

Wytrzymałość przy napięciach złożonych

prof. dr hab. inż. Franciszek Mosiński

W eksploatacji transformator narażony jest na przepięcia różnego typu, w tym udarowe łączeniowe i udarowe piorunowe.

Oczywistym jest, że w warunkach rzeczywistych przepięcie udarowe i napięcie robocze występują jednocześnie. Tymczasem w badaniach laboratoryjnych i przy próbach odbiorczych każde z przepięć jest aplikowane oddzielnie.

Zachodzi zatem pytanie czy takie postępowanie jest uprawnione i czy są lub nie istotne różnice w wytrzymałości elektrycznej przy napięciach złożonych AC+LI lub AC+SI, w porównaniu z wytrzymałością elektryczną przy rozdzielonych narażeniach: tylko AC, tylko LI, tylko SI.

Badania takie zrealizowano w ZWN w latach pięćdziesiątych i znalazły oddźwięk w literaturze światowej [2, 3].

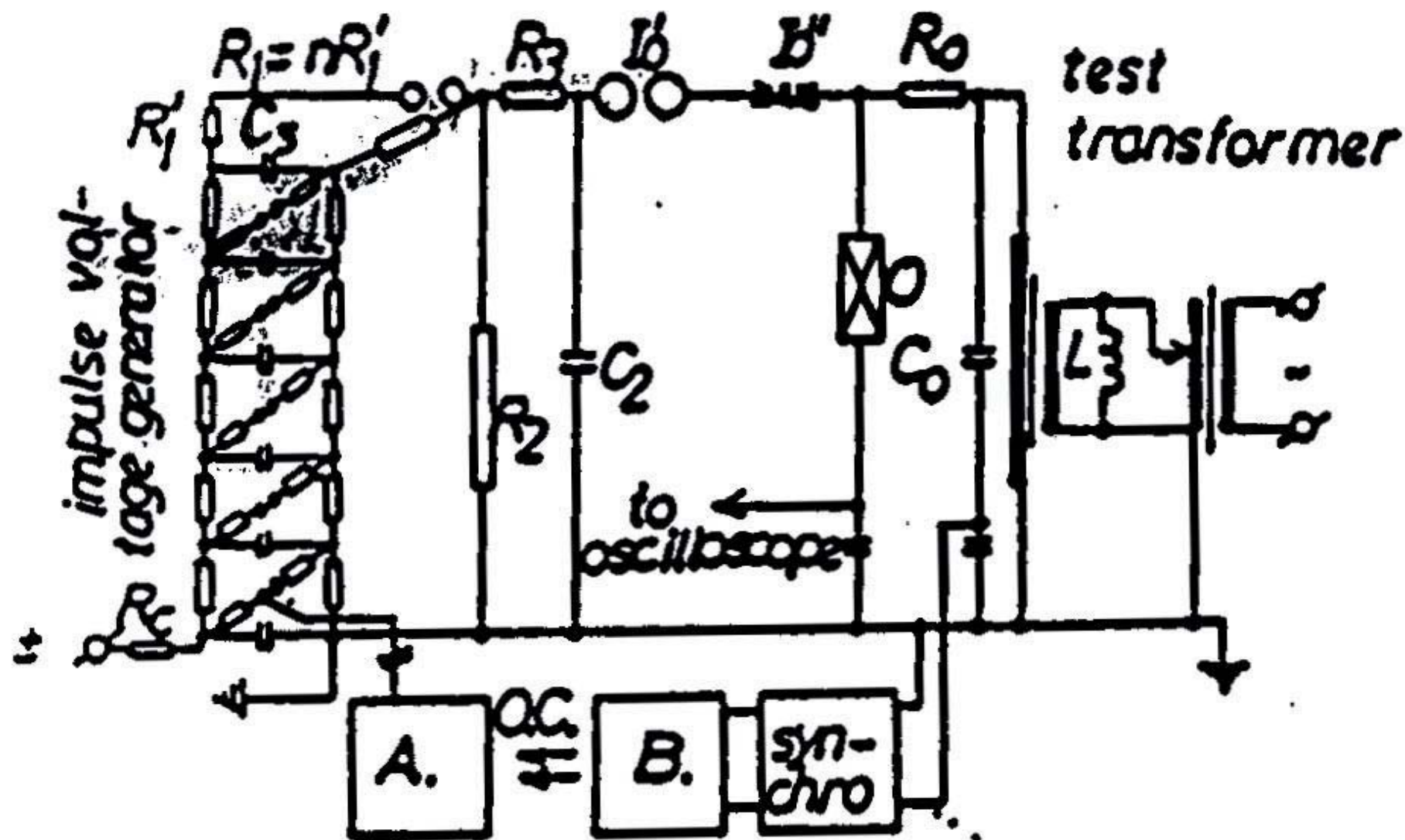


Figure 1. Composite voltage generator.

A - Control System Transmitter, B - Control System Receiver.

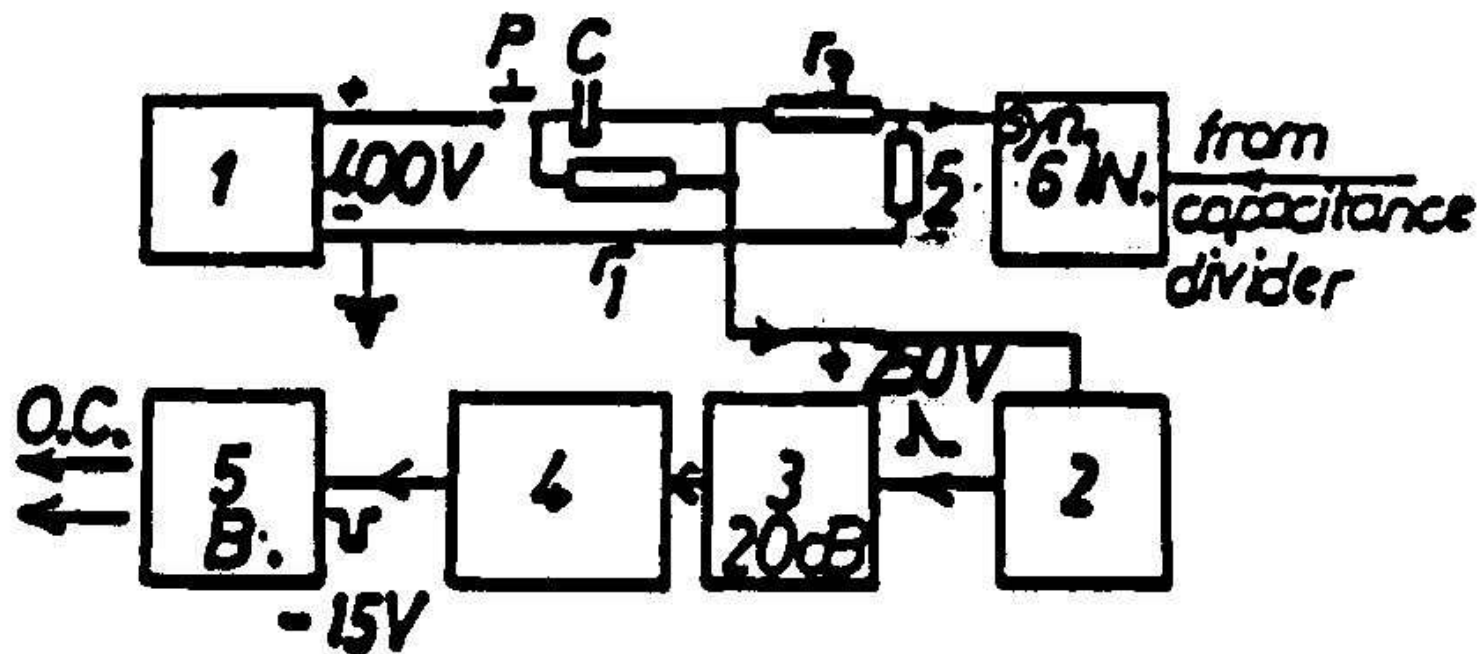


Figure 2. Block Diagram of a Circuit for Oscillographing Composite Voltages: 1 - DC Power Unit, 2 - Phase Shifting Unit, 3 - Attenuator, 4 - square-pulse Generator, 5 - Control System Transmitter, LO - Optoelectronic interface, P, C, r_1 , r_2 , r_3 - elements of Spike Pulse Generating System, 6 - Oscilloscope.

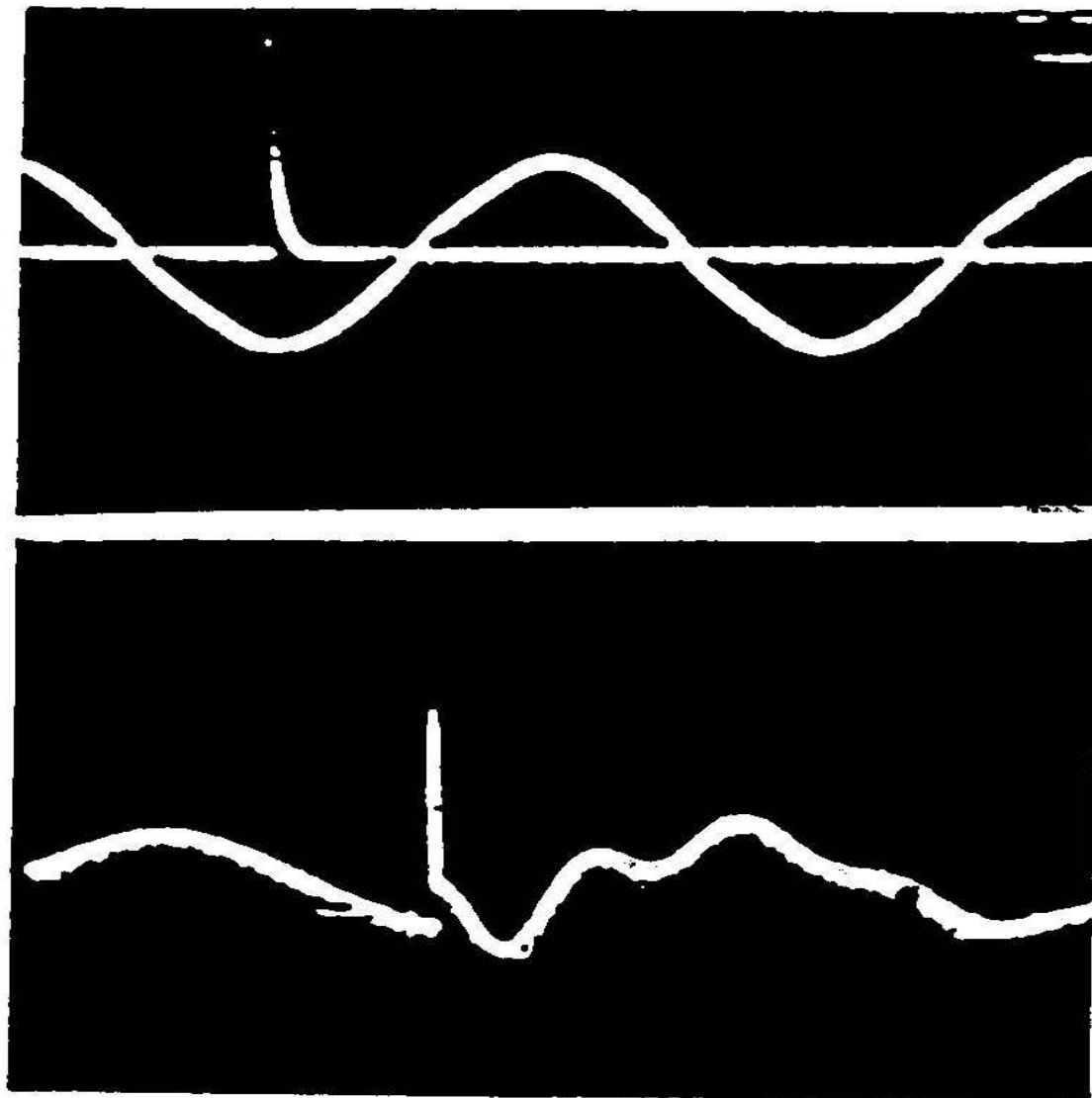


Figure 3. Oscillogram of AC voltage with superimposed signal from the Control System Receiver (a) and oscillogram of a composite voltage.

Badania wykonano na prostym układzie izolacji papierowo-olejowej o konfiguracji podobnej do układu izolacji międzyzwojowej.

Szkic wraz z wymiarami pokazano na rys. 4. Prostota modelu pozwoliła go powielić w bardzo dużej liczbie egzemplarzy około 300 sztuk. Tak duża liczba teoretycznie jednakowych układów izolacyjnych pozwoliły na wiarygodną analizę statystyczną uzyskanych wyników.

Modele były preparowane z użyciem techniki cieplno-próżniowej odwzorowującej procedurę preparacji izolacji dużych transformatorów energetycznych.

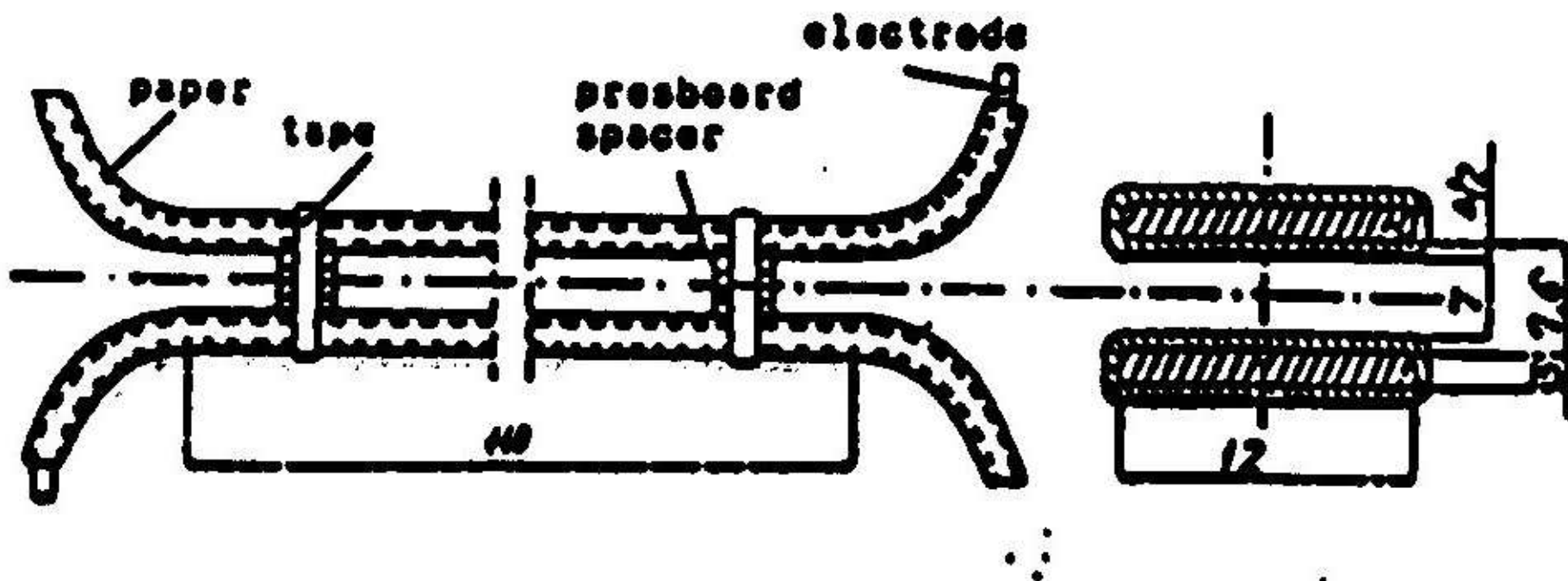


Figure 4. Dimensions of paper-oil insulation model

Przed zasadniczymi badaniami napięciami AC+LI wykonano serię badań z napięciem AC dla ustalenia czysto przemiennej wytrzymałości modeli izolacji. W wyniku uzyskano dystrybuantę napięć przebicia o parametrach:

rozkład Weibulla $U_0 = 24.1 \text{ kV}$, $U_{63\%} = 84.6 \text{ kV}$

oraz minimalne napięcie przebicia 55 kV

W oparciu o te wyniki wybrano poziomy napięcia tła AC jako równe 20 i 40 kV. Napięcie 20 kV jest nieco niższe od statystycznie określonego napięcia wytrzymywanego U_0 , a napięcie 40 kV wybrano jako istotnie wyższe od U_0 , ale niższe od minimalnego poziomu z przebicciem (55 kV).

Badania przy napięciach złożonych wykonano według następującej procedury:

- ustalano napięcie przemienne tła 0, 20 lub 40 kV;
- doprowadzano udary 1.2/50 μs o wybranej biegunowości, poczynając od napięcia startu (100 kV), stopniami (5 kV) aż do przebicia.

Liczność próbki we wszystkich przypadkach wynosiła 10.

Nie stosowano żadnych reguł co do kolejności serii badań, dla zachowania losowości.

Wykonano następujące serie badań:

- jednominutowe napięcie przebicia AC;
- ujemne udarowe napięcie przebicia AC=0;
- dodatnie udarowe napięcie przebicia AC=0;
- ujemne udarowe napięcie przebicia AC=20 kV; kąty 45°, 90°, 135°, 225°, 270°;
- ujemne udarowe napięcie przebicia AC=40 kV; kąty 90°, 135°, 180°, 270°, 315°;
- dodatnie udarowe napięcie przebicia AC=20 kV; kąty 45°, 90°, 135°, 225°, 270°;
- dodatnie udarowe napięcie przebicia AC=40 kV; kąty 90°, 135°, 180°, 270°, 315°;
- ujemne udarowe napięcie przebicia AC=0;
- dodatnie udarowe napięcie przebicia AC=0;
- jednominutowe napięcie przebicia AC;

Wyniki pomiarów opracowano metodą największej wiarygodności za pomocą własnego, autorskiego programu numerycznego MOSTAT.

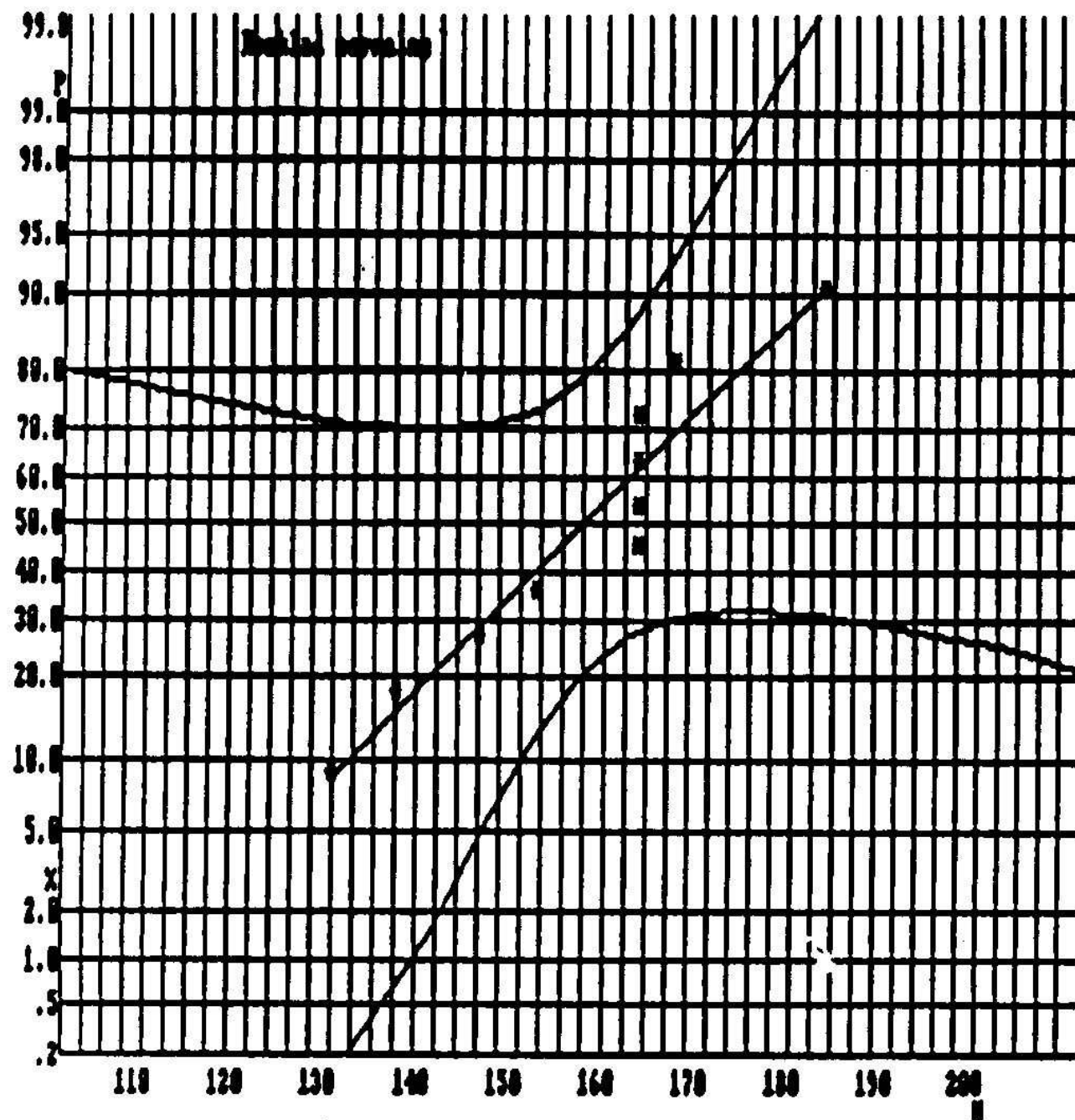


Figure 5a. Gauss distribution.

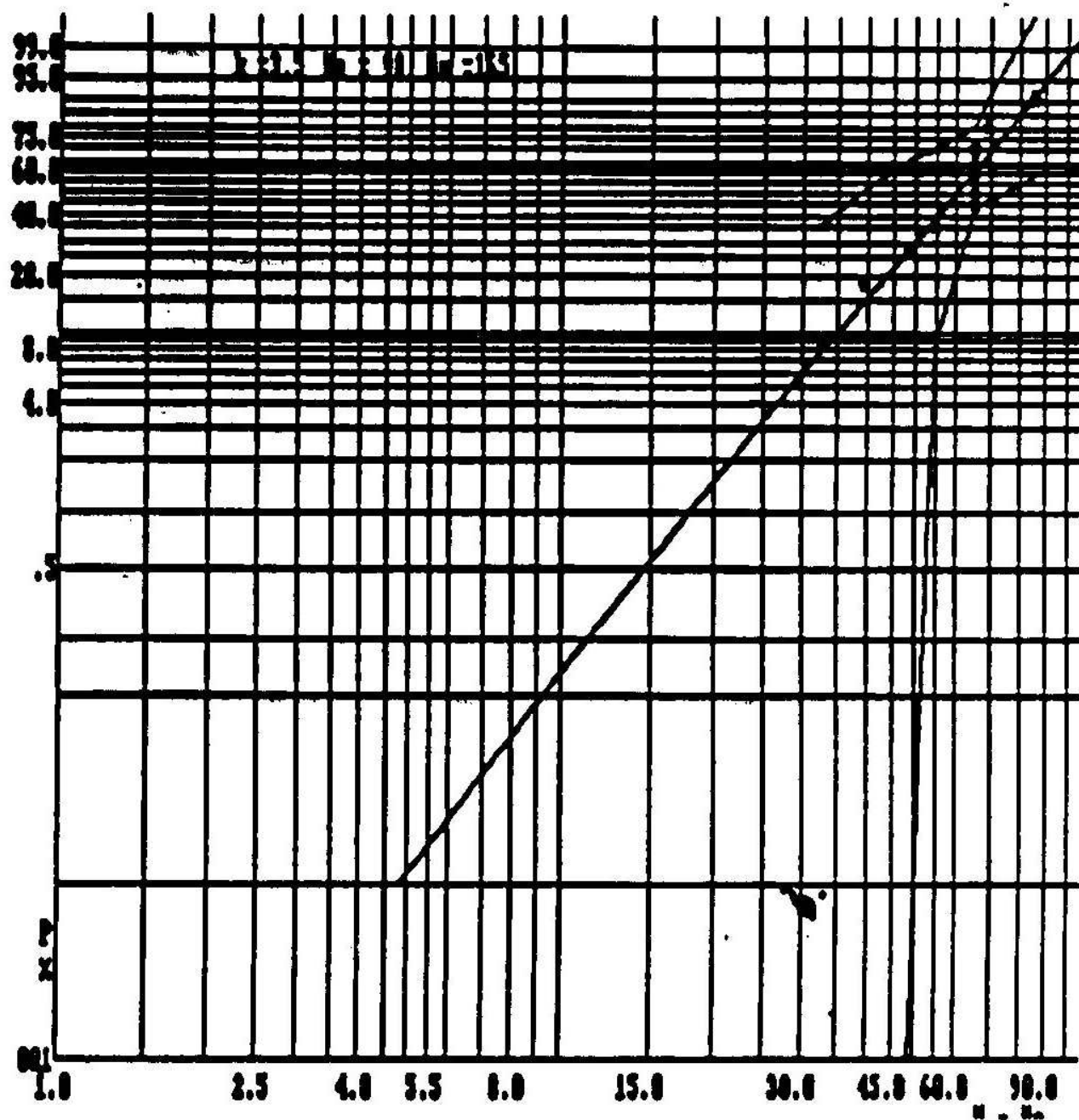


Figure 5c. Weibull distribution; universal coordinates.

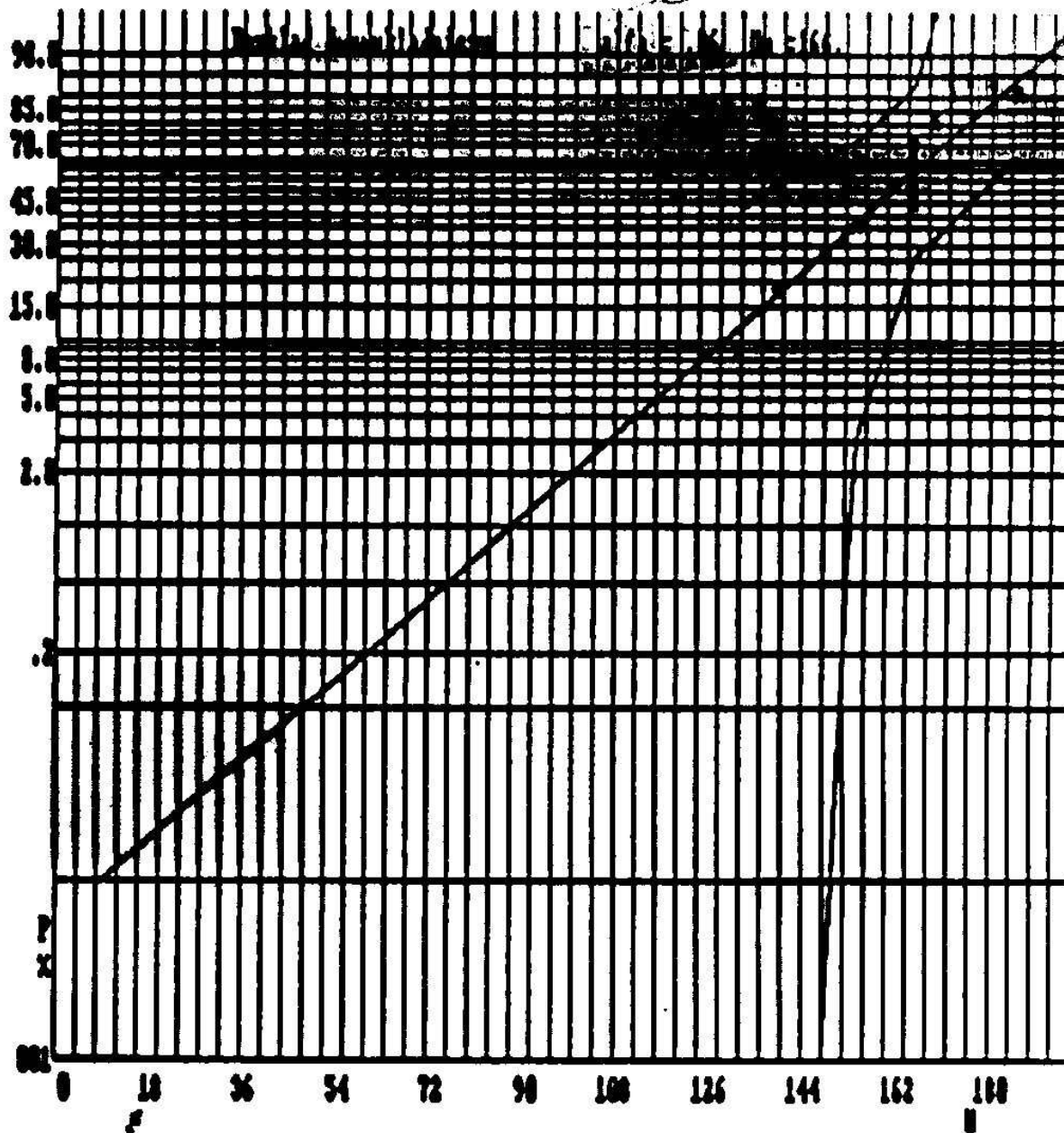


Figure 5d. Gumbel distribution.

Figure 5. Example of calculations for case of positiv lightning impulse (LI+), AC = 20 kV, phase 225° .

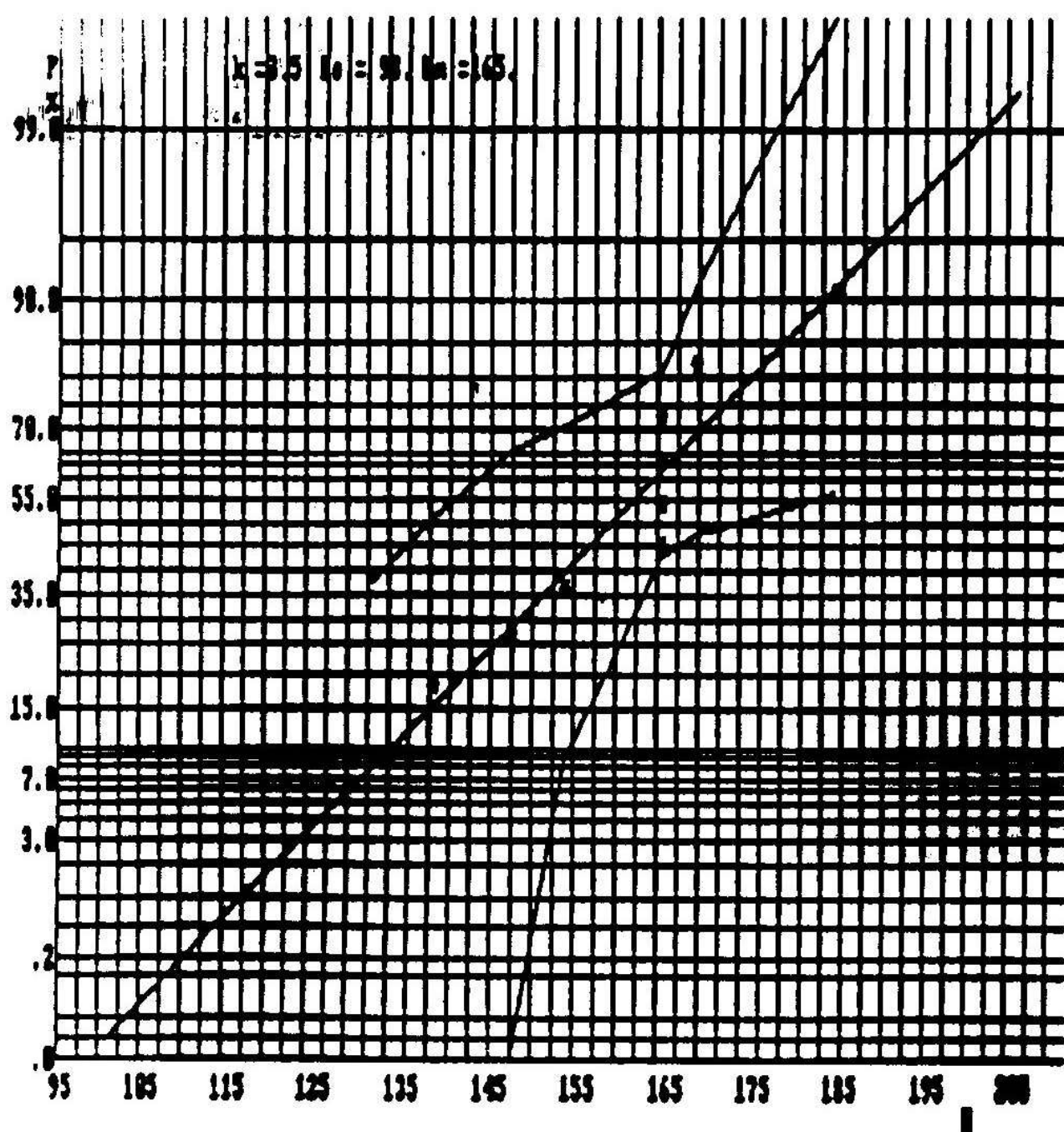


Figure 5b. Weibull distribution; coordinates for $k = \text{const.}$

Mediana udarowych napięć przebicia

Jak wynika z rys. 6, dla udaru o biegunowości dodatniej (LI+), dla niemal wszystkich przypadków, zarówno przy AC 20 kV jak i AC 40 kV, mediana udarowego napięcia przebicia jest niższa niż przy braku napięcia przemiennego (165 kV). W skrajnym przypadku (dla LI+ 40 kV oraz kąta 315°) obniżenie mediany wynosiło 14% (do 14%) i następuje przy nałożeniu udaru dodatniego (LI+) na ujemną połówkę sinusoidy AC, w pobliżu jej wartości szczytowej.

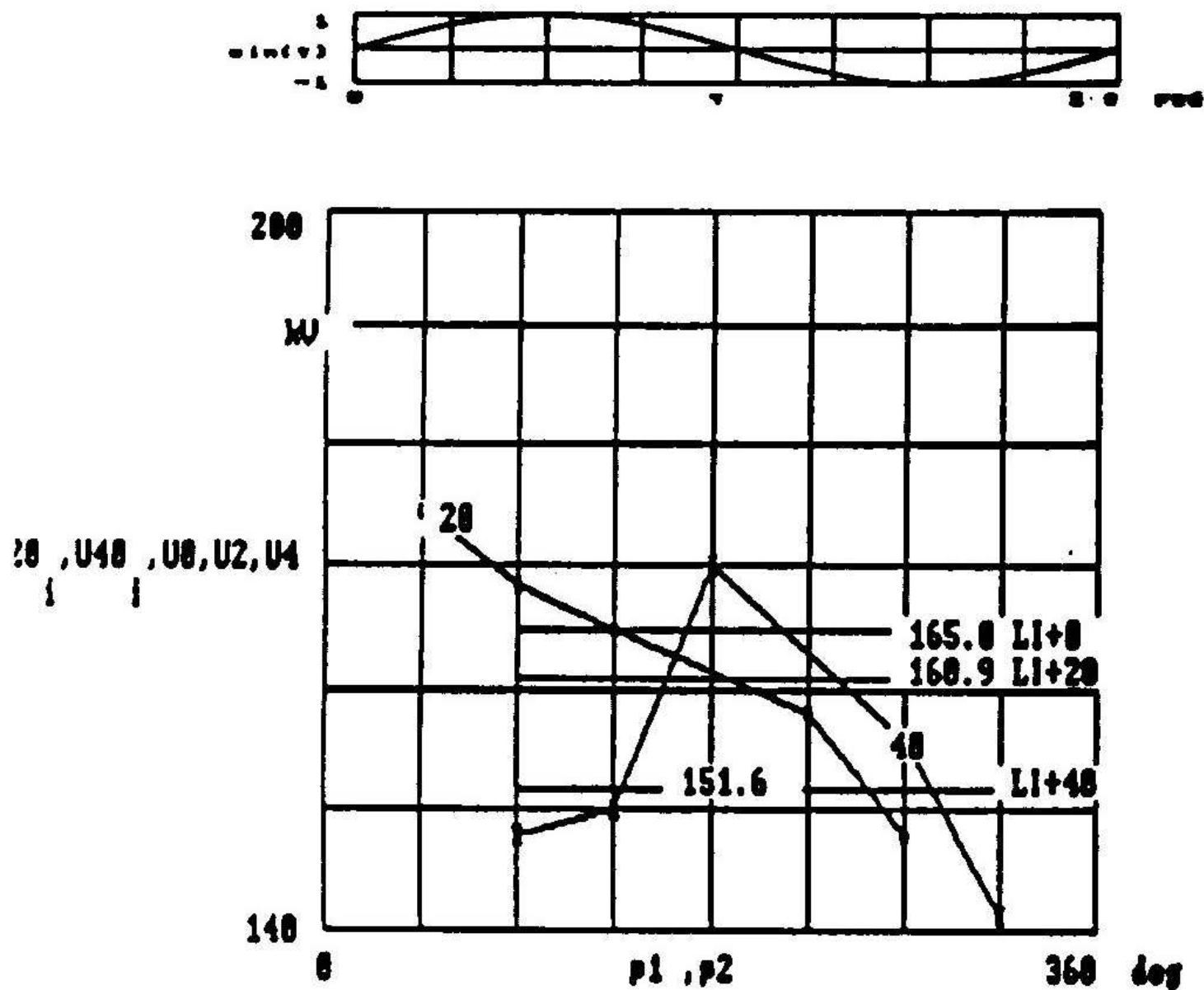


Figure 6. U_{50} versus phase of positive lightning impulse (LI+).

Rys. 7 dotyczy mediany ujemnych udarowych napięć przebicia. Przy LI- najgroźniejszym przypadkiem jest nałożenie się ujemnego udaru na dodatnią połówkę sinusoidy w pobliżu jej wartości szczytowej (LI-/AC+). W skrajnym przypadku (dla LI-40 kV oraz kąta 180°) obniżenie mediany udarowych napięć przebicia wynosi około 20 % spadając do 143 kV.

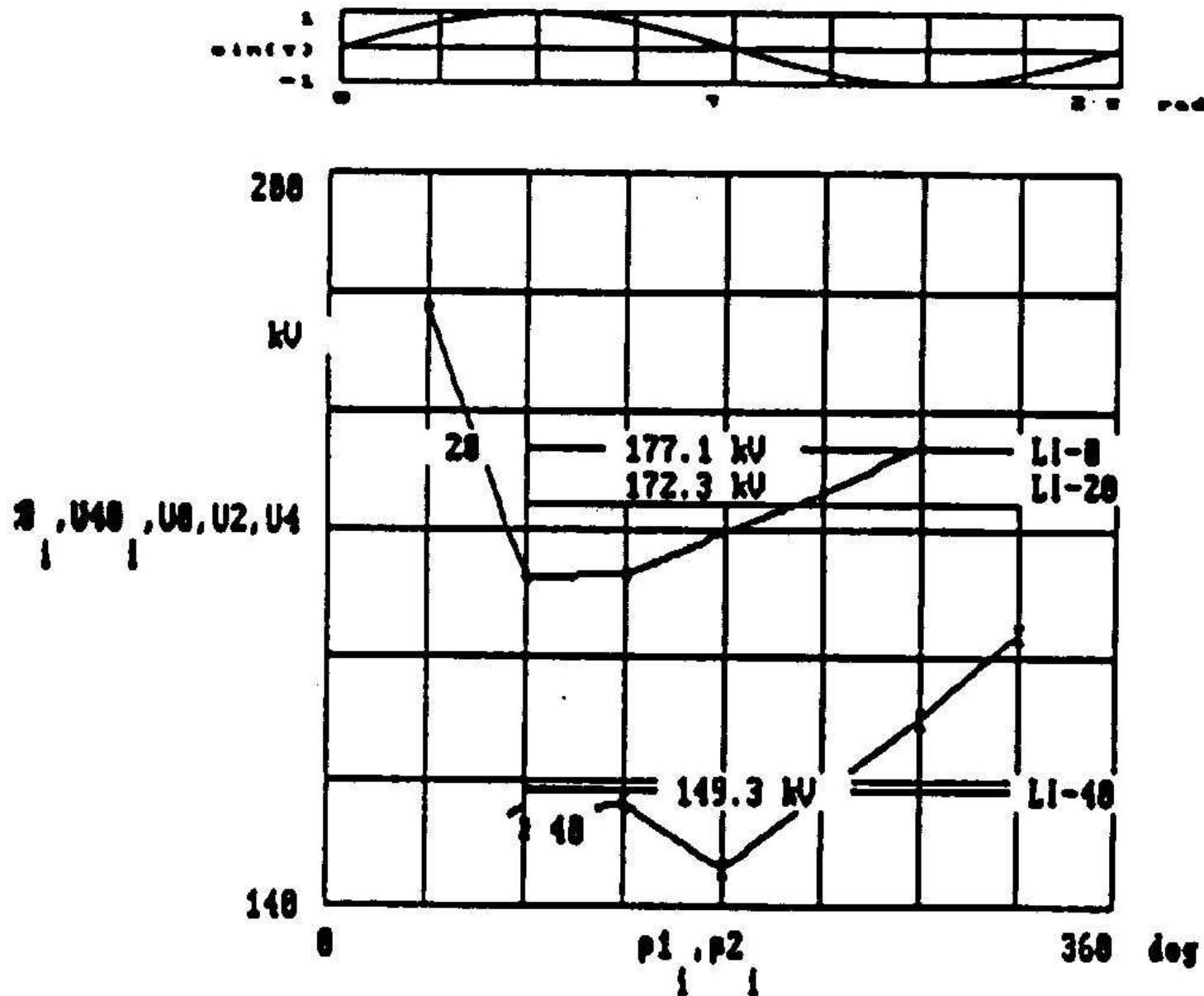


Figure 7. U_{50} versus phase of negative lightning impulse (LI-)

Można więc stwierdzić, że mediana udarowych napięć przebicia (U_{50}) w nieznacznym stopniu zależy od biegunowości udaru. Natomiast ze wzrostem wartości przemiennej napięcia tła mediana udarowych napięć przebicia maleje sukcesywnie, niezależnie od biegunowości udaru. W analizowanym przypadku, przy napięciu tła 40 kV, będącego dla rozważanego układu izolacji napięciem znacznie wyższym (około dwukrotnie) od długotrwałego napięcia roboczego AC mediana udarowych napięć przebicia zmalała o około 10% dla obu biegunowości udaru.

Przy napięciu 20 kV, które można traktować jako odpowiadające w przybliżeniu napięciu roboczemu, spadek ten był mniejszy i wynosił około 3% niezależnie od biegunowości udaru.

Udarowe napięcie wytrzymywane

Z punktu widzenia konstruktora znacznie bardziej interesującą wartością niż mediana jest napięcie wytrzymywane, które w sensie statystycznym charakteryzowane jest bliskim zeru prawdopodobieństwem zaistnienia. Jako napięcie wytrzymywane przyjęto wartość parametru przesunięcia rozkładu Weibulla.

Jak wynika z rys. 8, dla udaru o biegunowości dodatniej (LI+), napięcia wytrzymywane są niższe od napięcia wytrzymywanego przy braku tła (116.8 kV) jedynie wówczas gdy dodatni udar jest nakładany na ujemną połówkę sinusoidy (AC-) w pobliżu jej wartości szczytowej.

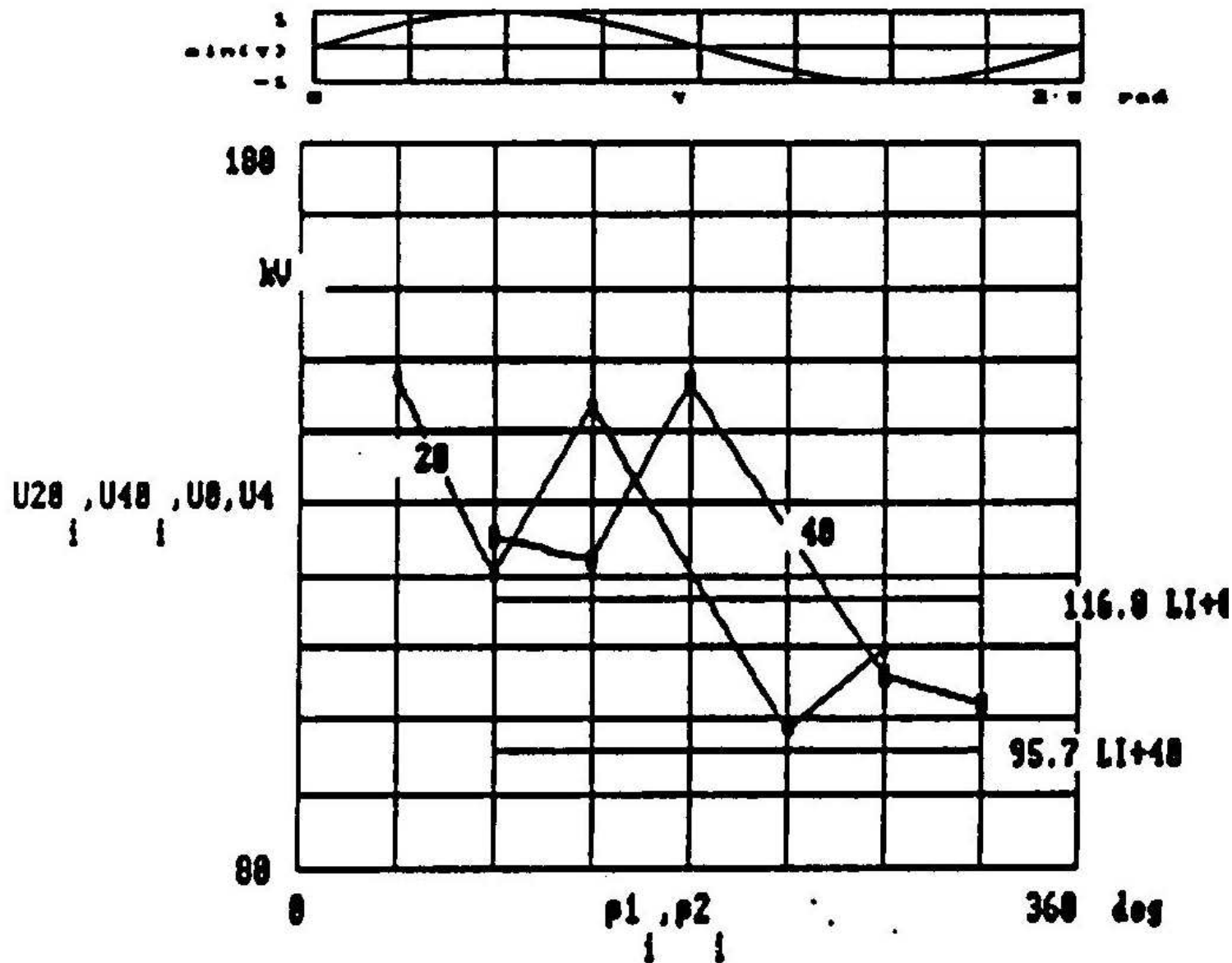


Figure 8. U_0 versus phase of positive lightning impulse (LI+)

Jak wynika z rys. 9, dla udaru o biegunowość ujemnej (LI-), napięcie wytrzymywane maleje bardziej dla przypadku nakładania się ujemnego udaru na dodatnią połowę sinusoidy i przy obecności tła AC jest niemal zawsze niższe niż przy braku tła (158 kV). W najgorszym przypadku (dla LI- 40 kV oraz kąta 135°) (82.9 kV) napięcie wytrzymywane zmalało aż o około 47%.

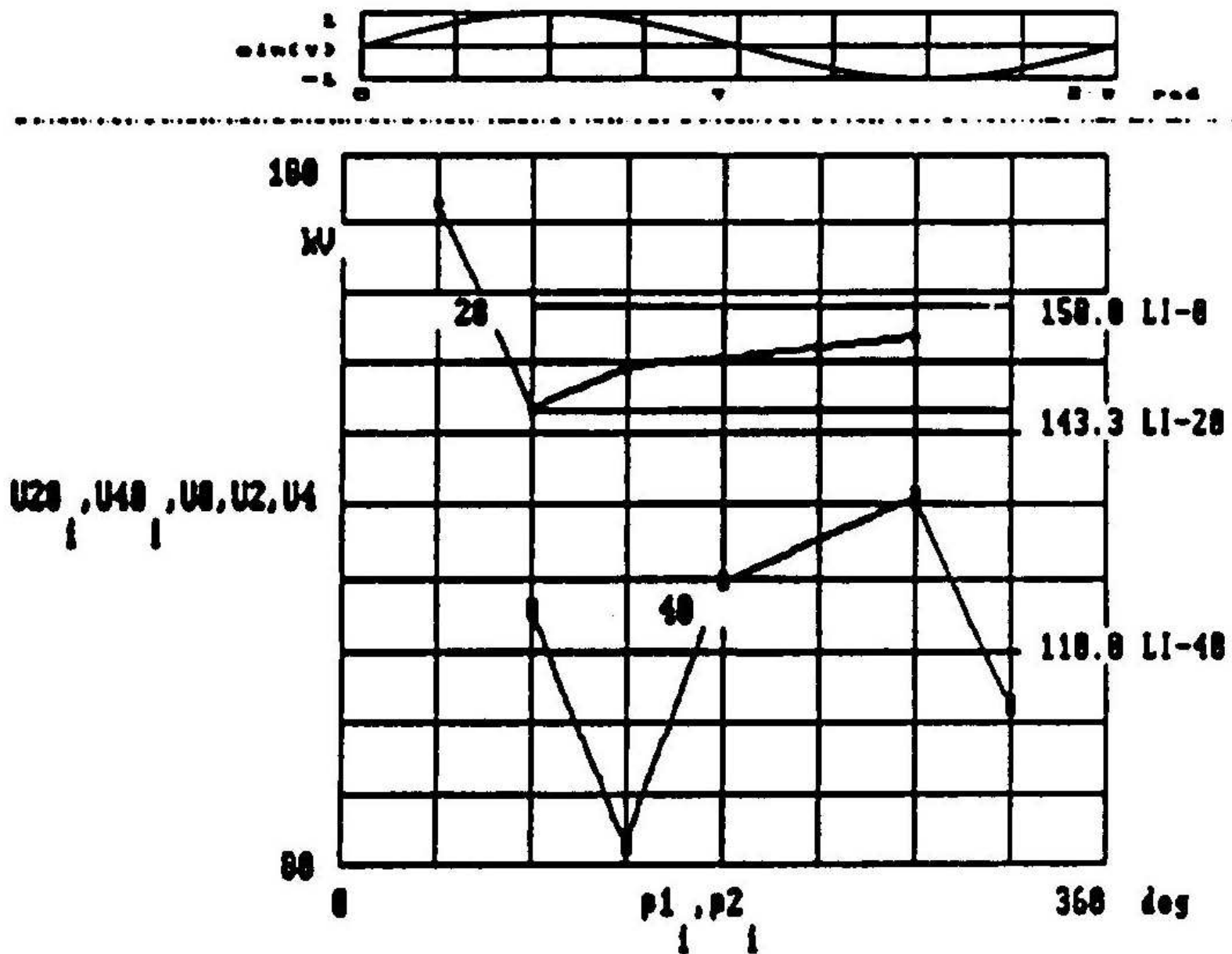


Figure 9. U_0 versus phase of negative lightning impulse (LI-)

Z powyższych rozważań widać, że napięcie wytrzymywane jest niższe przy dodatniej biegunowości udaru niż przy ujemnej. Jednakże ze wzrostem napięcia tła napięcie wytrzymywane maleje bardziej przy biegunowości ujemnej. Przy AC 40 kV różnica napięć wytrzymywanych dla LI+ i LI- wynosi jedynie około 13% podczas gdy przy braku tła wynosiła 27% na niekorzyść udaru ujemnego.

Wyniki obliczeń dla uderu dodatniego (LI+)

Napięcie tła AC	Faza uderu	Rozkład Gaussa				Rozkład Gumbela			Rozkład Weibulla			
		U ₅₀	σ	z	H	α	U _m	H	U ₀	U ₁	k	H
kV	deg	kV	kV	%	-	1/kV	kV	-	kV	kV	-	-
20	45	174.3	19.5	11.2	0.223	0.0467	183.5	0.437	147.6	179.6	1.50	0.112
	90	168.5	15.3	9.1	0.317	0.0853	173.9	0.198	120.2	173.6	3.80	0.371
	135	164.8	17.9	10.9	0.301	0.0516	173.2	0.452	143.8	169.1	1.32	0.181
	225	158.0	19.5	12.3	0.215	0.0588	169.6	0.232	98.4	164.7	3.50	0.240
	270	147.9	30.0	20.3	0.184	0.0411	159.3	0.135	109.8	151.2	1.46	0.793
40	90	147.8	18.2	12.3	0.122	0.0610	155.3	0.137	125.3	152.0	1.30	0.142
	135	150.0	23.2	15.5	-	0.0452	159.9	0.194	122.1	155.5	1.23	0.181
	180	170.2	21.6	12.7	0.280	0.0463	179.8	0.361	146.7	175.0	1.22	0.194
	270	155.8	26.0	16.7	0.095	0.0412	166.6	0.174	106.1	163.9	2.10	0.109
	315	141.2	31.0	22.0	-	0.0351	154.2	0.136	102.3	148.5	1.29	0.066
0	-	165.0	29.7	18.0	0.121	0.0360	177.5	0.187	116.8	173.5	1.81	0.129

Tabela 2

Wyniki obliczeń dla udaru ujemnego (LI-)

Napięcie tła AC	Faza udaru	Rozkład Gaussa				Rozkład Gumbela			Rozkład Weibulla			
		U ₅₀	σ	z	H	α	U _m	H	U ₀	U ₁	k	H
kV	deg	kV	kV	%	-	1/kV	kV	-	kV	kV	-	-
20	45	188.9	15.6	8.3	0.234	0.0639	195.8	0.327	173.0	192.0	1.10	0.122
	90	166.4	13.6	8.2	0.124	0.0826	172.0	0.150	143.5	170.3	1.82	0.126
	135	166.5	23.9	14.4	0.429	0.0389	177.7	0.543	149.3	169.2	0.80	0.157
	225	173.3	18.8	10.8	0.230	0.0615	180.8	0.232	151.8	177.5	1.10	0.255
	270	177.2	16.0	9.0	0.127	0.0627	184.3	0.241	153.4	181.6	1.63	0.102
40	90	146.2	28.3	19.4	0.143	0.0358	158.7	0.232	115.8	151.8	1.10	0.043
	135	148.4	20.6	13.9	0.038	0.0528	157.0	0.084	82.9	155.6	3.60	0.044
	180	143.0	16.2	11.3	0.156	0.0608	150.2	0.292	119.4	147.5	1.60	0.108
	270	155.0	20.2	13.0	0.289	0.0441	164.7	0.495	131.1	159.9	1.30	0.115
	315	161.9	20.5	12.0	0.327	0.0662	169.1	0.235	102.5	168.7	3.41	0.381
0	-	177.1	20.5	11.6	0.276	0.0470	186.5	0.390	158.0	180.9	0.99	0.162

Rozrzut udarowych napięć przebicia (współczynnik zmienności)

Jak wynika z rys. 10 rozrzut napięć przebicia przy udarze dodatnim jest największy wówczas gdy napięcie tła jest równe zeru (18%). Przy obecności napięcia tła rozrzut jest prawie zawsze mniejszy i tylko przy opozycji biegunowości jest nadal tak duży.

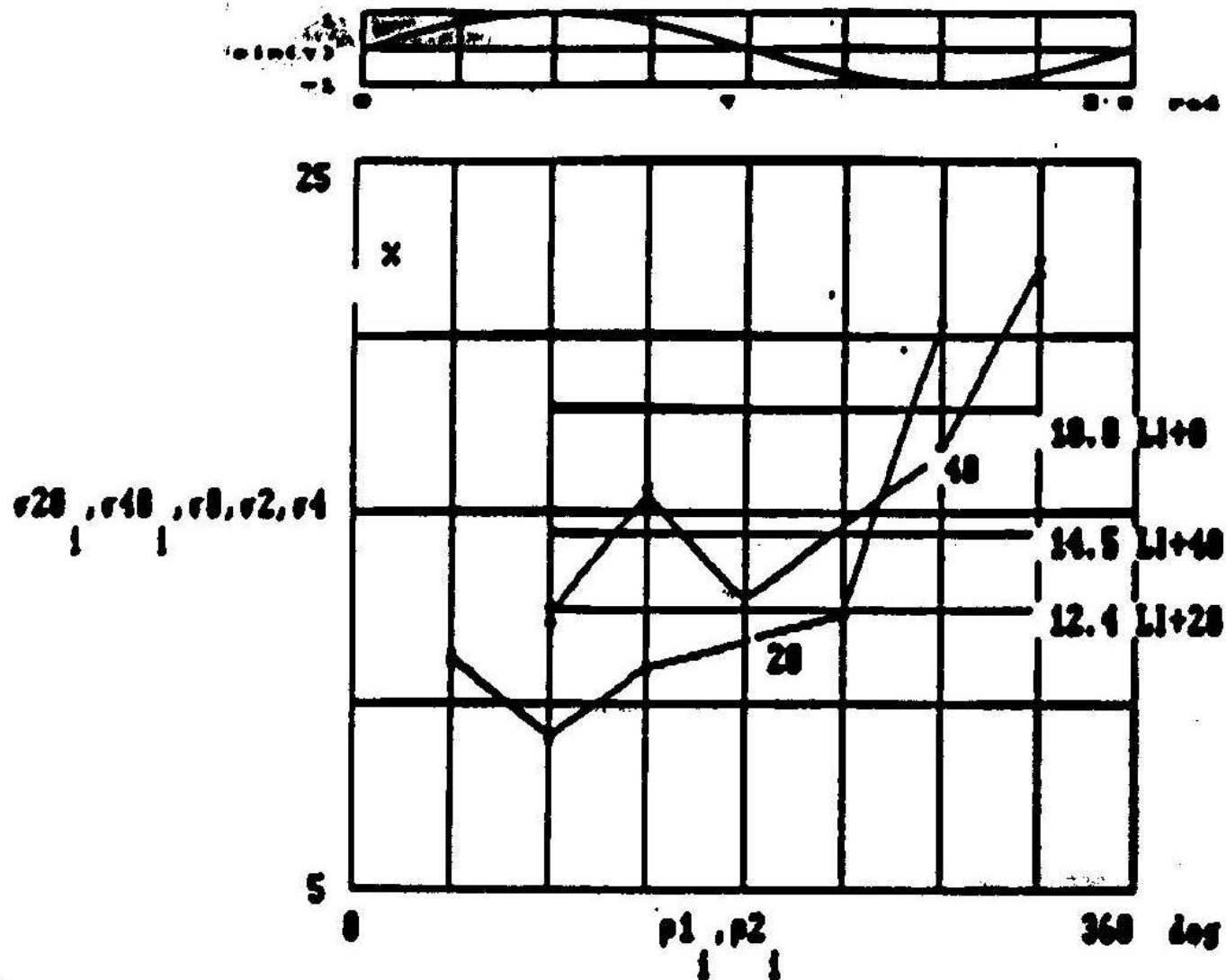


Figure 10. Percentage standard deviation versus phase of positive lightning impulse (LI+).

Dla biegunowości ujemnej (rys. 11) rozrzuty są zwykle mniejsze niż dla biegunowości dodatniej. Tym niemniej podobnie jak to miało miejsce dla rys. 10, widać że rozrzut jest mniejszy przy zgodnych biegunowościach niż przy biegunowościach przeciwnych. Jednakże wzrost napięcia tła nie powoduje malenia rozrzutu (LI+0 11.6%; LI+20 10.3%; LI+40 13.1%) jak to było przy biegunowości dodatniej.

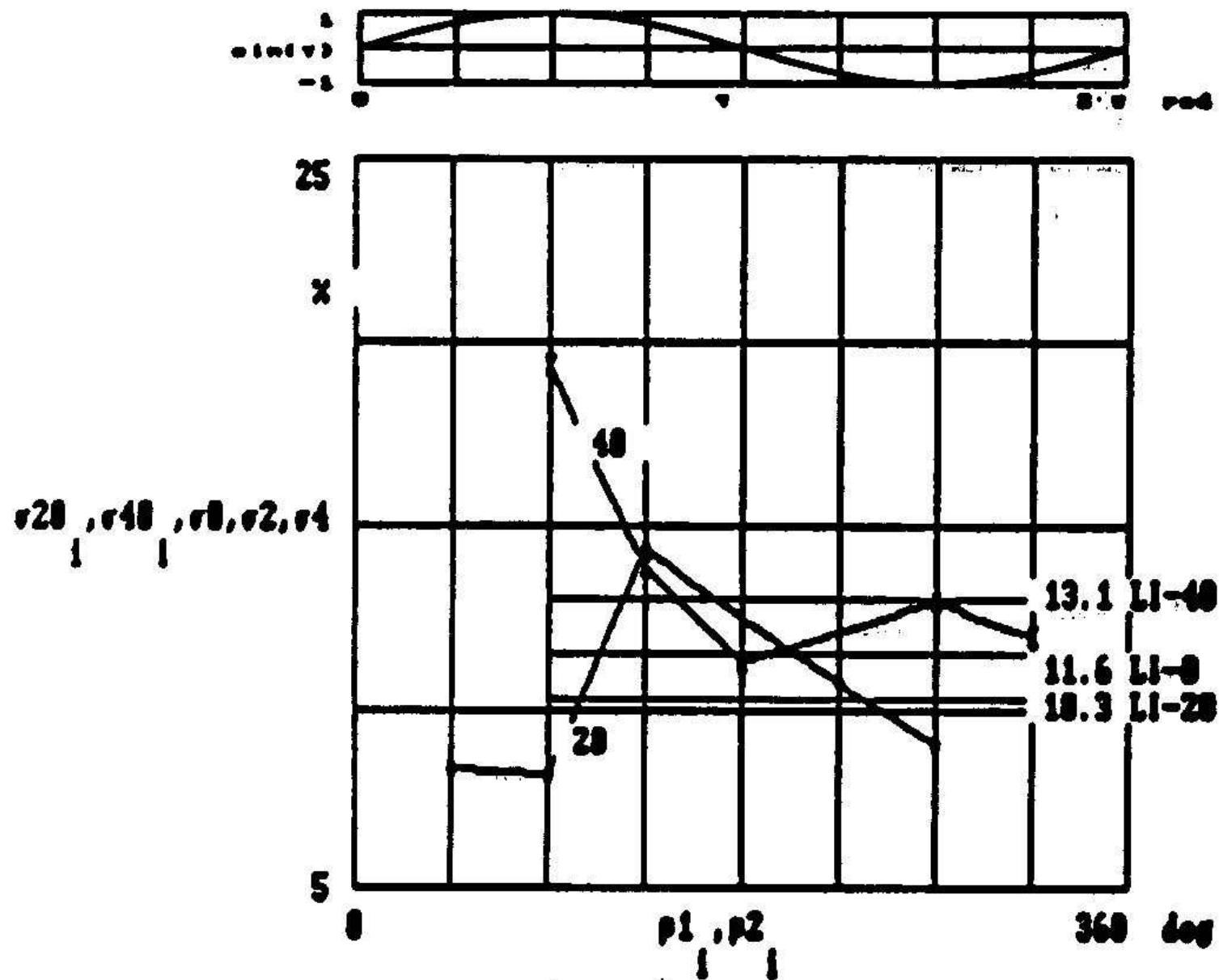


Figure 11. Percentage standard deviation versus phase of negative lightning impulse (LI-).

Na rys. 14 wykreślono wartości szczytowe mediany udarowych napięć przebicia uzyskane dla najgorszych warunków zgodności lub opozycji biegunowości udaru i sinusoidy. Czyli na rys. 14 uwzględniono jedynie wyniki uzyskane dla kątów 90° i 270° oraz dla braku tła $AC = 0$ kV.

Jak widać wzrost napięcia AC od 0 do 20 kV niemal nie zmienia mediany udarowego napięcia przebicia jeśli udar i napięcie przemienne mają tą samą biegunowość.

Przy opozycji biegunowości U_{50} maleje o około 7% (przy kącie 90°) dla biegunowości ujemnej udaru i o około 9% (przy kącie 270°) dla biegunowości dodatniej.

Przy AC 40 kV występuje spadek mediany udarowych napięć przebicia niezależnie od biegunowości napięcia przemienne. Spadek ten jest największy dla kąta 90° niezależnie od biegunowości udaru czyli przy dodatnim maksimum sinusoidy. Spadek U_{50} wynosi wówczas nadal około 9% dla biegunowości dodatniej i około 17% dla biegunowości ujemnej.

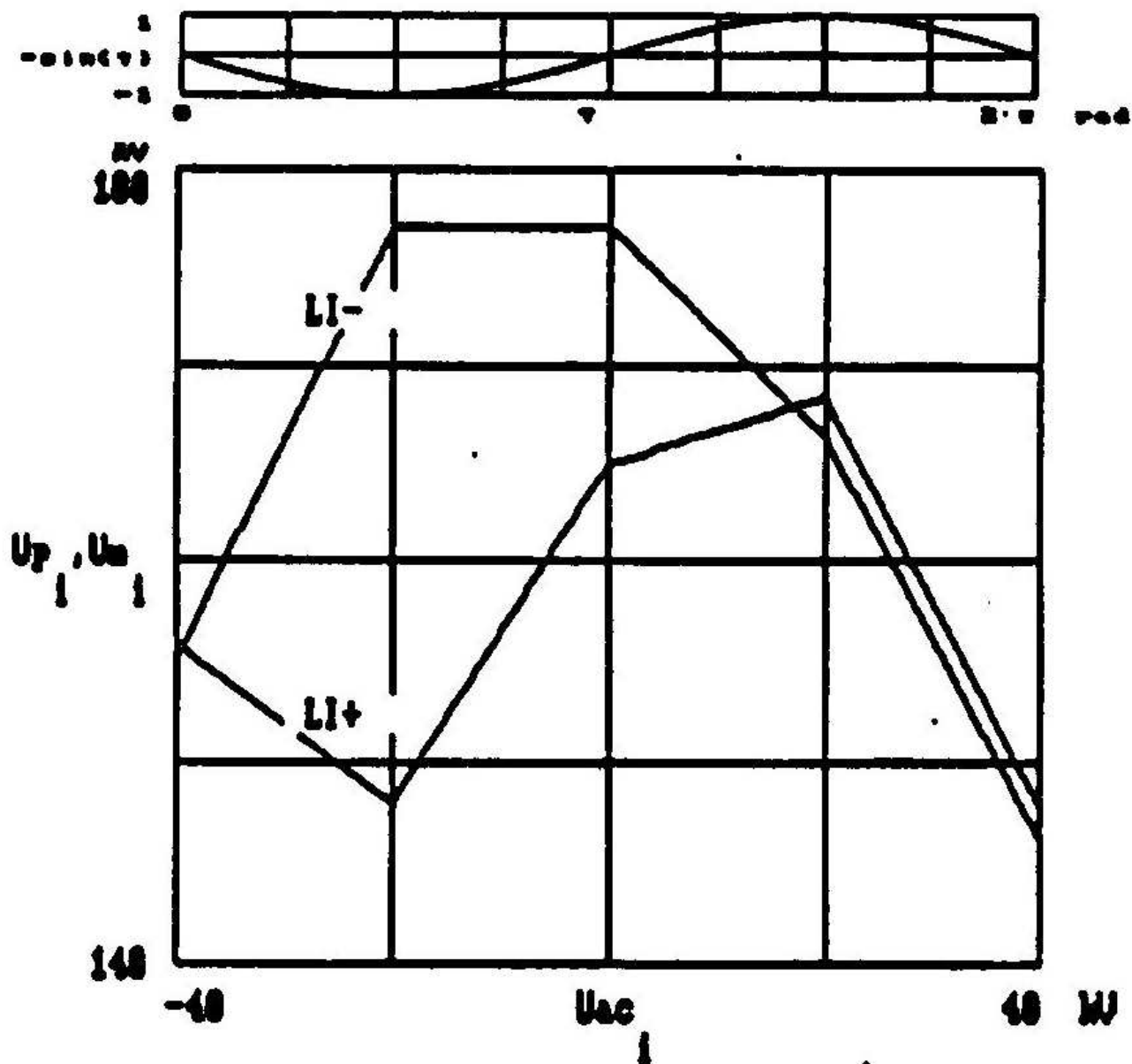
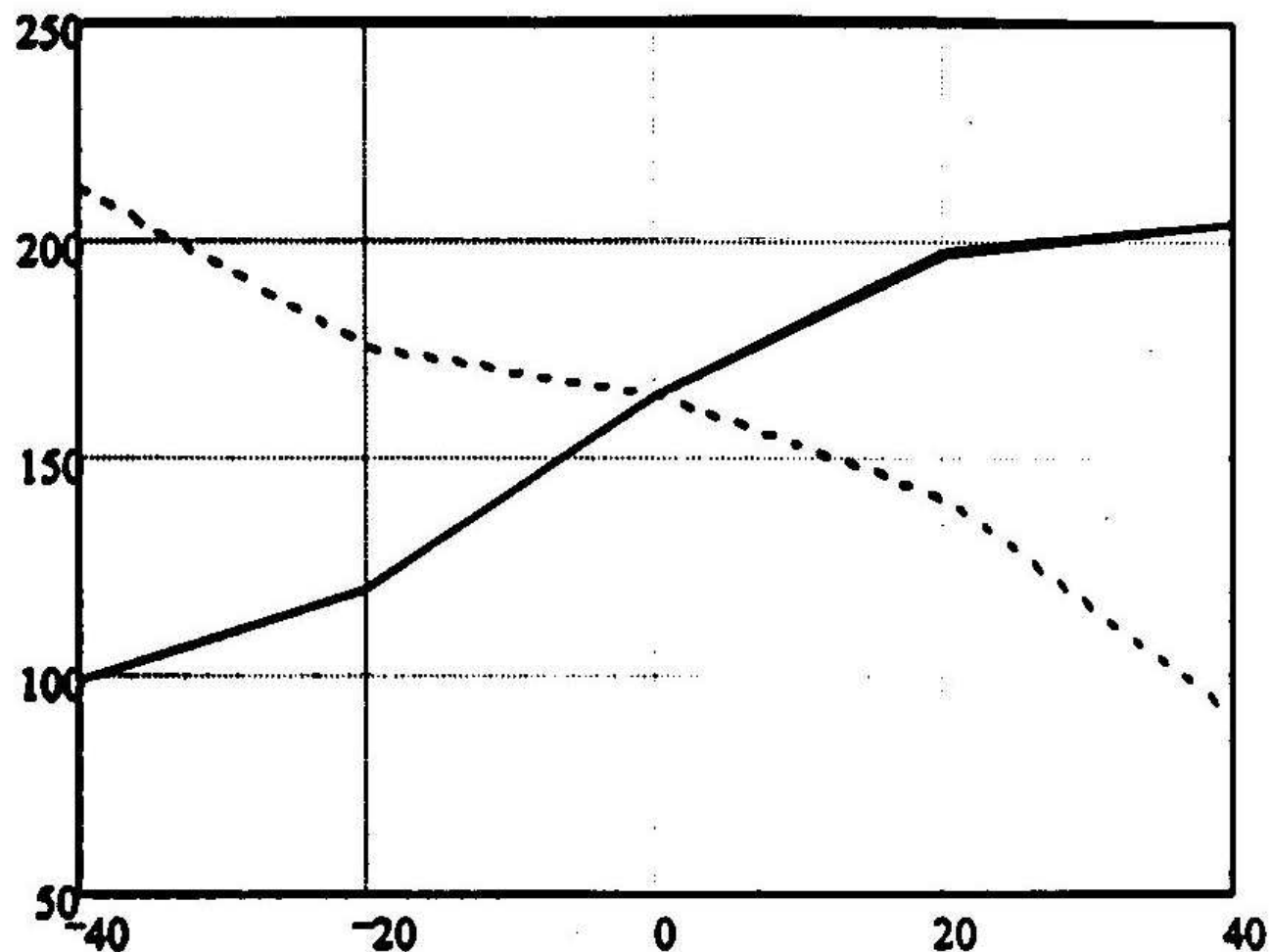


Figure 14. Use of lightning impulse versus AC voltage with LI superimposed on maximum sine wave.

Na rys. 5 powtórzono dane z rys. 14, z tą różnicą, że na osi pionowej podano sumę wartości szczytowej napięcia udarowego i wartości szczytowej napięcia przemiennego, z uwzględnieniem biegunowości obu napięć. Jak widać przy napięciu przemiennym 40 kV, sumaryczne napięcie przebicia badanego układu izolacji papierowo-olejowej jest mniejsze niż przy przemiennie napięcie przebicia tej izolacji ($U_{50AC} = 78.7$ kVs czyli 111.8 kVm). Oznacza to, że przy odpowiednio wysokim napięciu przemiennym udarowa zmiana napięcia o biegunowości przeciwnej do AC, wzmacnia zjawiska wyładowcze ułatwiające proces przebicia do tego stopnia, że sumaryczne napięcie przebicia znacznie maleje.



Rys. 5 Zależność wartości bezwzględnej mediany napięć przebicia jako suma wartości szczytowych napięcia przemiennego i udarowego, w funkcji napięcia tła przy nakładaniu udaru na maksimum sinusoidy.

Współczynnik uderowy

$$k^{+} = \frac{U_{50LI+}}{\sqrt{2} \cdot U_{50AC+}}$$
$$k^{-} = \frac{U_{50LI-}}{\sqrt{2} \cdot U_{50AC-}}$$

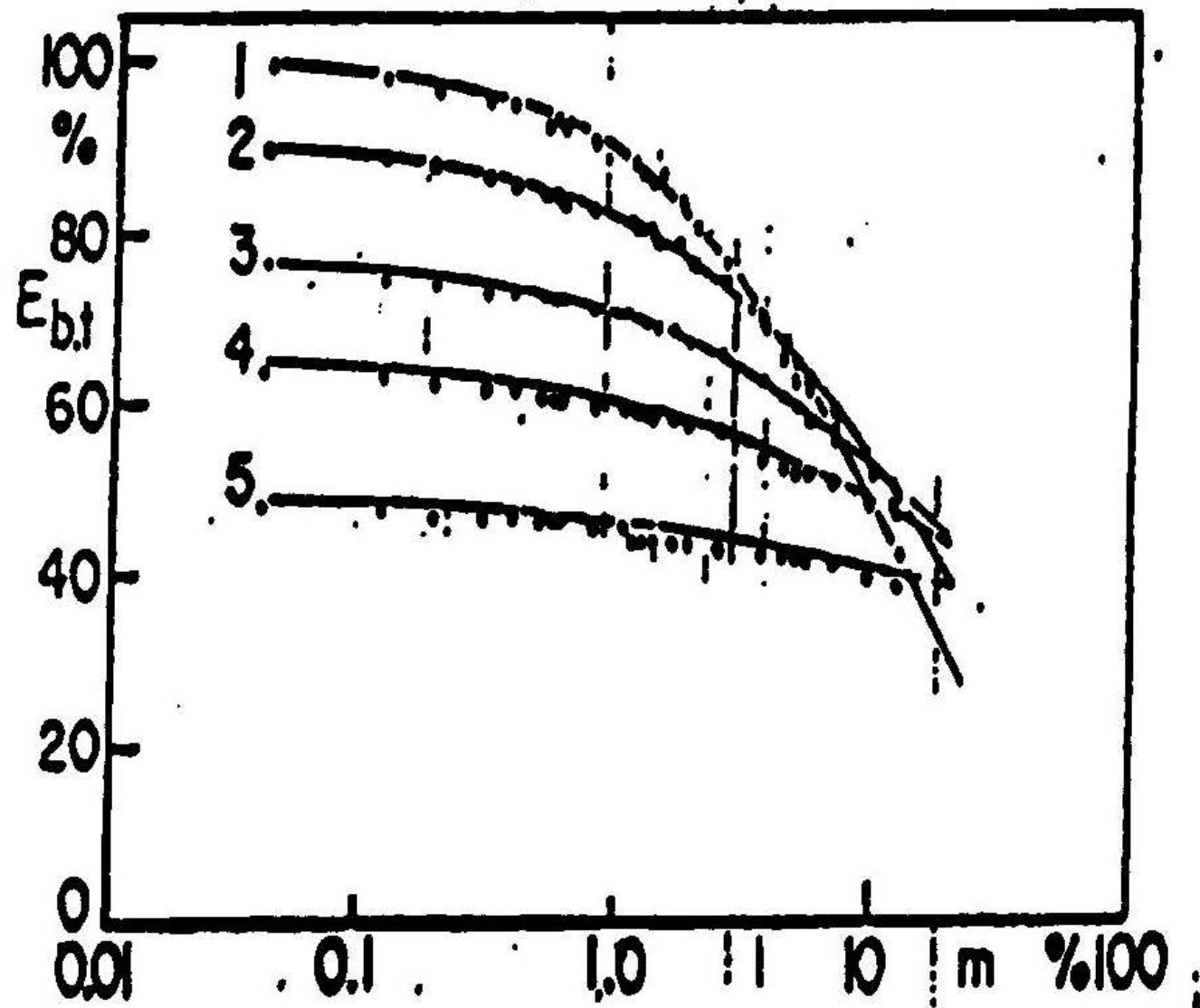
W tabeli 3 zestawiono wartości mediany napięć przebicia obliczane globalnie dla danego poziomu tła AC i porównano je z wartością mediany przemiennej napięć przebicia. W oparciu o te dane obliczono współczynniki udarowe odpowiednio dla obu biegunowości udaru.

Jak widać w miarę wzrostu napięcia tła AC współczynnik udarowy, dla badanego układu izolacji papierowo-olejowej, maleje niezależnie od biegunowości udaru.

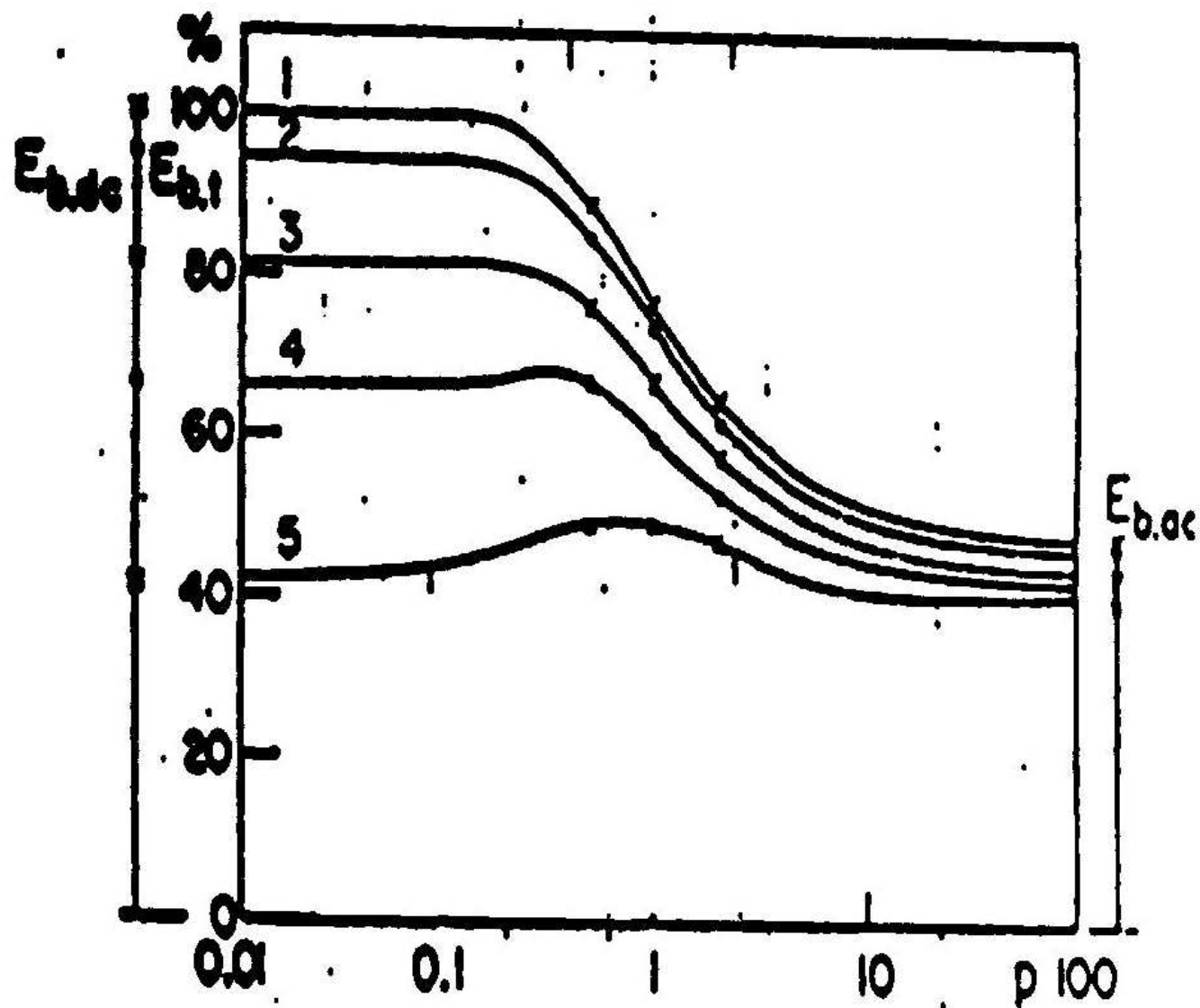
Table 3
Impulse ratio

Voltage	Back-ground AC	U50	k
-	kVs	kVm	-
AC	-	111.8	-
LI +	0	165.0	1.48
	20	160.9	1.44
	40	151.6	1.36
LI-	0	177.1	1.58
	20	172.3	1.54
	40	149.3	1.34

Rys. 6a i 6b prezentują wytrzymałość elektryczną przy nakładaniu się na siebie napięć AC i DC. Widać, że napięcie DC daje najwyższą wytrzymałość, napięcie AC najniższą, a przypadki nakładania się DC+AC są pośrednie.



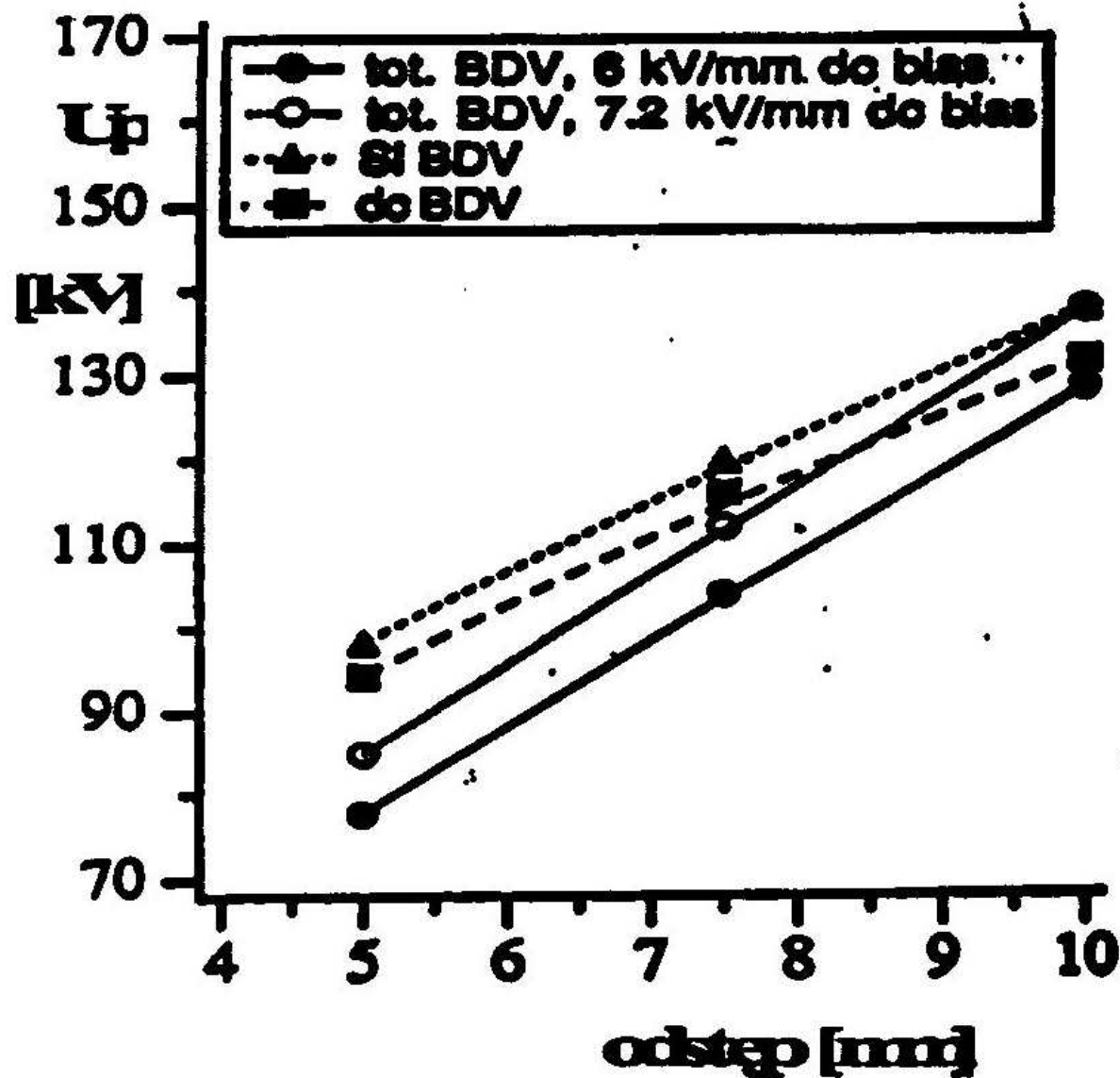
Rys. 6a. Zależność wytrzymałości od zawilgocenia przy różnych współczynnikach pulsacji [12]: 1 - $p=0$ (dc), 2 - $p=0.5$, 3 - $p=1$, 4 - $p=2$, 5 - $p=\infty$ (ac)



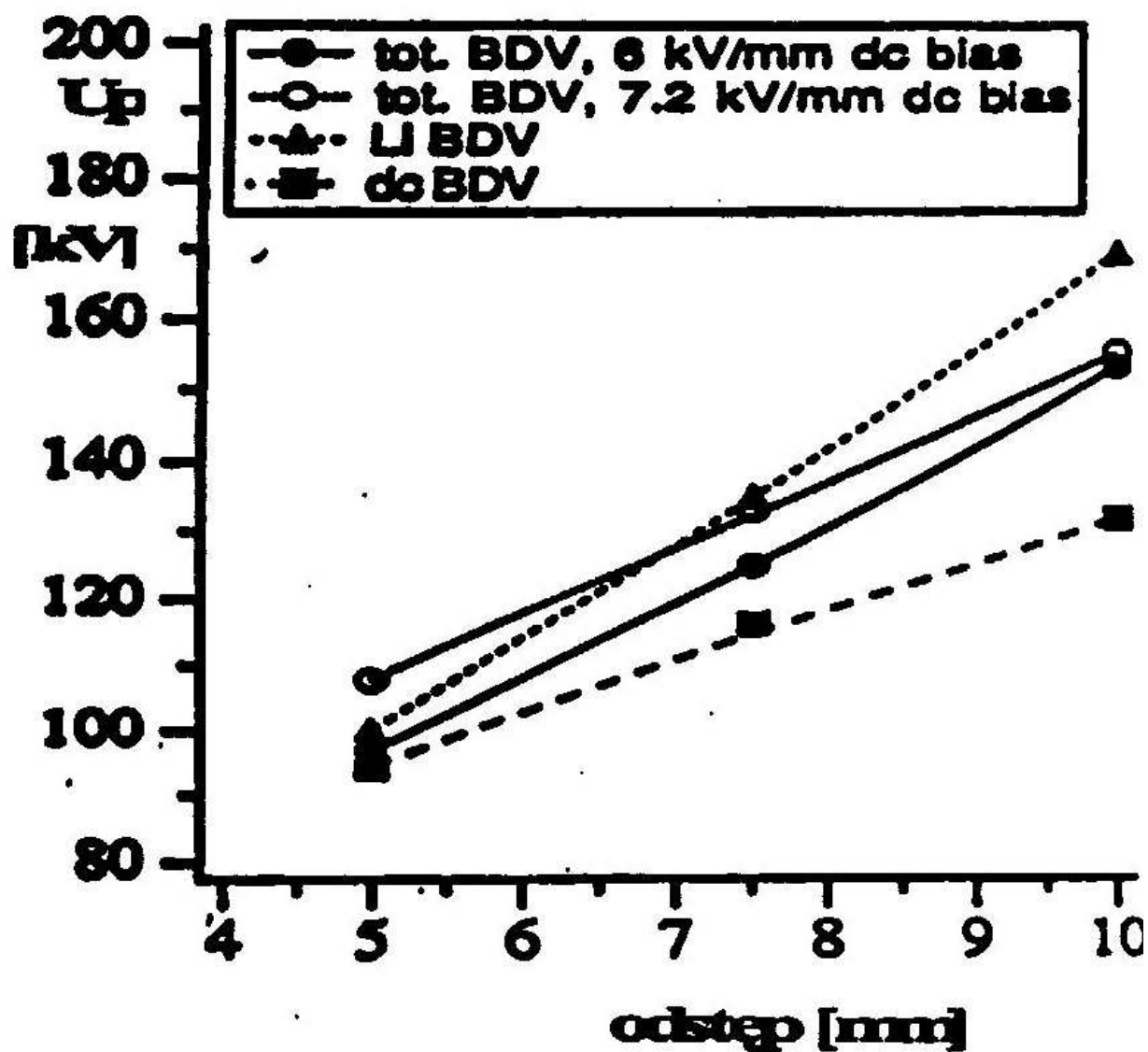
Rys. 6b. Zależność wytrzymałości od współczynnika pulsacji przy różnych zawilgoceniach [12]: 1 - 0.04%, 2 - 0.51%, 3 - 1.98%, 4 - 4.47%, 5 - 12.36%

W publikacji [4] zaprezentowano wyniki nakładania się udarów łączeniowych SI i piorunowych LI na napięcie stałe DC.

Tu również widać, że przypadki nakładania się stwarzają większe zagrożenia.



Rys. 8a. Napięcie przebicia po powierzchni izolacji w oleju przy napięciu złożonym DC+SI [2]



Rys. 8b. Napięcie przebicia po powierzchni izolacji w oleju przy napięciu złożonym DC+LI [2]

Wnioski

- obecność napięcia AC, na które nakłada się udar piorunowy LI powoduje malenie mediany udarowego napięcia, dla modeli izolacji papierowo-olejowej typowej dla izolacji międzyzwojowej;
- malenie to osiąga około 10 % niezależnie od biegunowości udaru;
- maksymalny spadek napięcia przebicia zaobserwowano dla udaru dodatniego nałożonego na dodatnią połówkę sinusoidy i wynosił około 14 %;
- dla napięcia wytrzymywanego (o zerowym prawdopodobieństwie przebicia) spadek wartości tego napięcia jest większy niż dla mediany i wynosi około 20 % dla udaru dodatniego i około 30 % dla udaru ujemnego;
- najbardziej niekorzystne warunki występują gdy udar LI nakłada się na szczyt sinusoidy AC; krytyczna jest opozycja opozycja biegunowości udaru i sinusoidy; maleje wówczas zarówno U_{50} jak i U_0 oraz rośnie rozrzut napięć przebicia.

Literatura

- [1] F. Mosinski, J. Wodzinski, L. Sikorski, J. Ziencikiewicz – “Electrical Strength of paper-Oil Insulation Subject to Composite Voltages”, IEEE Trans. On Dielectric and Electrical Insulation, vol. 1, August 1994, pp. 615-623
- [2] P.M. Balma, R.C. Degeneff, H.R. Moore, L.B. Wagenaar _The Effect of Long Term Operation and system Conditions on Dielectric capability and Insulation Coordination of Large Power transformers”, IEEE Trans. On Power Delivery, vol. 14, No. 3, July 1999, pp. 960-971
- [3] Aster, Shoo Chern Wee - “*Electrical Strength of Paper-oil Insulation Subjected To Composite Voltages* ”, degree Bachelor of Engineering (Honours), Faculty of Engineering, The University of Queensland, October 1998 (Supervisor : Dr Tapan Kumar Saha)
- [4] M.R. Raghuveer, Ge Zhang, F. David – „Effect of dc Bias on Surface Strength of Processed pressboard under Lightning and switching Impulses”, IEEE Trans on Electrical Insulation, vol. 26, No 4, August 1991, pp. 806-810
- [5] F. Mosiński, J. Wodziński, Ł. Sikorski – „Wytrzymałość elektryczna izolacji papierowo-olejowej przy napięciach złożonych”, Archiwum Elektrotechniki, t. XLII, Z. 1-4, 1993, str. 66-85