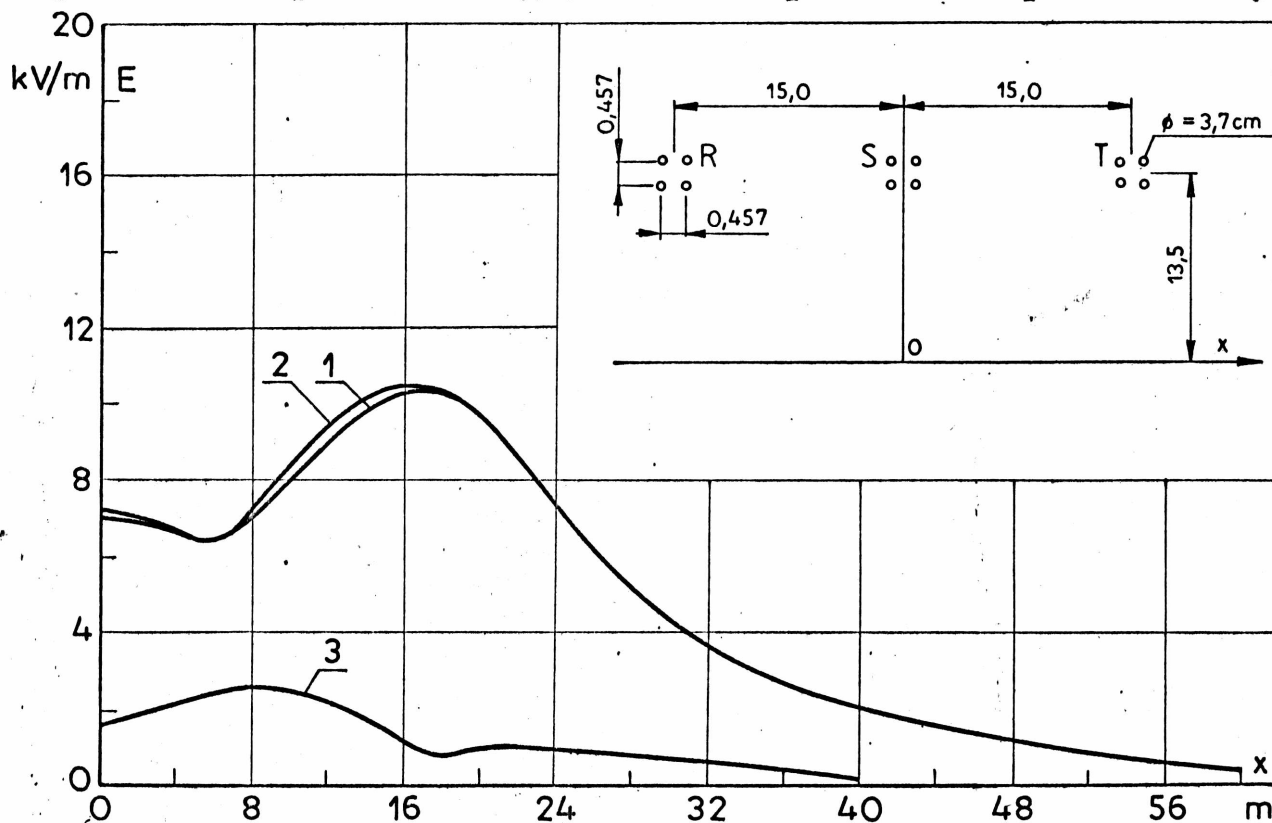
Rys.3.7. Rozkład składowej poziomej i pionowej natężenia pola elektrycznego, w kierunku x , dla linii przesyłowej o napięciu 110kV; 1 - składowa pionowa na powierzchni ziemi, 2 - składowa pionowa 2 m ponad ziemią, 3 - składowa pozioma 2 m ponad ziemią



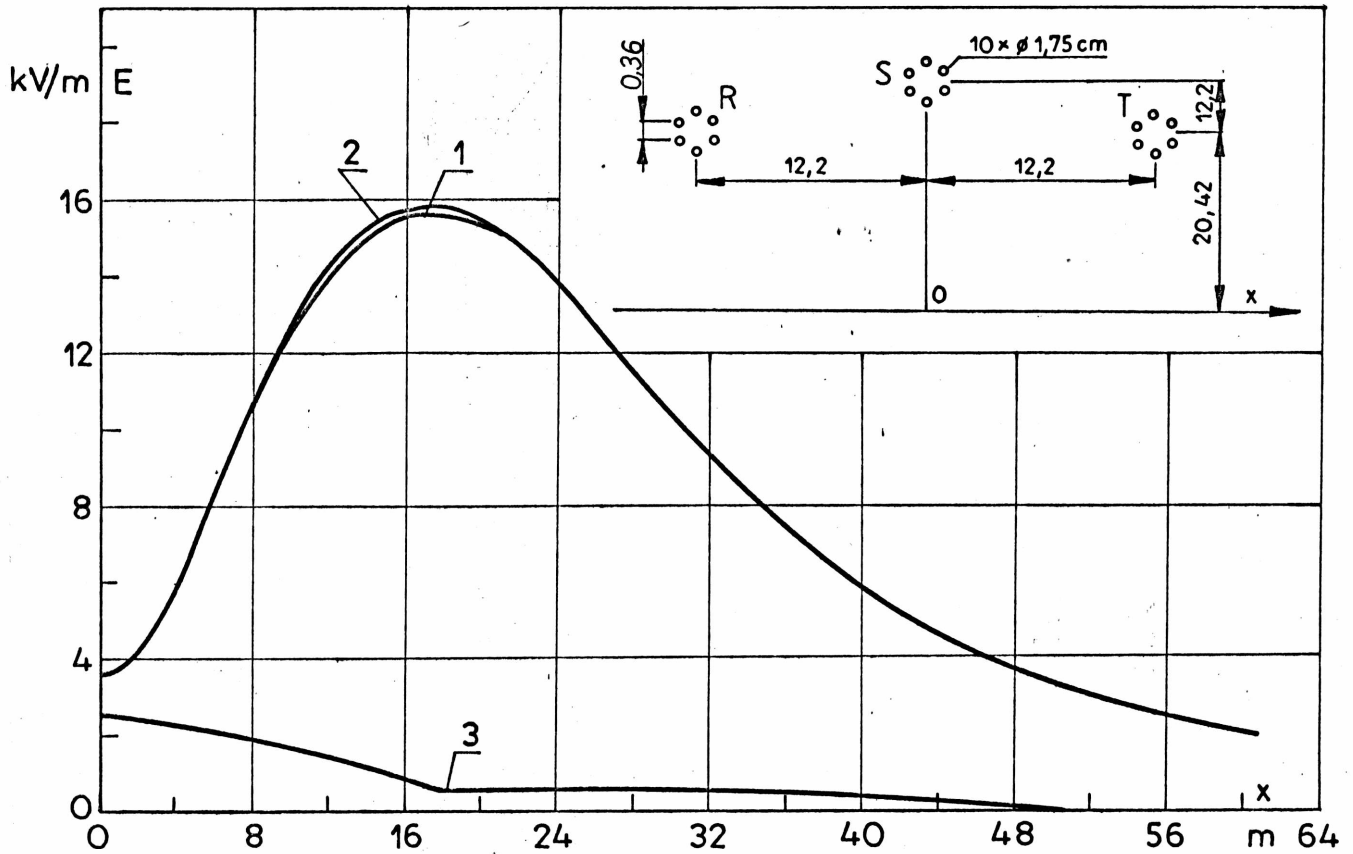
Rys.3.8. Rozkład składowej poziomej i pionowej natężenia pola elektrycznego, w kierunku x , dla linii przesyłowej o napięciu 220 kV; 1 - składowa pionowa na powierzchni ziemi, 2 - składowa pionowa 2 m ponad ziemią, 3 - składowa pozioma 2 m ponad ziemią



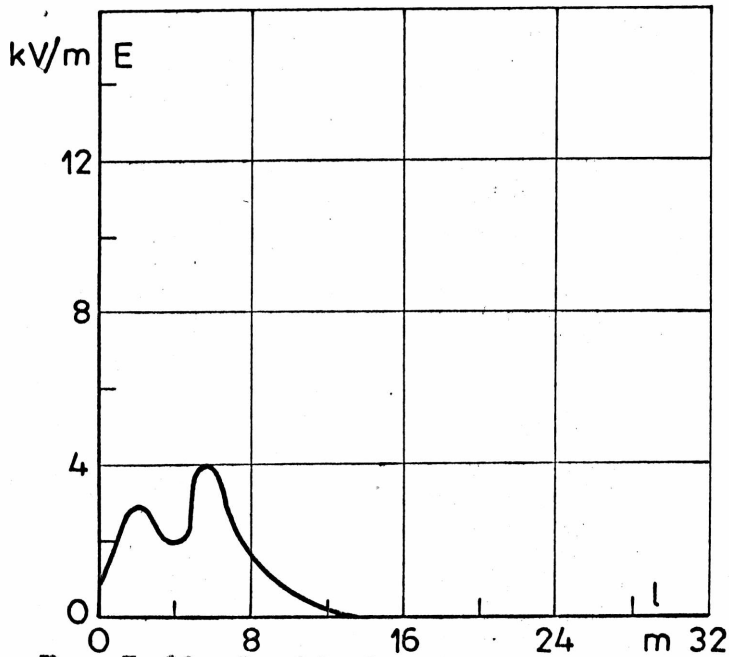
Rys. 3.9. Rozkład składowej poziomej i pionowej natężenia pola elektrycznego, w kierunku x , dla linii przesyłowej o napięciu 400 kV; 1-składowa pionowa na powierzchni ziemi, 2-składowa pionowa 2 m ponad ziemią, 3-składowa pozioma 2 m ponad ziemią.



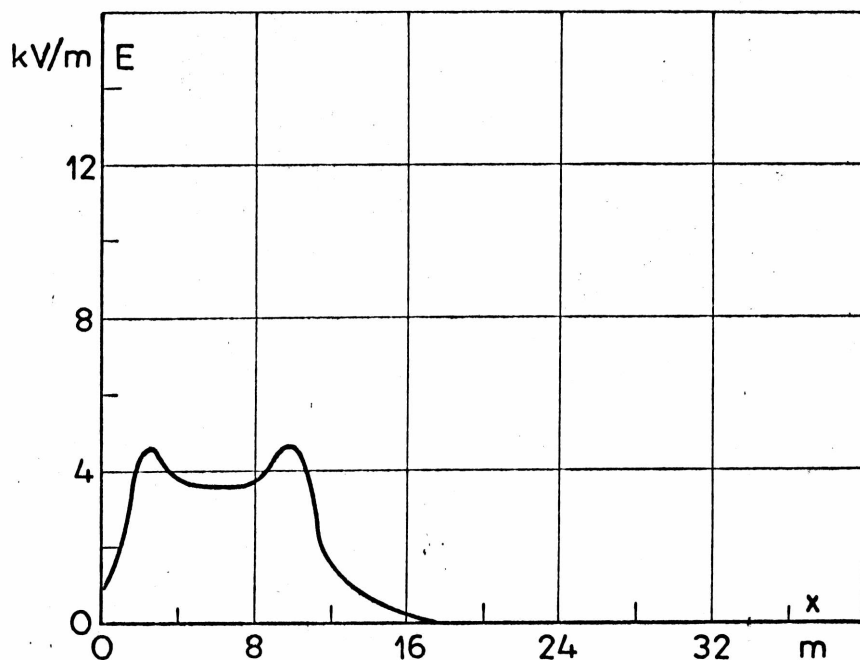
Rys. 3.10. Rozkład składowej poziomej i pionowej natężenia pola elektrycznego w kierunku x , dla linii przesyłowej o napięciu 735 kV; 1-składowa pionowa na powierzchni ziemi, 2-składowa pionowa 2 m ponad ziemią, 3-składowa pozioma 2 m ponad ziemią.



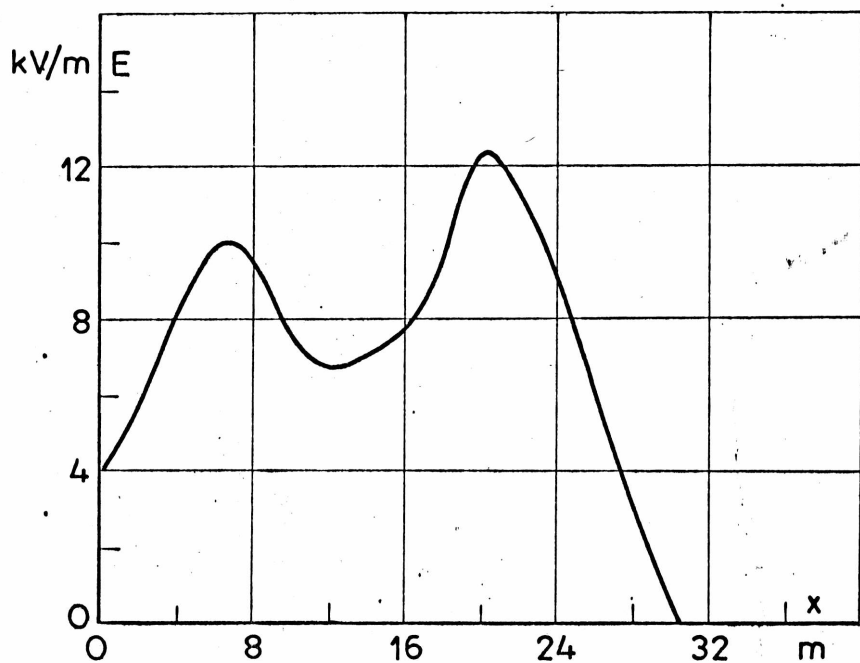
Rys.3.11. Rozkład składowej poziomej i pionowej natężenia pola elektrycznego w kierunku x , dla linii przesyłowej o napięciu 1500 kV; 1-składowa pionowa na powierzchni ziemi; 2-składowa pionowa 2 m. ponad ziemią; 3-składowa pozioma 2 m. ponad ziemią.



Rys.3.12. Rozkład natężenia pola elektrycznego na wysokości 1,7 m ponad ziemią w sąsiedztwie pola 4 rozdzielni 110 kV Łaziska - Kopanina [25].



Rys.3.13. Rozkład natężenia pola elektrycznego na wysokości 1,7 m ponad ziemią w sąsiedztwie pola 7 w rozdzielni 220 kV Łaziska-Kopanina [25].



Rys.3.14. Rozkład natężenia pola elektrycznego na wysokości 1,7 m ponad ziemią w rozdzielni 380 kV [25].

W tablicy 3.1 zestawiono maksymalne wartości natężenia pola elektrycznego występującego w otoczeniu linii przesyłowych różnych typów. Podano także wartości natężenia pola elektrycznego w charakterystycznych miejscach pod linią, a ponadto wyznaczono szerokość strefy, w której natężenie pola przekracza wartość 1 kV/m.

Pomimo, że w procesie obliczeń natężenia pola uwzględniono te czynniki, które mają decydujący wpływ na jego wartość, a to:

- a) napięcie urządzenia,
- b) wysokość zawieszenia przewodów nad ziemią,
- c) rodzaj stosowanych przewodów i ich wzajemną konfigurację,

zdaniami Schneidera [74] rozkład pola elektrycznego otrzymany w wyniku obliczeń będzie różnił się od rzeczywistego. Różnica ta, jego zdaniem, może być spowodowana nieuwzględnieniem w stosowanych procedurach obliczeniowych takich czynników wpływających na rozkład pola jak: nieregularności terenu pod i w okolicy obiektu, obecność roślinności o różnej wysokości oraz bliskość dużych mas metalowych w otoczeniu źródła pola. Pogląd ten, zdaniem autora słuszny, potwierdzają wyniki pomiarów natężenia pola wykonanych przez różnych badaczy [1,14], którzy stwierdzili różnice w wynikach obliczeń i pomiarów sięgające wartości 20 a nawet 70%.

Analizując przebiegi zależności $E = f(x)$ przedstawione na rysunkach 3.7-3.14 oraz dane zawarte w tablicy 3.1 należy stwierdzić, że:

- a) natężenie pola elektrycznego występującego w otoczeniu obiektów elektroenergetycznych wysokiego napięcia osiąga wartości wielokrotnie przewyższające natężenie naturalnego pola elektrycznego Ziemi¹⁾ oraz natężenie pola generowanego przez domowe urządzenia powszechnego użytku (tabl. 3.2);

- b) maksymalna wartość natężenia pola elektrycznego do wysokości 2 m nad powierzchnią ziemi, przy obecnie eksploatowanych oraz w projektowanych liniach wysokiego napięcia nie przekracza 20 kV/m;

¹⁾ Jako wartość średnią stałego, pionowego, naturalnego pola elektrycznego Ziemi przyjmuje się natężenie równe 0,13 kV/m [69]

Tablica 3.1

Natężenie pola elektrycznego w otoczeniu linii elektroenergetycznych
wysokiego napięcia różnych typów¹⁾

Napięcie znamionowe linii, w kV	110	110	110	220	220	345	380	380	500	735	750	1100	1300	1500
Liczba torów	2	2	2	2	2	2	1	2	1	1	1	1	2	1
Minimalny odstęp przewodów do ziemi, w m.	7,3	7,3	7,6	9,9	7,2	10,0	9,1	9,1	7,6	11,0	12,0	17,4	17,3	20,4
Natężenie pola elektrycznego na powierzchni ziemi ²⁾ , w kV/m	1,6	2,0	1,9	3,3	6,2	6,1	8,1	7,2	4,1	12,1	12,0	7,8	14,1	3,8
Natężenie pola elektrycznego pod przewodem skrajnym, w kV/m	1,0	1,0	0,5	2,0	2,1	6,4	7,7	5,4	12,6	12,5	13,3	11,0	14,4	15,1
Maksymalna wartość natężenia pola elektrycznego, w kV/m	1,6	2,0	2,1	3,3	6,2	6,4	8,1	7,9	12,8	12,6	13,5	12,1	17,1	15,8
Szerokość strefy, dla której spełniona jest nierówność $E > 1 \text{ kV/m}$, w m	12	26	18	44	56	38	76	70	66	98	110	140	182	192

1) Tablicę sporządzono w oparciu o dane zawarte w pracach [4,16,19,36,43,70,74]

2) W odległości 1 m od osi symetrii linii ($x = 1 \text{ m}$ na rys. 3.7-3.11)

c) do wysokości 2 m nad powierzchnią ziemi, stopień jednorodności pola jest nie mniejszy niż 90%;

d) maksymalne natężenie pola elektrycznego w większości urządzeń elektroenergetycznych wysokiego napięcia występuje pod skrajną fazą, w miejscu największego zwisu przewodu;

e) składowa pozioma natężenia pola elektrycznego, do wysokości 2 m ponad powierzchnią ziemi, osiąga znacznie mniejsze wartości niż składowa pionowa tego pola.

Tablica 3.2

Natężenie pola elektrycznego w otoczeniu urządzeń elektrycznych powszechnego użytku [3]

Rodzaj urządzenia	Natężenie pola elektrycznego ¹⁾ w kV/m
Koc elektryczny	0,2 - 0,25
Terma elektryczna	0,13
Żelazko	0,06
Mikser ręczny	0,05
Toster	0,04
Suszarka do włosów	0,04
Gramofon	0,04
Odbiornik telewizyjny	0,03
Ekspres do kawy	0,03
Zegar elektryczny	0,015
Dzwonek	0,004
1) Pomiary wykonywano w odległości 30 cm od urządzenia	

Wysoki stopień jednorodności pola, jaki stwierdza się pod liniami przesyłowymi, do wysokości ok. 2 m ponad ziemią, a więc w obszarze, w którym organizmy żywe, w tym także i człowiek, mogą być narażone na jego działanie, uzasadnia celowość i poprawność stosowania jednorodnego, pionowego pola elektrycznego w badaniach laboratoryjnych.

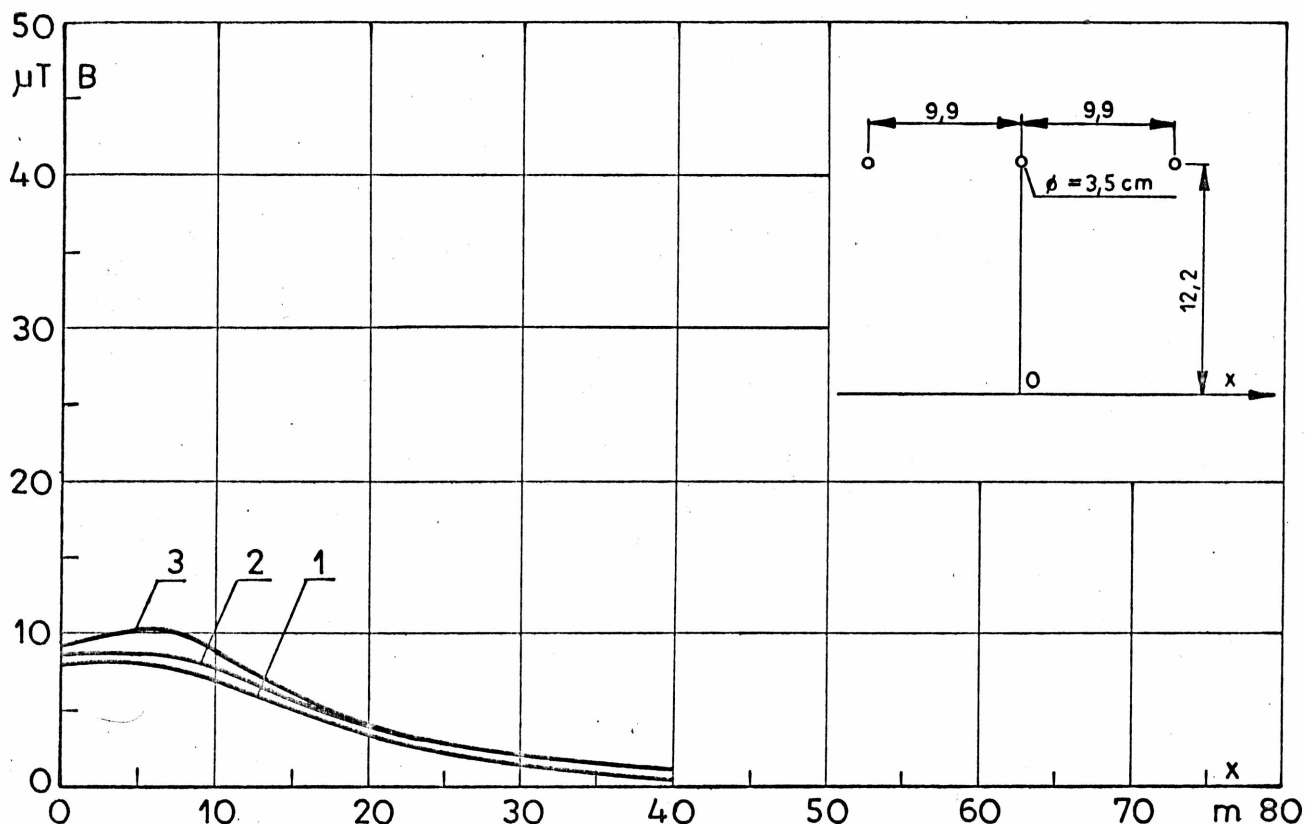
3.4. Rozkład indukcji magnetycznej w otoczeniu linii przesyłowych wysokiego napięcia

W oparciu o podaną w zarysie metodę (rozdz. 3.2.4), dokonano obliczeń rozkładu indukcji magnetycznej w otoczeniu 16 typów linii przesyłowych o różnych napięciach i konstrukcji. Na rysunkach 3.15 - 3.20 przedstawiono zależność maksymalnej indukcji występującej na powierzchni ziemi, 1 m i 2 m ponad ziemią, od odległości x od trasy linii, dla 6 wybranych typów linii. Na rysunkach tych oś pionową zakończono w miejscu, w którym wartość indukcji magnetycznej wynosi $50 \mu\text{T}$. Wartość ta przyjmowana jest [34,69] jako średnia wartość indukcji naturalnego pola magnetycznego Ziemi. Ponadto na rysunkach tych zaznaczono układ przewodów w linii oraz podano wartość impedancji falowej Z_F i prąd I_{ZF} , dla którego dokonano obliczeń indukcji magnetycznej. Dla pozostałych 10 typów linii wyniki obliczeń przedstawiono w tabelicy 3.3.

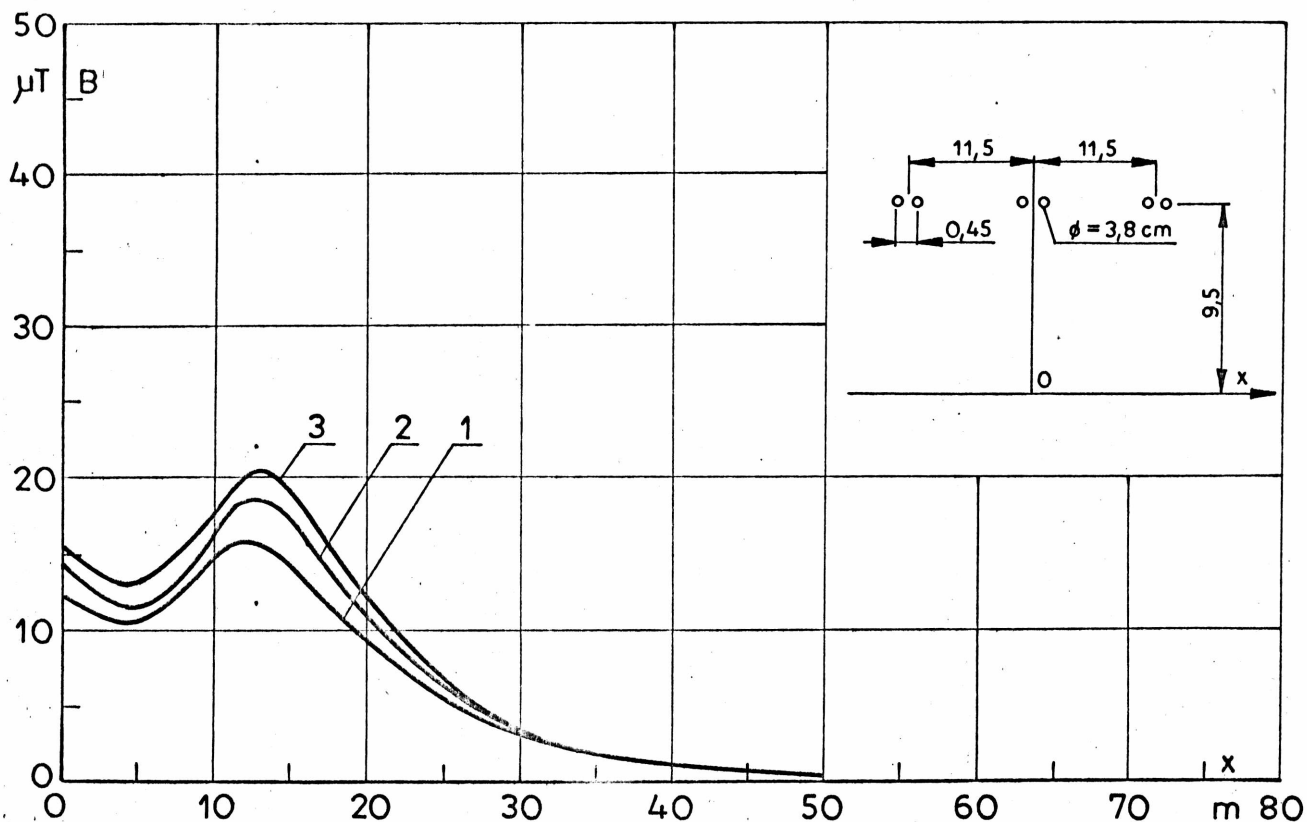
Biorąc pod uwagę występujące w praktyce wartości indukcyjności i pojemności linii przesyłowych wysokiego napięcia oraz korzystając z rozważań dotyczących warunków poprawnej pracy linii [65], na rysunku 3.21 sporządzono wykres zależności stosunku mocy znamionowej P_n przesyłanej przez linię, do jej mocy naturalnej P_{nat} , od długości linii przesyłowej l .

Analizując dane o obecnie eksploatowanych oraz projektowanych w różnych krajach układach linii przesyłowych w odniesieniu do ekonomicznie uzasadnionego napięcia pracy oraz długości linii, należy stwierdzić, że zależność napięcia linii od jej długości ma charakter prostoliniowy (rys.3.22).

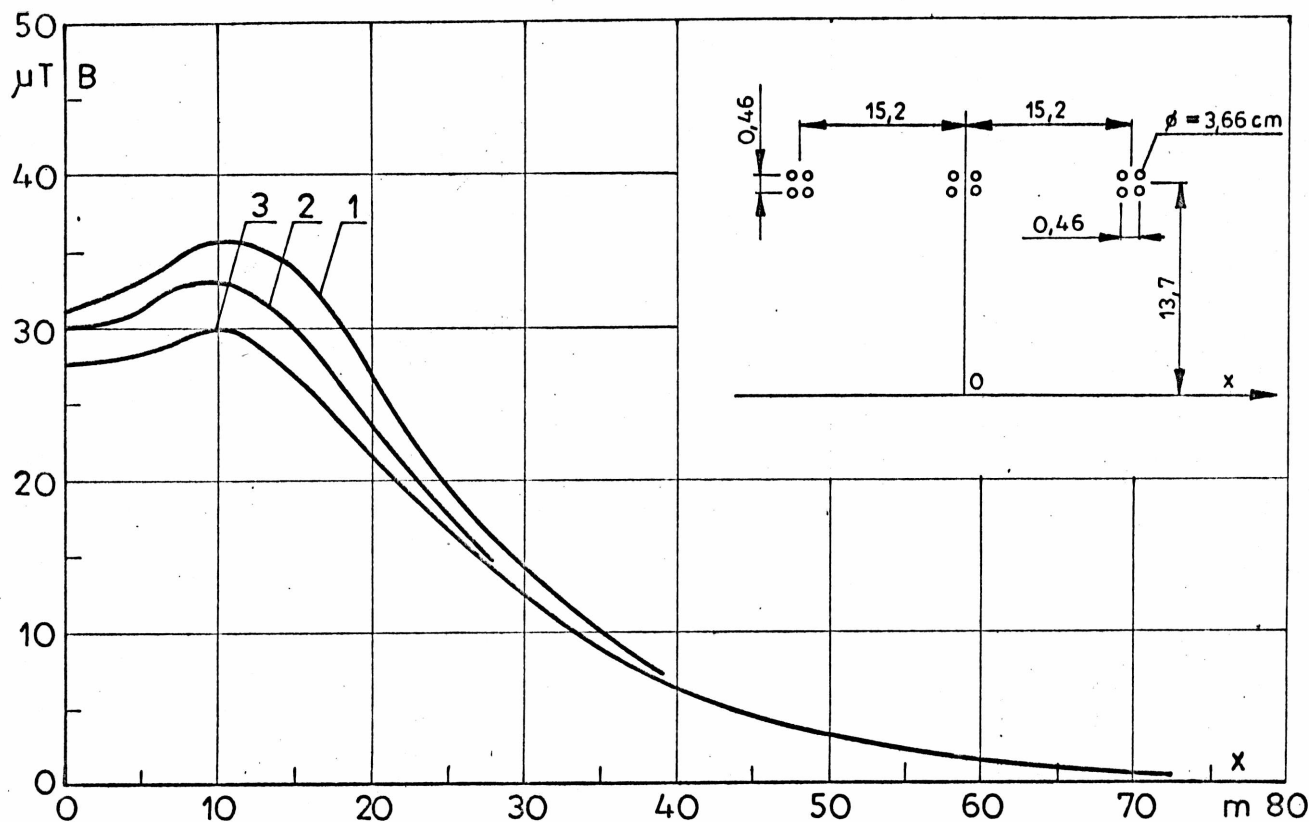
Przeliczenie indukcji magnetycznej obliczonej przy założeniu obciążenia linii impedancją falową na wartość odpowiadającą obciążeniu znamionowemu wymaga znajomości przebiegu funkcji $P_n/P_{nat} = f(U)$. Przebieg ten wyznaczony bezpośrednio z rysunków 3.21 i 3.22 przedstawiono na rysunku 3.23.



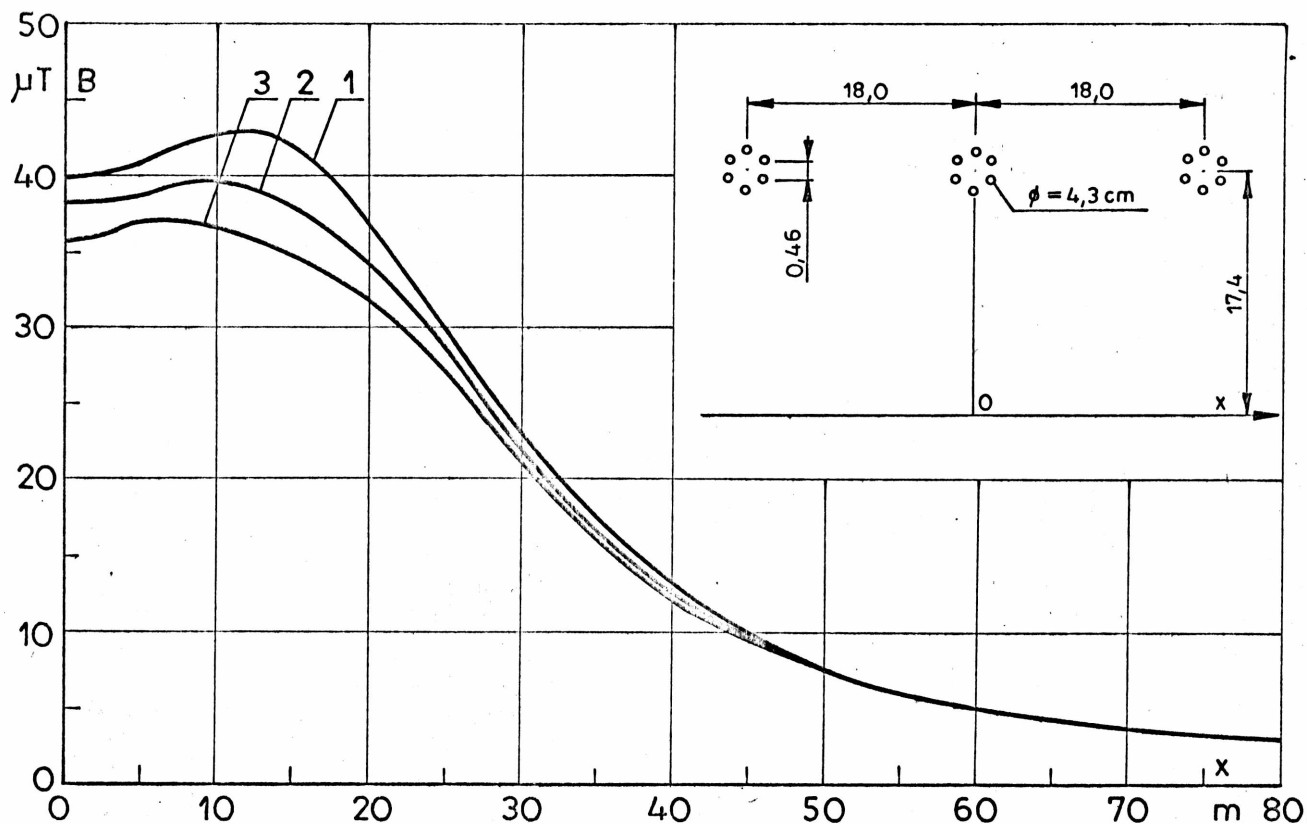
Rys.3.15. Indukcja magnetyczna B w odległości x od trasy linii przesyłowej o napięciu 220 kV; 1 - na powierzchni ziemi, 2 - 1 m nad ziemią, 3 - 2 m nad ziemią, $I_{ZF} = 590 \text{ A}$



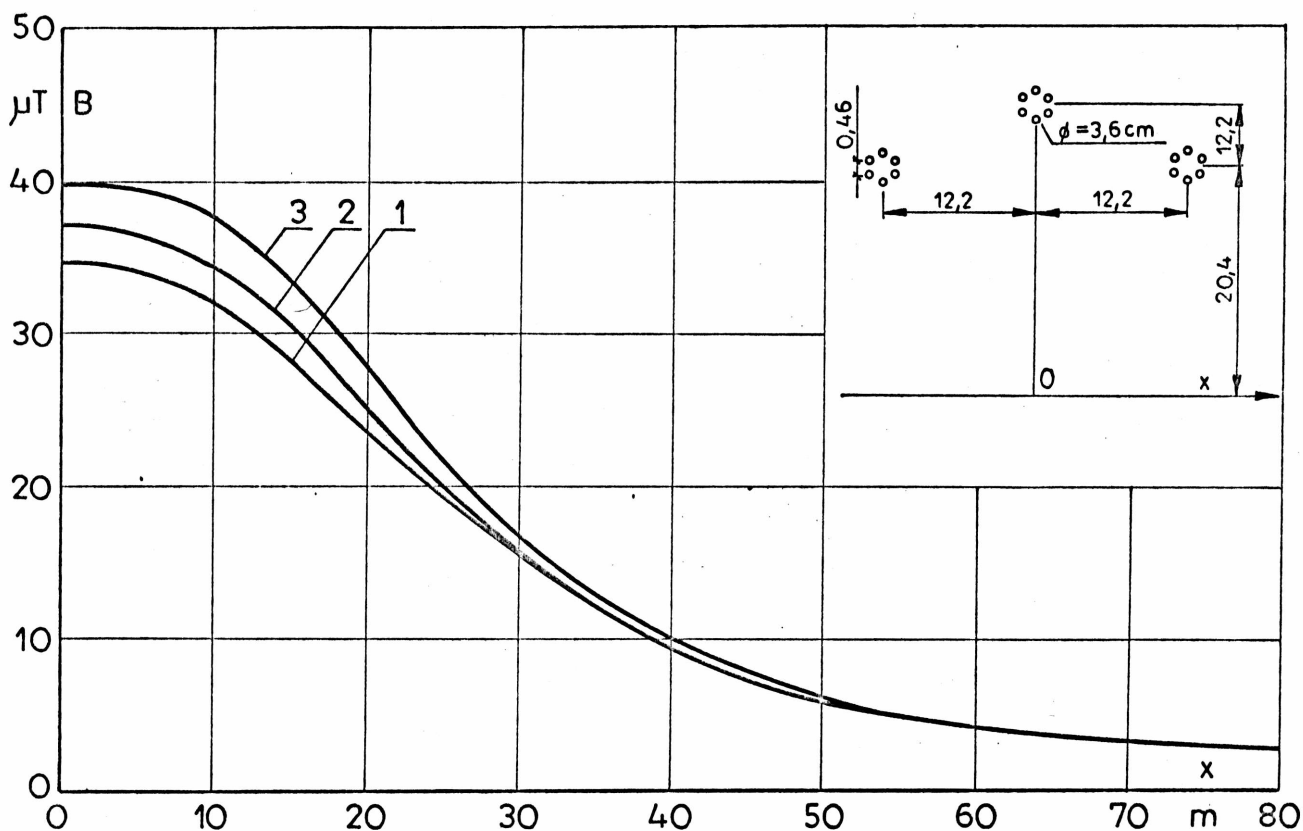
Rys.3.16. Indukcja magnetyczna B w odległości x od trasy linii przesyłowej o napięciu 400 kV; 1 - na powierzchni ziemi, 2 - 1 m nad ziemią, 3 - 2 m nad ziemią, $I_{ZF} = 1100 \text{ A}$



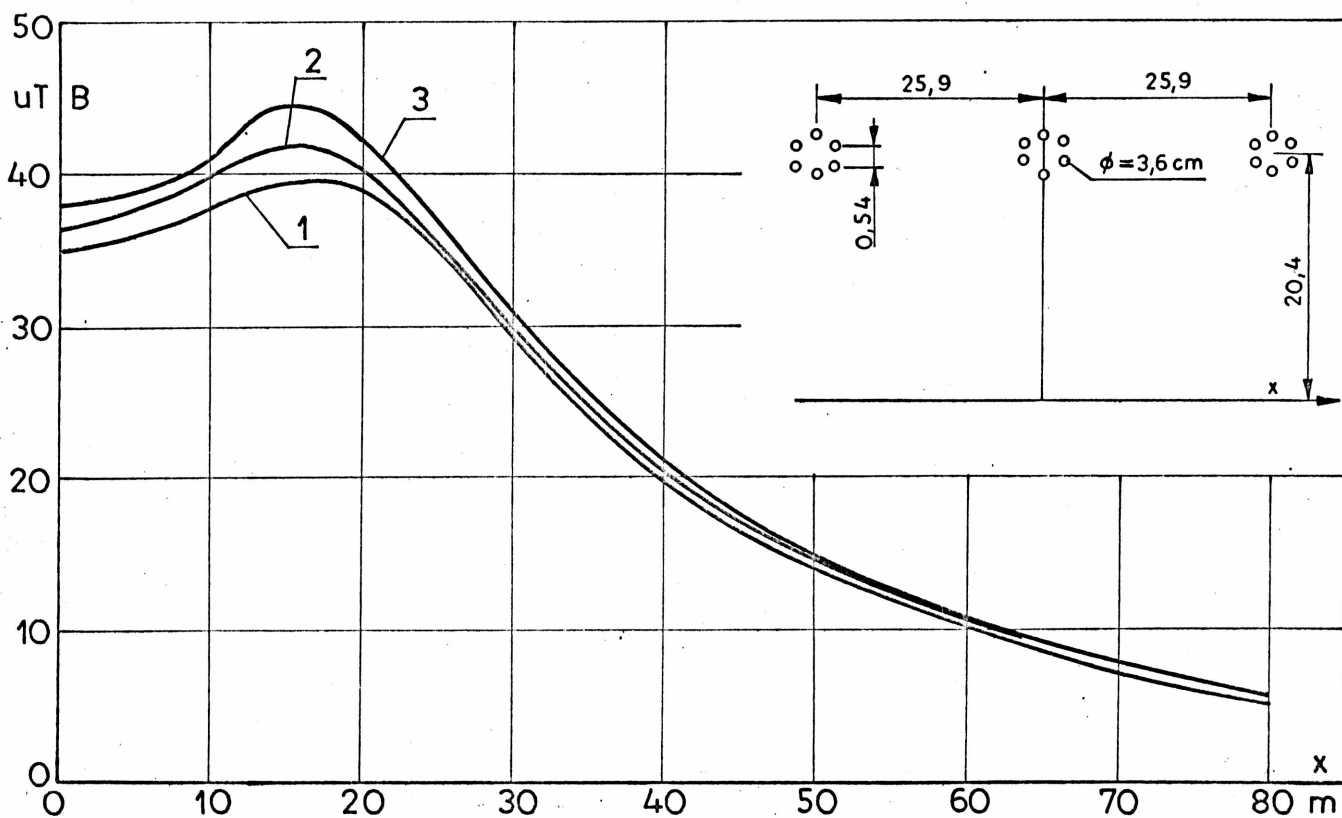
Rys.3.17. Indukcja magnetyczna B w odległości x od trasy linii przesyłowej o napięciu 735 kV; 1 - na powierzchni ziemi, 2 - 1 m nad ziemią, 3 - 2 m nad ziemią, $I_{ZF} = 2286$ A



Rys.3.18. Indukcja magnetyczna B w odległości x od trasy linii przesyłowej o napięciu 1100 kV; 1 - na powierzchni ziemi, 2 - 1 m nad ziemią, 3 - 2 m nad ziemią, $I_{ZF} = 3657$ A



Rys.3.19. Indukcja magnetyczna B w odległości x od trasy linii przesyłowej o napięciu 1500 kV; 1 - na powierzchni ziemi, 2 - 1 m nad ziemią, 3 - 2 m nad ziemią, $I_{ZF} = 4649 \text{ A}$

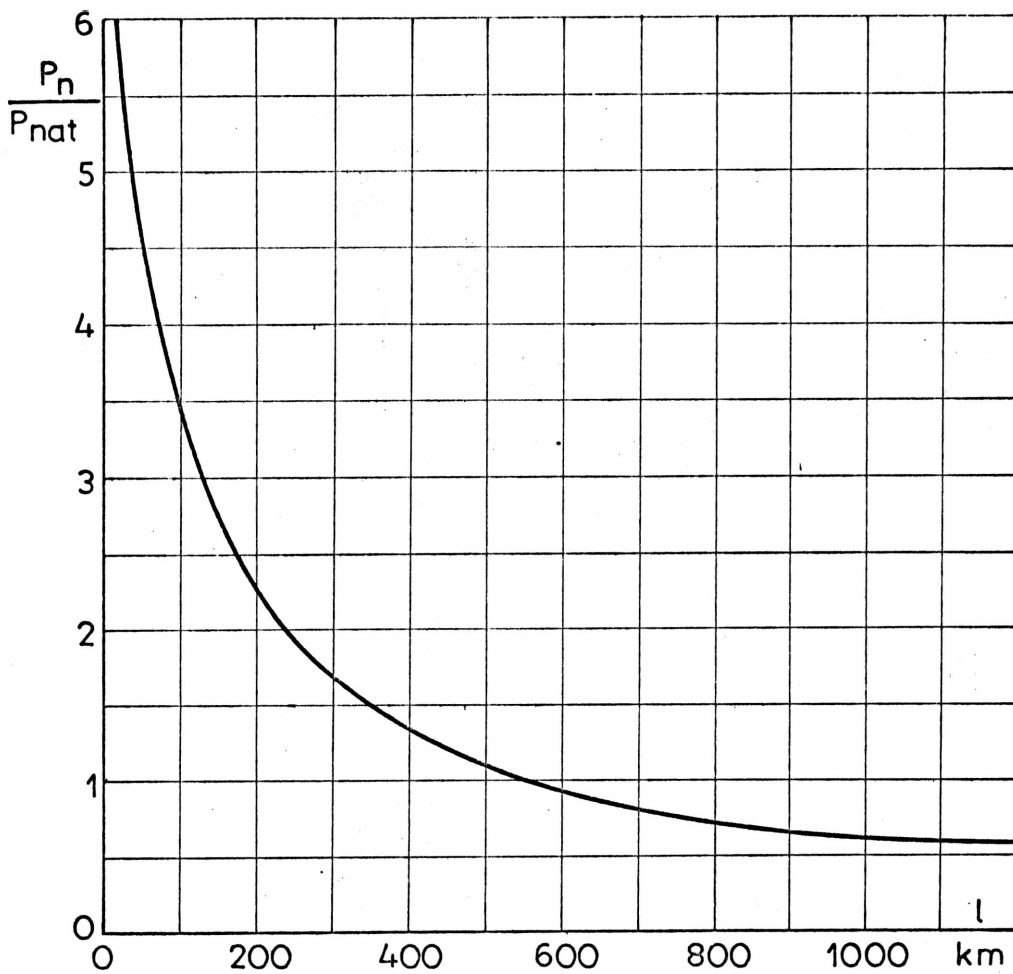


Rys.3.20. Indukcja magnetyczna B w odległości x od trasy linii przesyłowej o napięciu 1500 kV; 1 - na powierzchni ziemi, 2 - 1 m nad ziemią, 3 - 2 m nad ziemią, $I_{ZF} = 4273 \text{ A}$

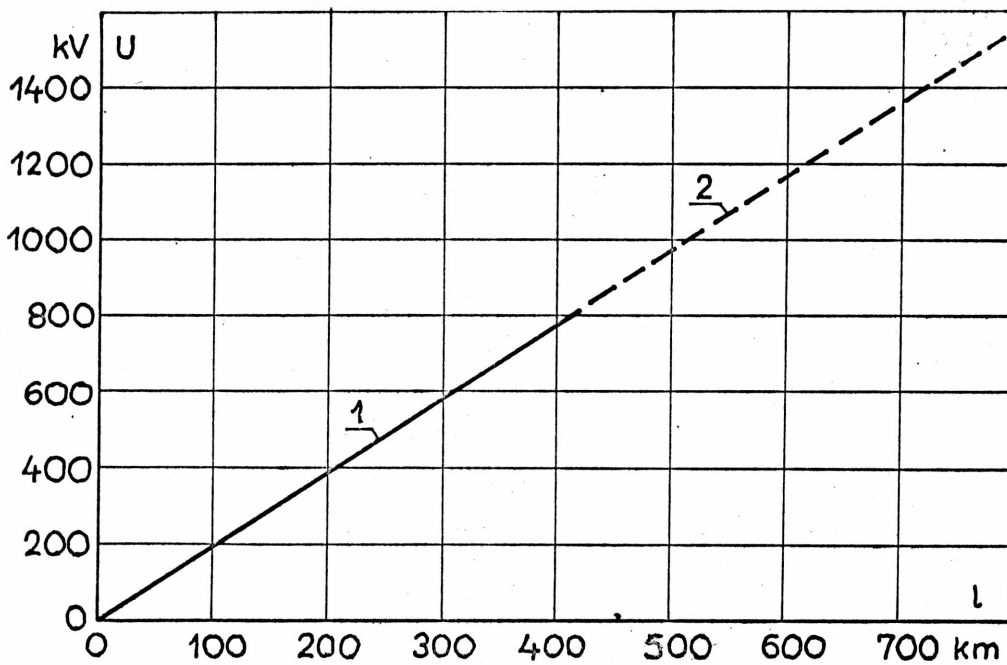
Tablica 3.3

Indukcja magnetyczna w otoczeniu linii elektroenergetycznych wysokiego
napięcia różnych typów

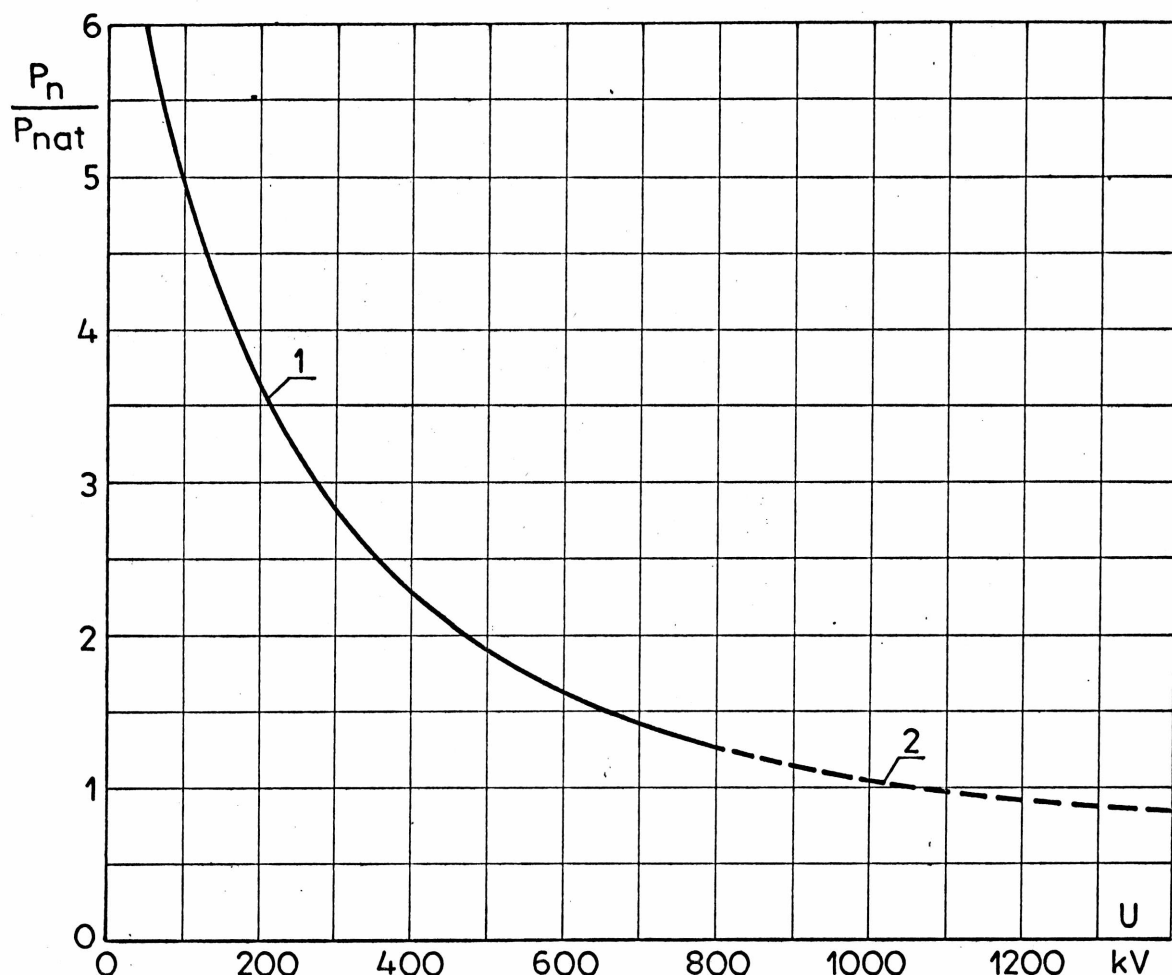
Napięcie znamionowe linii, w kV		287	287	345	345	500	500	1100	1100	1500	1500
Liczba torów		2	1	2	1	1	1	1	1	1	1
Maksymalna indukcja magnetyczna w μT	na powierzchni ziemi	12	8	13	20	25	25	35	38	36	37
	1 m nad ziemią	15	9	15	24	55	39	38	42	39	39
	2 m nad ziemią	18	10	18	28	30	48	42	45	42	42
Impedancja falowa linii Z_F , w Ω		361	397	267	293	282	271	255	235	253	272
$I_{ZF}^{1)}$, w A		649	590	1055	961	1448	1506	3522	3822	4849	4503
1) I_{ZF} - prąd płynący przez linię obciążoną impedancją falową Z_F											



Rys.3.21. Zależność $P_n/P_{nat} = f(l)$



Rys.3.22. Zależność przeciętnej długości linii przesyłowej od jej napięcia; 1 - linie aktualnie eksploatowane, 2 - linie projektowane



Rys.3.23. Zależność $P_n/P_{nat} = f(U)$

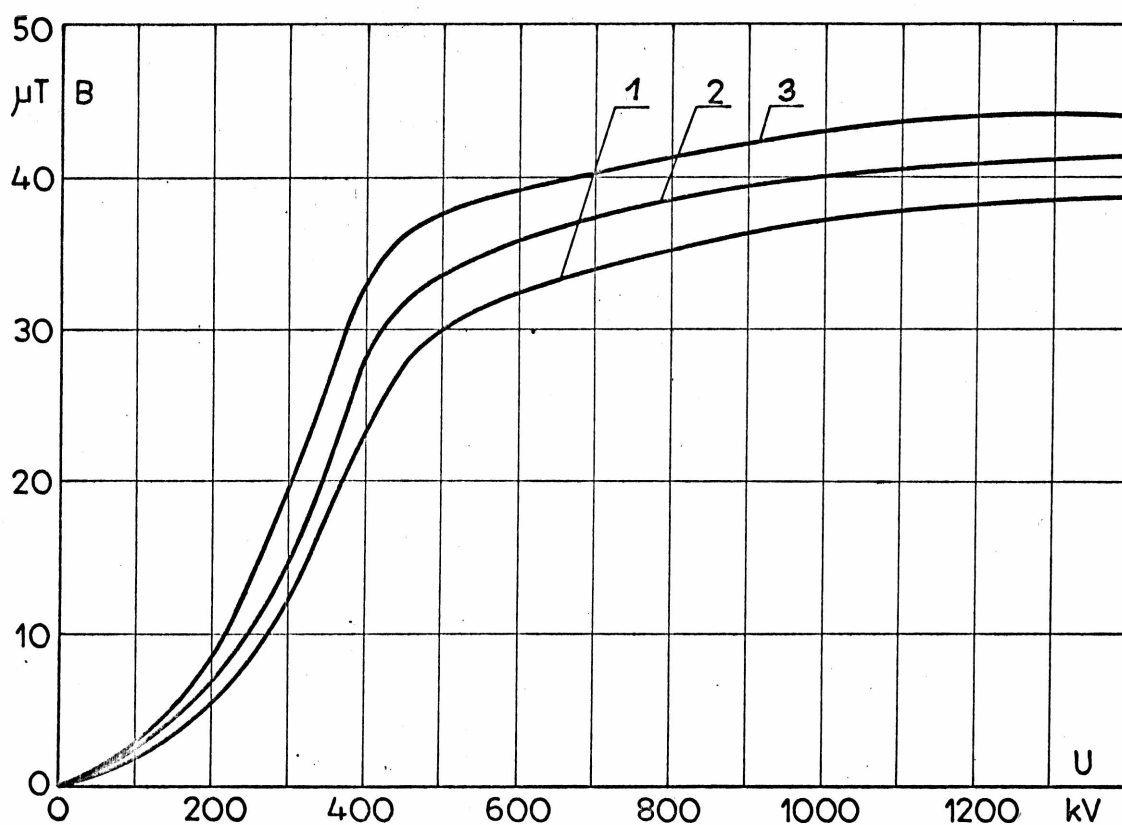
1 - linie aktualnie eksploatowane, 2 - linie projektowane

Korzystając z wyników obliczeń indukcji magnetycznej, wykonanych dla różnych typów linii (rys.3.15-3.20, tabl.3.3), na rysunku 3.24 sporządzono wykresy zależności obliczonych wartości indukcji od napięcia linii.

Wykorzystując uprzednio wyznaczoną zależność $P_n/P_{nat} = f(U)$, (rys.3.23), dokonano odpowiedniego przeliczenia wartości indukcji obliczonych przy założeniu obciążenia naturalnego linii, na wartości, które wystąpią przy obciążeniu znamionowym. Wyniki tych przeliczeń ilustrują odpowiednie krzywe na rysunku 3.25.

Analiza przebiegu krzywych przedstawionych na rysunku 3.25 prowadzi do następujących wniosków:

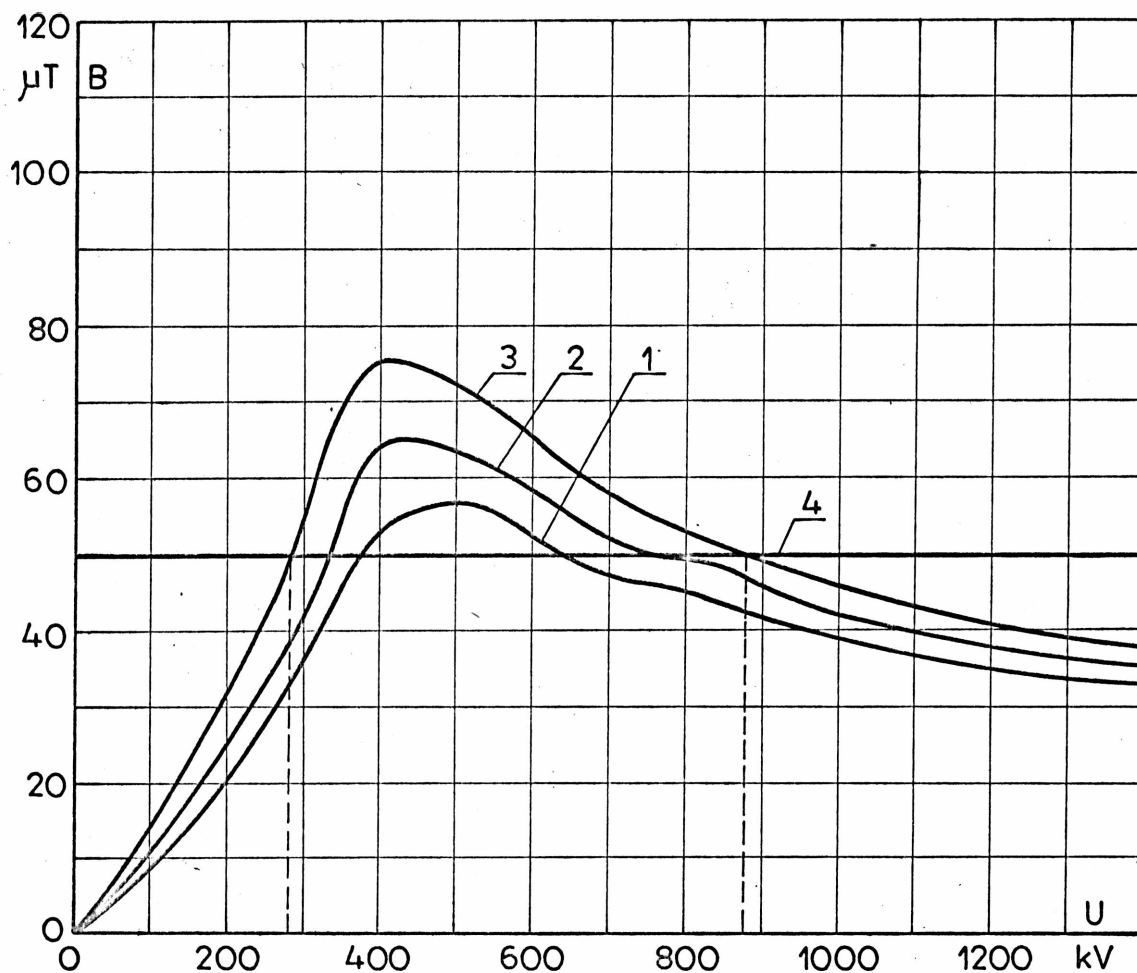
1. W bezpośrednim otoczeniu linii przesyłowych o napięciach w granicach 280-880 kV, prawdopodobne jest występowanie pola magnetycznego o indukcji nieznacznie przekraczającej wartość indukcji pola magnetycznego Ziemi tj. 50 μT .



Rys.3.24. Zależność maksymalnej indukcji magnetycznej pod linią przesyłową od jej napięcia
1 - na powierzchni ziemi; 2 - 1m nad ziemią;
3-2m nad ziemią

2. W sąsiedztwie linii przesyłowych o napięciach do 280 kV i powyżej 880 kV indukcja magnetyczna osiąga wartości niższe niż w otoczeniu linii o napięciach 280 kV - 880 kV.

Pomimo, że pola magnetyczne generowane przez linie przesyłowe o napięciach do 280 kV i powyżej 880 kV nie przekraczają indukcji naturalnego pola magnetycznego Ziemi, a w przypadku linii o napięciach od 280 do 880 kV przekraczają ją nieznacznie, nie można twierdzić, że pola te nie mają wpływu na organizmy żywe w nim umieszczone. Opierając się jednak na fakcie, że wartości indukcji pola magnetycznego wytwarzanego przez linie przesyłowe oraz pola ziemskiego są zbliżone oraz, że dotychczasowe badania oddziaływania pola magnetycznego o częstotliwości 50 Hz na organizmy żywe [29,46], nawet w przypadku stosowania znacznie wyż-



Rys.3.25. Zależność szczytowej indukcji magnetycznej pod linią przesyłową obciążoną mocą znamionową P_n , od napięcia linii U

1 - na powierzchni ziemi; 2 - 1 m nad ziemią;
3 - 2 m nad ziemią; 4 - indukcja pola magnetycznego Ziemi ($50 \mu\text{T}$)

—szych indukcji [6,48] , nie potwierdziły istnienia wpływu tego rodzaju pól na organizmy żywe, w badaniach laboratoryjnych przeprowadzonych w ramach niniejszej pracy nie zajmowano się składową magnetyczną pól generowanych przez urządzenia przesyłowo-rozdzielcze wysokiego napięcia.

4. BADANIA WPŁYWU POLA ELEKTRYCZNEGO O CZĘSTOTLIWOŚCI 50 Hz NA ORGANIZM LUDZKI W WARUNKACH LABORATORYJNYCH

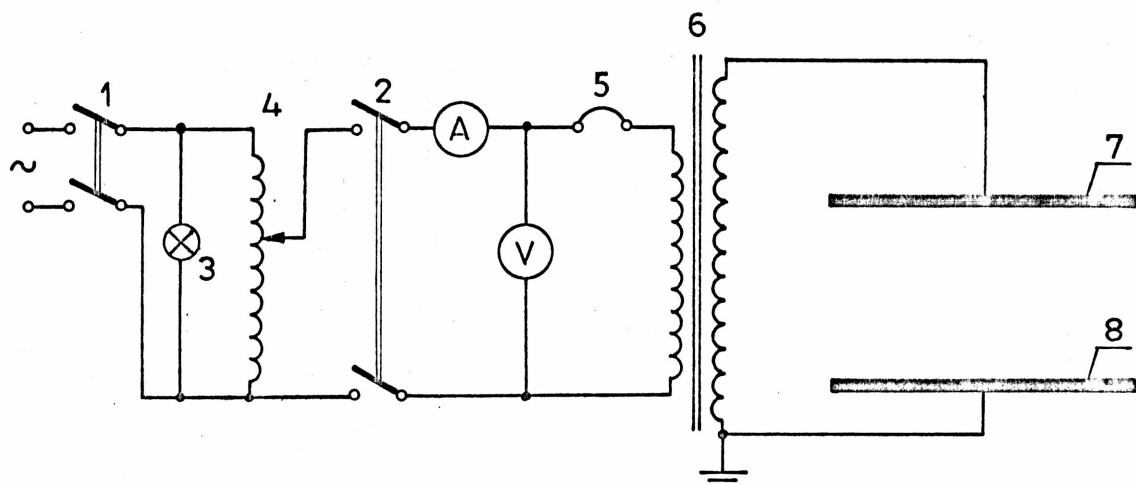
4.1. Opis stanowiska pomiarowego

Badania wpływu zewnętrznego pola elektrycznego na organizm ludzki wykonywano w Hali Wysokich Napięć Politechniki Wrocławskiej w okresie od października 1979 r. do lipca 1980 r. Badania prowadzono przy wilgotności względnej powietrza w granicach 50-60% i temperaturze pomieszczenia 18°C.

Źródłem pionowego pola o częstotliwości 50 Hz był układ elektrod, z których jedną stanowiła podłoga pokryta blachą aluminiową, a drugą - wiszącą - koło wykonane ze styropianu, pokryte od strony wewnętrznej i na obrzeżach folią aluminiową. Pole powierzchni każdej z elektrod wynosiło 15,85 m². Krawędzie elektrod wyprofilowano w sposób zapobiegający powstawaniu ulotu krawędziowego przy stosowanych w badaniach wartościach napięć. Odstęp między elektrodami regulowano w sposób płynny przez podnoszenie lub opuszczanie elektrody górnej.

Tak skonstruowany układ elektrod zasilano napięciem przemennym o częstotliwości 50 Hz z transformatora wysokiego napięcia typu TP 60 o napięciu górnym 60 kV. Jeden z końców uzwojenia wysokonapięciowego połączono z elektrodą dolną i uziemiono. Stronę niskonapięciową transformatora zasilano z pulpitu sterowniczego, umieszczonego w odległości 8 m od pola pomiarowego i oddzielonego od niego uziemioną siatką metalową. Pulpit sterowniczy wyposażony był w niezbędne przyrządy i urządzenia pomiarowe, umożliwiające dokonywanie przełączeń i regulacji w układzie w sposób niewidoczny dla osoby poddanej badaniom. Schemat układu zasilania elektrod przedstawiono na rysunku 4.1.

Zadaniem opisanego układu elektrod było wytworzenie pionowego pola elektrycznego o częstotliwości 50 Hz o dużym stopniu jednorodności, a więc takiego, jakie występuje przy powierzchni ziemi w otoczeniu urządzeń elektroenergetycznych wysokiego napięcia (rozdz.3.3). Stopień jednorodności pola wytworzonego przez laboratoryjny układ elektrod sprawdzono dokonując pomiarów natężenia niezakłóconego pola elektrycznego E_0 w obszarze między elektrodami. Przez niezakłócone pole elektryczne rozumieć należy



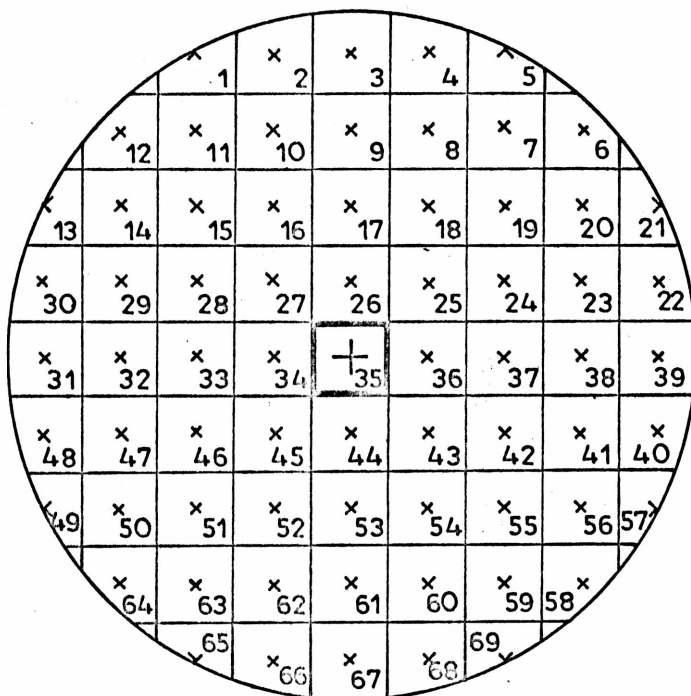
Rys.4.1. Schemat układu zasilania elektrod

1,2 - wyłączniki; 3 - lampka kontrolna; 4 - autotransformator; 5 - blokada; 6 - transformator wysokiego napięcia; 7 - elektroda górna; 8 - elektroda dolna

pole elektryczne panujące w obszarze międzyelektrodowym przy braku w tym obszarze przedmiotów przewodzących lub innych, mogących zniekształcić jego rozkład. Pomiarów E_0 dokonywano na powierzchni elektrody dolnej oraz na wysokości 1 m ponad tą elektrodą. W tym celu elektrodę dolną podzielono na 69 części w sposób pokazany na rysunku 4.2. Natężenie pola elektrycznego mierzone w punktach pomiarowych (rys.4.2), oddalonych od siebie o 0,5 m.

Pomiarów natężenia niezakłóconego pola elektrycznego dokonano miernikiem natężenia pola elektrycznego o częstotliwości 50 Hz, skonstruowanym w Instytucie Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej. Rezystancja wejściowa miernika w zależności od rodzaju wykonywanych pomiarów spełnia równanie (3.13) lub (3.14) co zapewniło znaczną dokładność pomiarów.

Pomiary natężenia pola elektrycznego E_0 wykonano przy odstępach międzyelektrodowych H równych: 200, 225, 250, 275 i 300 cm. Analizując wyniki tych pomiarów zdecydowano o wyborze odstępu międzyelektrodowego, przy jakim prowadzono badania z udziałem ludzi, równego 250 cm, jako odległości zapewniającej wymaga-



Rys.4.2. Sposób podziału elektrody dolnej na pola pomiarowe
x - oznaczenie punktu pomiarowego

na jednorodność pola oraz niezbędną przerwę izolacyjną ponad głową osoby badanej.

Wyniki pomiarów natężenia niezakłóconego pola elektrycznego na powierzchni elektrody dolnej E_0 oraz na wysokości 1 m ponad nią E'_0 , dla różnych napięć międzyelektrodowych, przy odległości $H = 250$ cm, przedstawiono w tablicy 4.1.

Na podstawie wyników pomiarów zawartych w tablicy 4.1, stwierdzono, że zależność natężenia niezakłóconego pola elektrycznego od napięcia jest liniowa (rys.4.3).

Uśredniając wyniki pomiarów dla poszczególnych punktów pomiarowych (tabl.4.1) leżących w jednakowej odległości od osi symetrii układu elektrod, na rysunku 4.4 przedstawiono wykresy zależności $E_0/E_{0maks} = f(y)$ i $E'_0/E'_{0maks} = f(y)$, w których y oznacza odległość punktu pomiarowego od osi symetrii układu elektrod.

Przy stosowanej w trakcie wykonywania badań stałej odległości międzyelektrodowej $H = 250$ cm, pole elektryczne w obszarze

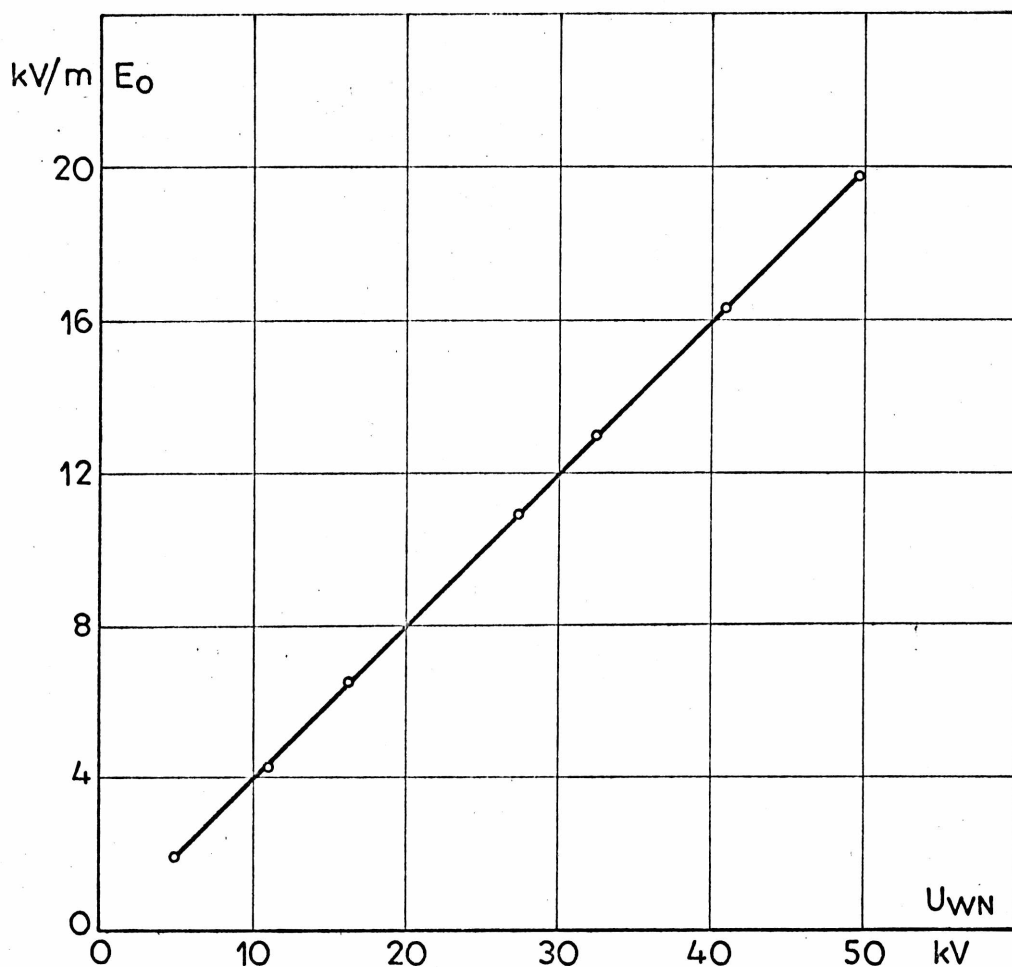
Tablica 4.1

Natężenie niezakłóconego pola elektrycznego E_0 i E'_0 dla różnych wartości napięć międzyelektrodowych U_{WN} , przy odległości między elektrodami H równej 250 cm

NPP	U_{WN}	E_0	E'_0	NPP	E_0	E'_0	NPP	E_0	E'_0	NPP	E_0	E'_0
	kV	kV/m	kV/m		kV/m	kV/m		kV/m	kV/m		kV/m	kV/m
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	10,9	3,16	2,41	13	3,17	2,39	21	3,13	2,36	57	3,16	2,48
	16,35	4,75	3,61		4,71	3,57		4,70	3,56		4,71	3,57
	27,3	7,93	5,99		7,90	5,97		7,91	5,98		7,88	5,84
	32,7	9,46	7,28		9,55	7,31		9,50	7,30		9,40	7,24
	40,9	11,83	8,89		11,86	9,10		11,83	8,91		11,70	8,85
2	10,9	3,32	2,68	22	3,33	2,69	30	3,29	2,61	40	3,24	2,57
	16,35	4,97	4,01		4,96	4,01		4,90	4,0		4,98	4,04
	27,3	8,30	6,70		8,35	6,73		8,25	6,64		8,27	6,66
	32,7	9,93	8,04		10,0	8,11		9,77	7,97		9,92	8,02
	40,9	12,38	10,04		12,48	10,08		12,26	9,97		12,36	10,02
3	10,9	3,36	2,80	31	3,37	2,81	39	3,39	8,85	67	3,33	2,77
	16,35	5,03	4,20		5,09	4,20		5,04	4,20		5,02	4,19
	27,3	8,73	7,14		8,56	7,11		8,41	7,04		8,49	7,09
	32,7	10,10	8,21		10,26	8,47		10,04	8,17		10,10	8,20
	40,9	12,55	10,48		12,92	10,61		12,54	10,47		12,71	10,57
4	10,9	3,23	2,69	48	3,18	2,61	66	3,23	2,69	68	3,10	2,57
	16,35	4,89	4,01		4,88	3,97		4,91	4,03		4,69	3,77
	27,3	8,44	6,70		8,46	6,75		8,29	6,58		7,92	6,46
	32,7	9,78	8,05		10,11	8,12		9,91	8,09		9,49	7,94
	40,9	12,17	10,10		12,64	10,12		122,41	10,05		12,14	10,10
5	10,9	3,12	2,39	49	3,18	2,42	65	3,15	2,40	69	3,17	2,41
	16,35	4,77	3,62		4,68	3,59		4,82	3,65		4,63	3,53
	27,3	7,96	5,94		7,88	5,90		8,07	5,98		7,76	5,65
	32,7	9,49	7,27		9,53	7,31		9,58	7,40		9,28	7,31
	40,9	11,94	8,91		11,76	8,84		11,92	8,90		11,40	8,78
6	10,9	3,22	2,57	12	3,33	2,61	58	3,36	2,64	64	3,10	2,51
	16,35	4,85	3,91		4,85	3,90		4,80	3,88		4,83	3,93
	27,3	8,12	6,54		8,19	6,57		7,99	6,52		8,34	6,62
	32,7	9,75	7,79		9,91	7,85		9,42	7,76		9,46	7,72
	40,9	12,13	9,74		12,23	9,82		11,75	9,76		12,08	9,70
7	10,9	3,47	3,20	11	3,52	3,23	59	3,49	3,20	63	3,44	3,16
	16,35	5,17	4,75		5,19	4,77		5,22	4,81		5,23	4,86
	27,3	8,68	8,00		8,80	8,12		8,73	8,07		8,77	8,09
	32,7	10,33	9,65		10,43	9,71		10,28	9,62		10,59	9,76
	40,9	12,98	12,01		13,07	12,09		13,09	12,11		13,18	12,17
8	10,9	3,77	3,68	10	3,73	3,66	23	3,75	3,67	29	3,72	3,65
	16,35	5,66	5,52		5,56	5,50		5,54	5,49		5,56	5,57
	27,3	9,46	9,21		9,35	9,16		9,32	9,14		9,32	9,15
	32,7	11,36	11,04		11,21	11,01		11,13	10,97		11,10	10,89
	40,9	14,47	13,80		13,93	13,57		13,93	13,54		13,91	13,64

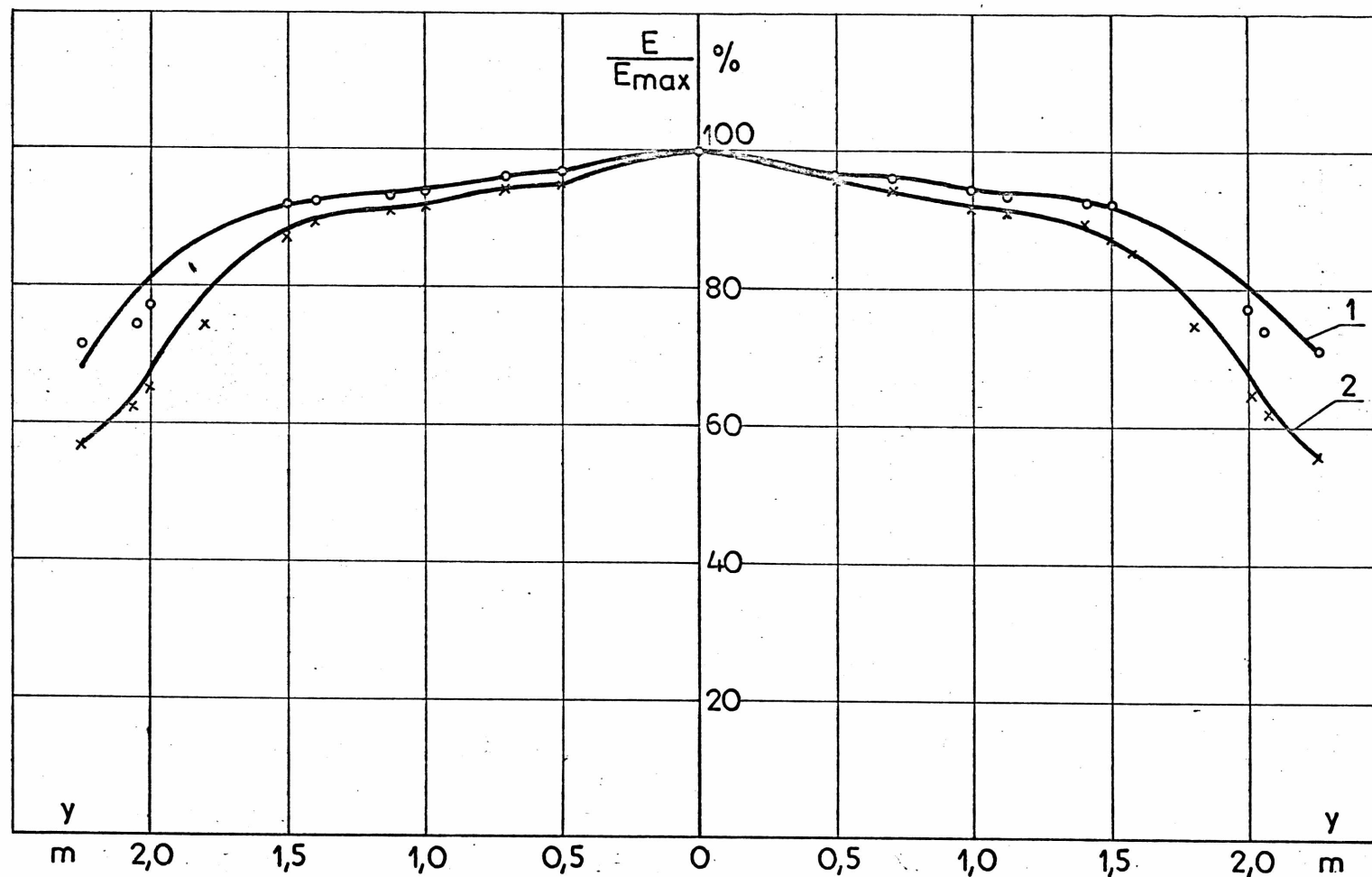
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
44	10,9 16,35 27,3 32,7 40,9	3,76 5,56 9,28 11,13 13,60	3,59 5,48 9,21 11,04 13,80	47	3,80 5,69 10,46 11,40 14,15	3,66 5,55 10,04 11,15 14,11	60	3,81 5,60 9,49 11,32 14,08	3,68 5,51 9,29 11,09 14,02	62	3,88 5,61 9,55 11,35 13,91	3,72 5,53 9,36 11,11 13,93
9	10,9 16,35 27,3 32,7 40,9	3,99 5,69 9,86 11,78 14,73	3,72 5,57 9,33 11,14 13,96	38	4,11 5,69 9,82 11,78 14,71	3,80 5,58 9,30 11,15 13,91	32	3,98 5,83 9,77 11,76 14,63	3,71 5,62 9,26 11,14 13,84	61	4,09 5,70 9,72 11,50 14,42	3,76 5,60 9,25 11,09 13,69
14	10,9 16,35 27,3 32,7 40,9	3,43 5,08 8,48 10,12 12,66	3,20 4,81 7,99 9,54 12,01	20	3,45 5,17 8,62 10,35 12,96	3,23 4,94 8,11 9,60 12,27	50	3,49 5,19 8,68 10,59 13,18	3,27 4,96 8,16 9,72 12,42	56	3,41 5,06 8,48 10,19 12,66	3,19 4,99 8,04 9,58 12,09
15	10,9 16,35 27,3 32,7 40,9	3,99 5,96 9,97 11,96 14,96	3,80 5,69 9,48 11,39 14,24	19	4,21 6,11 10,06 12,02 14,82	4,01 5,76 9,54 11,46 14,21	51	3,98 5,93 9,93 11,88 14,86	3,77 5,68 9,51 11,32 14,23	55	4,11 5,95 9,93 11,94 14,90	3,92 5,70 9,50 11,35 14,18
16	10,9 16,35 27,3 32,7 40,9	3,94 5,91 9,84 11,79 14,82	3,90 5,86 9,77 11,68 14,62	18	3,99 5,98 10,03 10,99 14,98	3,90 5,91 9,89 11,84 14,71	24	3,99 5,95 10,05 11,92 14,99	3,89 5,87 9,88 11,76 14,74	28	4,02 5,99 10,02 11,84 14,94	3,94 5,87 9,90 11,71 14,76
42	10,9 16,35 27,3 32,7 40,9	4,03 6,0 10,02 12,03 15,03	3,93 5,87 9,89 11,91 14,76	46	4,05 6,03 10,12 12,13 15,11	3,96 5,88 9,97 12,0 14,84	52	4,03 6,10 10,04 12,01 15,0	3,92 5,94 9,91 11,94 14,70	54	3,99 6,08 9,93 12,05 14,99	3,89 5,92 9,84 11,94 14,68
17	10,9 16,35 27,3 32,7 40,9	4,15 6,18 10,40 12,44 15,50	3,95 5,92 9,92 11,89 14,84	33	4,06 6,09 10,14 12,19 15,20	3,87 5,81 9,79 11,65 14,65	37	4,09 6,06 10,20 12,29 15,26	3,92 5,84 9,71 11,74 14,71	53	4,22 6,28 10,46 12,33 15,60	4,05 6,01 9,96 11,76 14,91
25	10,9 16,35 27,3 32,7 40,9	4,21 6,27 10,48 12,56 15,72	4,06 6,10 10,14 12,21 15,25	43	4,20 6,26 10,52 12,59 15,74	4,05 6,08 10,21 12,24 15,31	45	4,22 6,25 10,54 12,44 15,74	4,08 6,10 10,02 12,18 15,30	27	4,21 6,26 10,50 12,56 15,75	4,08 6,11 10,01 12,20 15,32
26	10,9 16,35 27,3 32,7 40,9	4,22 6,42 10,73 12,85 16,05	4,13 6,18 10,32 13,42 15,41	34	4,22 6,43 10,75 12,86 16,12	4,14 6,19 10,36 12,43 15,49	36	4,21 6,43 10,73 12,85 16,03	4,13 6,20 10,35 12,41 15,37	44	4,22 6,44 10,75 12,82 16,10	4,13 6,23 10,35 12,48 15,50
35	10,9 16,35 27,3 32,7 40,9	4,36 6,54 10,90 13,08 16,31	4,30 6,46 10,75 12,95 16,12									

E_0 - natężenie niezakłóconego pola elektrycznego na powierzchni elektrody
dolnej: E_0^1 - natężenie niezakłóconego pola elektrycznego na wysokości 1 m.
nad elektrodą dolną: NPP - numer punktu pomiarowego.



Rys.4.3. Zależność natężenia niezakłóconego pola elektrycznego E_0 od napięcia międzyelektrodowego w punkcie pomiarowym nr 35, przy odległości $H = 250$ cm

- o promieniu mniejszym niż odpowiednio: 1,25 m dla E'_0 i 1,65 m dla E_0 , można uważać za jednorodne, gdyż natężenie pola w odpowiednich obszarach nie maleje poniżej wartości $0,9 E_{omaks}$, gdzie E_{omaks} jest maksymalną wartością natężenia niezakłóconego pola elektrycznego, występującego na środku elektrody dolnej. Stopień jednorodności pola rośnie, wraz ze zbliżaniem się do osi symetrii układu elektrod, w ten sposób, że natężenie pola elektrycznego w obszarze pola pomiarowego nr 35 nie spada poniżej wartości $0,98 E_{omaks}$.



Rys.4.4. Stopień jednorodności pola elektrycznego w obszarze międzyelektrodowym w zależności od odległości od osi symetrii układu elektrod; 1- $E_0/E_0 \text{ maks} = f(y)$; 2- $E'_0/E'_0 \text{ maks} = f(y)$; y - odległość punktu pomiarowego od osi symetrii układu elektrod; $U_{\text{wn}} = 10,9 \text{ kV/m}$; $H = 250 \text{ cm}$.

Wykonany i przebadany pod względem rozkładu generowanego pola (tabl.4.1, rys.4.4) laboratoryjny układ elektrod przeznaczony do badań wpływu pola elektrycznego na organizm człowieka, spełnia warunek generowania pola jednorodnego, przynajmniej w odniesieniu do środkowej części obszaru międzyelektrodowego. Może on być uważany za model, w dostatecznym stopniu odzwierciedlający rozkład pola elektrycznego rzeczywistych urządzeń elektroenergetycznych wysokiego napięcia. W modelu tym obszar oznaczony nr 35 (rys.4.2), wybrano jako centralne pole pomiarowe, na którym umieszczono osoby poddawane wszystkim rodzajom testów.

4.2. Metodyka wykonywania badań eksperymentalnych z udziałem ludzi poddanych działaniu zewnętrznego pola elektrycznego oraz prądu elektrycznego

4.2.1. Pomiary prądu elektrycznego płynącego przez człowieka umieszczonego w polu elektrycznym

Badaniom poddano 35 osobową grupę ochotników w wieku 20-56 lat. Pomiary prądu elektrycznego o charakterze pojemnościowym płynącego przez człowieka umieszczonego w polu elektrycznym wykonano dla wszystkich osób z tej grupy w czterech różnych sytuacjach, które w sposób opisowy scharakteryzować można następująco:

1. Badany w pozycji wyprostowanej, uziemiony przez przyłożenie dwóch elektrod opaskowych na obie nogi, nieco ponad kostką (rys.4.5a).

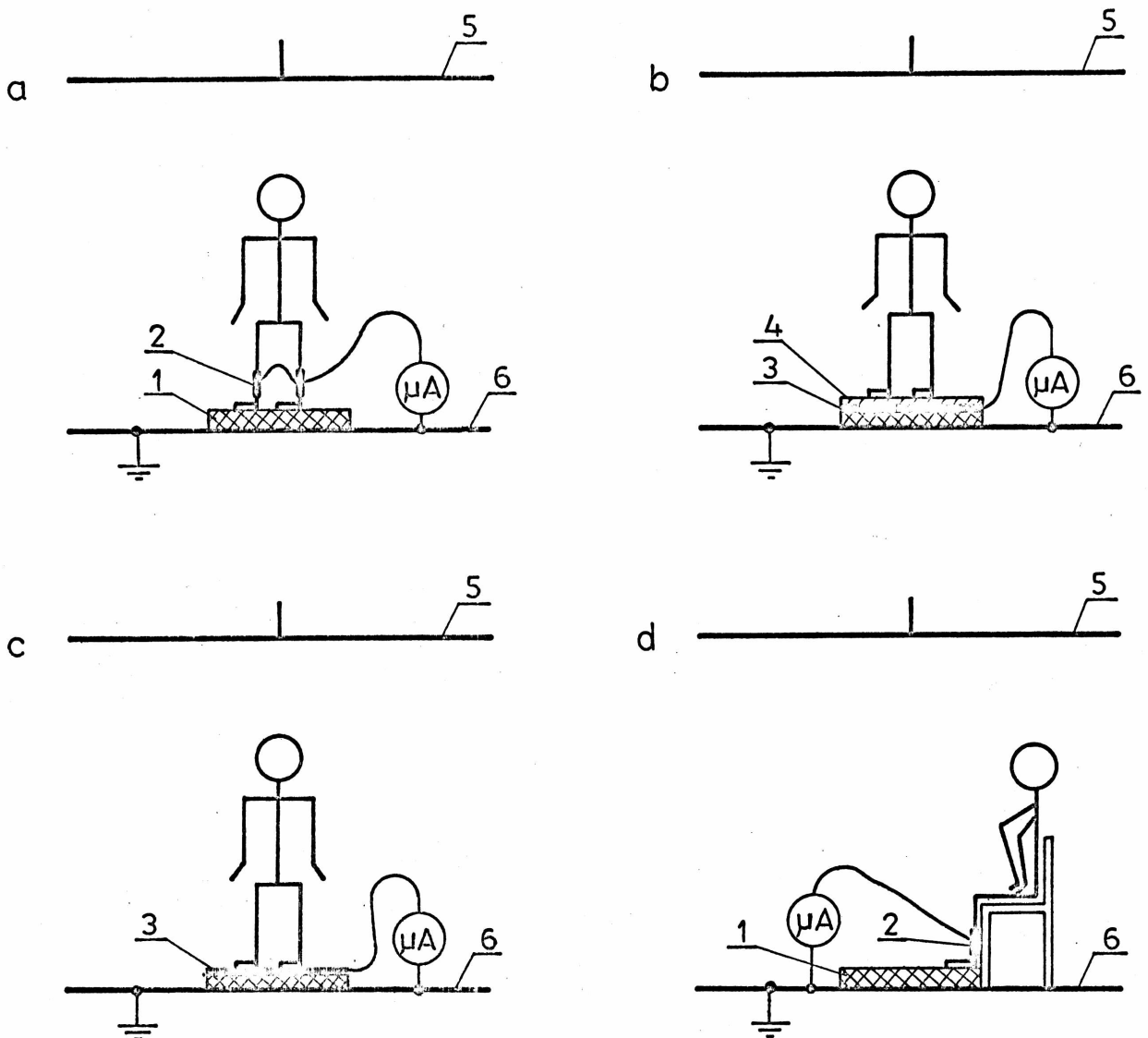
2. Badany w pozycji wyprostowanej, izolowany od ziemi przez zastosowanie przekładki izolacyjnej (preszpan o grubości 1 mm), oddzielającej buty osoby badanej od uziemionej elektrody dolnej (rys.4.5b).

3. Badany w pozycji wyprostowanej, oddzielony elektrycznie od uziemionej elektrody dolnej przez obecność obuwia (rys.4.5c).

4. Badany w pozycji siedzącej, uziemiony w ten sam sposób jak w sytuacji 1; krzesło typowe, wykonane całkowicie z drewna (rys.4.5d).

W praktyce pomiary odbywały się w ten sposób, że badany stał (lub siedział na krześle) w obszarze międzyelektrodowym na

polu pomiarowym nr 35. Pod nogami badanego umieszczono płytkę izolacyjną (tekstolit) o wymiarach: 35x35x2 cm. W sytuacjach 1 i 4 prąd płynący przez badanego mierzono pomiędzy elektrodami opaskowymi a uziemioną elektrodą dolną (rys.4.5a,d). W pozostałych sytuacjach płytka izolacyjna pokryta była jednostronnie folią miedzianą i między to folią a uziemioną elektrodą dolną włączony był mikroamperomierz, mierzący prąd (rys.4.5b,c).



Rys.4.5. Sposób dokonywania pomiarów prądu pojemnościowego w poszczególnych sytuacjach

1 - płytka izolacyjna z tekstolitu; 2 - elektrody opaskowe; 3 - płytka izolacyjna z tekstolitu jednostronnie pokrytego folią miedzianą; 4 - przekładka izolacyjna z preszpanu; 5 - elektroda górna; 6 - elektroda dolna

Pomiary wykonywano mikroamperomierzem prądu przemiennego, a kształt krzywej prądu obserwowano na ekranie oscyloskopu, włączonego równolegle do zacisków mikroamperomierza. W każdej z opisanych sytuacji, pomiarów dokonywano dla 8 różnych wartości natężenia niezakłóconego pola elektrycznego, leżących w przedziale od 0 do 26 kV/m.

4.2.2. Badania czasu reakcji prostej

Badania przeprowadzono w tej samej 35 osobowej grupie, na której wykonano pomiary prądu pojemnościowego. Pomiary czasu reakcji wykonywano w różnych dniach tygodnia w godzinach 15⁰⁰-17⁰⁰.

Ponieważ badania miały na celu określenie wpływu krótkotrwałe działającego zewnętrznego pola elektrycznego na czas reakcji prostej, pomiary wykonano dla kilku wartości natężenia pola. Ustalenie wartości tych natężeń poprzedziło wykonanie szeregu badań wstępnych, które miały na celu:

- a) ustalenie czasu trwania całego eksperymentu w taki sposób, aby w końcowej jego fazie badany nie odczuwał zmęczenia, objawiającego się wydłużeniem czasu reakcji;
- b) określenie maksymalnej wartości natężenia pola elektrycznego stosowanego w badaniach, przy której jest ono jeszcze niewyczuwalne w sposób fizyczny przez badanego, gdyż odczuwanie obecności pola w czasie wykonywania próby mogłoby wpływać w sposób znaczący na stan psychofizjologiczny człowieka, powodując u niego zjawisko stresu prowadzące w konsekwencji do wydłużenia lub skrócenia czasu reakcji;
- c) wybór wartości natężeń pól stosowanych w badaniach oraz kolejności ich występowania w eksperymencie;
- d) wybór kolejności stosowania określonego typu bodźca.

Na podstawie wyników badań wstępnych sformułowano następujące wnioski, będące podstawą do opracowania programu eksperymentu:

1. Czas trwania badania nie powinien przekraczać 30 minut, przy czym konieczne jest stosowanie kilkuminutowej przerwy po wykonaniu każdej próby¹⁾.

1) Przez próbę rozumieć należy wykonanie od kilkunastu do kilkunastu pomiarów czasu reakcji przy stosowaniu jednego rodzaju bodźca (światlny lub dźwiękowy) oraz jednej wartości natężenia pola.

2. Czas trwania przerwy pomiędzy kolejnymi badaniami powinien wynosić co najmniej 15 minut.

3. Maksymalna wartość natężenia pola elektrycznego, jakie jest jeszcze nieodczuwalne przez badanego, umieszczonego w jego zasięgu wynosi $14 \text{ kV/m}^{1)}$, powyżej tej wartości niektóre osoby badane odczuwały charakterystyczne drgania włosów na głowie.

4. Kolejność stosowania w tych badaniach pól o różnych natężeniach oraz różnych rodzajów bodźca nie ma wpływu na uzyskiwane wyniki.

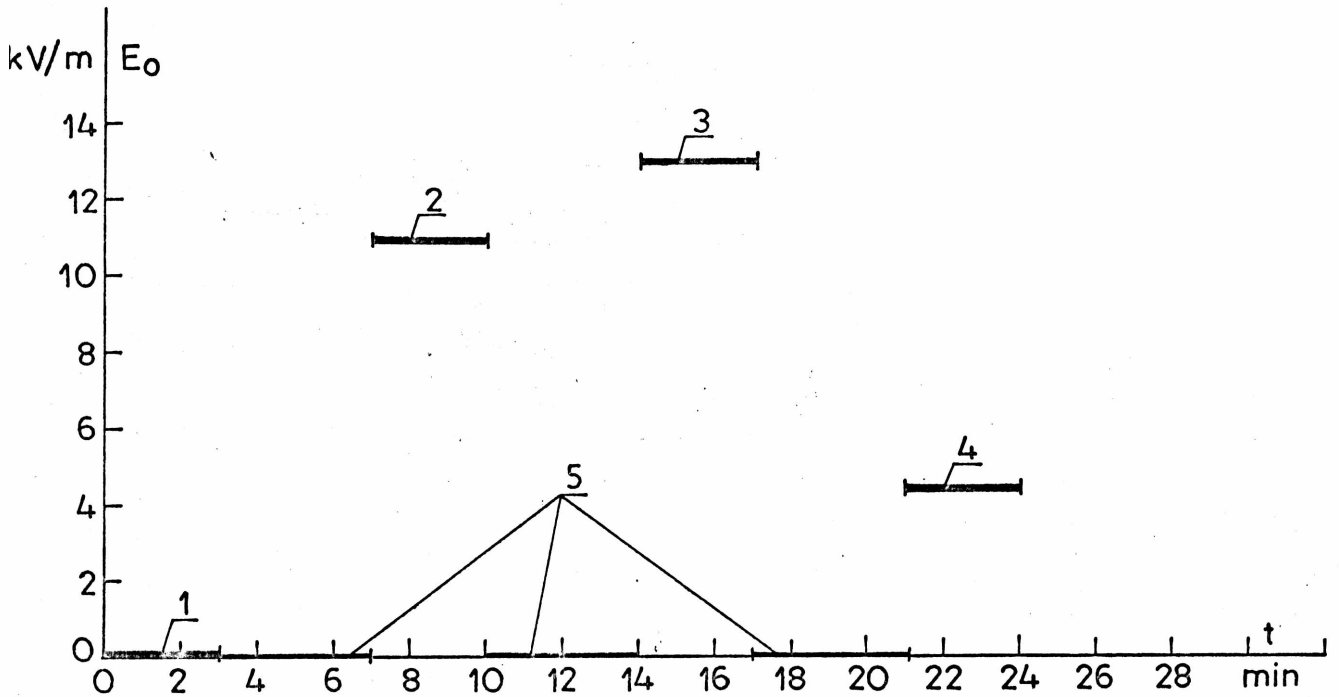
Wykorzystując przedstawione powyżej wnioski opracowano program eksperymentu, który obejmował wykonanie z każdym badanym dwóch serii badań.

Seria 1 polegała na wykonaniu pomiarów czasu reakcji prostej na bodziec dźwiękowy i obejmowała przeprowadzenie 4 prób dla różnych wartości natężenia niezakłóconego pola elektrycznego równych: 0; 4,4; 10,9 i 13 kV/m . Po wykonaniu każdej próby następowała 4 minutowa przerwa, w trakcie której dokonywano pomiarów tętna i ciśnienia krwi u osoby badanej, podobnie jak to czyniono przed i po zakończeniu serii prób. Czas trwania 4 prób wraz z przerwami wynosił około 24 minut. Czasową strukturę serii 1 eksperymentu zilustrowano na rysunku 4.6.

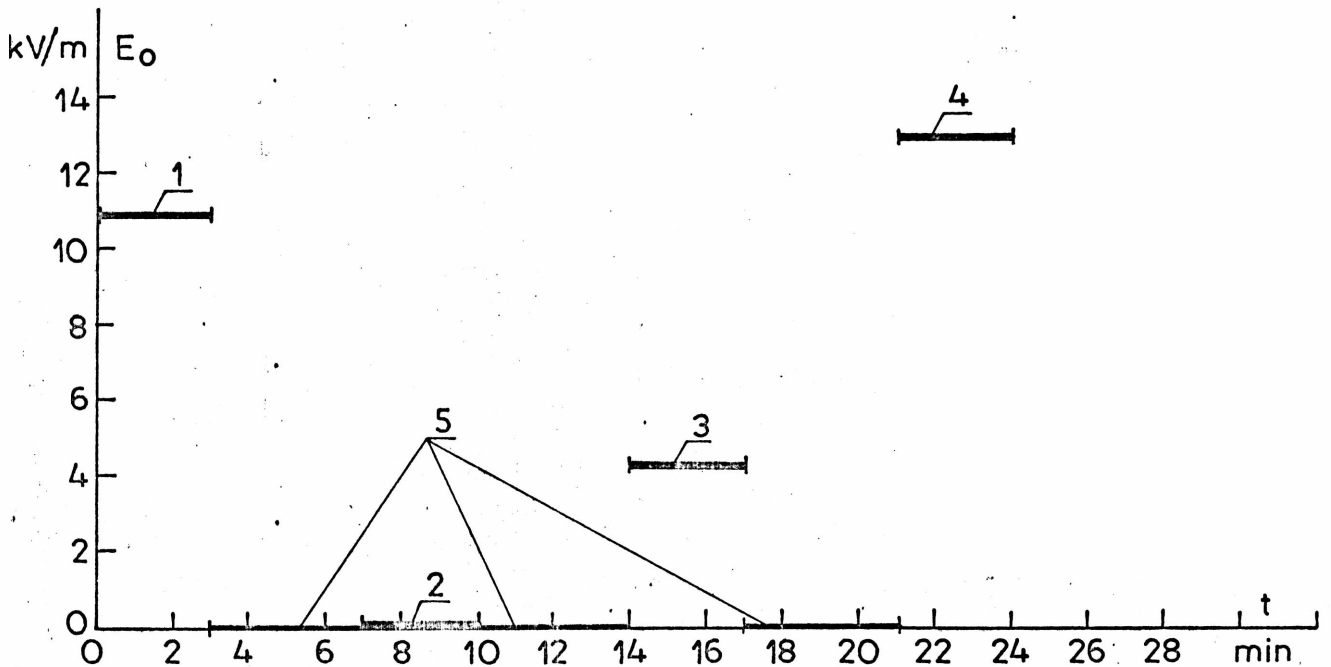
Seria 2 obejmowała wykonanie pomiarów czasu reakcji prostej na bodziec świetlny i przebiegała w sposób identyczny jak seria 1, z tym, że zastosowano inną kolejność wykonywania prób (zmieniono kolejność stosowania natężeń pól). Czasową strukturę serii 2 zobrazowano na rysunku 4.7.

W czasie wykonywania badań w pomieszczeniu badawczym znajdowały się tylko dwie osoby: eksperymentator i osoba badana. Eksperymentator siedział poza obszarem pola pomiarowego przy pulpicie sterowniczym, na którym dokonywał niezbędnych operacji łączeniowych w układzie pomiarowym w sposób uniemożliwiający badanemu zorientowanie się czy układ do generacji pola jest włączony oraz czy znajduje się pod działaniem pola. Osoba badana siedziała na krześle w obszarze międzyelektrodowym na polu pomia-

1) Badania progu odczuwania przez ludzi pola elektrycznego nie były dotychczas wykonywane, jednak wartość 14 kV/m uzyskana w badaniach wstępnych przeprowadzonych przez autora, zbliżona jest do wartości 13 kV/m podanej w literaturze [31] jako progu odczuwania pola elektrycznego przez zwierzęta doświadczalne.



Rys. 4.6. Struktura czasowa serii 1 eksperymentu - pomiar czasu reakcji t_r na bodziec dźwiękowy; 1- $E_0=0$ kV/m, pomiary t_r ; 2- $E_0=10,9$ kV/m, pomiary t_r ; 3- $E_0=13$ kV/m, pomiary t_r ; 4- $E_0=4,4$ kV/m, pomiary t_r ; 5- $E_0=0$ kV/m, przerwy, pomiary tętna i ciśnienia krwi.



Rys. 4.7. Struktura czasowa serii 2 eksperymentu - pomiar czasu reakcji t_r na bodziec świetlny; 1- $E_0=10,9$ kV/m, pomiary t_r ; 2- $E_0=0$ kV/m, pomiary t_r ; 3- $E_0=4,4$ kV/m, pomiary t_r ; 4- $E_0=13$ kV/m, pomiary t_r ; 5- $E_0=0$ kV/m, przerwy, pomiary tętna i ciśnienia krwi.

rowym nr 35 (rys.4.2). Przed osobą badaną ustawiono drewniany stolik. Przed rozpoczęciem badania każda osoba była dokładnie instruowana o sposobie jego wykonywania oraz wykonała 5 próbnych pomiarów. Rozpoczęcie każdej próby eksperymentator poprzedzał ostrzeżeniem słownym "uwaga zaczynamy" po czym wykonywano pomiary.

Pomiary wykonywano cyfrowym miernikiem czasu reakcji typu M 301A produkcji "Elpo" o dokładności pomiaru ± 1 ms. Przyrząd umieszczony na pulpicie sterowniczym obsługiwany był przez eksperymentatora. Bodźce dźwiękowe, wysyłane przez głośnik umieszczony wewnątrz przyrządu, posiadały częstotliwość równą 1000 Hz, a ich głośność oceniona była przez badanych jako bardzo dobra. Bodźce świetlne pojawiały się w postaci błysków, przy czym źródło światła umieszczone było w odległości około 3 m na wprost osoby badanej. Bodźce (świetlne lub dźwiękowe) pojawiały się w odstępach czasu od 0,5 do 7 sekund i wyzwalane były zewnętrznym urządzeniem sterującym, wykonanym specjalnie do tego typu badań. Urządzenie sterujące układem wyzwalania impulsów pozwoliło na użycie w każdej z 8 wykonywanych prób zaprogramowanej sekwencji odstępów czasowych między kolejnymi impulsami. Każda osoba badana wykonywała próbę przy tej samej sekwencji, charakterystycznej dla danej próby. Na celowość takiego ujednolicenia badań zwrócono uwagę w pracy [94].

W czasie wykonywania prób badany zwrócony był twarzą do eksperymentatora i trzymał w ręku przycisk, który naciskał prawym kciukiem natychmiast po ukazaniu się impulsu. Powodowało to automatyczne zatrzymanie zegara uruchamianego w momencie rozpoczęcia impulsu. U każdego z badanych dokonywano w jednej próbie 40 pomiarów, zgodnie z sugestiami [66] dotyczącymi wpływu ilości wykonywanych pomiarów na parametry statystyczne próby oraz ujednolicenia procedury w tego rodzaju badaniach. Czasy reakcji wyświetlane były na polu odczytowym miernika cyfrowego.

Badania ciśnienia krwi u osób z tej grupy dokonywano na tętnicy lewej ręki aparatem do mierzenia tętniczego ciśnienia krwi z manometrem rtęciowym typu PRLTH-2.

4.2.3. Badania poziomu hemoglobiny i składu krwi

Badania wpływu pola elektrycznego o częstotliwości 50 Hz na krew człowieka przeprowadzono na opisanym (rozdz.4.1) stanowisku pomiarowym, w grupie 14 osób w wieku 24-37 lat, których stan zdrowia oceniono na podstawie aktualnych wyników badań lekarskich jako bardzo dobry.

Badania obejmowały wykonanie analizy¹⁾ krwi obwodowej, pobranej z żyły lewej ręki osoby badanej przed ekspozycją polem, bezpośrednio po jej zakończeniu oraz w godzinę później. Każdorazowo pobierano ok. 2 cm³ krwi, w której oznaczono poziom hemoglobiny oraz następujące elementy morfologiczne:

- a) erytrocyty,
- b) leukocyty,
- c) granulocyty obojętnochłonne,
- d) trombocyty,
- e) retikulocyty.

Każdego z badanych eksponowano dwukrotnie. Pierwszy raz polem elektrycznym o natężeniu $E_0 = 5$ kV/m a po czterech dniach przerwy polem o natężeniu $E_0 = 15$ kV/m, przy czym w obu przypadkach czas ekspozycji polem był jednakowy i wynosił 2 godziny. W trakcie trwania ekspozycji polem osoba badana siedziała na drewnianym krześle przy stoliku (rys.4.5d). W czasie ekspozycji polem oraz w ciągu godziny po jego wyłączeniu dokonywano kontrolnych pomiarów tętna (co 15 minut) oraz ciśnienia krwi (co 30 min.).

4.2.4. Badania wpływu prądu elektrycznego na czas świadomej reakcji

Stanowisko badawcze do pomiaru wpływu prądu elektrycznego, przepływającego na drodze ręka-ręka, na czas reakcji prostej człowieka, zlokalizowano w wydzielonym pomieszczeniu o powierzchni około 24 m², izolowanym od zakłóceń akustycznych i świetlnych w czasie prowadzenia badań. W trakcie wykonywania badań temperatura powietrza w pomieszczeniu wynosiła 18°C a wilgotność po-

1) Analizy wykonano w Centralnym Laboratorium Analitycznym Wojewódzkiego Szpitala Zespołowego we Wrocławiu

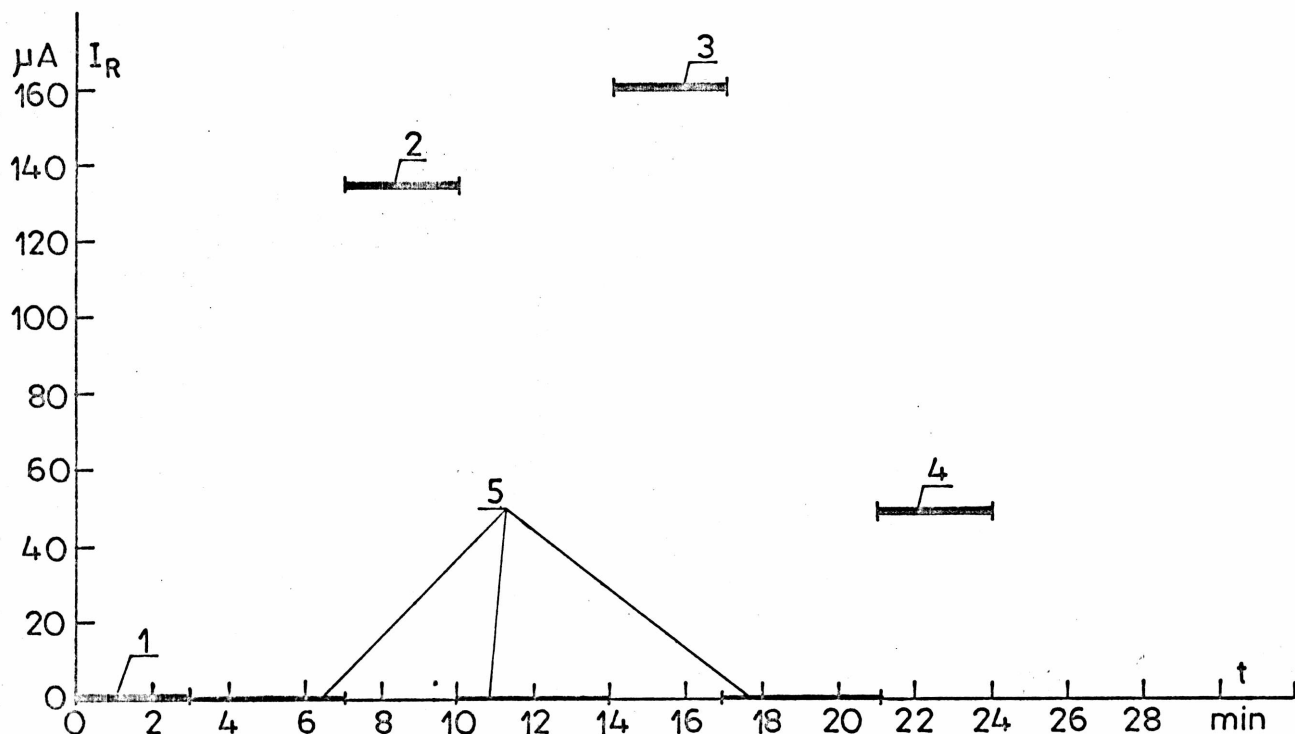
wietrza utrzymywano w granicach 40-60 %.

Badaniom poddano grupę 36 osób w wieku 19-51 lat, w tym 22 mężczyzn i 14 kobiet.

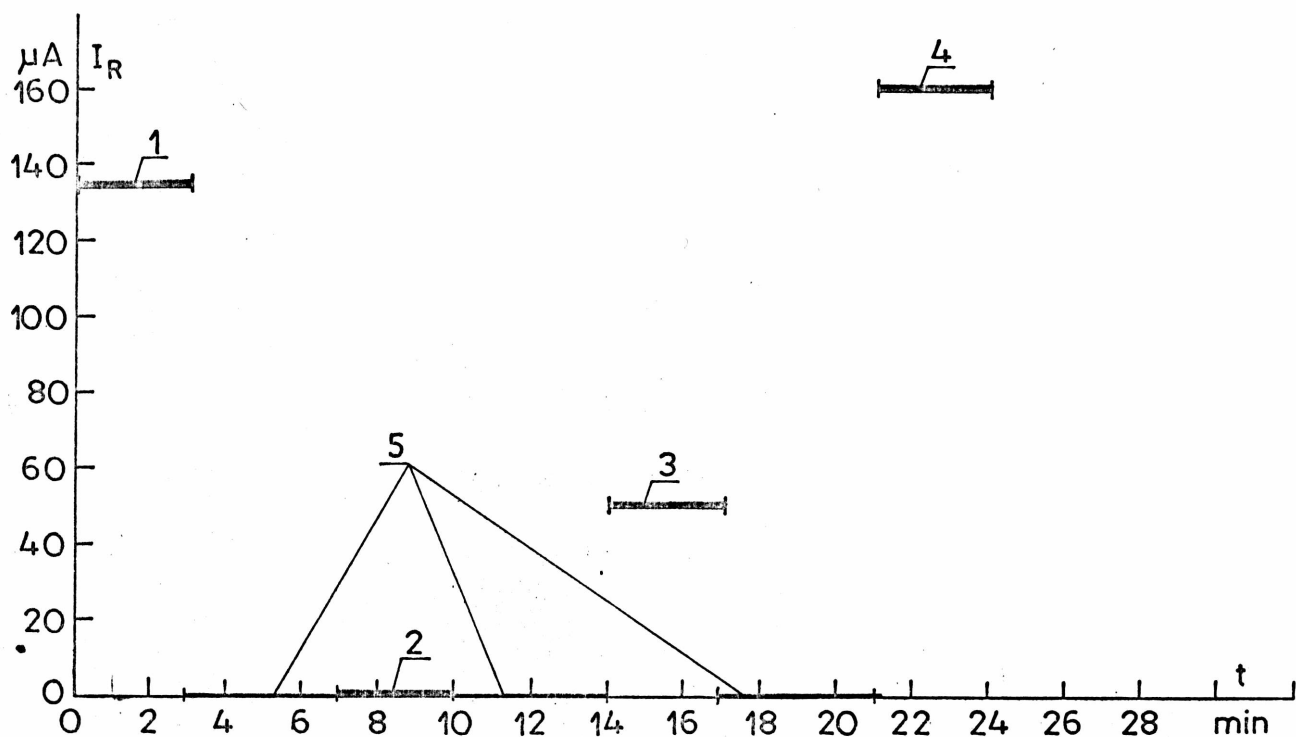
Źródłem prądu przemiennego o częstotliwości 50 Hz był specjalnie skonstruowany zasilacz prądowy, utrzymujący na niezmiennym poziomie z góry nastawioną wartość natężenia prądu, niezależnie od zmian impedancji w obwodzie zewnętrznym (np. zmiana rezystancji zestykowej elektroda-naskórek). Jako doprowadzenie prądu do osoby badanej zastosowano półelastyczne ocynkowane elektrody o powierzchni styczności 15 cm^2 , dociskane do skóry opaską gumową.

Program badań obejmował wykonanie pomiarów czasu reakcji na bodziec dźwiękowy i świetlny u osób poddanych działaniu prądu elektrycznego przepływającego na drodze ręka-ręka. Prądy stosowane w tych badaniach odpowiadały prądom pojemnościowym płynącym przez człowieka umieszczonego w polu elektrycznym i poddanego badaniom czasu reakcji. W badaniach czasu reakcji stosowano natężenia pól o wartościach: 0; 4,4; 10,9 i 13 kV/m, a odpowiadające tym natężeniom pola prądy pojemnościowe wynosiły odpowiednio: 0; 50; 135 i 160 μA (tabl.4.2). Przy tych wartościach prądów, przepływających na drodze ręka-ręka, wykonano u badanych pomiary czasu reakcji na bodziec świetlny i dźwiękowy.

Podobnie jak miało to miejsce w badaniach wpływu pola elektrycznego na czas reakcji, osoby badane nie były poinformowane ani też nie miały możliwości stwierdzenia, czy w chwili wykonywania próby są pod działaniem prądu, gdyż wartości prądów stosowanych w badaniach leżały poniżej granicy odczuwania. Instruktaż badanych oraz przebieg wykonywania prób był identyczny jak w badaniach wpływu pola elektrycznego na czas reakcji. Pomiarów czasu reakcji dokonywano przy użyciu tej samej aparatury. W trakcie przerw między kolejnymi próbami dokonywano pomiarów tętna i ciśnienia krwi osoby badanej. Struktury czasowe eksperymentów dla obu rodzajów bodźca przedstawiono na rysunkach 4.8 i 4.9.



Rys. 4.8. Struktura czasowa pomiarów czasu reakcji t_R na bodesieć dół; 1- $I_R=0\mu A$, pomiary t_R ; 2- $I_R=135\mu A$, pomiary t_R ; 3- $I_R=160\mu A$, pomiary t_R ; 4- $I_R=50\mu A$, pomiary t_R ; 5- $I_R=0\mu A$, przerwy, pomiary tętna i ciśnienia krwi; I_R - natężenie prądu rożeniowego na drodze ręką-ręka.



Rys. 4.9. Struktura czasowa pomiarów czasu reakcji t_R na bodesieć prawo; 1- $I_R=135\mu A$, pomiary t_R ; 2- $I_R=0\mu A$, pomiary t_R ; 3- $I_R=50\mu A$, pomiary t_R ; 4- $I_R=160\mu A$, pomiary t_R ; 5- $I_R=0\mu A$, przerwy, pomiary tętna i ciśnienia krwi; I_R - natężenie prądu rożeniowego na drodze ręką - ręką.

4.3. Wyniki badań eksperymentalnych

4.3.1. Prąd pojemnościowy płynący przez człowieka umieszczonego w polu elektrycznym o częstotliwości 50 Hz

Wyniki pomiarów prądu pojemnościowego I_p , dla poszczególnych sytuacji pomiarowych (rys.4.5) zestawiono w tabelicy 4.2, która zawiera również wyniki obliczeń wartości stosunku I_p/E_0 dla zmierzonych wartości I_p . Pomiarów I_p dokonywano dla 9 różnych wartości E_0 , ze względu jednak na znaczną liczbę wyników, w pracy (tabl. 4.2) przedstawiono je dla 5 różnych, dla każdej osoby badanej wartości E_0 .

Kompletna dokumentacja wyników pomiarów znajduje się w archiwum Instytutu Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej.

W celu zbadania charakteru zależności prądu pojemnościowego płynącego przez człowieka od jego wzrostu i pola powierzchni ciała, w tabelicy 4.2 podano dla każdej osoby badanej jej wzrost, masę ciała oraz pole powierzchni ciała obliczone wg wzoru Dubois'a

$$S = 71,84 \cdot W^{0,425} \cdot L^{0,725} \cdot 10^{-4}, \quad (4.1)$$

w którym: S - pole powierzchni ciała, w cm^2 ,

W - masa ciała, w kg,

L - wzrost człowieka, w cm.

Tablica 4.2

Wyniki pomiarów prądu pojemnościowego płynącego przez człowieka w różnych sytuacjach pomiarowych

Dane o osobie bada- nej				E_o	I_p				I_p/E_o			
Nr	Wz- rost	Masa cia- ła	Pole po- wierzch. ciała		Wartości zmierz- ne w sytuacji z rys.4.5				Wartości obliczone na podstawie wyni- ków pomiarów wyko- nanych w sytuacji z rys.4.5			
					a	b	c	d	a	b	c	d
	cm	kg	cm ²	kV/m	μA				$\mu A/kV/m$			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
				4,6	47	24	30	47	10,7	5,4	6,8	10,7
				9,4	98	52	65	81	11,2	6,0	7,4	9,3

c.d.tabl. 4.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	153	46	14026	13,9 20,7 25,4	150 228 281	82 126 161	99 153 192	126 194 240	11,5 11,6 11,7	6,3 6,4 6,7	7,6 7,8 8,0	9,6 9,9 10,0
2	153	49	14407	4,4 8,7 13,1 19,6 24,0	48 99 150 226 283	23 54 86 134 161	23 56 89 139 175	38 82 129 200 247	11,1 11,4 11,5 11,5 11,8	5,3 6,2 6,6 6,8 6,7	5,3 6,4 6,8 7,1 7,3	8,8 9,4 9,9 10,2 10,3
3	162	65	16934	4,4 8,7 13,1 19,6 24,0	57 115 174 265 329	28 61 90 139 173	28 61 90 139 173	47 97 149 226 283	13,0 13,2 13,3 13,5 13,7	6,5 7,0 7,1 6,9 7,2	6,5 7,0 6,9 7,1 7,2	10,7 11,1 11,4 11,5 11,8
4	166	50	15417	4,6 9,4 13,9 20,7 25,4	57 118 176 267 328	23 52 79 122 153	48 105 163 249 301	46 97 143 226 277	12,4 12,6 12,7 12,9 12,9	5,1 5,5 5,7 5,9 6,0	10,4 11,2 11,8 12,0 11,8	10,1 10,4 10,3 10,9 10,9
5	169	60	16877	4,6 9,4 13,9 20,7 25,4	62 128 191 288 356	24 51 76 114 142	26 52 78 130 173	50 103 157 240 297	13,4 13,7 12,8 13,9 14,0	5,2 5,4 5,5 5,5 5,6	5,6 5,5 5,6 6,3 6,8	10,8 11,0 11,3 11,6 11,7
6	169	69	17910	4,4 8,7 13,1 19,6 24,0	61 123 186 283 350	27 45 73 115 144	28 47 76 118 149	50 102 161 246 305	14,0 14,1 14,2 14,4 14,6	6,2 5,2 5,6 5,8 6,0	6,4 5,4 5,8 6,0 6,2	11,5 11,7 12,3 12,5 12,7
7	170	64	17420	4,6 9,4 13,9 20,7 25,4	63 117 195 296 369	40 83 123 188 234	53 125 191 287 360	60 126 190 286 356	13,7 14,0 14,1 14,3 14,5	8,7 8,9 8,9 9,1 9,2	11,5 14,9 13,8 13,8 14,2	13,1 13,5 13,7 13,8 14,0
8	170	65	17536	4,4 8,7 13,1 19,6 24,0	60 122 186 283 350	16 42 69 108 139	18 47 72 116 154	49 101 156 238 295	13,8 14,0 14,2 14,4 14,6	3,7 4,8 5,3 5,5 5,8	4,1 5,4 5,5 5,9 6,4	11,2 11,6 11,9 12,1 12,3
9	170	72	18315	4,4 8,7 13,1 19,6 24,0	62 129 193 287 253	29 62 92 137 170	29 61 92 141 175	52 110 164 247 307	14,2 14,5 14,5 14,6 14,7	6,6 7,0 7,0 7,0 7,1	6,6 6,9 7,0 7,2 7,3	11,9 12,4 12,4 12,6 12,8

c.d. tabl.4.2

2	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
10	172	66	17800	4,4 8,7 13,1 19,6 24,0	62 126 191 187 346	29 64 98 147 180	40 80 122 184 227	51 104 164 240 292	13,8 14,2 14,5 14,6 14,6	6,7 7,2 7,4 7,5 7,6	9,1 9,0 9,2 9,4 9,6	11,7 11,7 12,4 12,2 12,3
11	172	78	19110	4,6 9,3 13,7 20,5 25,0	67 137 205 309 383	55 113 172 264 328	58 119 181 282 355	55 116 177 268 333	14,7 14,8 15,0 15,1 15,3	12,1 12,1 12,6 12,9 13,1	12,8 12,9 13,2 13,8 14,2	12,1 12,5 12,9 13,1 13,3
12	173	68	18104	4,4 8,7 13,1 19,6 24,0	62 126 192 291 358	25 60 96 151 197	23 62 124 224 290	105 161 246 305	14,3 14,5 14,7 14,8 14,9	5,7 6,9 7,3 7,7 8,2	5,3 7,1 9,5 11,4 12,1	12,0 12,0 12,3 12,5 12,7
13	174	70	18405	4,6 9,4 13,9 20,7 25,4	67 138 205 309 381	33 70 105 160 186	34 72 108 242 301	55 113 173 261 325	14,5 14,7 14,8 14,9 15,0	7,2 7,5 7,6 7,7 7,7	7,4 7,7 7,8 10,7 11,8	12,0 12,1 12,5 12,6 12,8
14	175	56	16809	4,4 8,7 13,1 19,6 24,0	59 123 187 281 339	40 81 123 185 229	21 43 81 170 245	49 101 153 230 280	13,4 13,9 14,2 14,3 14,3	9,1 9,1 9,3 9,4 9,7	4,8 4,8 6,1 8,6 10,3	11,1 11,4 11,6 11,7 11,8
15	175	63,5	17731	4,6 9,4 13,9 20,7 25,4	65 135 204 305 376	38 80 122 182 224	40 83 127 182 236	53 112 168 257 320	14,2 14,4 14,7 14,8 14,8	8,3 8,5 8,8 8,8 8,8	8,7 8,8 9,2 9,2 9,3	11,6 11,9 12,1 12,4 12,6
16	175	68	18255	4,4 8,7 13,1 19,6 24,0	62 128 195 295 365	20 52 86 132 166	20 63 123 203 298	51 105 161 247 310	14,2 14,7 14,9 15,0 15,2	4,6 6,0 6,6 6,7 6,9	4,6 7,2 9,4 11,4 12,4	11,7 12,0 12,4 12,8 12,9
17	175	70	18481	4,4 8,7 13,1 19,6 24,0	64 131 198 299 365	31 66 99 151 187	31 66 99 247 187	53 108 165 247 277	14,6 14,7 15,0 15,2 15,2	7,1 7,4 7,5 7,7 7,8	7,1 7,4 7,5 7,7 7,8	12,0 12,2 12,5 12,6 12,7
18	175	87	20270	4,6 9,4 13,9 20,7 25,4	71 146 219 329 409	38 86 130 201 252	29 62 93 137 173	60 124 187 284 351	15,4 15,6 15,8 15,9 16,1	8,3 9,2 9,4 9,7 9,9	6,3 6,6 6,7 6,6 6,8	13,1 13,2 13,5 13,7 13,8

c.d. tabl. 4.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
19	176	60	17381	4,4 8,7 13,1 19,6 24,0	62 125 190 287 353	24 57 91 141 178	25 59 93 149 192	50 102 158 238 300	14,2 14,3 14,5 14,6 14,7	5,5 6,5 6,9 7,2 7,4	5,7 6,8 7,1 7,6 8,0	11,4 11,7 12,1 12,1 12,5
20	176	72	18781	4,6 9,4 13,9 20,7 25,4	69 141 209 315 386	28 61 92 139 168	29 64 98 267 183	55 116 176 267 330	14,9 15,0 15,1 15,2 15,2	6,1 6,5 6,6 6,7 6,6	6,3 6,8 7,1 7,2 7,2	12,0 12,4 12,7 12,9 13,0
21	176	89	20552	4,4 8,7 13,1 19,6 24,0	68 138 209 316 389	27 58 90 139 178	32 93 158 246 302	57 118 179 273 338	15,5 15,8 16,0 16,1 16,2	6,2 6,7 6,9 7,1 7,4	7,4 10,7 12,1 12,5 12,6	13,1 13,5 13,7 13,9 14,1
22	176	74	19001	4,6 9,4 13,9 20,7 25,4	69 141 211 317 391	36 72 108 164 203	39 82 126 193 244	55 118 179 271 336	15,0 15,1 15,2 15,3 15,4	7,6 7,7 7,8 7,9 8,0	8,4 8,8 9,1 9,3 9,6	11,9 12,6 12,9 13,1 13,2
23	177	62	17697	4,4 8,7 13,1 19,6 24,0	64 130 194 293 356	16 41 67 106 133	31 61 131 223 289	51 107 160 240 294	14,5 14,6 14,7 14,9 15,0	3,7 4,6 5,1 5,4 5,6	7,1 6,9 9,9 11,3 12,2	11,7 12,0 12,1 12,2 12,4
24	177	65	18056	4,4 8,7 13,1 19,6 24,0	64 131 197 295 362	30 65 98 147 182	32 104 161 247 307	52 107 164 246 277	14,5 14,8 14,9 15,0 15,1	6,8 7,3 7,4 7,5 7,6	7,3 11,7 12,2 12,6 12,8	11,8 12,1 12,4 12,5 12,7
25	178	65	18130	4,4 8,7 13,1 19,6 24,0	65 130 196 295 362	40 93 144 221 271	48 105 164 256 317	51 106 162 250 310	14,9 14,9 15,0 15,0 15,1	9,2 10,7 11,0 11,2 11,3	11,0 12,0 12,5 13,0 13,2	11,8 12,1 12,4 12,7 12,9
26	178	68	18481	4,4 8,7 13,1 19,6 24,0	65 132 199 298 367	24 57 93 144 180	29 69 114 169 209	51 108 166 251 312	14,8 15,1 15,2 15,2 15,3	5,5 6,5 7,1 7,3 7,5	6,6 7,9 8,7 8,6 8,7	11,8 12,4 12,7 12,8 13,0
27	178	68	18481	4,6 9,4 13,9 20,7 25,4	69 141 212 317 394	32 69 102 154 192	33 71 106 156 196	56 117 175 261 328	15,0 15,1 15,4 15,3 15,5	7,0 7,4 7,6 7,4 7,5	7,2 7,6 7,6 7,5 7,6	12,1 12,5 12,6 12,6 12,9

c.d. tabl.4.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
28	178	74	19158	4,4 8,7 13,1 19,6 24,0	66 133 203 306 380	21 51 81 126 161	22 54 86 134 170	53 109 170 265 326	15,1 15,3 15,5 15,6 15,8	4,8 5,8 6,2 6,4 6,7	5,0 6,2 6,6 6,8 7,1	12,2 12,5 13,0 13,5 13,6
29	178	75	19267	4,6 9,4 13,9 20,7 25,4	70 145 213 323 399	37 76 116 174 216	40 82 124 186 231	57 119 182 275 343	15,2 15,5 15,4 15,6 15,7	8,0 8,1 8,4 8,4 8,5	8,7 8,8 8,9 9,0 9,1	12,4 12,7 13,1 13,3 13,5
30	178	83	20115	4,4 8,7 13,1 19,6 24,0	68 138 209 318 391	28 61 95 143 178	30 65 101 155 192	56 116 178 277 336	15,6 15,8 16,0 16,2 16,3	6,4 7,0 7,3 7,3 7,4	6,9 7,5 7,7 7,9 8,0	12,9 13,3 13,6 14,1 14,0
31	179	69	18672	4,6 9,4 13,9 20,7 25,4	69 142 212 317 391	38 76 114 172 214	38 79 119 190 249	55 117 175 267 336	15,1 15,2 15,3 15,3 15,4	8,3 8,1 8,2 8,3 8,4	8,3 8,4 8,9 9,2 9,8	12,0 12,5 12,6 12,9 13,2
32	179	71	18900	4,4 8,7 13,1 19,6 24,0	66 137 203 306 374	22 52 79 124 156	45 91 140 213 260	55 113 173 253 308	15,0 15,4 15,4 15,6 15,8	4,9 5,8 6,0 6,3 6,6	10,2 10,2 10,6 10,8 11,0	12,5 12,7 13,1 12,9 13,0
33	180	72	19090	4,4 8,7 13,1 19,6 24,0	67 139 209 310 382	51 101 157 236 290	53 113 164 246 305	54 113 173 259 319	15,3 15,6 15,8 15,9 15,9	11,6 11,4 11,9 12,0 12,7	12,1 12,3 12,4 12,5 12,7	12,4 12,7 13,1 13,2 13,3
34	181	76	19612	4,4 8,7 13,1 19,6 24,0	58 140 211 316 384	30 67 92 140 171	34 70 103 161 195	56 115 174 263 322	15,6 15,8 16,0 16,1 16,2	6,8 7,0 7,0 7,1 7,2	7,7 7,9 7,8 8,2 8,2	12,7 12,9 13,2 13,4 13,6
35	183	76	19769	4,4 8,7 13,1 19,6 24,0	70 140 212 322 396	34 69 105 161 204	34 69 106 165 202	57 114 178 271 338	16,0 16,1 16,2 16,4 16,5	7,8 7,9 8,0 8,2 8,5	7,8 7,9 8,0 8,2 8,5	13,0 13,1 13,6 13,8 14,1

4.3.2. Czas reakcji u osób poddanych działaniu pola elektrycznego o częstotliwości 50 Hz

Przeprowadzone badania dostarczyły znacznej liczby wyników pomiarów, które w rozprawie przedstawiono w formie opracowanej statystycznie¹⁾. W tablicy 4.3 przedstawiono wyniki pomiarów czasu reakcji dla obu rodzajów bodźca: dźwiękowego i świetlnego oraz stosowanych w badaniach natężeń pól. Dla każdej osoby badanej czas reakcji podany w tablicy 4.3 stanowi średnią z 40 pomiarów.

Dokonanie statystycznej oceny charakterystycznych parametrów próby wymagało sprawdzenia statystycznego rozkładu otrzymanych wyników. W pracy [66] wysunięto i potwierdzono doświadczalnie słuszność hipotezy, że czas świadomej reakcji człowieka można opisać za pomocą rozkładu logarytm-normalnego. Dla celów prawidłowej interpretacji otrzymanych wyników przyjęto w rozprawie tę samą hipotezę, uzyskując jej potwierdzenie, po przeprowadzeniu odpowiedniej weryfikacji nieparametrycznym testem χ^2 - Pearsona oraz w oparciu o metodę graficznych siatek prawdopodobieństwa [9].

W tablicy 4.4 przedstawiono, obliczone na podstawie wyników pomiarów, wartości statystyki χ^2 i odczytane z tablic, dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0,05$, wartości krytyczne statystyki χ^2_{α} .

Przy przyjęciu jako zmiennej losowej X czasu reakcji, we wszystkich przypadkach uzyskuje się nierówność $\chi^2 > \chi^2_{\alpha}$ co oznacza, że hipotezę o normalnym rozkładzie badanej cechy należy odrzucić. Przyjmując natomiast jako zmienną losową Y logarytm czasu reakcji ($Y = \ln X$), we wszystkich przypadkach uzyskuje się zależność odwrotną tzn. $\chi^2 < \chi^2_{\alpha}$, co oznacza, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o rozkładzie normalnym logarytmu mierzonej cechy.

Rysunki 4.10 i 4.11 ilustrują dystrybuanty empiryczne $D(X)$ czasu reakcji prostej na bodźce dźwiękowy i świetlny wykreślone w siatce laplaso-logarytmicznej. Dystrybuanty te obliczono z 40 pomiarów dla próbki o liczności $N = 35$. Linia prosta łącząca punkty naniesione na siatkę, potwierdza słuszność hipotezy o logarytm-normalnym rozkładzie mierzonej cechy. Dla porównania na rysunku 4.12 zilustrowano dystrybuantę empiryczną $D(X)$ dla bodźca dźwięko-

¹⁾ Pełna dokumentacja wyników pomiarów znajduje się w protokółach badań przechowywanych w archiwum Instytutu Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej.

Tablica 4.3

Zestawienie wyników pomiarów czasu reakcji u osób poddanych działaniu pola elektrycznego

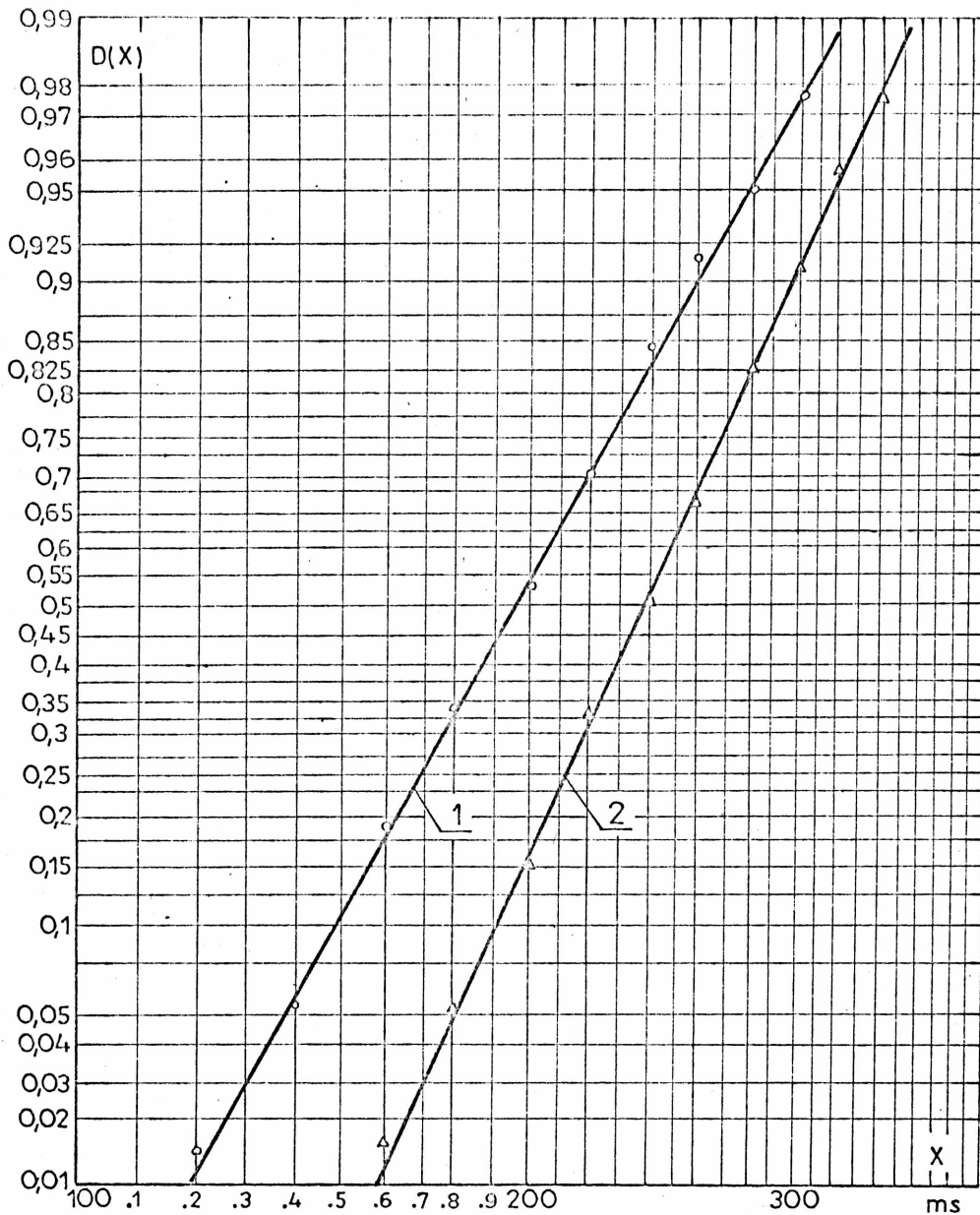
	Bodziec dźwiękowy				Bodziec świetlny			
	Natężenie pola elektrycznego E_0 , w kV/m							
	0	4,4	10,9	13,0	0	4,4	10,9	13,0
Numer badanego	Czas reakcji t_r , w ms							
1	191	194	185	176	174	199	231	253
2	226	217	286	320	209	228	229	220
3	178	176	204	250	177	241	214	223
4	180	178	200	185	156	221	232	201
5	196	202	185	195	180	195	175	165
6	190	193	225	243	201	242	197	218
7	172	178	276	270	197	165	226	238
8	194	191	201	210	191	197	195	267
9	202	208	149	168	186	190	231	233
10	201	200	218	218	226	248	299	244
11	224	220	264	266	198	156	199	175
12	200	206	249	253	184	218	212	227
13	189	189	237	227	187	194	192	198
14	168	169	195	201	189	188	201	246
15	214	221	253	241	231	225	252	260
16	220	220	263	291	215	202	185	241
17	202	212	221	238	192	183	188	190
18	183	180	240	261	145	165	171	170
19	188	196	185	195	246	208	185	201
20	207	204	206	217	228	219	217	219
21	202	201	284	308	223	206	199	211
22	239	244	258	254	229	227	259	298
23	208	215	236	241	201	195	201	219
24	266	246	284	288	214	236	261	234
25	227	224	236	231	237	226	250	255
26	213	217	228	248	199	206	212	216
27	220	209	251	253	221	258	251	267
28	211	214	243	242	199	208	197	210
29	214	220	233	239	216	236	224	240
30	221	218	237	246	239	257	259	283
31	218	235	265	196	216	220	205	231
32	187	184	221	265	161	180	175	201
33	212	219	241	276	171	165	174	189
34	189	209	232	285	202	219	242	260
35	194	204	209	287	175	168	186	195
Wartość średnia	204	206	231	242	200	208	215	226
Odchylenie standardowe	20	18	32	36	24	27	30	32

Tablica 4.4

Zestawienie obliczonych wartości statystyki χ^2 dla zmiennych losowych X i Y = ln X oraz wartości krytycznych statystyk χ_α^2 , przy $\alpha = 0,05$

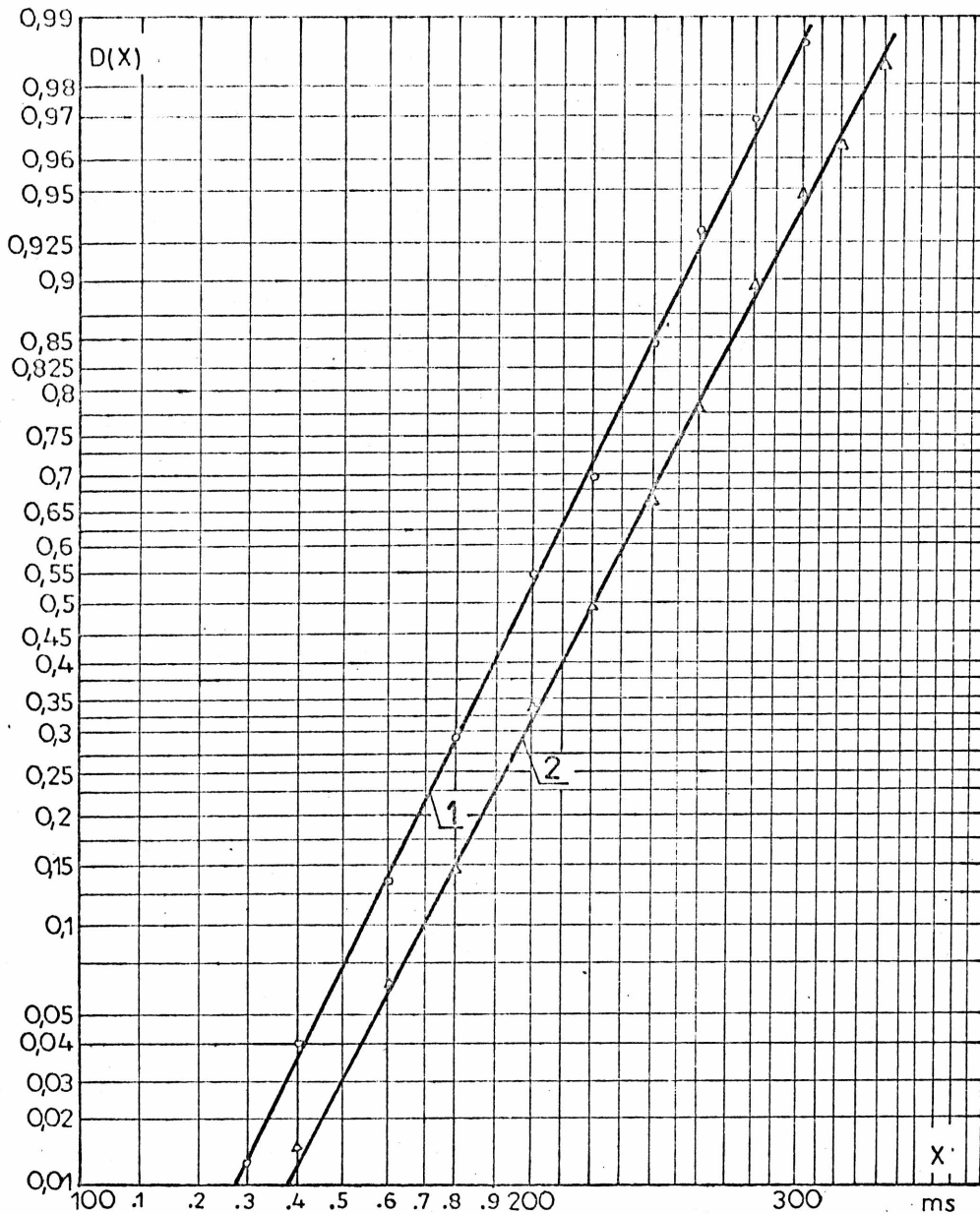
	Zmienna losowa X								Zmienna losowa Y = ln X							
	Bodziec dźwiękowy				Bodziec świetlny				Bodziec dźwiękowy				Bodziec świetlny			
	Natężenie pola elektrycznego E ₀ , w kV/m								Natężenie pola elektrycznego E ₀ , w kV/m							
Wartość statystyki	0	4,4	10,9	13,0	0	4,4	10,9	13,0	0	4,4	10,9	13,0	0	4,4	10,9	13,0
χ ²	109,3	188,7	164,6	83,0	113,7	1029	147,2	243,0	2,67	1,84	1,61	1,64	2,09	4,71	1,87	2,85
χ _α ²	15,5	14,1	15,5	16,9	14,1	16,9	16,9	16,9	5,991	7,815	7,815	7,815	7,815	7,815	7,815	7,815

wego w siatce laplaso-regularnej¹⁾.



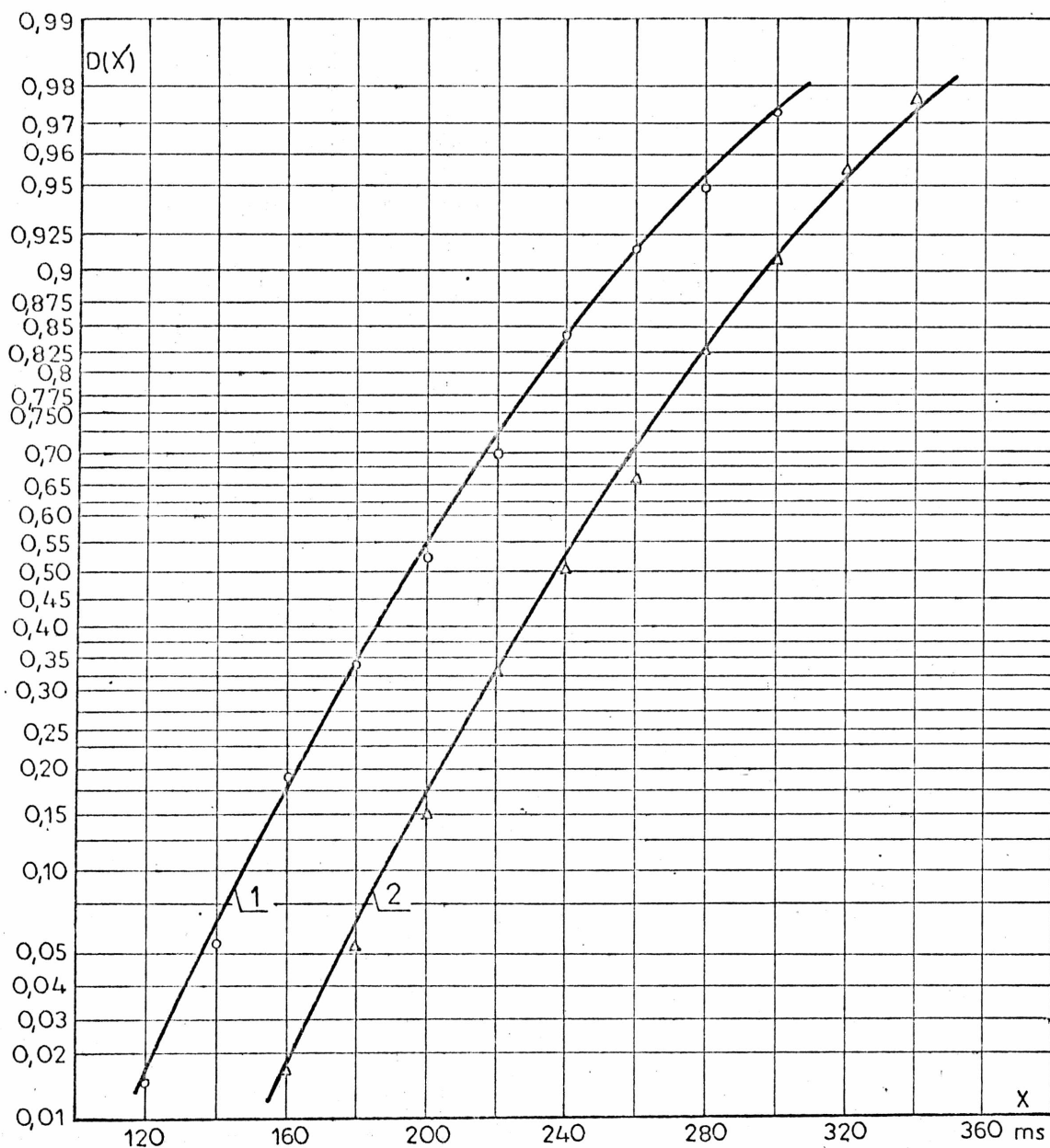
Rys.4.10. Dystrybuanta empiryczna $D(X)$ czasu reakcji prostej na bodziec dźwiękowy w siatce laplaso-logarytmicznej, obliczona z 40 pomiarów dla próbki o liczności $N = 35$
 1 - $E_0 = 0$ kV/m; 2 - $E_0 = 13$ kV/m

¹⁾ W przypadku rozkładu normalnego, $D(X)$ wykreślona w siatce laplaso-regularnej jest linią prostą [9].



Rys.4.11. Dystrybuanta empiryczna $D(X)$ czasu reakcji prostej na bodziec świetlny w siatce laplaso-logarytmicznej, obliczona z 40 pomiarów dla próbki o liczności $N = 35$
1 - $E_0 = 0$ kV/m; 2 - $E_0 = 13$ kV/m

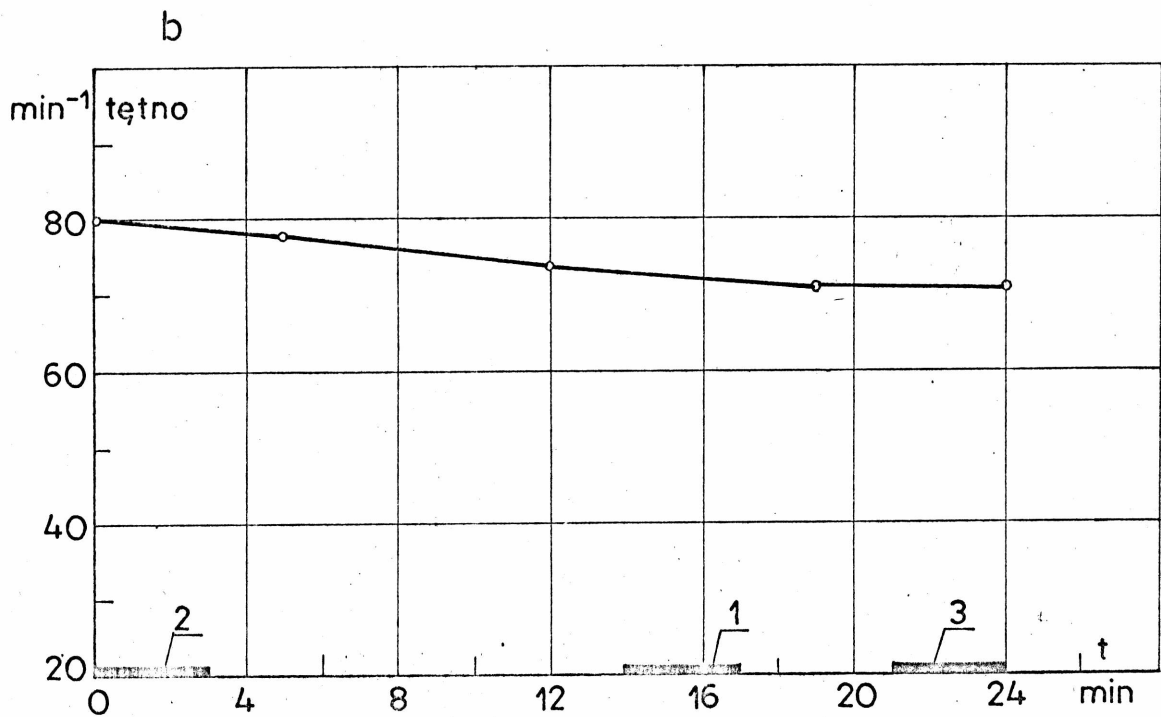
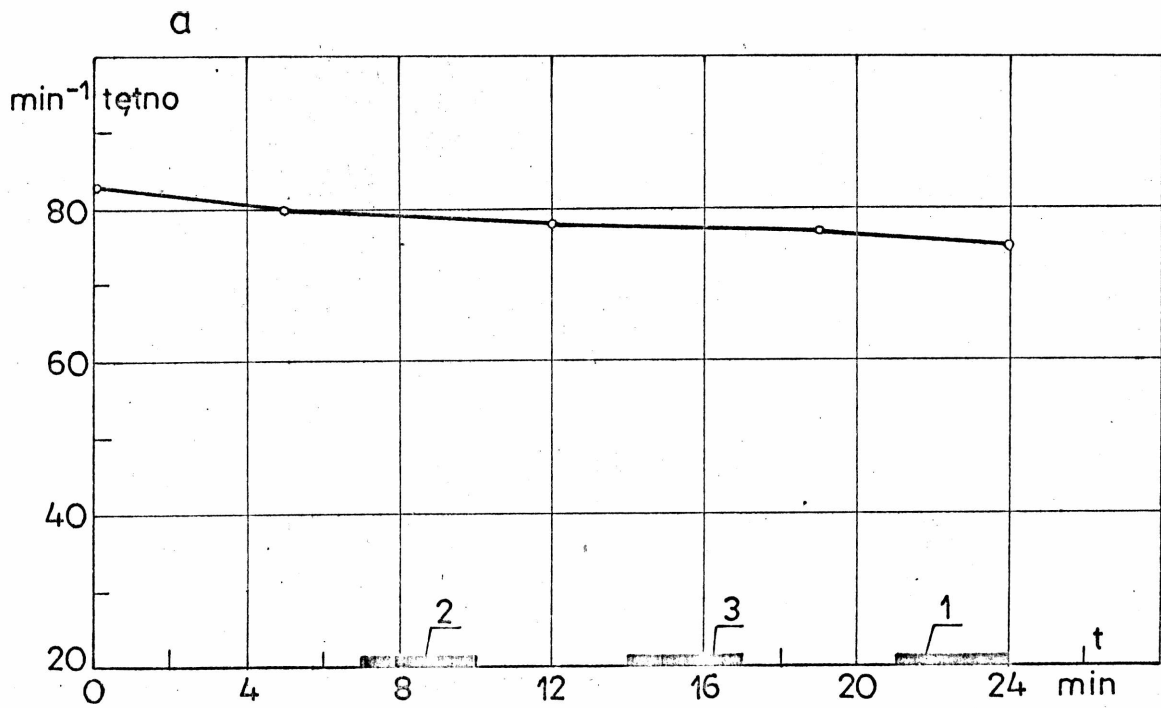
Wykazano więc, że mierzona cecha, czas reakcji, nie podlega rozkładowi normalnemu jaki wielu autorów przyjmuje i posługuje się statystycznymi metodami analizy wyników, które są słuszne



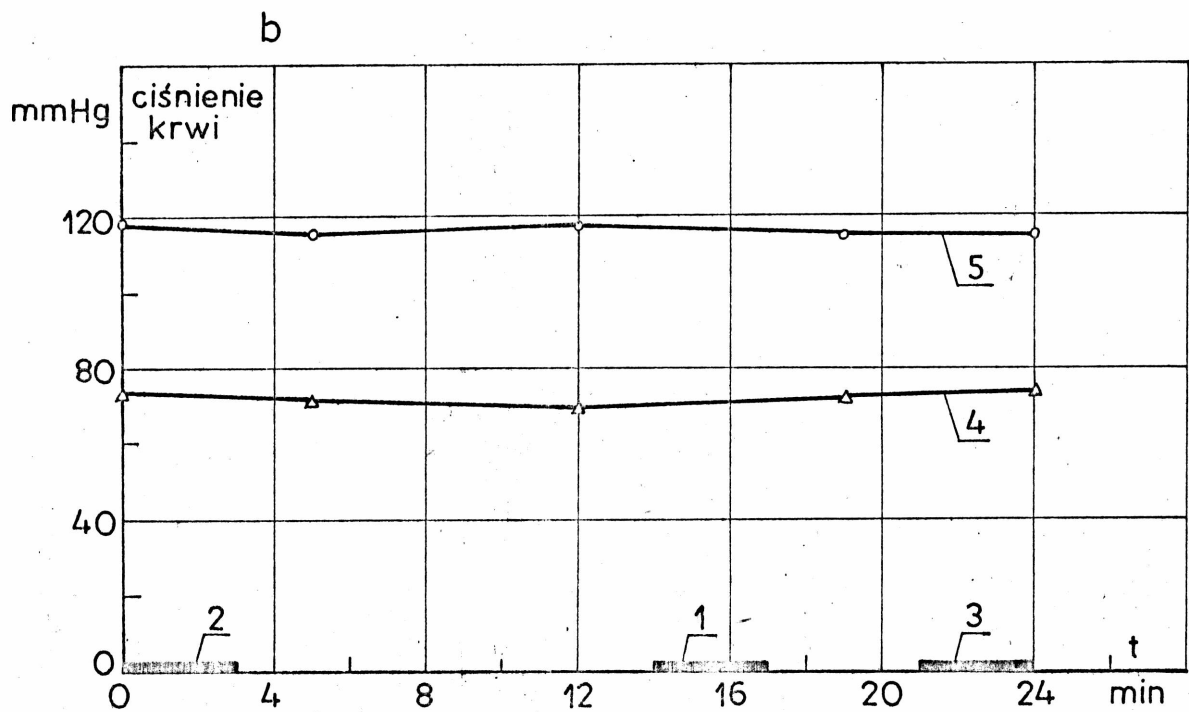
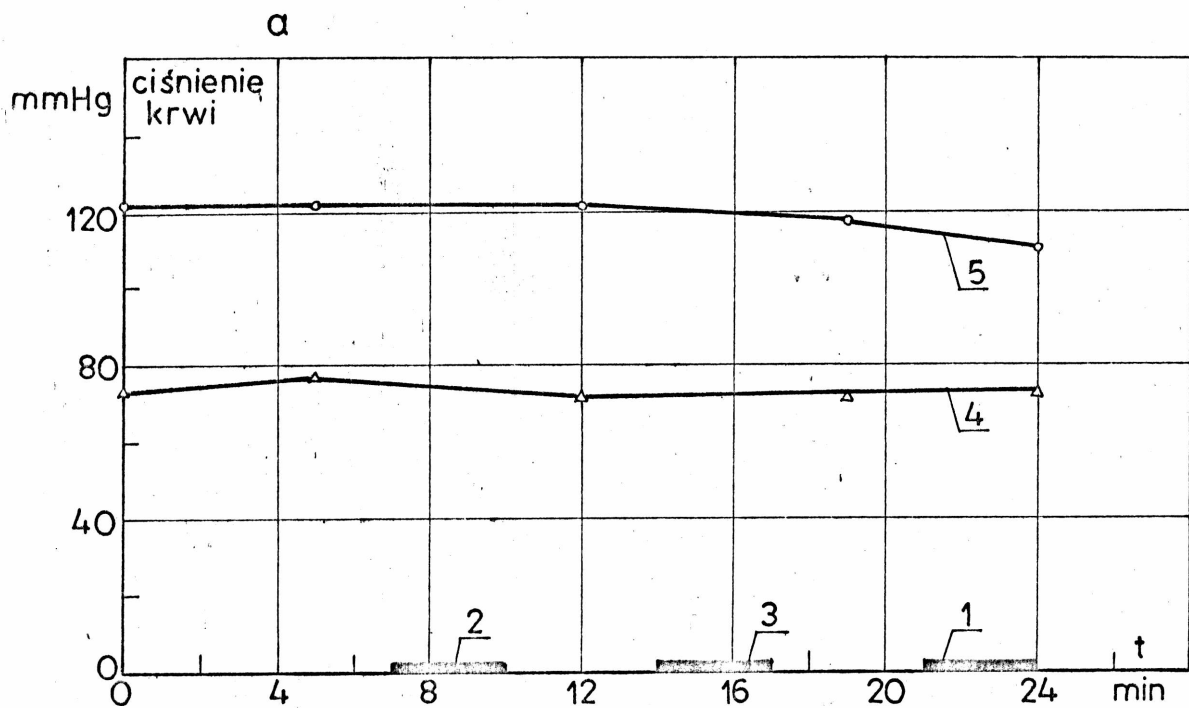
Rys.4.12. Dystrybuanta empiryczna $D(X)$ czasu reakcji prostej na bodziec dźwiękowy w siatce laplaso-regularnej, obliczona z 40 pomiarów dla próbki o liczności $N = 35$
 1 - $E_0 = 0$ kV/m; 2 - $E_0 = 13$ kV/m

jedynie dla tego właśnie rozkładu.

Wyniki, przeprowadzonych w trakcie badania czasu reakcji, pomiarów tętna i ciśnienia krwi przedstawiono na rysunkach 4.13 i 4.14.



Rys.4.13. Zmiany tętna w czasie badań wpływu pola elektrycznego na czas reakcji na bodźce dźwiękowy (a) i świetlny (b)
 1 - $E_0 = 4,4 \text{ kV/m}$; 2 - $E_0 = 10,9 \text{ kV/m}$; 3 - $E_0 = 13 \text{ kV/m}$



Rys.4.14. Zmiany ciśnienia krwi w czasie badań wpływu pola elektrycznego na czas reakcji na bodziec dźwiękowy (a) i świetlny (b); 1 - $E_0 = 4,4 \text{ kV/m}$; 2 - $E_0 = 10,9 \text{ kV/m}$; 3 - $E_0 = 13 \text{ kV/m}$; 4 - ciśnienie rozkurczowe, 5 - ciśnienie skurczowe

Tablica 4.6

Wyniki badań poziomu hemoglobiny i niektórych składników morfologicznych krwi u ludzi poddanych działaniu pola elektrycznego o natężeniu $E_0 = 15 \text{ kV/m}$

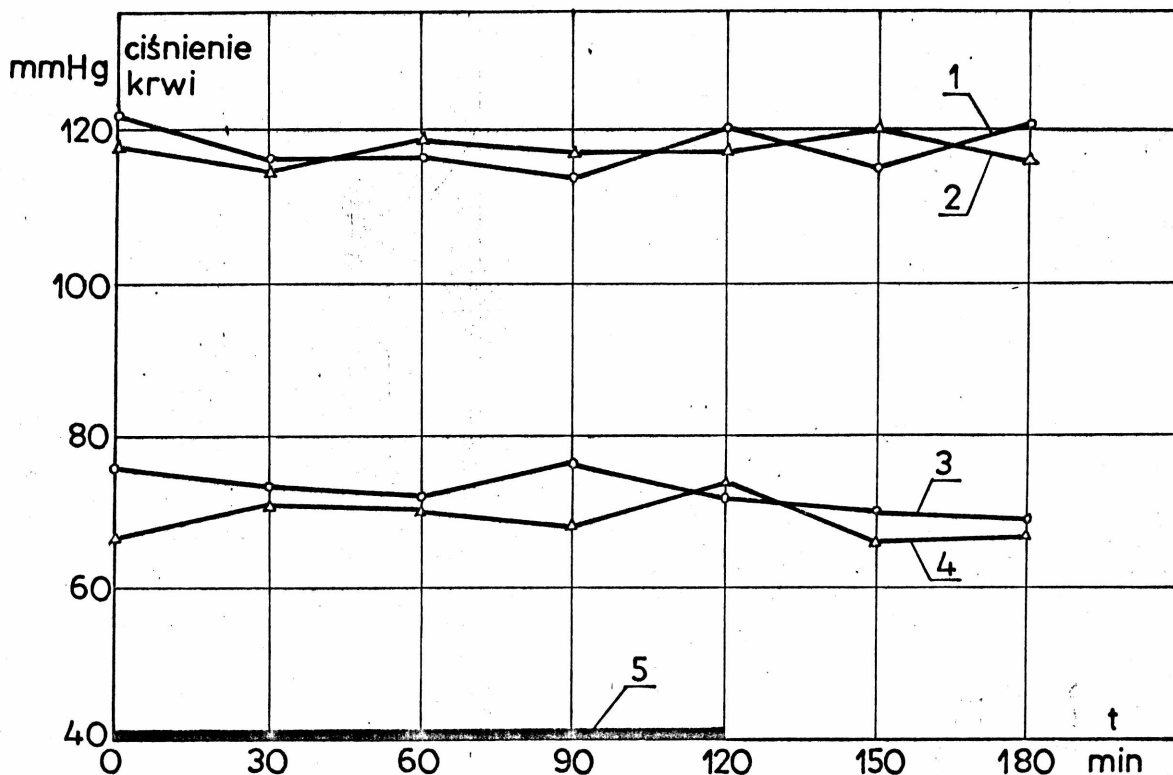
	Przed ekspozycją		Bezpośrednio po zakończeniu ekspozycji		W godzinę po zakończeniu ekspozycji	
	$\bar{X}$	S	$\bar{X}$	S	$\bar{X}$	S
Hemoglobina, w g/100 ml	14,8	1,4	14,8	1,4	14,7	1,4
Erytrocyty, w mln/mm ³	5,236	0,389	5,265	0,405	5,280	0,374
Leukocyty, w tys/mm ³	6,396	1,111	6,942	1,139	6,941	1,159
Granulocyty obojętne, w tys/mm ³	4,015	0,790	4,328	0,822	4,337	0,834
Trombocyty, w tys/mm ³	217,88	27,50	221,15	25,20	220,86	26,41
Retikulocyty, w ‰	6,48	1,60	6,57	1,88	6,66	1,82
$\bar{X}$ - wartość średnia S - odchylenie standardowe						

Wyniki pomiarów tętna i ciśnienia krwi, które przeprowadzono w trakcie trwania tego eksperymentu, przedstawiono na rysunkach 4.15 i 4.16.

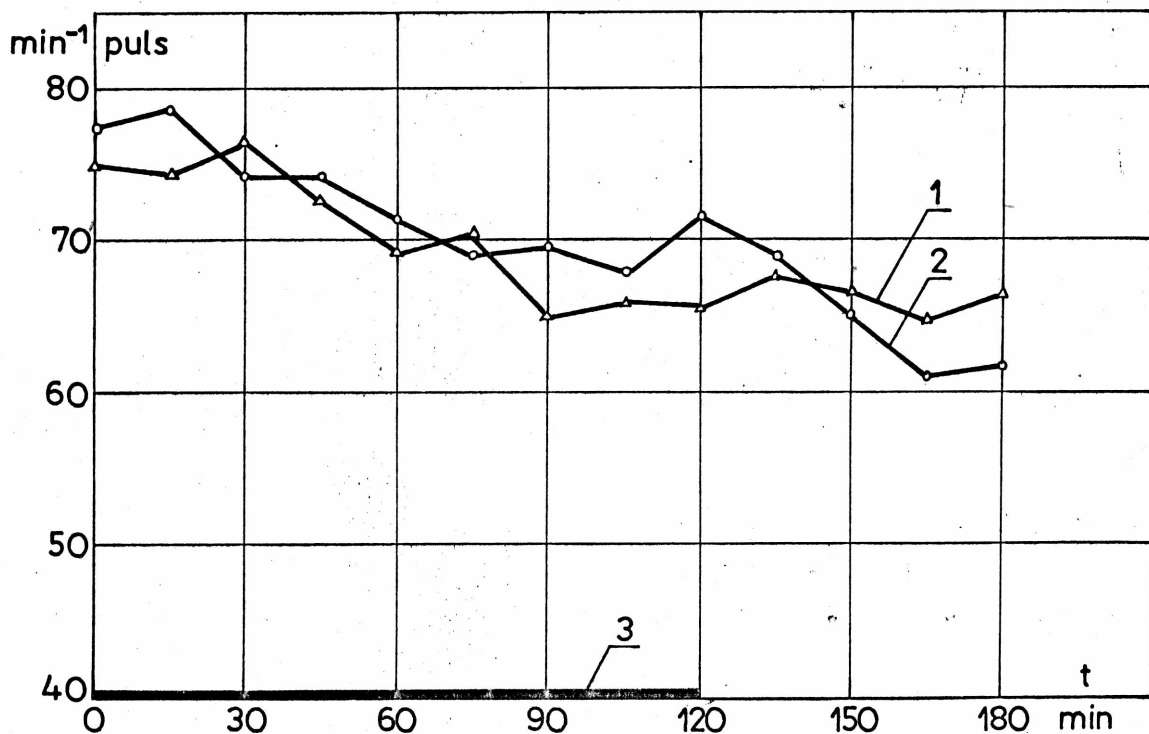
4.3.4. Czas reakcji u osób poddanych działaniu prądu elektrycznego

W tablicy 4.7 zestawiono wyniki pomiarów czasu reakcji na bodziec dźwiękowy i świetlny przy stosowanych w badaniach prądach rażeniowych. Dla każdej osoby badanej czas reakcji podany w tablicy 4.7 stanowi średnią arytmetyczną z 40 pomiarów.

Ocenę rozkładu mierzonej cechy przeprowadzono stosując w odniesieniu do uzyskanych wyników test χ^2 , podobnie jak miało to



Rys.4.15. Zmiany ciśnienia krwi w czasie trwania badań wpływu pola elektrycznego na składniki krwi; 1 - ciśnienie skurczowe, $E_0 = 5 \text{ kV/m}$; 2 - ciśnienie skurczowe, $E_0 = 15 \text{ kV/m}$; 3 - ciśnienie rozkurczowe, $E_0 = 5 \text{ kV/m}$; 4 - ciśnienie rozkurczowe, $E_0 = 15 \text{ kV/m}$; 5 - czas ekspozycji polem elektrycznym (2 godziny)



Rys.4.16. Zmiany tętna w czasie trwania badań wpływu pola elektrycznego na składniki krwi; 1 - $E_0 = 5 \text{ kV/m}$; 2 - $E_0 = 15 \text{ kV/m}$; 3 - czas ekspozycji polem elektrycznym (2 godziny)

Tablica 4.7

Zestawienie wyników pomiarów czasu reakcji u osób poddanych działaniu prądu elektrycznego

	Bodziec dźwiękowy				Bodziec świetlny			
	Natężenie prądu rażeniowego I_R , w μA							
	0	50	135	160	0	50	135	160
Numer badanego	Czas reakcji t_r , w ms							
1	157	161	161	157	178	146	184	188
2	159	148	144	138	202	206	228	237
3	177	186	200	228	188	194	182	212
4	127	122	137	144	136	132	129	148
5	204	164	168	168	221	217	247	282
6	152	152	172	177	164	157	184	211
7	183	182	177	220	264	219	269	273
8	177	187	179	205	194	162	187	197
9	114	118	160	204	146	132	153	181
10	167	181	218	200	187	187	232	257
11	142	156	189	165	197	197	167	193
12	141	146	158	174	194	194	197	213
13	227	214	252	268	271	220	221	213
14	147	141	186	201	175	163	184	251
15	248	237	273	271	294	218	298	320
16	171	157	181	211	208	161	227	227
17	128	129	161	203	158	156	201	213
18	185	179	189	186	253	172	260	282
19	180	182	211	187	169	158	188	202
20	209	184	216	236	228	185	220	229
21	163	151	186	218	193	177	221	232
22	136	126	174	183	138	125	163	168
23	194	178	226	195	235	230	232	242
24	158	179	228	200	176	175	213	194
25	221	221	248	267	285	276	258	260
26	138	147	188	208	153	159	212	226
27	196	195	237	302	217	176	236	253
28	188	180	244	257	173	158	177	221
29	243	247	300	321	312	256	284	281
30	196	186	184	194	214	221	227	243
31	156	154	191	200	157	146	163	202
32	211	216	278	260	232	231	248	247
33	226	218	236	243	188	174	212	231
34	197	181	208	264	223	243	228	248
35	194	183	212	221	178	174	178	185
36	188	194	231	248	186	180	210	228
Wartość średnia	177	174	203	214	202	185	212	228
Odchylenie standardowe	33	31	38	42	43	36	36	35

miejsce w przypadku wyników pomiarów czasu reakcji, u osób poddanych działaniu pola elektrycznego.

W tablicy 4.8 przedstawiono obliczone na podstawie uzyskanych wyników pomiarów, wartości statystyki χ^2 przy przyjęciu jako zmiennej losowej X' czasu reakcji oraz zmiennej losowej Y' ($Y' = \ln X'$) logarytmu czasu reakcji. Wartości krytyczne statystyki χ^2_α , podane w tablicy 4.8 odczytano z tablic dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0,05$.

Porównanie odpowiednich wartości χ^2 i χ^2_α (tabl.4.8) wskazuje, że mierzona cecha, czas reakcji osób poddanych działaniu prądu elektrycznego, posiada rozkład logarytm-normalny.

5. OGÓLNA OCENA WPŁYWU POLA ELEKTRYCZNEGO NA ORGANIZM LUDZKI

5.1. Ocena wyników pomiarów prądu pojemnościowego

Pomiary prądu elektrycznego, płynącego przez człowieka umieszczonego w polu elektrycznym wytworzonym w laboratorium, wykazały, że stosunek tego prądu do natężenia niezakłóconego pola elektrycznego, dla osób o różnym wzroście, różnej masie i budowie ciała, zawierał się w granicach 11-16 $\mu\text{A}/\text{kV}/\text{m}$ w przypadku gdy osoba badana była "uziemiona" (rys.4.5a). Gdy pomiary przeprowadzono po odizolowaniu badanego od ziemi (rys.4.5b) stosunek ten zawierał się w granicach 5-12 $\mu\text{A}/\text{kV}/\text{m}$.

Biorąc pod uwagę, że natężenie niezakłóconego pola elektrycznego w otoczeniu obecnie eksploatowanych i projektowanych urządzeń elektroenergetycznych wysokiego napięcia nie przekracza wartości 20 kV/m (tabl.3.1), indukowany przez to pole prąd pojemnościowy płynący przez "uziemionego" człowieka może osiągnąć wartość 350 μA , a w otoczeniu najbardziej rozpowszechnionych urządzeń o napięciach do 1000 kV, nie przekroczy wartości 230 μA .

Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że natężenie prądu pojemnościowego płynącego przez człowieka umieszczonego w polu elektrycznym, w przypadku gdy jest on dobrze "uziemiony" zależy przede wszystkim od natężenia tego pola a ponadto od wzrostu człowieka, masy ciała i jego budowy wewnętrznej. Te dwa ostatnie czynniki

Tablica 4.8

Zestawienie wartości statystyki χ^2 dla zmiennych losowych X' i $Y' = \ln X'$ oraz wartości krytycznych statystyki χ_{α}^2 przy $\alpha = 0,05$

[illegible]

nie znalazły jednak odbicia w podawanych w literaturze zależnościach, służących do obliczania wartości tego prądu.

Deno [15] zaproponował, by wartość prądu I_p , płynącego przez "uziemiętego" człowieka, umieszczonego w jednorodnym polu elektrycznym obliczać z zależności

$$I_p = 5,4 L^2 E_0, \quad (5.1)$$

w której:

L - wzrost człowieka,

E_0 - natężenie niezakłóconego pola elektrycznego.

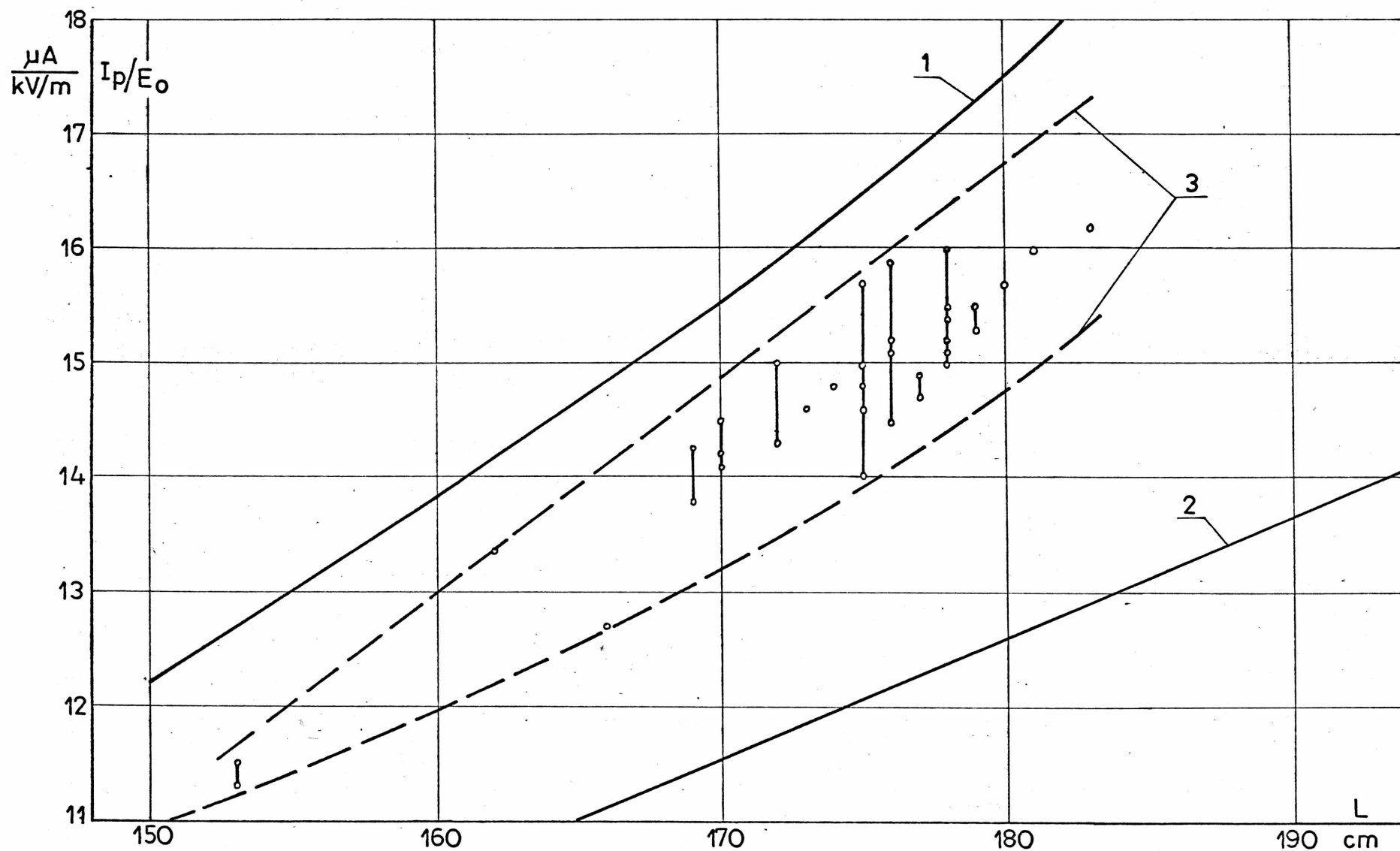
W pracy [32] proponuje się stosowanie do obliczeń tego prądu wzór postaci

$$I_p = \left(\frac{L}{9} - 7,34\right) E_0. \quad (5.2)$$

Na rysunku 5.1 wykreślono zależności $I_p/E_0 = f(L)$, wynikające ze wzorów (5.1) i (5.2) oraz tę samą zależność uzyskaną na podstawie przeprowadzonych pomiarów. Można zauważyć, że stosowanie do obliczeń prądu I_p zależności (5.1) prowadzi do uzyskania zawyżonych (w stosunku do obliczonych) wartości prądu, natomiast korzystanie ze wzoru (5.2) prowadzi do wartości niższych od zmierzonych.

Należy zwrócić uwagę, że w przytoczonych wzorach, przy określonej wartości E_0 , prąd I_p zależy tylko od wzrostu człowieka, przy czym we wzorze (5.1) zależność ta jest kwadratowa a w (5.2) liniowa. Z uzyskanych wyników pomiarów wynika, że zależności (5.1) i (5.2) nie stanowią precyzyjnego, analitycznego ujęcia tego zagadnienia. Wydaje się, że wyznaczenie dokładnych wartości prądu pojemnościowego, płynącego przez człowieka umieszczonego w polu elektrycznym, w różnych warunkach, wymagać będzie wykonania szeregu pomiarów na dużej grupie ludzi, różniących się między sobą wzrostem, masą ciała i typem budowy.

Prąd płynący przez człowieka umieszczonego w polu elektrycznym, obliczony z zależności (5.1) lub (5.2), w przypadku pól o natężeniu poniżej 20 kV/m, z całą pewnością nie przekroczy wartości 500 μA , a więc progu odczuwania przy rażeniu bezpośrednim, co



Rys.5.1. Zależność $I_p/E_0 = f(L)$ według różnych źródeł; 1 - $I_p/E_0 = 5,4 L^2$;
 2 - $I_p/E_0 = L/9 - 7,34$; 3 - wyniki uzyskane przez autora

potwierdziły przeprowadzone, na 35 osobach, pomiary.

Analiza wyników tych pomiarów pozwala na wyciągnięcie następujących wniosków:

1. Natężenie prądu pojemnościowego indukowanego w ciele człowieka izolowanego od ziemi było niższe niż w przypadku człowieka "uziemionego". Oznacza to, że w wielu rzeczywistych przypadkach narażenia człowieka na działanie pola elektrycznego należy spodziewać się niższych wartości prądów płynących przez jego ciało, niż wynikałoby to z obliczeń teoretycznych słusznych dla najbardziej niekorzystnego przypadku - człowieka "uziemionego".

2. Wartość stosunku I_p/E_0 wyznaczona dla tej samej osoby badanej, rośnie nieznacznie ze wzrostem napięcia przyłożonego do elektrod. Wynika stąd, że w przypadku obszarów o jednakowym natężeniu pola lecz różnych napięciach generujących to pole, większe wartości prądów I_p wystąpią przy napięciach wyższych. Zjawisko to tłumaczyć można różnym rozkładem pola elektrycznego na powierzchni ciała człowieka przy stosowaniu różnych napięć. Rozkład ten może się zmieniać w wyniku zmian własności dielektrycznych warstw powierzchniowych ciała człowieka.

3. Prąd elektryczny płynący przez człowieka umieszczonego w sinusoidalnie zmiennym polu elektrycznym zachowuje charakter sinusoidalny.

5.2. Statystyczna analiza wyników pomiarów czasu reakcji

Uzyskane w pomiarach czasu reakcji wyniki (tabl.4.3) sugerują, że krótkotrwałe działanie na organizm człowieka pola elektrycznego o natężeniu powyżej 10 kV/m powoduje wydłużenie czasu reakcji. Sugestię tę można sprowadzić do hipotezy statystycznej dotyczącej istotnej różnicy między wartościami średnimi w dwóch populacjach. Zastosowanie testu istotności dla dwóch średnich jest możliwe, gdy rozkład badanej cechy w populacji jest normalny [24]. W rozdziale 4.3.2 wykazano, że warunek ten w odniesieniu do czasu reakcji nie jest spełniony. Rozkład normalny w badanej populacji wykazuje natomiast logarytm naturalny tej cechy. Dlatego też celem zastosowania testu istotności dla dwóch średnich, wyniki przeprowadzonych pomiarów dla wszystkich badanych osób i rodzajów wykonanych prób, przedstawiono w tablicy 5.1 w postaci war-

Tablica 5.1

Wartości logarytmów naturalnych czasów reakcji zmierzonych
w poszczególnych próbach

	Bodziec dźwiękowy				Bodziec świetlny			
	Natężenie pola elektrycznego, w kV/m							
	0	4,4	10,9	13,0	0	4,4	10,9	13,0
	Wartość logarytmu naturalnego czasu reakcji							
Numer badanego	$x_i^{D_0}$	$x_i^{D_1}$	$x_i^{D_2}$	$x_i^{D_3}$	$x_i^{S_0}$	$x_i^{S_1}$	$x_i^{S_2}$	$x_i^{S_3}$
1	5,2523	5,2679	5,2204	5,1705	5,1591	5,2933	5,4424	5,5334
2	5,4205	5,3799	5,6560	5,7683	5,3423	5,4293	5,4337	5,3936
3	5,1818	5,1705	5,3181	5,5215	5,1761	5,4848	5,3660	5,4072
4	5,1930	5,1818	5,2983	5,2204	5,0499	5,3982	5,4467	5,3033
5	5,2781	5,3083	5,2204	5,2730	5,1930	5,2730	5,1648	5,1059
6	5,2470	5,2627	5,4161	5,4931	5,3033	5,4889	5,2832	5,3845
7	5,1475	5,1818	5,6204	5,5984	5,2832	5,1059	5,4205	5,4723
8	5,2679	5,2523	5,3033	5,3471	5,2523	5,2832	5,2730	5,5872
9	5,3083	5,3375	5,0039	5,2440	5,2257	5,2470	5,4424	5,4510
10	5,3033	5,2983	5,3845	5,3845	5,4205	5,5134	5,7004	5,4972
11	5,4116	5,3936	5,5759	5,5835	5,2883	5,0499	5,2933	5,1648
12	5,2983	5,3279	5,5175	5,3334	5,2149	5,3845	5,3566	5,4250
13	5,2417	5,2417	5,4681	5,4250	5,2311	5,2679	5,2575	5,2883
14	5,1240	5,1299	5,2730	5,3033	5,2417	5,2364	5,3033	5,5053
15	5,3660	5,3982	5,5334	5,4848	5,4424	5,4161	5,5294	5,5607
16	5,3936	5,3936	5,5722	5,6733	5,3706	5,3083	5,2204	5,4848
17	5,3083	5,3566	5,3982	5,4723	5,2575	5,2095	5,2364	5,2470
18	5,2095	5,1930	5,4806	5,5645	4,9767	5,1059	5,1417	5,1358
19	5,2364	5,2781	5,2204	5,2730	5,5053	5,3375	5,2204	5,3033
20	5,3327	5,3181	5,3279	5,3799	5,4293	5,3891	5,3799	5,3891
21	5,3083	5,3033	5,6490	5,7301	5,4072	5,3279	5,2933	5,3519
22	5,4767	5,4972	5,5530	5,5373	5,4337	5,4250	5,5568	5,6971
23	5,3375	5,3706	5,4638	5,4848	5,3033	5,2730	5,3033	5,3891
24	5,5835	5,5036	5,6490	5,6630	5,3660	5,4638	5,5645	5,4553
25	5,4250	5,4116	5,4638	5,4424	5,4681	5,4205	5,5215	5,5413
26	5,3613	5,3799	5,4293	5,5134	5,2933	5,3279	5,3566	5,3753
27	5,3936	5,3423	5,5255	5,3334	5,3982	5,5530	5,5255	5,6595
28	5,3519	5,3660	5,4931	5,4889	5,2933	5,3375	5,2832	5,3471
29	5,3600	5,3936	5,4510	5,4765	5,3753	5,4638	5,4116	5,4806
30	5,3982	5,3845	5,4681	5,5053	5,4765	5,5491	5,5568	5,6454
31	5,3845	5,4596	5,5797	5,2781	5,3753	5,3936	5,3230	5,4424
32	5,2311	5,2149	5,3982	5,5797	5,0814	5,1930	5,1648	5,3033
33	5,3566	5,3891	5,4848	5,6204	5,1417	5,1059	5,1591	5,2417
34	5,2417	5,3423	5,4467	5,6525	5,3083	5,3891	5,4889	5,5607
35	5,2679	5,3181	5,3423	5,6595	5,1648	5,1240	5,2257	5,2730
Wartość średnia	5,3144	5,3244	5,4344	5,4674	5,2928	5,3305	5,3613	5,4115
Odchylenie standardowe	0,0946	0,0898	0,1425	0,1580	0,1246	0,1314	0,1363	0,1420

tości logarytmów naturalnych zmierzonych czasów reakcji.

W przypadku wykonywania badań na elementach tylko jednej populacji, w ten sposób jak miało to miejsce w opisanych badaniach, wyniki dwóch prób stanowią parę przyporządkowanych sobie liczb. Można wtedy analizować wyniki obu prób jako wyniki jednej próby złożonej, której wynikiem będzie różnica wyników uzyskanych w obu próbach.

W przeprowadzonych badaniach taką próbę złożoną stanowiła para prób, z których pierwsza obejmowała pomiar czasu reakcji bez obecności pola ($E_0 = 0$ kV/m), a druga, pomiar czasu reakcji w przypadku ekspozycji polem. Wynik próby złożonej stanowiła różnica logarytmów naturalnych czasów reakcji zmierzonych w obu tych próbach.

Niech $X_i^{D_k}$ oznacza wartość logarytmu naturalnego średniej z 40 pomiarów czasu reakcji na bodziec dźwiękowy dla i -tej osoby badanej ($i = 1, 2 \dots 35$), w k -tej próbie, natomiast $X_i^{S_k}$, wartość logarytmu naturalnego średniej z 40 pomiarów czasu reakcji na bodziec świetlny, dla i -tej osoby badanej w k -tej próbie. Poszczególne numery prób oznaczają: próba pierwsza ($k=0$), pomiary wykonane bez działania pola ($E_0 = 0$ kV/m); próba druga ($k=1$), natężenie działającego pola wynosiło $E_0 = 4,4$ kV/m; próba trzecia ($k=2$), $E_0 = 10,9$ kV/m oraz próba czwarta ($k=3$), $E_0 = 13$ kV/m.

Korzystając z przyjętych oznaczeń utworzono następujące różnice:

$$\begin{aligned} Z_i^{D_0-1} &= X_i^{D_0} - X_i^{D_1}, \\ Z_i^{D_0-2} &= X_i^{D_0} - X_i^{D_2}, \\ Z_i^{D_0-3} &= X_i^{D_0} - X_i^{D_3}, \\ Z_i^{S_0-1} &= X_i^{S_0} - X_i^{S_1}, \\ Z_i^{S_0-2} &= X_i^{S_0} - X_i^{S_2}, \\ Z_i^{S_0-3} &= X_i^{S_0} - X_i^{S_3}, \end{aligned} \tag{5.3}$$

których wartości stanowiły wyniki 6 prób złożonych dla i-tego elementu badanej populacji. Wartości różnic określonych zależnościami (5.3) przedstawiono w tablicy 5.2.

Statystyczną weryfikację istotności różnic obliczonych na podstawie zależności (5.3) przeprowadzono, stosując test t-Studenta dla zmiennych losowych parami skorelowanych.

W tym celu obliczono następujące wartości średnie:

$$\bar{Z}^{D_{o-1}}, \bar{Z}^{D_{o-2}}, \bar{Z}^{D_{o-3}}, \bar{Z}^{S_{o-1}}, \bar{Z}^{S_{o-2}}, \bar{Z}^{S_{o-3}}$$

z wyników każdej próby złożonej oraz odpowiadające tym wartościom średnim odchylenia standardowe:

$$S_z^{D_{o-1}}, S_z^{D_{o-2}}, S_z^{D_{o-3}}, S_z^{S_{o-1}}, S_z^{S_{o-2}}, S_z^{S_{o-3}}.$$

Wartości te przedstawiono w tablicy 5.2.

Dla każdej wartości średniej postaci $\bar{Z}^m$, gdzie $m = D_{o-1}, D_{o-2}, D_{o-3}, S_{o-1}, S_{o-2}$ i S_{o-3} sformułowano następujące hipotezy statystyczne: zerową H^0 postaci $\bar{Z}^m = 0$ i alternatywną H^1 postaci $\bar{Z}^m < 0$.

Dla tak opisanego modelu statystycznego, postać zależności, za pomocą której obliczono wartości statystyki t, jest następująca:

$$t = \frac{\bar{Z}}{S_z} \sqrt{n-1}, \quad (5.4)$$

gdzie:

$\bar{Z}$ - wartość średnia różnic wyników,

S_z - odchylenie standardowe,

n - liczba par wyników.

Obliczone na podstawie zależności (5.4) wartości statystyki t^0 , dla danych z poszczególnych prób złożonych ($\bar{Z}^m$ i S_z^m), przedstawiono w tablicy 5.3, w której podano również, dla każdego przypadku wartość krytyczną statystyki t_α dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0,05$.

Przeprowadzona analiza statystyczna wyników pomiarów (tabl. 5.3) wykazała, że działające na człowieka pole elektryczne o częs-

Tablica 5.2

Zestawienie wartości różnic obliczonych na podstawie zależności (5.3)

	Bodziec dźwiękowy			Bodziec świetlny		
Numer badanego	$z_i^{D_{0-1}}$	$z_i^{D_{0-2}}$	$z_i^{D_{0-3}}$	$z_i^{S_{0-1}}$	$z_i^{S_{0-2}}$	$z_i^{S_{0-3}}$
1	-0,0156	0,0319	0,0818	-0,1342	-0,2833	-0,3743
2	0,0406	-0,2355	-0,3478	-0,0870	-0,0914	-0,0513
3	0,0113	-0,1363	-0,3397	-0,3087	-0,1899	-0,2311
4	0,0112	-0,1053	-0,0274	-0,3483	-0,3968	-0,2534
5	-0,0302	0,0577	0,0051	-0,080	-0,0282	-0,0871
6	-0,0157	-0,1691	-0,2461	-0,1856	-0,0201	-0,0812
7	-0,0343	-0,4729	-0,4509	0,1773	-0,1373	-0,1891
8	0,0156	-0,0354	-0,0792	-0,0309	-0,0207	-0,3349
9	-0,0292	0,3044	0,1843	-0,0213	-0,2167	-0,2253
10	0,005	-0,0812	-0,0812	-0,0929	-0,2799	-0,0767
11	0,0180	-0,1643	-0,1719	0,2384	-0,0050	-0,1235
12	-0,0296	-0,2192	-0,0351	-0,1696	-0,1417	-0,2101
13	0	-0,2264	-0,1833	-0,0368	-0,0264	-0,0572
14	-0,0059	-0,1490	-0,1793	0,0053	-0,0612	-0,2636
15	-0,0322	-0,1674	-0,1188	0,0263	-0,0870	-0,1183
16	0	-0,1786	-0,2797	0,0623	-0,1502	-0,1142
17	-0,0483	-0,0899	-0,1640	0,0480	-0,0211	-0,0105
18	0,0165	-0,2711	-0,3550	-0,1292	-0,1650	-0,1591
19	-0,0417	0,0160	-0,0366	0,1678	-0,2849	-0,2020
20	0,0146	0,0048	-0,0472	0,0402	-0,0494	-0,0402
21	0,0050	-0,3407	-0,4218	0,0793	-0,1139	-0,0553
22	-0,0207	-0,0765	-0,0608	0,0087	-0,1231	-0,2634
23	-0,0331	-0,1263	-0,1473	0,0303	0	-0,0858
24	0,0782	-0,0655	-0,0793	-0,0978	-0,1985	-0,0893
25	0,0134	-0,0388	-0,0174	0,0476	-0,0534	-0,0732
26	-0,0186	-0,0680	-0,1521	-0,0346	-0,0633	-0,0820
27	0,0513	-0,1319	0,0602	-0,1548	-0,1273	-0,2613
28	-0,0141	-0,1412	-0,1370	-0,0442	-0,0101	-0,0538
29	-0,0276	-0,0850	-0,1105	-0,0885	-0,0363	-0,1059
30	0,0137	-0,0699	-0,1071	-0,0726	-0,0803	-0,1689
31	-0,0751	-0,1952	0,1064	-0,0183	-0,0523	-0,0671
32	0,0162	-0,1671	-0,3486	-0,1116	-0,0834	-0,2219
33	-0,0325	-0,1282	-0,2638	0,0358	-0,0174	-0,10
34	-0,1006	-0,2050	-0,4108	-0,0808	-0,1806	-0,2524
35	-0,0502	-0,0744	-0,3916	-0,0408	-0,0609	-0,1082
	$\bar{z}^{D_{0-1}}$	$\bar{z}^{D_{0-2}}$	$\bar{z}^{D_{0-3}}$	$\bar{z}^{S_{0-1}}$	$\bar{z}^{S_{0-2}}$	$\bar{z}^{S_{0-3}}$
Wartość średnia	-0,0098	-0,120	-0,1530	-0,3770	-0,0685	-0,1187
	$s_z^{D_{0-1}}$	$s_z^{D_{0-2}}$	$s_z^{D_{0-3}}$	$s_z^{S_{0-1}}$	$s_z^{S_{0-2}}$	$s_z^{S_{0-3}}$
Odchylenie standardowe	0,0341	0,1260	0,1590	0,1191	0,1281	0,1268

Tablica 5.3

Wyniki statystycznej oceny wpływu pola elektrycznego na czas reakcji osób poddanych działaniu tego pola przy hipotezie zerowej H^0 postaci $\bar{Z}^m = 0$

	Bodziec dźwiękowy			Bodziec świetlny		
Warunki polowe eksperymentów ocenianych	$E_0 =$ 0 i 4,4 kV/m	$E_0 =$ 0 i 10,9 kV/m	$E_0 =$ 0 i 13,0 kV/m	$E_0 =$ 0 i 4,4 kV/m	$E_0 =$ 0 i 10,9 kV/m	$E_0 =$ 0 i 13,0 kV/m
Weryfikowana hipoteza zerowa H^0	$\bar{Z}^{D_0-1}=0$	$\bar{Z}^{D_0-2}=0$	$\bar{Z}^{D_0-3}=0$	$\bar{Z}^{S_0-1}=0$	$\bar{Z}^{S_0-2}=0$	$\bar{Z}^{S_0-3}=0$
Obliczona wartość statystyki t^0	-1,685	-5,55	-5,61	-1,645	-3,117	-5,457
Wartość krytyczna statystyki t_α przy $\alpha = 0,05$	-1,693	-1,693	-1,693	-1,693	-1,693	-1,693
Wynik testu	+ ¹⁾	- ²⁾	-	+	-	-
1) + oznacza brak podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej 2) - oznacza, że hipotezę zerową należy odrzucić na korzyść hipotezy alternatywnej						

totliwości 50 Hz i natężeniu przekraczającym wartość 10 kV/m wpływa w sposób istotny na czas reakcji, powodując jego przedłużenie dla obu rodzajów bodźców stosowanych w badaniach. Pole elektryczne o natężeniu 4,4 kV/m, stosowane w badaniach, nie powodowało istotnych zmian w czasie reakcji osób eksponowanych.

Interesujące byłoby znalezienie wartości progowej natężenia pola, powyżej której czas reakcji ulega statystycznie istotnemu przedłużeniu. Wymagałoby to wykonania badań dla kilkunastu wartości natężenia pola z przedziału 4,4 - 10,9 kV/m na odpowiednio liczonym materiale doświadczalnym. Dalsze przedłużenie czasu reakcji u osób poddanych działaniu pola elektrycznego o natężeniu przekra-

czającym wartość 13 kV/m, jakkolwiek prawdopodobne w świetle uzyskanych wyników, byłoby trudne do zinterpretowania jako skutek jedynie działania pola elektrycznego. Jak już bowiem wykazano (rozdz.4.2.2) pole elektryczne o natężeniu przekraczającym wartość 14 kV/m, było w sposób charakterystyczny odczuwane przez badanych. Tak więc pole takie stanowiłoby zewnętrzny, odczuwalny czynnik stressowy, posiadający określony wpływ na przebieg reakcji psychofizjologicznych człowieka. Zdaniem autora wyniki uzyskane w badaniach prowadzonych w warunkach odczuwania i nieodczuwania pola elektrycznego przez osoby badane, nie mogą być porównywane.

Mechanizm obserwowanego zjawiska przedłużenia czasu reakcji u osób poddanych krótkotrwałej ekspozycji polem elektrycznym jest trudny do ustalenia. Można przypuszczać, że zjawisko to spowodowane jest oddziaływaniem prądu elektrycznego, indukowanego przez pole elektryczne, płynącego w organizmie człowieka na centralny system nerwowy, który spełnia nadrzędną funkcję w psychofizjologii człowieka. Ewentualny wpływ pola elektrycznego na funkcjonowanie receptorów lub efektorów, biorących udział w reakcjach psychofizjologicznych, jest w świetle dotychczas poznanych mechanizmów ich działania, mało prawdopodobny.

Pomiary tętna i ciśnienia krwi przeprowadzone równoległe z badaniem czasu reakcji jak również wykonane w trakcie pozostałych eksperymentów wykazały znikomą zmienność ciśnienia tętniczego (zarówno skurczowego jak i rozkurczowego) oraz nieznaczne systematyczne zwolnienie tętna w czasie trwania badań. Obserwowane zwolnienie tętna u osób badanych wytłumaczyć można statyczną pozycją wykonującego badanie oraz ogólnym efektem uspokojenia.

Na podstawie uzyskanych wyników (rys.4.13 - 4.16) należy stwierdzić, że nie ujawniono wpływu pola elektrycznego o częstotliwości 50 Hz, o wartościach stosowanych w badaniach, na tętno i ciśnienie krwi u osób narażonych na jego krótkotrwałe działanie.

5.3. Analiza wyników badań krwi

Statystyczną analizę wyników badań krwi u ludzi poddanych krótkotrwałemu działaniu pola elektrycznego przeprowadzono, stosując test t-Studenta dla zmiennych losowych parami skorelowanych, podobnie jak miało to miejsce przy opracowywaniu wyników pomiaru czasu reakcji. Przez parę zmiennych losowych rozumieć należy dwie wartości badanej cechy krwi, zmierzone u tej samej osoby przed rozpoczęciem i po zakończeniu eksperymentu. Dla każdego badanego składnika krwi obliczono wartość średnią i odchylenie standardowe różnic wyników (par zmiennych losowych) pomiarów, uzyskanych odpowiednio: przed ekspozycją i bezpośrednio po jej zakończeniu ($\bar{Z}_1, \bar{Z}_2, S_{Z_1}, S_{Z_2}$) oraz przed ekspozycją i w godzinę po jej zakończeniu ($\bar{Z}'_1, \bar{Z}'_2, S_{Z'_1}, S_{Z'_2}$). Wartości te obliczono dla obu eksperymentów: pierwszego, w którym stosowano pole elektryczne o natężeniu 5 kV/m i drugiego, w którym natężenie pola wynosiło 15 kV/m. Wyniki obliczeń wartości $\bar{Z}_1, \bar{Z}'_1, S_{Z_1}$ i $S_{Z'_1}$ dla poszczególnych składników krwi przedstawiono w tabelicy 5.4 natomiast wartości $\bar{Z}_2, \bar{Z}'_2, S_{Z_2}$ i $S_{Z'_2}$ w tabelicy 5.5.

Weryfikację istotności otrzymanych różnic przeprowadzono, obliczając za pomocą wzoru (5.4) wartość statystyki t^0 dla odpowiednich wartości średnich i odchyleń standardowych, przyjmując hipotezę zerową H^0 o nieistotności statystycznej uzyskanych różnic.

Obliczone wartości statystyki t^0 oraz wartość krytyczną t_α tej statystyki, przy $\alpha = 0,05$ przedstawiono w tabelicy 5.6.

Rezultaty statystycznej weryfikacji uzyskanych wyników badań krwi (tabl. 5.6) wykazały, że istnieje wpływ pola elektrycznego o częstotliwości 50 Hz na ilościową zawartość niektórych składników morfologicznych krwi u ludzi poddanych krótkotrwałemu działaniu tego pola. Stwierdzono statystycznie znaczące podwyższenie liczby leukocytów i granulocytów obojętnochłonnych u osób poddanych dwugodzinnej ekspozycji polem elektrycznym o natężeniu 5 kV/m. Podwyższona zawartość obu tych składników utrzymywała się w godzinę po zakończeniu ekspozycji. Dwugodzinna ekspozycja grupy doświadczalnej polem elektrycznym o natężeniu 15 kV/m, spowodowała u osób eksponowanych, statystycznie znaczący wzrost liczby leukocytów, granulocytów obojętnochłonnych oraz trombocytów.

Tablica 5.4

Wartości średnie i odchylenia standardowe różnic
wyników pomiarów uzyskanych w badaniach krwi
u ludzi poddanych działaniu pola elektrycznego
o natężeniu 5 kV/m

	Różnica wyników uzyskanych przed ekspozycją polem i bezpośrednio po jej zakończeniu		Różnica wyników uzyskanych przed ekspozycją polem i w godzinę po jej zakończeniu	
	Wartość średnia $\bar{Z}_1$	Odchyle- nie stan- dardowe $S_{Z'_1}$	Wartość średnia $\bar{Z}_1$	Odchyle- nie stan- dardowe $S_{Z'_1}$
Hemoglobina, w g/100 ml	0,25	0,55	-0,12	0,84
Erytrocyty, w mln/mm ³	-0,0629	0,1398	-0,0207	0,0774
Leukocyty, w tys/mm ³	-0,443	0,296	-0,416	0,259
Granulocyty obo- jętnochłonne, w tys/mm ³	-0,241	0,194	-0,227	0,172
Trombocyty, w tys/mm ³	-0,579	4,981	-0,686	3,371
Retikulocyty, w ‰	0,136	0,403	0,014	0,541

Tablica 5.5

Wartości średnie i odchylenia standardowe różnic wyników pomiarów uzyskanych w badaniach krwi u ludzi poddanych działaniu pola elektrycznego o natężeniu 15 kV/m

	Różnica wyników uzyskanych przed ekspozycją polem i bezpośrednio po jej zakończeniu		Różnica wyników uzyskanych przed ekspozycją polem i w godzinę po jej zakończeniu	
	Wartość średnia $\bar{Z}_2$	Odchylenie standardowe S_{Z_2}	Wartość średnia $\bar{Z}'_2$	Odchylenie standardowe $S_{Z'_2}$
Hemoglobina, w g/100 ml	- 0,06	0,31	-0,05	0,25
Erytrocyty, w mln/mm ³	-0,0286	0,171	-0,0436	0,244
Leukocyty, w tys/mm ³	-0,546	0,282	-0,546	0,366
Granulocyty obojętnochłonne, w tys/mm ³	-0,313	0,171	-0,323	0,180
Trombocyty, w tys/mm ³	-3,271	5,406	-2,979	5,131
Retikulocyty, w ‰	-0,093	0,502	-0,179	0,512

Tablica 5.6

Statystyczna ocena wyników badań krwi u ludzi poddanych działaniu pola elektrycznego

	Eksperyment 1 - $E_0 = 5 \text{ kV/m}$						Eksperyment 2 - $E_0 = 15 \text{ kV/m}$					
	Postać hipotezy zerowej $H_0 : \bar{Z}_1 = 0$			Postać hipotezy zerowej $H_0 : \bar{Z}_1 = 0$			Postać hipotezy zerowej $H_0 : \bar{Z}_2 = 0$			Postać hipotezy zerowej $H_0 : \bar{Z}_2 = 0$		
	t^0	t_α	Wynik testu	t^0	t_α	Wynik testu	t^0	t_α	Wynik testu	t^0	t_α	Wynik testu
Hemoglobina	+1,70	+1,771	+ ¹⁾	-0,52	-1,771	+	-0,70	-1,771	+	-0,72	-1,771	+
Erytrocyty	-1,62	-1,771	+	-0,96		+	-0,60		+	-0,64		+
Leukocyty	-5,40		- ²⁾	-5,79		-	-6,98		-	-5,38		-
Granulocyty obojętnochłonne	-4,48		-	-4,76		-	-6,60		-	-6,47		-
Trombocyty	-0,42		+	-0,73		+	-2,18		-	-2,09		-
Retikulocyty	+1,22	+1,771	+	+0,09	+1,771	+	-0,67		+	-1,26		+
1) + brak podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej 2) - hipotezę zerową należy odrzucić na korzyść hipotezy alternatywnej o istotności testowanej różnicy												

Stan taki nie uległ istotnej zmianie w godzinę po zakończeniu ekspozycji.

Stwierdzone doświadczalnie zmiany w zawartości niektórych składników morfologicznych krwi u osób poddanych działaniu pola elektrycznego, jakkolwiek są statystycznie znamienne, to jednak są jednocześnie na tyle niewielkie, że zaobserwowane podwyższone ilości mieszczą się w granicach zmienności fizjologicznych danego osobnika.

Biorąc pod uwagę, że za fizjologicznie prawidłową uważa się zawartość poszczególnych składników krwi w granicach: erytrocyty $3,8 - 5,1 \text{ mln/mm}^3$, leukocyty $4,5 - 8,5 \text{ tys/mm}^3$, granulocyty obojętnochłonne $2,5 - 5 \text{ tys./mm}^3$, trombocyty $150 - 290 \text{ tys/mm}^3$ i retikulocyty $2 - 10\%$ [59], stwierdzone doświadczalnie zmiany w ilości leukocytów i granulocytów obojętnochłonnych, a w przypadku eksperymentu z użyciem pola o natężeniu 15 kV/m również i trombocytów, nie mają charakteru zmian patologicznych.

Szczegółowe badania lekarskie w dziedzinie oddziaływania pola elektrycznego o częstotliwości 50 Hz na krew człowieka poddanego działaniu tego pola nie były dotychczas prowadzone. Standardowe badania krwi wykonywane w ramach eksperymentów prowadzonych przez Haufa [30] wykazały niewielkie podwyższenie liczby leukocytów i trombocytów u ludzi eksponowanych polami o różnym natężeniu. Ze względu jednak na różny czasokres ekspozycji oraz różne wartości natężenia pola wyniki te nie mogą być porównywane z rezultatami uzyskanymi w badaniach prowadzonych przez autora.

Interesujące wyniki uzyskano natomiast w eksperymentach przeprowadzonych na zwierzętach. Sieron [77] badał wpływ pola elektrycznego o częstotliwości 50 Hz na krew szczurów eksponowanych długotrwale. Stwierdził wzrost liczby leukocytów oraz trombocytów a ponadto zmiany procentowe frakcji białkowych we krwi zwierząt eksponowanych. Na podstawie uzyskanych wyników badań wnioskował on o uznanie pola elektromagnetycznego o częstotliwości 50 Hz jako czynnika wpływającego na przemiany metaboliczne badanych zwierząt.

Wyniki uzyskane w badaniach przeprowadzonych przez autora oraz wyniki podobnych badań innych autorów [30,77] wskazują, że istnieje wpływ pola elektrycznego o częstotliwości 50 Hz na ilościowy skład krwi organizmów żywych poddanych działaniu pola. Wpływ

ten ujawnia się nawet wówczas gdy natężenie działającego pola nie przekracza wartości 10 kV/m, przyjętej według przepisów [72] jako graniczna wartość drugiej strefy ochronnej, w której dopuszcza się przebywanie ludzi nawet przez czas nieograniczony.

Pole elektryczne jako fizyczny czynnik środowiska pracy powoduje, w świetle dotychczasowych ustaleń, nie specyficzne efekty wpływające na morfologię krwi organizmów żywych narażonych na jego działanie.

W świetle przedstawionych faktów wydaje się celowe podjęcie dalszych badań w dziedzinie oddziaływania pola elektrycznego o częstotliwości 50 Hz na składniki i wielkości charakteryzujące krew organizmów żywych poddanych działaniu pola. Szczególne znaczenie będą miały badania parametrów elektrycznych poszczególnych składników krwi.

5.4. Analiza wyników pomiarów czasu reakcji u osób poddanych działaniu prądu rażeniowego

Ocenę wyników pomiarów czasu reakcji u osób poddanych działaniu prądu rażeniowego na drodze "ręka-ręka" przeprowadzono stosując test t-Studenta dla zmiennych losowych parami skorelowanych. W tym celu obliczono logarytmy naturalne z wartości uzyskanych w pomiarach i utworzono różnice tych logarytmów dla odpowiednich par eksperymentów posługując się zależnościami:

$$\begin{aligned}Z_i^{D'_{0-1}} &= X_i^{D'_0} - X_i^{D'_1}, \\Z_i^{D'_{0-2}} &= X_i^{D'_0} - X_i^{D'_2}, \\Z_i^{D'_{0-3}} &= X_i^{D'_0} - X_i^{D'_3}, \\Z_i^{S'_{0-1}} &= X_i^{S'_0} - X_i^{S'_1}, \\Z_i^{S'_{0-2}} &= X_i^{S'_0} - X_i^{S'_2}, \\Z_i^{S'_{0-3}} &= X_i^{S'_0} - X_i^{S'_3},\end{aligned}\tag{5.5}$$

przyjmując następujące oznaczenia:

$X_i^{D_j}$ - wartość logarytmu naturalnego średniej z 40 pomiarów czasu reakcji na bodziec dźwiękowy dla i-tej osoby badanej ($i = 1, 2, \dots, 36$) w j-tej próbie ($j = 0$ dla $I_R = 0 \mu A$, $j = 1$ dla $I_R = 50 \mu A$, $j = 2$ dla $I_R = 135 \mu A$ i $j = 3$ dla $I_R = 160 \mu A$, gdzie I_R - natężenie prądu rażeniowego);

$X_i^{S_j}$ - wartość logarytmu naturalnego średniej z 40 pomiarów czasu reakcji na bodziec świetlny dla i-tej osoby badanej w j-tej próbie.

Wartości różnic określonych zależnościami (5.5) oraz odpowiadające tym różnicom wartości średnie ($\bar{Z}^{D'_{0-1}}, \bar{Z}^{D'_{0-2}}, \bar{Z}^{D'_{0-3}}, \bar{Z}^{S'_{0-1}}, \bar{Z}^{S'_{0-2}}, \bar{Z}^{S'_{0-3}}$) i odchylenia standardowe ($S_z^{D'_{0-1}}, S_z^{D'_{0-2}}, S_z^{D'_{0-3}}, S_z^{S'_{0-1}}, S_z^{S'_{0-2}}, S_z^{S'_{0-3}}$) przedstawiono w tabelicy 5.7.

Dla każdej wartości średniej postaci $\bar{Z}^n$, gdzie $n = D'_{0-1}, D'_{0-2}, D'_{0-3}, S'_{0-1}, S'_{0-2}$ i S'_{0-3} sformułowano odpowiednie hipotezy statystyczne: zerową H^0 o statystycznej nieistotności średniej ($\bar{Z}^n = 0$) i alternatywną H^1 postaci $\bar{Z}^n < 0$.

Dla tak określonego modelu statycznego obliczono wartość statystyki t^0 posługując się zależnością (5.4). Obliczoną wartość statystyki t^0 dla poszczególnych par eksperymentów przedstawiono w tabelicy 5.8, w której przedstawiono również wartość krytyczną statystyki t_α dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0,05$.

Przeprowadzona statystyczna ocena wyników eksperymentów wykazała, że prądy rażeniowe o wartościach 135 i 160 μA przepływające przez człowieka na drodze "ręka-ręka" powodują przedłużenie czasu reakcji u badanych, niezależnie od rodzaju stosowanego bodźca. Prąd rażeniowy o wartości 50 μA powodował statystycznie znaczące skrócenie czasu reakcji w przypadku stosowania bodźca świetlnego. Zgodnie z założeniami przebiegu eksperymentu, w badaniach czasu reakcji stosowano takie wartości prądów rażeniowych, które odpowiadały wartościom prądów indukowanych w organizmie człowieka umieszczonym w polu elektrycznym. Porównanie wyników pomiarów czasu reakcji dla obu rodzajów wymuszenia przepływu prądu (tabl. 4.3 i 4.7) wykazało, że w przypadku ekwiwalentnych wartości prądów: rażeniowego i indukowanego na skutek działania zewnętrznego pola elektrycznego, względne procentowe przedłużenie

Tablica 5.7

Zestawienie wartości różnic obliczonych na podstawie zależności (5.5)

	Bodziec dźwiękowy			Bodziec świetlny		
Numer badanego	$z_1^{D'_{0-1}}$	$z_1^{D'_{0-2}}$	$z_1^{D'_{0-3}}$	$z_1^{S'_{0-1}}$	$z_1^{S'_{0-2}}$	$z_1^{S'_{0-3}}$
1	-0,0252	-0,0252	0	0,1982	-0,0331	-0,0546
2	0,0717	0,0991	0,1416	-0,0196	-0,1210	-0,1598
3	-0,0496	-0,1212	-0,2532	-0,0315	0,0324	-0,1929
4	0,0402	-0,0758	-0,1256	0,0299	0,0529	-0,0845
5	0,0382	0,0141	0,0141	0,0183	-0,1112	-0,2437
6	0	-0,1236	-0,1522	0,0437	-0,1150	-0,2520
7	0,0050	0,0334	-0,1841	0,1868	-0,0188	-0,0336
8	-0,0550	-0,0113	-0,1469	-0,1212	0,0368	-0,0153
9	-0,0345	-0,3390	-0,5819	0,1008	-0,0468	-0,2149
10	-0,0805	-0,2665	-0,1803	0	-0,2156	-0,3180
11	-0,0941	-0,2859	-0,1501	0	0,1652	0,0205
12	-0,0348	-0,1138	-0,2103	0	-0,0153	-0,0934
13	0,0590	-0,1044	-0,1660	0,2085	0,2039	0,2408
14	0,0416	-0,2353	-0,3129	0,0710	-0,0501	-0,3607
15	0,0453	-0,0961	-0,0887	0,2991	-0,0135	-0,0847
16	0,0855	-0,0568	-0,2102	0,2561	-0,0875	-0,0875
17	-0,0078	-0,2294	-0,4612	0,0127	-0,2407	-0,2987
18	0,0330	-0,0213	-0,0053	0,3859	-0,0273	-0,0273
19	-0,0110	-0,1589	-0,0381	0,0673	-0,1065	-0,1784
20	0,1274	-0,0330	-0,1215	0,2089	0,0357	-0,0044
21	0,0765	-0,1319	-0,2907	0,0866	-0,1355	-0,1840
22	0,0764	-0,2464	-0,2968	0,1070	-0,1665	-0,1967
23	0,0861	-0,1614	-0,0051	0,0215	0,0129	-0,0293
24	-0,1248	-0,3667	-0,2357	0,0057	-0,1908	-0,0974
25	0,0416	-0,1152	-0,1890	0,0321	0,0995	0,0918
26	-0,00631	-0,3091	-0,4102	-0,0385	-0,3262	-0,3901
27	0,0051	-0,1900	-0,4323	0,2094	-0,0839	0,0465
28	0,0434	-0,2608	-0,3127	0,0907	-0,0228	-0,2449
29	-0,0163	-0,2107	-0,2783	0,1978	0,0940	0,1046
30	0,0524	0,0632	0,0102	-0,0322	-0,0590	-0,1271
31	-0,0066	-0,2219	-0,2679	0,0726	-0,0376	-0,2521
32	-0,0234	-0,2757	-0,2088	0,0043	-0,0667	-0,0627
33	0,0360	-0,0433	-0,0726	0,0773	-0,1202	-0,2060
34	0,0847	-0,0543	-0,2927	-0,0859	-0,0221	-0,1062
35	0,0584	-0,0887	-0,1303	0,0227	0	-0,0386
36	-0,0315	-0,2060	-0,2770	0,0327	-0,1214	-0,2036
	$\bar{z}^{D'_{0-1}}$	$\bar{z}^{D'_{0-2}}$	$\bar{z}^{D'_{0-3}}$	$\bar{z}^{S'_{0-1}}$	$\bar{z}^{S'_{0-2}}$	$\bar{z}^{S'_{0-3}}$
Wartość średnia	0,0125	-0,1381	-0,1923	0,0755	-0,0506	-0,1205
	$s_z^{D'_{0-1}}$	$s_z^{D'_{0-2}}$	$s_z^{D'_{0-3}}$	$s_z^{S'_{0-1}}$	$s_z^{S'_{0-2}}$	$s_z^{S'_{0-3}}$
Odchylenie standardowe	0,0571	0,1155	0,1478	0,1097	0,1065	0,1346

6. WNIOSKI OGÓLNE

1. Przeprowadzone badania wykazały, że pole elektryczne o częstotliwości 50 Hz o natężeniu przekraczającym wartość 10 kV/m, występujące w otoczeniu obiektów elektroenergetycznych najwyższych napięć powoduje statystycznie istotne przedłużenie czasu reakcji u ludzi znajdujących się pod działaniem tego pola.

2. Wyniki badań czas-u reakcji przeprowadzone w warunkach ekspozycji polem oraz w przypadku bezpośredniego rażenia prądem elektrycznym pozwalają sądzić, że bezpośrednią przyczyną obserwowanego przedłużenia czasu reakcji jest zjawisko przepływu prądu wewnątrz organizmu człowieka niezależnie od charakteru powstawania tego prądu.

3. Mechanizm obserwowanego zjawiska jest trudny do ustalenia i wymaga prowadzenia dalszych interdyscyplinarnych badań. Wydaje się jednak, że obserwowane przedłużenie czasu reakcji związane jest z oddziaływaniem prądu elektrycznego na centralny system nerwowy sterujący reakcjami psychofizjologicznymi człowieka. Szczególną uwagę w tym względzie należałoby w przyszłych badaniach zwrócić na wpływ długotrwałego narażenia organizmu ludzkiego na działanie pola elektrycznego.

4. Obserwowane zmiany w składzie krwi u ludzi poddanych krótkotrwałemu działaniu pola elektrycznego nie mają szkodliwego wpływu na fizjologię organizmu ludzkiego.

7. LITFRATURA

- [1] Aleksandrov G.N., Kašina W.A., Lisočkina T.W., Podporkin G.W., Zelenye nasaždenija kak sredstvo obespečenija èkologičeskoj bezopasnosti linij èlektroperedatči. Èlektričeskiye Stancii, 1978, nr 5, s. 71-74.
- [2] Asanova T.P., Rakov A.N., Sostojaniye zdorov'ja rabotajuščich v èlektričeskom pole otkrytych raspredelitel'nykh ustrojstv 400-500 kV. Gigiena Truda i Profesional'nyje zabolevaniya. 1966, nr 10, s. 50-52.
- [3] Atoian G.F., Are there biological and psychological effects due to extra high voltage installations ? IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1978, 97, nr 1, s. 8-16.
- [4] Aubin J., McGillis D.T., Parent J., Composite insulation strength of Hydro-Quebec 735 kV towers. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1966, nr 6, s. 633-648.
- [5] Bankoske J.W., McKee G.W., Graves H.B., Ecological influence of electric field. EPRI EA - 178, Project 129, Interim Report 2, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, 1976.
- [6] Beischer D.E. i in., Exposure of man to magnetic fields alternating at extremely low frequency. Naval Aerospace Medical Research Laboratory, Report nr 1180, Pensacola, Floride, 1973.
- [7] Benedick M.H., Greenberg B., The Sanguine Biological - Ecological Research Program. IEEE Transactions on Communications, 1974, 22, nr 4, s. 570 - 577.
- [8] Blanche D. i in., Exposure to mammals to strong 50 Hz electric fields. Archiv. Physiol., 1973, nr 70, s. 30 - 34.
- [9] Bobrowski D., Probabilistyka w zastosowaniach technicznych. WNT, Warszawa 1980.
- [10] Bridges I.E., Environmental considerations concerning the biological effects of power frequency (50 or 60 Hz) electric fields. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1978, 97, nr 1, s. 19 - 27.

- [11] Burgess T.J., Live line maintenance. Conférence Internationale des Grands Réseaux Électriques à Haute Tension, Paris, 16 - 26 Mai, 1962, ref. 411, s. 1 - 16.
- [12] Conti R., Previ A., Study, design and construction, in a laboratory, of a system for submitting small animals to high electric fields at 50 Hz. Third International Symposium on High Voltage Engineering, Milan, 28 - 31 August 1979, ref. 12.21, s. 1 - 4.
- [13] Deno D.W., Electrostatic effect induction formulae. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, 1975, 94, nr 5, s. 1524 - 1536.
- [14] Deno D.W., Transmission line fields. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1976, 95, nr 5, s. 1600 - 1611.
- [15] Deno D.W., Currents induced in the human body by high voltage transmission line electric field. Measurement and calculation of distribution and dose. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1977, 96, nr 5, s. 1517 - 1427.
- [16] Die Planung des 380 kV - Netzes in der Deutschen Verbundgesellschaft. Heidelberg. Deutsche Verbundgesellschaft e.v., 1957.
- [17] Dudziewicz J., Podstawy elektromagnetyzmu. WNT, Warszawa 1972.
- [18] Effert S., Silny J., Influence des champs électriques et électromagnétiques sur l'organisme vivant. Colloque A.I.S.S., Maraballa, October 1975.
- [19] EPRI RP 129 Final Report, Part 1, Biological effects of 60 Hz electric fields. Introduction and engineering studies. Westinghouse Electric Corporation, 1978, January 19.
- [20] Friend A.W., Finch E.D., Schwan H.P., Low frequency electric field induced changes in the shape and mobility of amoebas. Science, 1975, 187, nr 3, s. 357 - 359.
- [21] Gann D.S., La France T.F., Effect of 60 Hz electrostatic fields on growth and survival of cells in tissue culture. John Hopkins University School of Medicine, Baltimore, Maryland, 1974.

- [22] Gann D.S., Biological effects of exposure to high voltage electric fields. Final Report RP 98 - 02. Electric Power Research Institute and John Hopkins University, School of Medicine, Baltimore, Maryland, 1976.
- [23] Giarola A.J., Krueger W.F., Continuous exposure of chicks and rats to electromagnetic fields. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1974, 22, nr 6, s.432-440.
- [24] Greń J., Modele i zadania statystyki matematycznej. PWN, Warszawa 1970.
- [25] Groszko M., Pomiarы natężenia pola elektrycznego 50 Hz w krajowych obiektach energetycznych najwyższych napięć. Energetyka, Biuletyn ZPBE "Energopomiar" 1973, 19, nr 6, s. 41 - 44.
- [26] Hart F.X., Marino A.A., Energy flux along high voltage transmission lines. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 1977, 24, nr 5, s. 493 - 495.
- [27] Hauf G., Untersuchungen über die Wirkung energietechnischer Felder auf den Menschen. Dissertation, Institut für Rechtsmedizin der Universität München, Johannes Krause, 1974.
- [28] Hauf R., Wirkung von 50 Hz Wechselfeldern auf den Menschen. ETZ-B, 1974, 26, nr 12, s. 318 - 320.
- [29] Hauf R., Einfluss elektromagnetischer Felder auf den Menschen. ETZ-B, 1976, nr 6-7, s. 181 - 183.
- [30] Hauf R., Influence of 50 Hz alternating electric and magnetic fields on human beings. Revue Générale de L'électricité, Numéro spécial - Juillet, 1976, s. 31-49.
- [31] Hauf R., Neue Ergebnisse bei Untersuchungen mit Versuchspersonen im elektrischen Feld. Bericht über die wissenschaftliche Tagung der Forschungsstelle für Elektropathologie, Freiburg im Br., 13 - 14 October, 1977, s. 29 - 66.
- [32] Ivanova S.N., Gončarik E.P., Ocenka gigieničeskich norm pod linijami sverchvysokogo naprjaženija. Električeskiye Stancii. 1979, nr 4, s. 118 - 121.

- [33] Jakob G., Steinbigler H., Wiesinger J., Das elektrische Feld unter Hochspannungs - Freileitungen. Bull. SEV, 1972, 63, nr 24, s. 1428 - 1432.
- [34] Janowski B.M., Magnetyzm ziemski. PWN, Warszawa 1958.
- [35] Johansson R., Lundquist G., Lundquist S., Scuka V., Is there a connection between the electricity in the atmosphere and the function of man ? Part 3, 50 Hz field variations. Institut for High Voltage Research, Uppsala, 1973.
- [36] Kac R.A., Perel'man L.S., Rasčet èlektričeskogo polja trechfaznoj linii èlektroperedachi. Èlektričestvo, 1978, nr 1, s. 16 - 19.
- [37] Knickerbocker G.G., Kouwenhoven W.B., Barnes H.C., Exposure of mice to a strong AC electric field - an experimental study. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1967, 86, nr 4, s. 498 - 505.
- [38] Koepen S., Gutachten über den Einfluss von Elektrischen Wechselfeldern (50 Hz) auf den Menschen unter einer 380 kV Freileitungen. Nicht Allgemein Zugänglich 1966.
- [39] Korobkova V.P., Morozov Yu.A., Stolarov M.D., Yakubov Yu.A., Influence of the electric field in 500 and 750 kV switchyards on maintenance staff and means for its protection. International Conference on Large High Tension Electric Systems, Paris, 26 August - 6 September, 1972, ref. 23-06, s. 1-9.
- [40] Kouwenhoven W.B., Miller C.J., Barnes H.C., Simpson J.W., Rorden H.L., Burgess T.J., Body currents in live line working. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1966, 85, nr 4, s. 403-411.
- [41] Kouwenhoven W.B., Langworthy O.R., Singewald M.L., Knickerbocker H.G., Medical evaluation of man working in AC electric fields. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1967, 86, nr 4, s. 506-511.
- [42] Krueger W.F., Giarola A.J., Brandley J.W., Shrekenhamer A., Effects of electromagnetic fields on fecundity in the chicken. Ann. N.Y. Acad. Sci., 1975, 247, nr 2, s. 391-402.

- [43] Kuhnert E., Latzel G., Die verteilung des Fehlerstromes auf Erdseil und Masterdungen bei stationsnahen Fehler in Hochspannungsnetzen mit Sternpunktterdung. Elektrizitätswirtschaft, 1968, 67, nr 23, s. 681-685.
- [44] Kühne B., Beobachtungen über den Einfluss elektrischer Felder auf lebende Organismen. Bericht über die wissenschaftliche Tagung der Forschungsstelle für Elektropathologie, Freiburg im Br., 13-14 October 1977, s. 67-83.
- [45] Le Bars H., André G., Cabanes J., Vorläufige Studien über die biologischen Wirkungen eines elektrischen Feldes. Bericht über die wissenschaftliche Tagung der Forschungsstelle für Elektropathologie, Freiburg im Br., 13-14 October 1977, s. 84-97.
- [46] Lorge J.D., Operant behavior of rhesus monkeys in the presence of extremely low frequency low intensity magnetic fields. Naval Aerospace Medical Research Laboratory, Experiment 1, Pensacola, Floride, 1972.
- [47] Mamontov S.G., Ivanova L.N., Effect of a low frequency electric field on cell division in mouse tissue. Bull. Exp. Biol. Med., 1971, nr 71, s. 192-195.
- [48] Mantel B., Untersuchungen über die Wirkung eines magnetischen wechselfelds 50 Hz auf den Menschen. Dissertation. Albert Ludwig Universität, Johannes Krause, 1975.
- [49] Marino A.A., Becker R.O., Ullrich B., The effect of continuous exposure to low frequency electric fields on three generations of mice. A pilot study. Separatum Experientia, 1976, nr 32, s. 565-566.
- [50] Marino A.A., Berger T.J., Austin B.P., Becker R.O., Evaluation of electrochemical information transfer system 1. Effect of electric fields on living organisms. Journal of the Electrochemical Society, 1976, 123, nr 8, s. 1199-1200.
- [51] Marino A.A., Becker R.O., Biological effects of extremely low frequency electric and magnetic fields. A review. Physiological Chemistry and Physics, 1977, 9, nr 2, s.131-147.

- [52] Marino A.A., Berger T.J., Austin B.P., Becker R.O., Hart F.X.,
In vivo bioelectrochemical changes associated with exposure
to extremely low frequency electric fields. *Physiological
Chemistry and Physics*, 1977, 9, nr 4 i 5, s. 433-441.
- [53] Marsh G., The effect of sixty-cycle AC current on the
regeneration axis of *Dugesia*. *Journ. Exper. Zool.*, 1968,
nr 169, s. 65-69.
- [54] Mathewson N.S., Oosta G.M., Levin G.G., Ekstrom M.E.,
Diamond S.S., Extremely low frequency (ELF) vertical electric
field exposure of rats: A search for growth, food consumption
and blood metabolite alterations. *Compilation of Navy Sponsored
ELF Biomedical and Ecological Research Reports*, Vol. III,
Naval Medical Research and Development Command, Bethesda, Md,
NTIS Nr AD A035954, January 1977.
- [55] Mathewson N.S., Oliva S.A., Oosta G.M., Blasco A.P.,
Extremely low frequency (ELF) vertical electric field
exposure of rats: Irradiation facility. *Compilation of Navy
Sponsored ELF Biomedical and Ecological Research Reports*,
Vol. III, Naval Medical Research and Development Command,
Bethesda, Md, NTIS Nr AD A035955, January 1977.
- [56] Meda E. i in., Effects of continuous exposure of animals
to AC electric field. 2^e Coll. Int. de Prévention des
risques professionnels aus a L'Electricité, Cologne, 30
November - 10 October, 1972.
- [57] Meda E. i in., Alcuni risultati sperimentali sull'esposizione
ad intensi campi electri a 50 Hz. *Securitas*, 1973, 58, nr 7,
s. 28-36.
- [58] Meda E., Carrescia V., Cappa S., Effects des champs électri-
ques sur les animaux resultats expérimentaux. *Bull. AISS*,
1974, nr 3, s. 17-34.
- [59] Miętkiewski F., Kurs wykładów fizjologii człowieka. PZWL,
Warszawa 1966.
- [60] Miller C.J., The measurement of electric fields in live
line working. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*,
1967, 86, nr 4, s. 493-498.

- [61] Miller D.A., Electric and magnetic fields produced by commercial power systems. Z Biologic and clinical effects of low frequency magnetic and electric fields, Llaurado and Sances, publ. C.C. Thomas Springfield, USA, 1974, s.62-70.
- [62] Miller M.W., Cartensen E.L., Kaufman G.F., Robertson D., 60 Hz electric field parameters associated with the perturbation of a eucaryotic system. Radiation and Environmental Biophysics, 1979, 18, nr 4, s. 1980-1987.
- [63] Milmer K., Behavioral changes in adult rats exposed to ELF electric fields. International Journal of Biometeorology. 1972, nr 3, s. 152-157.
- [64] Moos W.S., A preliminary report on the effects of electric fields on mice. Aerospace Medicine, 1964, 35, nr 4, s. 374-377.
- [65] National Power Survey Federal Power Commission, Report Nr 6, Part II, Criteria for AC transmission system performance, US Government Printing Office, Washington DC, 1964.
- [66] Nitsch E., Ziobro E., Uwagi dotyczące analizy wyników pomiaru czasu Świadomej reakcji. Instytut Organizacji i Zarządzania Politechniki Wrocławskiej, Komunikat nr 58, Wrocław 1974.
- [67] Perry D.A., Chartier V.L., Reiner G.L., BPA 1100 kV transmission system development. Corona and electric field studies. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979, nr 5, s. 1728-1738.
- [68] Pfützner H., The standarization of experimental investigations of biological effects of low frequency electric and magnetic fields. International Journal of Biometeorology, 1979, 23, nr 4, s. 271-278.
- [69] Presman A.S., Pola elektromagnetyczne a żywa przyroda. PWN, Warszawa 1972.
- [70] Rieger H., Der Freileitungsbau. Julius Springer Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg. 1960.
- [71] Riesen W., Aranyi C., Kyle J., Valentino A., Miller D., A pilot study of the interaction of extremely low frequency electromagnetic fields with brain organelles. IIT Research Institute, Project E6185, NTIS Nr AD 748119, August 1971.

- [72] Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 5.XI.1980 r. w sprawie szczegółowych zasad ochrony przed elektromagnetycznym promieniowaniem niejonizującym szkodliwym dla ludzi i środowiska. Dziennik Ustaw PRL, Warszawa 17.XI.1980 r., nr 25, poz. 101, s. 277-278.
- [73] Sazonova T.F., The effect of a low frequency electric field on the work capacity of the motor apparatus. Jour. Leningr. Univ., 1964, nr 3, s. 109-118.
- [74] Schneider K.H. i in., Displacement currents to the human body caused by the dielectric fields under overhead lines. International Conference on Large High Tension Electric Systems, 1974, ref. 36-04, s. 14-26.
- [75] Schwan H.P., Biological hazards from exposure to ELF electrical fields and potentials. NWL Technical Report TR-2713, 1972, s. 1-29.
- [76] Sieroń A., Wesołowski W., Jaskólski F., Wpływ pola elektrycznego o częstotliwości przemysłowej na szybkość przyrostu masy ciała oraz niektórych narządów wewnętrznych szczurów. Ann. Acad. Med. Siles., Katowice, 1978, s. 35-38.
- [77] Sieroń A., Działanie pola elektromagnetycznego o częstotliwości przemysłowej na niektóre składniki i wielkości charakteryzujące krew a zwłaszcza na przewodność i przenikalność elektryczną. Rozprawa doktorska. Śląska Akademia Medyczna, Katowice 1979.
- [78] Silny J., Biologische Auswirkungen intensiver niederfrequenter elektrischen und magnetischer Felder. Table ronde AISS, Paris, 19-22 March, 1974.
- [79] Silny J., Einfluss der elektrischen Felder auf den Organismus. Bericht an die Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik, Köln, 1975.
- [80] Silny J., Zur technischen Problematik der Untersuchung der Einflusses elektrischer 50 Hz Felder auf den Organismus. Fakultät für Elektrotechnik der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs genehmigte Dissertation, 1976.

- [81] Singer H., Die Berechnung des elektrostatischen Felds von Gittern. ETZ, 1970, 91, nr 5, s. 249-253.
- [82] Singer H., Steinbigler H., Weiss P., A charge simulation method for the calculation of high voltage fields. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1974, 93, nr 5, s. 1660-1668.
- [83] Singewald M.L., Langworthy O.R., Kouwenhoven W.B., Medical follow-up study of high voltage lineman working in AC electric fields. IEEE PTS Winter Meeting New York, 28 January-2 February, 1973, s. 1307-1309.
- [84] Solovev N.A., Experimental study of the biological action of a low frequency electrical field. Nov. Med. Prib., 1967, nr 3, s. 101-111.
- [85] Spiegel R.J., Electromagnetic fields in the near vicinity of transmission line towers. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1976, 95, nr 6, s. 1863-1871.
- [86] Spittka V. i in., Experimentelle Untersuchungen zum Operanten Trinkverhalten von Ratten im 50 Hz Hochspannungs-Wechselfeld. Biol. Zentralbl., 1969, 88, s. 273-282.
- [87] Steinbigler H., Digitale Berechnung elektrischer Felder. ETZ-A, 1969, 90, nr 25, s. 663-666.
- [88] Strumza M.V., Influence on the human health of close electric conductors at high tension. Medical Inquiry Result. Archives des Maladies Professionnelles de Medicine du Travail et de Securite Sociale, Paris, 1970, 31, nr 6, s. 269-276.
- [89] Strumza M.V., Exposition prolongée du rat à un puissant champ électrique. Section Hygiène Industrielle du Conseil Supérieur d'Hygiène Publique, Séance, 22 Juni 1971.
- [90] Transmission line reference book 345 kV and above. Electric Power Research Institute. Fred Weinder and Son. New York 1975.
- [91] Utmischi D., Berechnung dreidimensionaler Hochspannungsfelder. ETZ-A, 1978, 99, nr 2, s. 83-86.
- [92] Wadas R., Biomagnetyzm. PWN, Warszawa 1978.

- [93] Warnke U., Bienen unter Hochspannung. Umschau, 1975, 75, nr 13, s. 416-419.
- [94] Wiesinger J., Utmischi D., Reaktionszetteltests unter Hochspannungsfeldern, Bull. SEV/VSE, 1975, 66, nr 14, s. 746-750.



ODBIORCY	egz.
1. Promotor	1
2. Recenzenci	3
3. Archiwum Instytutu Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej	1
4. Biblioteka Główna Politechniki Wrocławskiej	1
5. Autor	3
Razem	9