

WYTRZYMAŁOŚĆ ELEKTRYCZNA UKŁADÓW IZOLACYJNYCH POGRAŻONYCH W KĄPIELI OLEJOWEJ

prof. dr hab. inż. Franciszek Mosiński

Zakład Wysokich Napięć

Politechnika Łódzka

Podział ogólny:

- izolacja główna,
- izolacja międzyfazowa,
- izolacja wzdużna,
- izolacja międzystykowa (w przełączniku zaczepów).

Podział ze względu na oddziaływania atmosferyczne:

- izolacja wewnętrzna,
- izolacja zewnętrzna:
 - w przestrzeniach otwartych (np. zacisk liniowy – konserwator, zacisk liniowy – zacisk liniowy, etc.) gdzie obowiązuje prawo Paschena,
 - wzduż powierzchni dielektryka stałego, np. wzduż powierzchni przepustu, gdzie nie obowiązuje prawo Paschena.

Podział ze względu na spodziewany rodzaj dominujących przepięć:

- izolacja międzyfazowa GN (XY),
- izolacja doziemna GN (XT),
- izolacja GN/DN (Xx),
- Izolacja międzyfazowa DN (xy),
- izolacja punktu gwiazdowego GN (0T),
- izolacja doziemna DN (xT),
- izolacja punktu gwiazdowego DN (oT),
- izolacja połączeń GN,
- izolacja połączeń DN,
- izolacja wzdłużna GN,
- izolacja wzdłużna DN.

Wytrzymałość odstępów olejowych zależy od wielu czynników, w tym przykładowo najważniejsze to:

- geometria elektrod;
- materiał elektrod;
- chemiczna czystość oleju;
- fizyczna czystość oleju;
- kształt i czas oddziaływania napięcia (DC czy AC, częstotliwość, kształt udaru dla SI oraz LI) etc

Dla napięcia DC, SI oraz LI dodatkowo ważna jest biegunowość napięcia, co z kolei związane jest z sekwencją narażeń napięciowych, symetrią napięciową i stopniem niejednorodności pola elektrycznego.

Motto:

- The analysis of light gases and water in transformer oil provide the basis of a diagnostic evaluation of equipment health
- Aby uniknąć dużych zapasów izolacji należy utrzymywać zawartość gazu na poziomie bliskim tego, który był w fabryce, czyli $< 3\%$. Przy większych wartościach zaleca się odgazowanie oleju.

6.1. RODZAJE CIECZY IZOLACYJNYCH

Ciecze izolacyjne najogólniej można podzielić na niepolarne, polarne i kriogeniczne. Do dielektryków ciekłych o strukturze **niepolarnej** należą głównie ciecze węglowodorowe, z których najszersze zastosowanie w elektrotechnice mają mineralne oleje izolacyjne uzyskiwane z ropy naftowej. Charakteryzują się one dużą wytrzymałością elektryczną, zdolnością do odprowadzania ciepła i gaszenia łuku elektrycznego. Kąpiel olejowa chroni dielektryki stałe przed działaniem powietrza atmosferycznego i wilgoci. Oleje mineralne są stosowane w transformatorach energetycznych, których układy izolacyjne muszą pracować przy napięciach UHV i EHV, w kablach z izolacją papierowo-olejową lub olejową, w wyłącznikach, przekładnikach itd.

Dielektryki **polarne**, np. woda czy aceton, są bardzo dobrymi rozpuszczalnikami stąd niezwykle trudno jest utrzymać je w czystej postaci, w której charakteryzują się dostatecznie dużą rezystywnością ($\geq 10^{12} \Omega\text{m}$) by można je sklasyfikować jako dielektryki. A szkoda, bo miałyby wówczas atrakcyjne właściwości w postaci wysokiej przenikalności elektrycznej względnej $\epsilon' > 30$. Oleje syntetyczne, np. na bazie chloru czy krzemu, zalicza się do cieczy słabo polarnych.

Dielektryki **kriogeniczne** to skroplone gazy, jak np. hel, neon, argon, krypton, ksenon czy gazy dwuatomowe jak wodór, tlen lub azot. Ciecze te znajdują zastosowanie w układach izolacyjnych kriogenicznych będących jeszcze wciąż na etapach opracowań prototypowych w zakresie kabli, generatorów czy transformatorów.

W tym wykładzie problematykę cieczy izolacyjnych ograniczono do omówienia podstawowych właściwości oleju transformatorowego jako najpowszechniej stosowanego dielektryka ciekłego oraz do zasygnalizowania problematyki olejów syntetycznych.

6.2. OLEJ TRANSFORMATOROWY

6.2.1. Wprowadzenie

Olej transformatorowy jest cieczą izolacyjną niezbyt dokładnie zdefiniowaną chemicznie. Jest to mieszanina węglowodorów parafinowych (C_nH_{2n+2}) (np. heksan C_6H_{14}), naftenowych (C_nH_{2n}) (np. cykloheksan C_6H_{12}), i aromatycznych (C_nH_n) (np. benzen C_6H_6). Proporcje zawartości poszczególnych składników zależą w pewnym stopniu od składu wyjściowej ropy naftowej i przykładowo najbardziej cenione oleje transformatorowe naftenowe można uzyskać tylko z niektórych gatunków ropy naftowej.

$$(A) C_n = 55.0 \%, \quad C_p = 41.5 \%, \quad C_a = 3.6 \%$$

$$(B) C_n = 43.0 \%, \quad C_p = 47.6 \%, \quad C_a = 9.4 \%$$

Mechanizm przebicia oleju transformatorowego nie jest jeszcze do końca rozpracowany. Powodem jest zarówno niedokładne zdefiniowanie struktury oleju jak i wielorakość czynników wpływających na mechanizm wyładowania.

Nie wdając się w szczegóły, ogólnie można powiedzieć, że mechanizm przebicia może być trojaki:

1. **Strimerowo-liderowy**, bardzo podobny do mechanizmu przeskoku w dużych odstępach powietrznych, przy czym brak jest zgodności, co do tego czy mechanizm ten jest zapoczątkowany przez jonizację zderzeniową cząstek cieczy czy przez mechanizm kawitacyjny na nierównościach katody, wskutek czego tworzą się pęcherzyki gazu rozprzestrzeniające się w kanał wyładowania. Mechanizm strimerowy występuje w nieskażonej postaci jedynie w bardzo dobrze oczyszczonych cieczach.
2. Mechanizm **gazowy** polegający na rozwoju wyładowania wskutek tego, że rozpuszczone w oleju powietrze lub inne gazy wydzielają się w postaci pęcherzyków, w których następuje przeskok. Wyładowanie w pęcherzykach powoduje rozkład oleju i ich wydłużenie aż do przebicia.
3. Mechanizm **mostkowy** polegający na tym, że higroskopijne włókna zanieczyszczeń znajdujących się w oleju, wskutek wysysania wody z oleju zwiększają swoją przenikalność elektryczną. Posiadając przenikalność elektryczną znacznie większą od oleju są poddane działaniu sił elektroforezy skierowanych w kierunku obszarów o dużych natężeniach pola elektrycznego gdzie ustawiają się wzdłuż linii sił pola tworząc łańcuchy (mostki). Mostek wskutek swych właściwości półprzewodzących zostaje silnie nagrzewany i eksploduje wyładowaniem.

Oleje silnie oczyszczone, w których występuje tylko mechanizm strimerowy charakteryzują się bardzo dobrą wytrzymałością elektryczną rzędu 1000 kV/cm. Wartości takie uzyskuje się jednak tylko w laboratoriach dla niewielkich próbek oczyszczonych specjalnymi metodami cieczy. Dla warunków technicznych (rozdz. 6.2.2) nie osiąga się nawet 1/3 wartości wytrzymałości uzyskiwanej w laboratoriach.

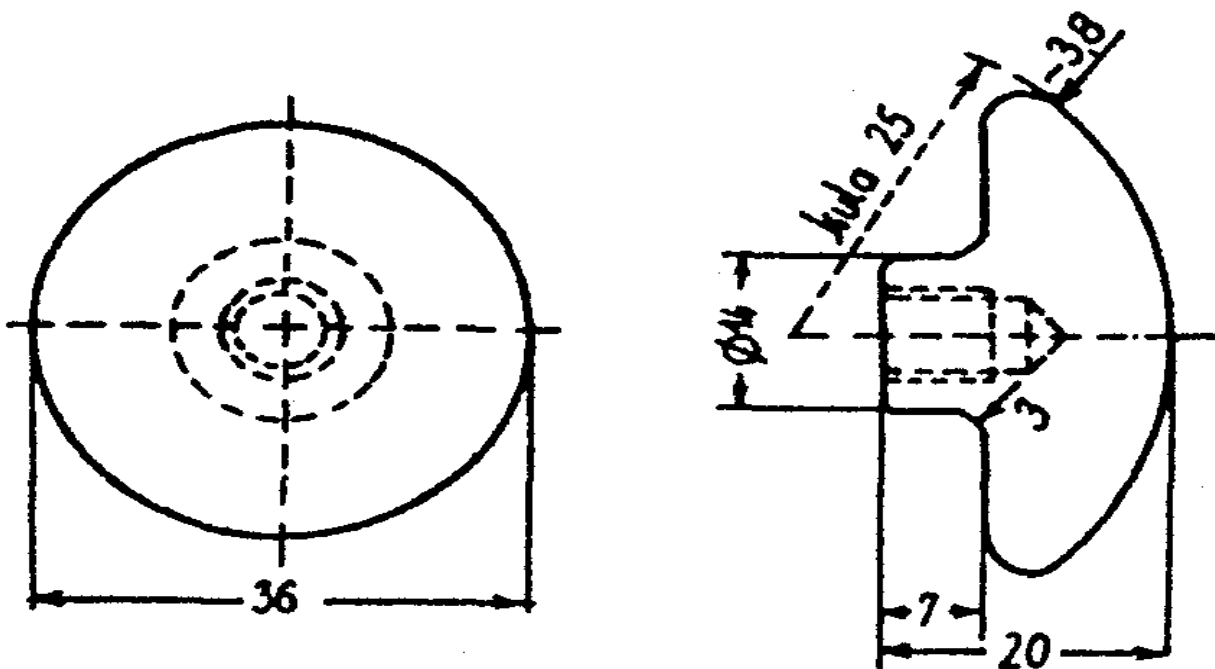
Mechanizm mostkowy jest utrudniony, jeśli elektrody są pokryte stałym materiałem izolacyjnym. Wskutek sił dielektrycznych następuje wówczas odpychanie włókienek zanieczyszczeń od powierzchni izolacji stałej i w pobliżu elektrod mostki się nie tworzą. Daje to skutek w postaci wzrostu wytrzymałości elektrycznej.

6.2.2. Wytrzymałość i inne właściwości elektryczne

Szczegółowe wymagania stawiane olejom surowym można podzielić na cztery grupy: właściwości fizyczne, dopuszczalna zawartość szkodliwych zanieczyszczeń, odporność na utlenianie i odporność na gazowanie.

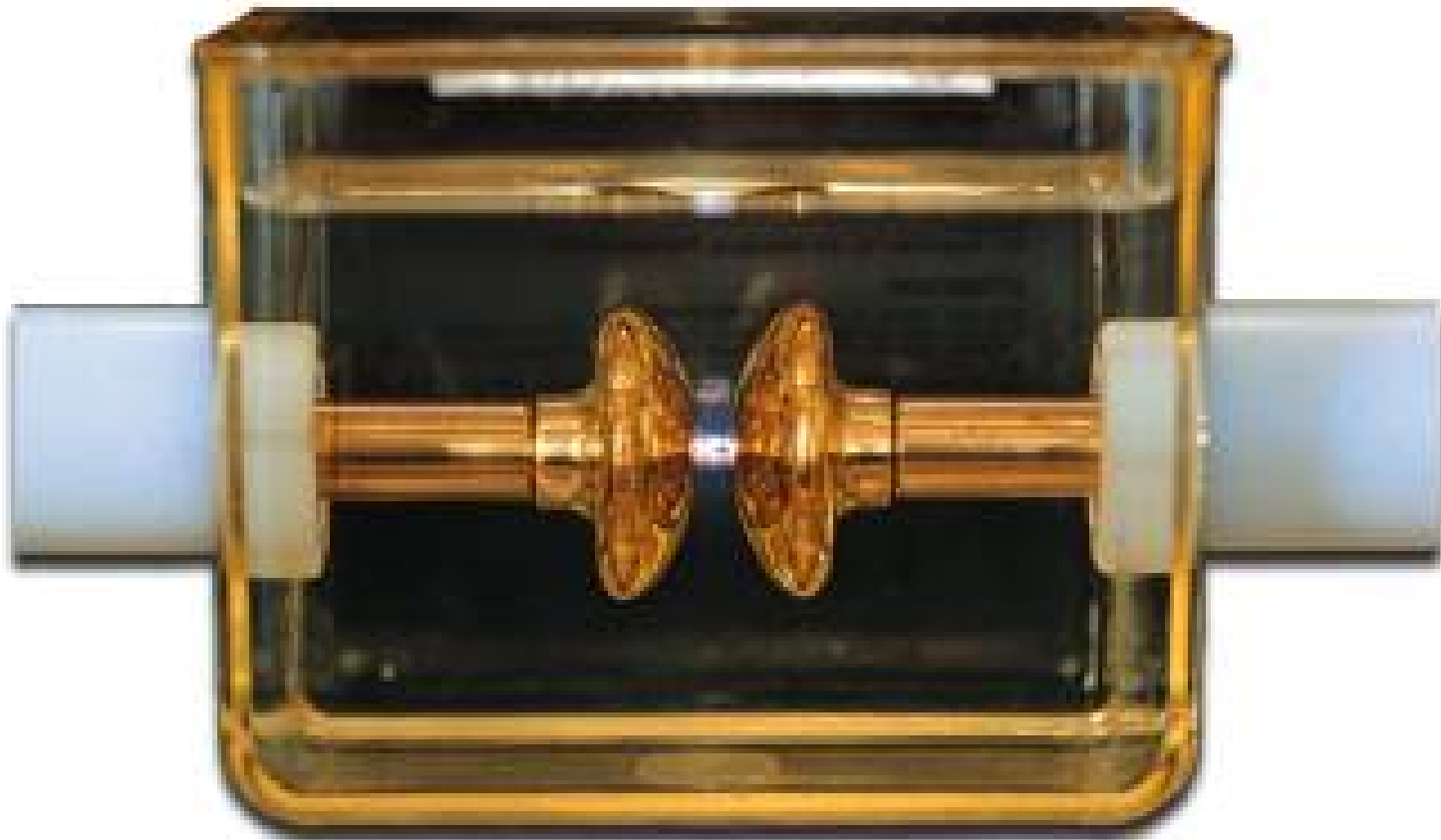
Wytrzymałość elektryczna oleju zależy głównie od stopnia czystości tzn. od stopnia wysuszenia, odgazowania i oczyszczenia z zanieczyszczeń stałych. Poza tym na wytrzymałość oleju ma wpływ cały szereg innych czynników jak kształt napięcia i sposób jego zmiany, kształt pola elektrycznego, materiał i stan powierzchni elektrod jak również ich pole powierzchni, temperatura i ciśnienie.

Mówiąc o wytrzymałości elektrycznej oleju zwykle rozumie się tzw. normatywną wytrzymałość przy napięciu przemiennym podwyższanym w sposób ciągły z umiarkowaną prędkością w iskierniku o elektrodach jak na rysunku 6.1 i odstępzie międzyelektrodowym 2.5 mm. Pole elektryczne w tym iskierniku jest zbliżone do równomierne.



Rys. 6.1. Elektroda znormalizowanego iskiernika do badania wytrzymałości elektrycznej oleju transformatorowego; współczynnik wykorzystania układu izolacyjnego $\eta = 0.97$

Electrical insulation
Breakdown voltage test (VDE electrodes)



Summary of important measurable properties to characterise transformer oils

Cooling Viscosity Pour point Viscosity index	Electrical insulation Breakdown voltage Dielectric dissipation factor (DDF) Impulse breakdown Resistivity Water content	Life time Oxidation stability Inhibitor content Solubility
Material Compatibility Sulphur content Acidity Corrosive sulphur Aromatic content	Health, safety and environment Flash point DMSO Extractable compounds, IP 346 Electrostatic charging tendency, ECT	Others Density Interfacial tension, IFT Furanic compounds Gassing tendency



Podsumowanie ważnych mierzalnych właściwości charakteryzujących olej transformatorowy

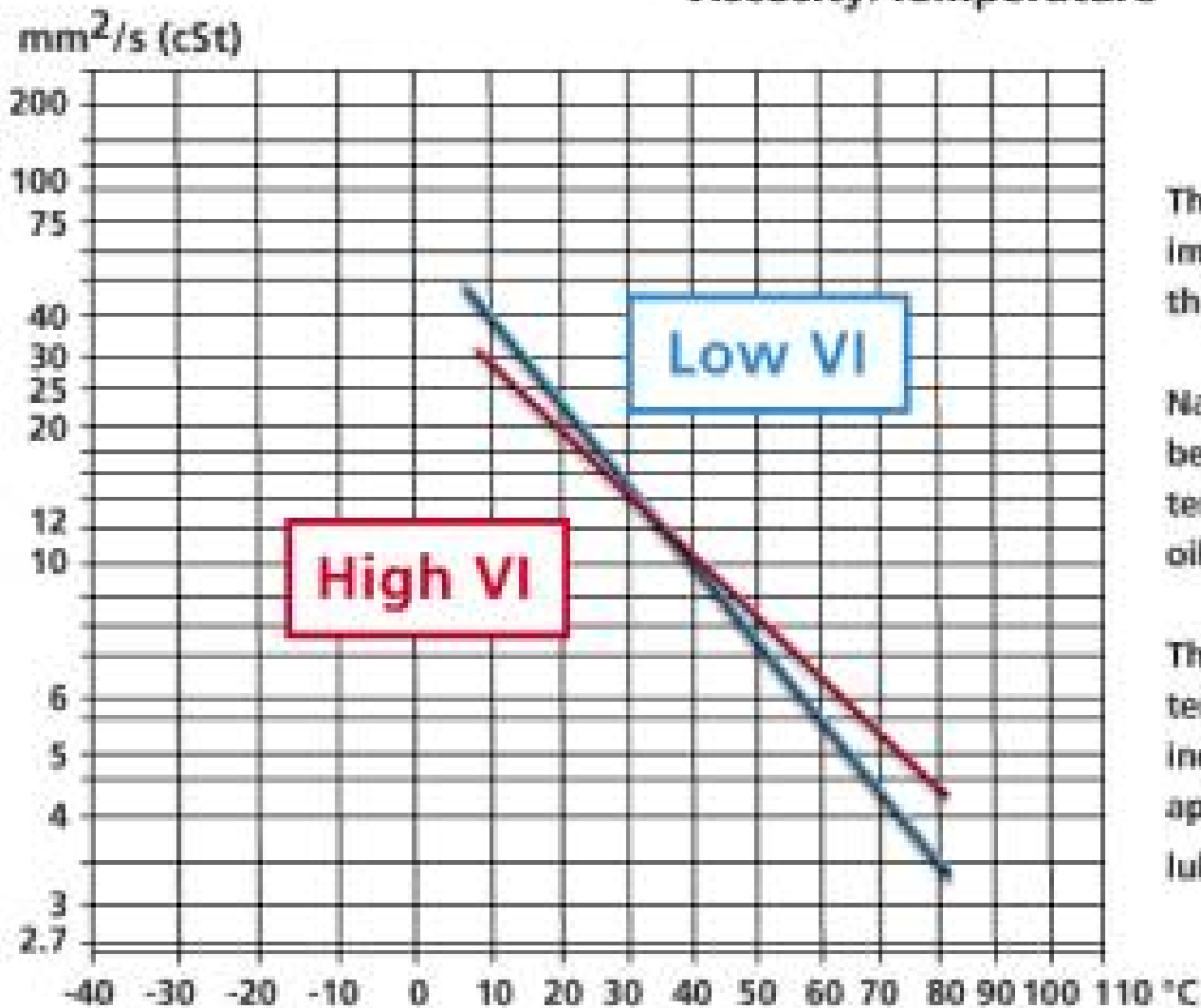
Ciepłota lepkość temperatura zstęplania indeks lepkości	Izolacja elektryczna Napięcie przebicia współczynnik stratności udarowe napięcie przebicia rezystywność zawartość wody	Wydajność Odporność na starzenie odporność na utlenianie zawartość inhibitorów rozpuszczalność
Kompatybilność z materiałami zawartość siarki kwasowość siarka korodująca zawartość aromatów	Bezpieczeństwo i środowisko temperatura zapłonu składniki ekstrahowalne DMSO tendencja do elektryczności statycznej	Inne gęstość napięcie powierzchniowe zawartość furanów tendencja do gazowania

DMSO - Dimethyl Sulfoxide

dwumetylosulfotlenek

Najważniejszą właściwością fizyczną oleju jest jego lepkość kinematyczna. Powinna być jak najmniejsza i w szerokim zakresie jak najmniej zależna od temperatury. Od tego zależy przydatność oleju jako środka chłodzącego, swobodnie krążącego w wąskich kanałach olejowych transformatora.

Cooling Viscosity/Temperature



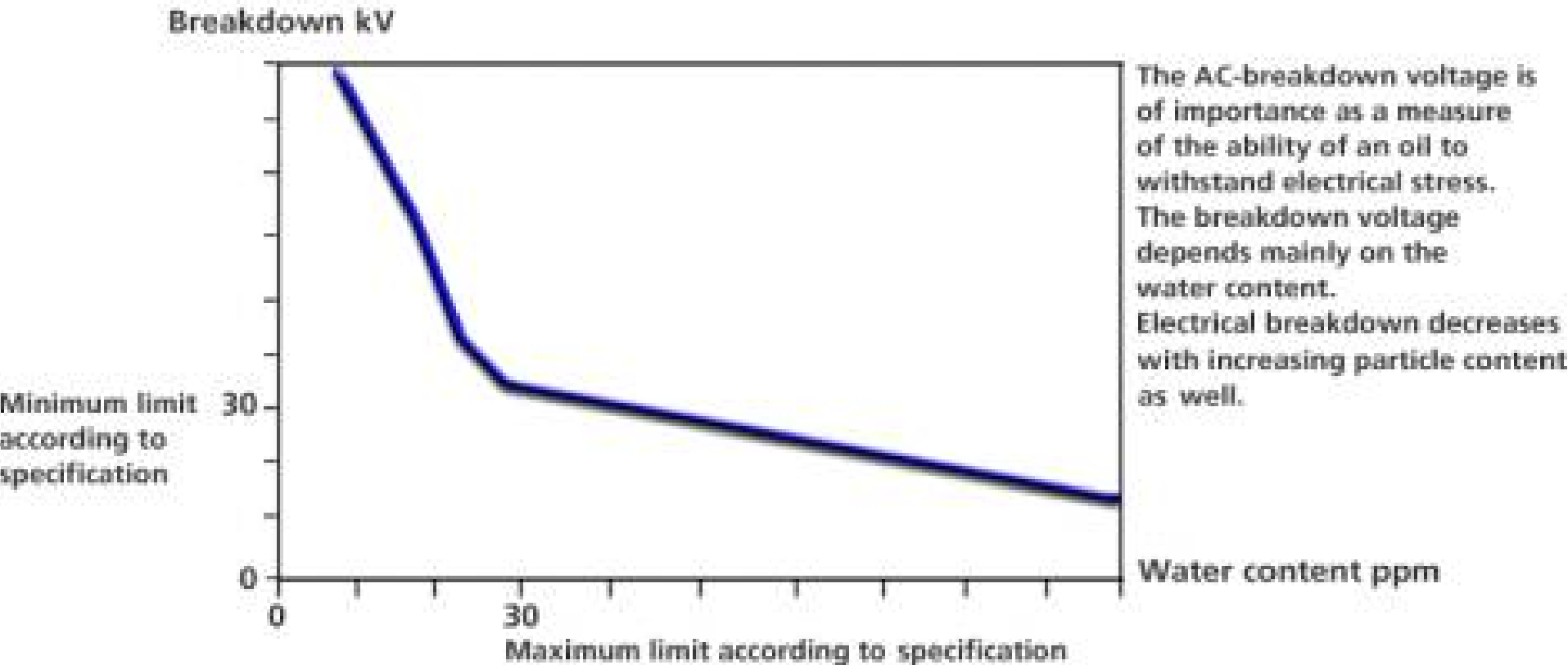
The viscosity of a transformer oil is important for the cooling, the lower the viscosity is the better is the cooling

Naphthenic oils have the advantage of being lower in viscosity at operating temperatures compared to paraffinic oils with the same viscosity at + 40° C.

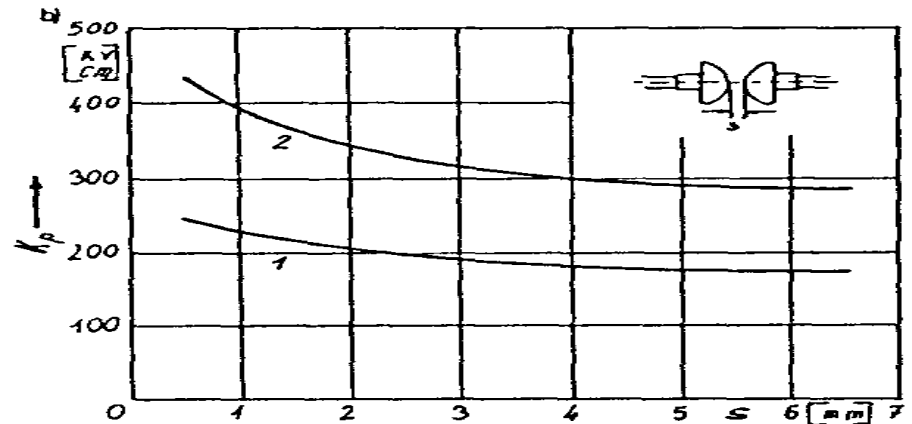
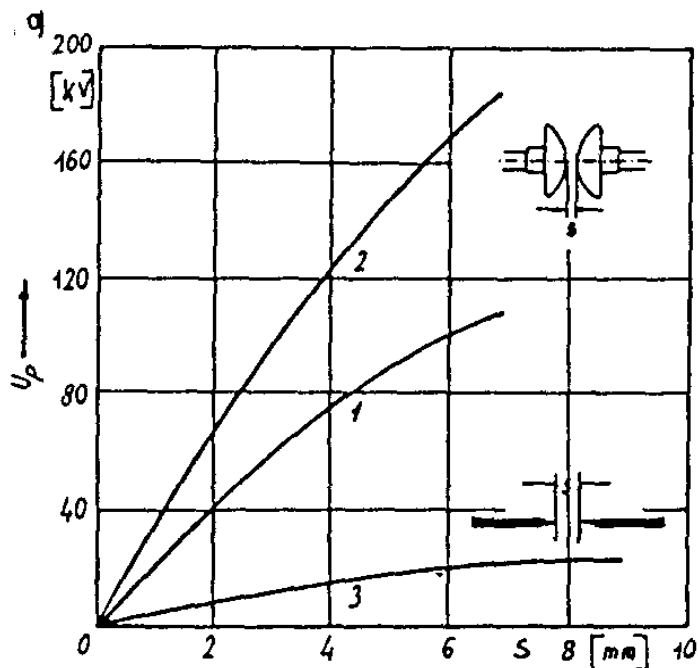
The property for viscosity change by temperature is known as viscosity index, VI. Low VI is good in cooling applications and high VI is good in lubrication applications.

Electrical insulation

Contaminants influencing the electrical breakdown voltage

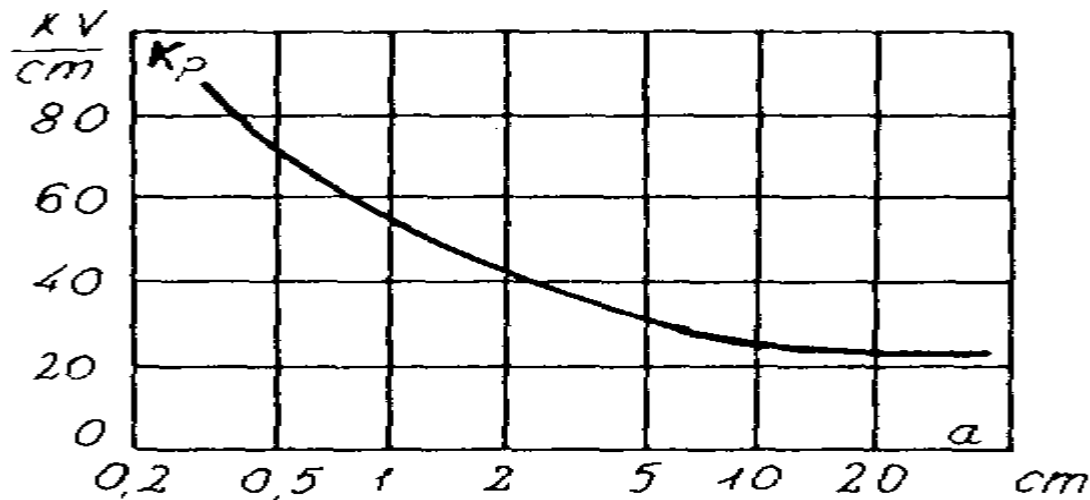


Zależność napięcia przebicia w funkcji odległości elektrod z rysunku na str. 11 i dla elektrod ostrzowych, dla oleju o 31 ppm (części na milion - ang. parts per million) zawartości wilgoci i temperaturach 20 °C lub 100 °C pokazano na rysunku 6.2a. Na rysunku 6.2b podano odpowiednie zależności dla natężenia pola elektrycznego odpowiadającego napięciu z rysunku 6.2a. Należy zauważyć, że rysunek 6.2 dotyczy oleju o raczej przeciętnych parametrach gdyż w nowoczesnych transformatorach na najwyższe moce i napięcia stosuje się oleje osuszone do zawartości poniżej 10 ppm wilgoci.



Rys. 6.2. Zależność napięcia przebicia U_p i odpowiadającego mu natężenia pola elektrycznego K_p od odległości elektrod s przy zawartości wody 31 ppm [21]: a) napięcie, b) natężenie pola elektrycznego;
 1 - w iskierniku znormalizowanym dla oleju o temperaturze 20°C, 2 - jw w temperaturze 100°C, 3 - w układzie elektrod ostrzowych przy 20°C

W układach o polu równomiernym wytrzymałość elektryczna oleju maleje (przy stałej powierzchni elektrod) ze wzrostem odległości elektrod a (rys. 6.3) zmierzając, w polu przemiennym, asymptotycznie do wartości 25 kV/cm (wartość skuteczna), co jest wartością niewiele większą niż wytrzymałość powietrza (21 kV/cm). Taki charakter zależności tłumaczy się wzrostem liczby zanieczyszczeń w rosnącej objętości oleju. Zanieczyszczenia ułatwiają bowiem inicjację i rozwój wyładowań.



Rys. 6.3. Zależność wytrzymałości elektrycznej K_p od odległości elektrod a w odstępie płaskim w oleju

PRZYKŁADY:

dla zawilgocenia oleju < 10 ppm

znormalizowanego napięcia przebicia > 50 kVs/2.5 mm

zanieczyszczeń < 50 μm

geometrii płyta – płyta i cylinder – płyta

napięcie przebicia można wyrazić wzorem:

$$U_{brakdown} = k \cdot d^m$$

gdzie: $U_{brakdown}$ jest w [kV]; d – odstęp w [mm]; m , k – stałe które zestawiono w tabeli:

Wykładnik „m” dla odstępów płyta-płyta i cylinder-płyta, dla napięcia DC:

Elektrody	Czas/średnica	m
płyta - płyta	5 s	0.560
	1 min	0.560
	30 min	0.584
cylinder - płyta	Φ 27.2 mm	0.519
	Φ 60.0 mm	0.512
	Φ 100.0 mm	0.604

Stała „m” jest dla napięcia DC znacząco mniejsza niż dla napięcia AC.

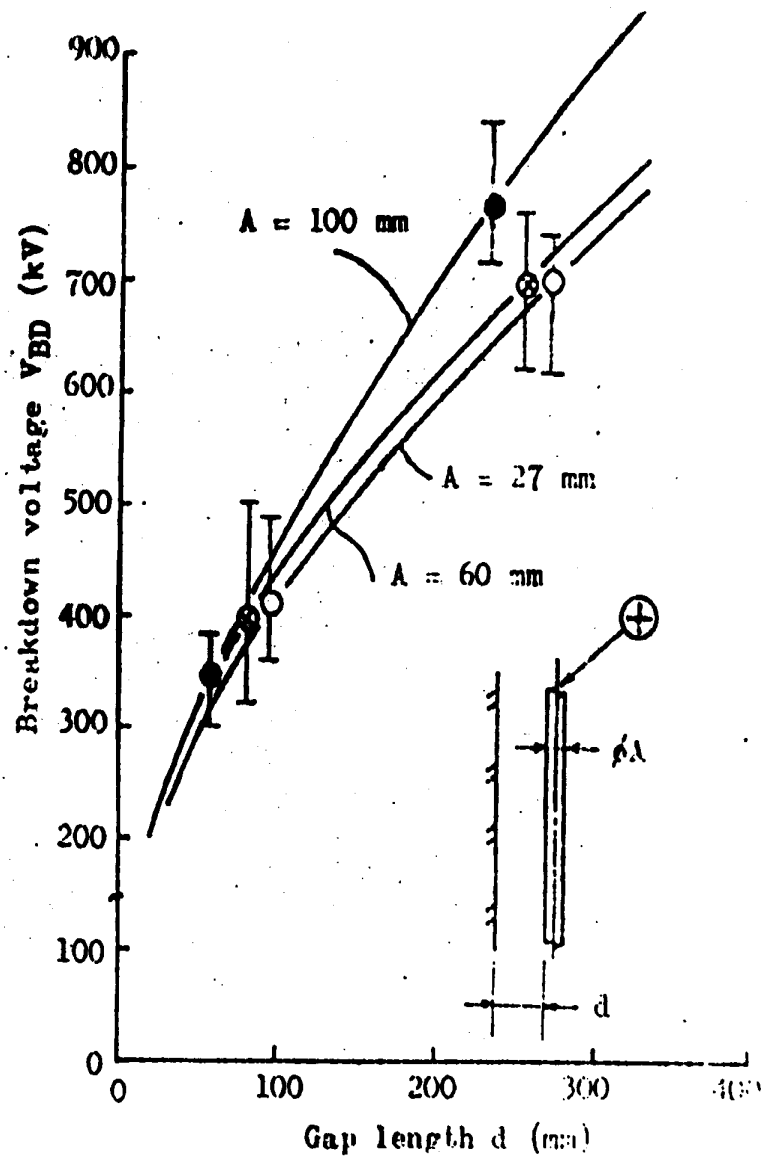


Fig. 6 Breakdown voltage for cylinder to plane gap

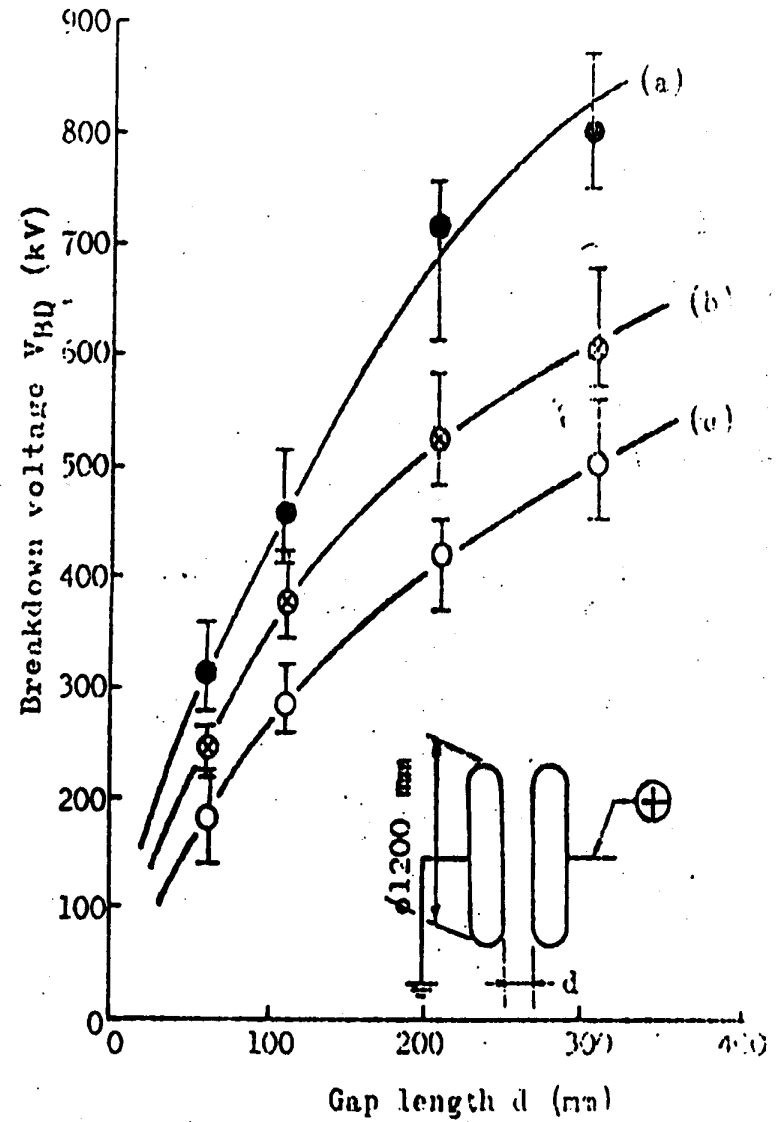


Fig. 5 Breakdown voltage for plane to plane gap

- (a) 5 seconds withstand method
- (b) 1 minute withstand method
- (c) 30 minutes withstand method

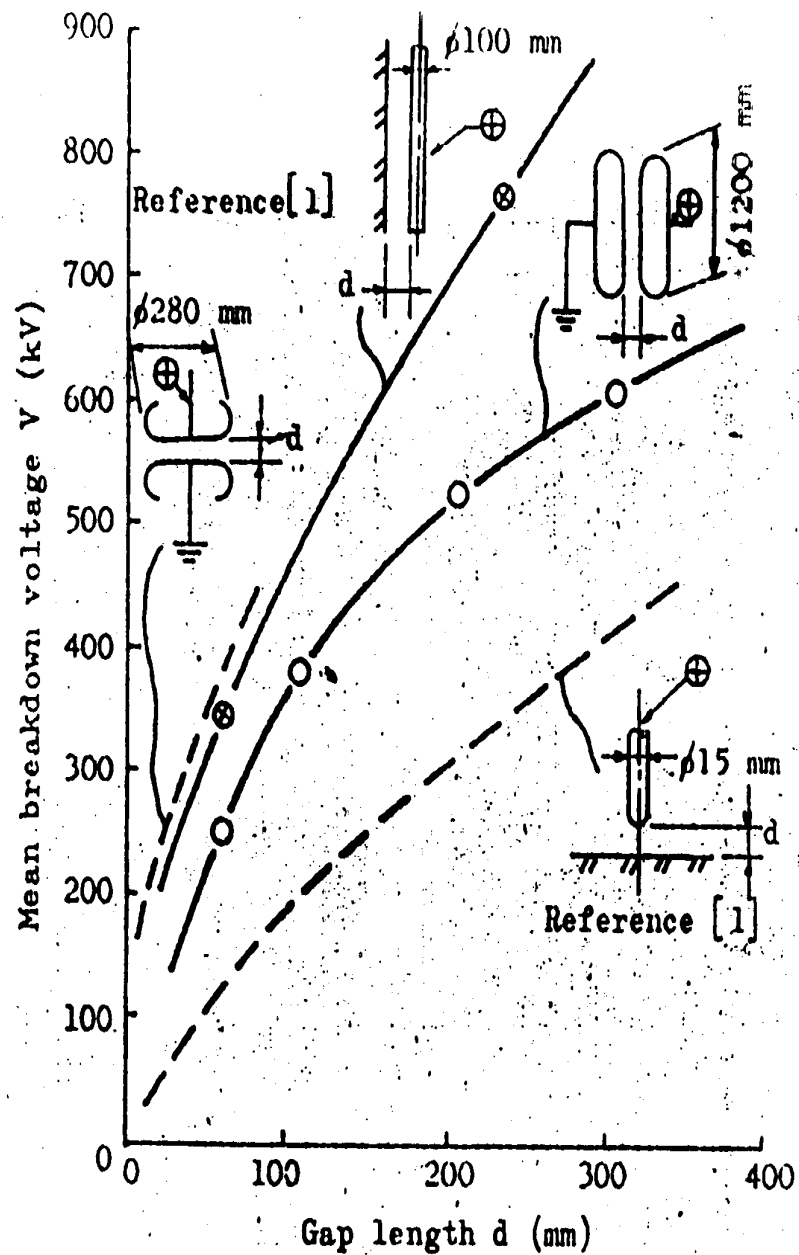


Fig. 7 Breakdown voltage for various gaps

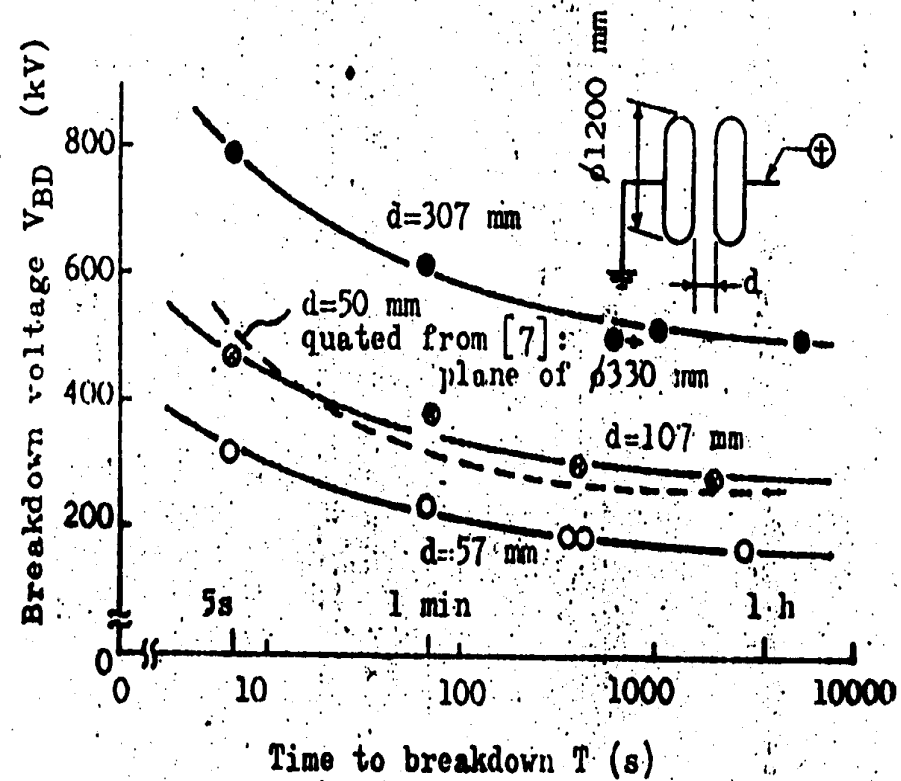


Fig. 8 Voltage-time curves for plane to plane gap

Jak wynika z rys. 8, powyżej czasu równego 5 min, napięcie przebicia DC stabilizuje się i dla dłuższych czasów maleje nieznacznie.

Decydująca rola przy rozwoju wyładowań w oleju przypisywana cząstkom zanieczyszczeń jest przyczyną sformułowania tzw. **efektu objętości** pozwalającego wyznaczyć wytrzymałość elektryczną odstępów olejowych w funkcji tzw. **objętości oleju szczególnie naprężanego**. Objętość tę definiuje się jako objętość między powierzchnią elektrody o większej krzywiznie (o mniejszym promieniu), a powierzchnią ekwigradientalną (o jednakowej wartości natężeń pola elektrycznego), o natężeniu pola równym 90% natężenia maksymalnego w układzie.

Efekt objętości jest słuszny dla układów o polach równomiernych i umiarkowanie nierównomiernych. Użyteczność tego efektu polega na możliwości eksperymentalnego określenia natężeń pola elektrycznego, przy których zachodzi przebicie w funkcji zdefiniowanej wyżej objętości a następnie wykorzystywaniu takich uniwersalnych zależności do projektowania układów izolacji olejowej o dowolnej konfiguracji elektrod, o ile tylko jest znana objętość oleju szczególnie naprężanego. Współcześnie w dobie numerycznego obliczania rozkładów pól elektrycznych obliczenie tej objętości nie stanowi problemu.

- Idea szczególnie naprężanej objętości oleju była zaproponowana przez WILSONA prawie czterdzieści lat temu. Lecz praktycznie została zastosowana, do szacowania wytrzymałości elektrycznej izolacji olejowej i papierowo-olejowej na początku lat 1980-tych.

- Idea ta dotyczy malenia średniej wytrzymałości elektrycznej komercyjnych dielektryków ciekłych wraz ze wzrostem logarytmu objętości dielektryka ciekłego w przestrzeniach szczególnie naprężanych elektrycznie.

- Objętość szczególnie naprężana była po raz pierwszy arbitralnie zdefiniowana przez WILSONA w polach równomiernych i słabo nierównomiernych dla wszystkich rodzajów napięć probierczych AC, DC, SI, LI.

- Definicja WILSONA definiuje objętość szczególnie naprężaną jako objętość pomiędzy powierzchnią elektrody o większej krzywiznie (o mniejszym promieniu – na której występują naprężenia maksymalne dla danego układu izolacyjnego), a powierzchnią **ekwigradientalną** (nie mylić z powierzchnią ekwipotencjalną) o naprężeniach wynoszących 0.9 naprężeń maksymalnych.
- MSOV - Mostly Stressed Oil Volume

- Definicja ta była wypracowana przez WILSONA poprzez porównanie wytrzymałości elektrycznej (naprężeń przebicia) w odstępie o polu równomiernym i w odstępie o polu nierównomiernym.
- Założeniem była równość uśrednionych statystycznie naprężeń przebicia w obu porównywanych układach; w polu równomiernym jest to całkowita objętość oleju między elektrodami, a w polu nierównomiernym jest to objętość do 90%-owej linii ekwigradientalnej.

- WILSON stwierdził również, że MSOV oparta na 90%-owej powierzchni **ekwigradientalnej** jest jedynie pewnym uproszczeniem i uśrednieniem, które jest jednak z praktycznego punktu widzenia wystarczająco dokładne, szczególnie dla oleju transformatorowego dla którego występują trudności w zakresie zdefiniowania jego właściwości i dużej zależności wytrzymałości od stosunkowo niewielkich zmian czystości fizycznej i chemicznej tego dielektryka.

- Krzywe eksperymentalne

$$E_{50} = f(\log V_{MSOV})$$

są dostępne i umożliwiają szacowanie 50%-owej wytrzymałości odstępów olejowych w oparciu o ich geometrię. Założeniem jest, że stosowany olej transformatorowy ma czystość na poziomie zbliżonym do czystości oleju dla którego wykonano badania eksperymentalne.

Na kolejnych rysunkach podano przykład omówionych zależności dla oleju transformatorowego o stopniu oczyszczenia odpowiadającym wymaganiom dla transformatorów najwyższych napięć. Rysunek 6.4a dotyczy maksymalnych wartości natężeń pola odpowiadających 50% prawdopodobieństwa zaistnienia przebicia. Krzywą z rysunku 6.4a można aproksymować zależnością (6.1). Na rysunku 6.4b podano wykres maksymalnych natężeń pola elektrycznego w funkcji objętości szczególnie naprężanego oleju przy prawdopodobieństwie zaistnienia przebicia bliskim 0%. Zatem krzywe z rysunku 6.4b mogą być stosowane do szacowania wytrzymałości elektrycznej odstępów olejowych.

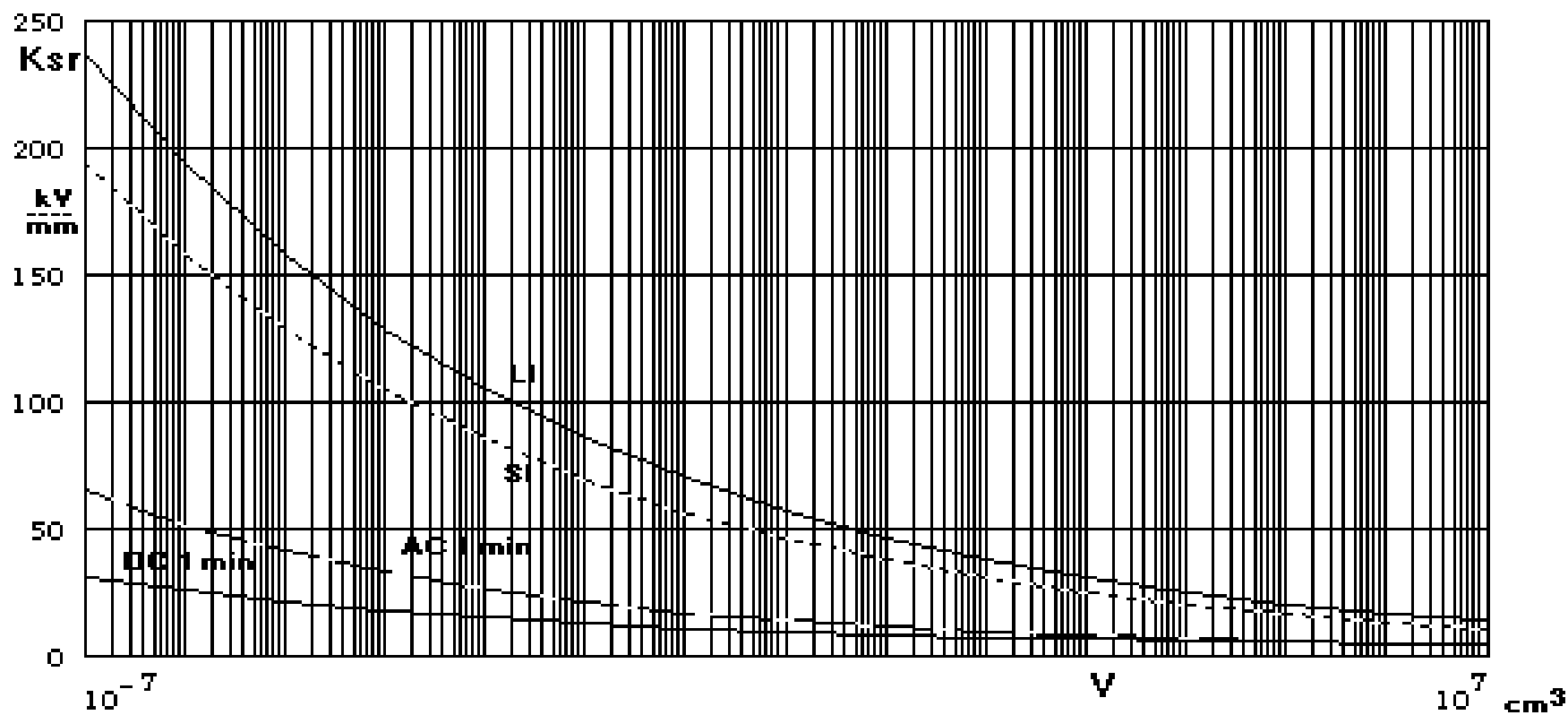
$$K_{\max} = A \cdot V_{ol}^{-m} + B \quad (6.1)$$

gdzie: K_{\max} - natężenia pola elektrycznego, przy których zachodzi przebicie odstepu olejowego; V_{ol} - objętość oleju szczególnie naprężanego; A , B , m - współczynniki podane w tabeli 16.

T a b e l a 16
Współczynniki do równania (6.1).

Rodzaj napięcia	A	m	B
Udar piorunowy 1.2/50 μ s	57.0	0.0885	0.0
Udar łączeniowy 250/2500 μ s	46.0	0.0893	0.0
Napięcie przemienne 3÷1 kV/s	16.0	0.1050	1.5
Napięcie przemienne 1 min	11.5	0.1050	2.5
Napięcie przemienne 30 min	8.0	0.1050	3.0

a)



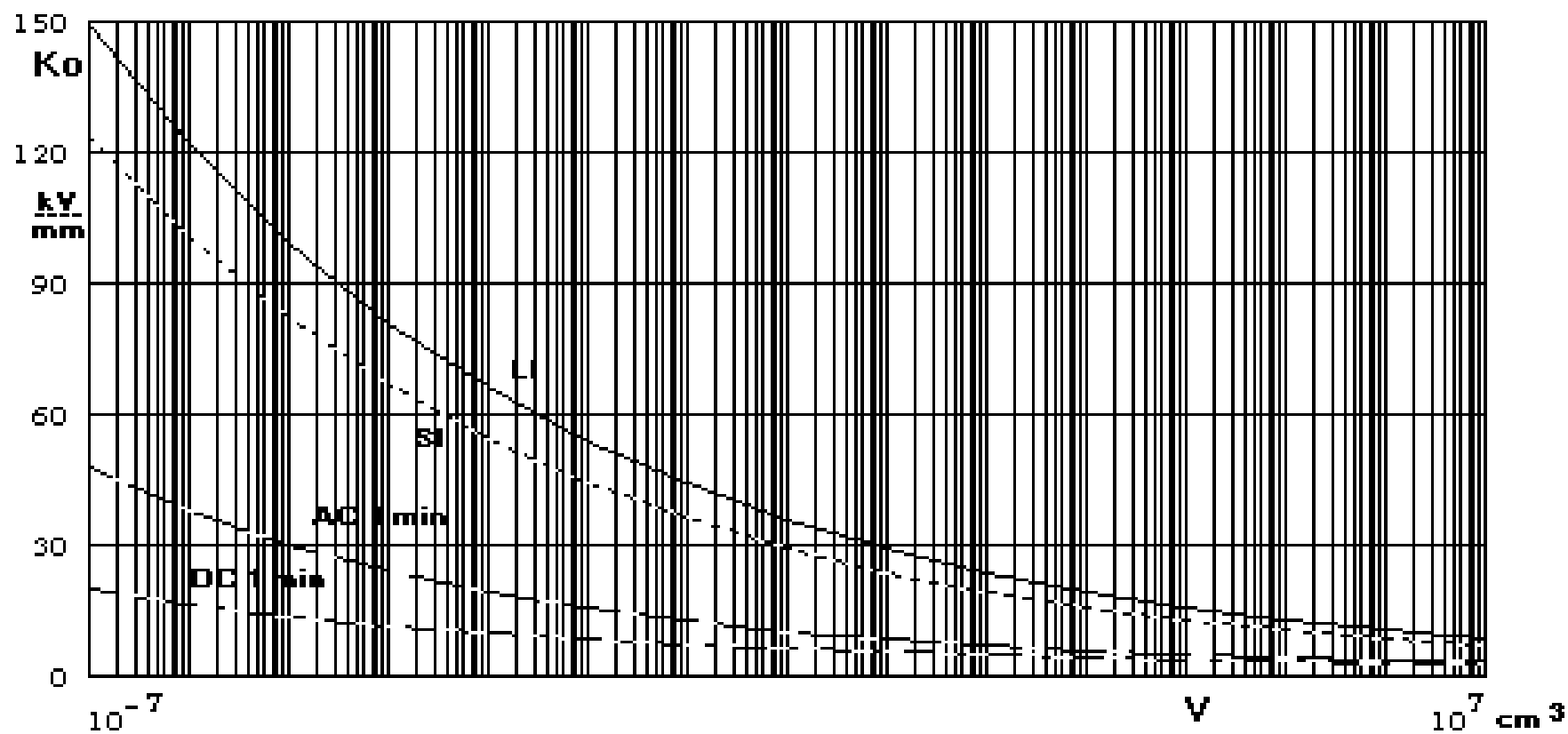
Znajomość wartości E_{50} lub odpowiedniej wartości U_{50} nie jest informacją wystarczającą do projektowania izolacji. Konieczna jest do tego znajomość wartości E_0 oraz U_0 odpowiadających zerowemu prawdopodobieństwu zaistnienia przebicia.

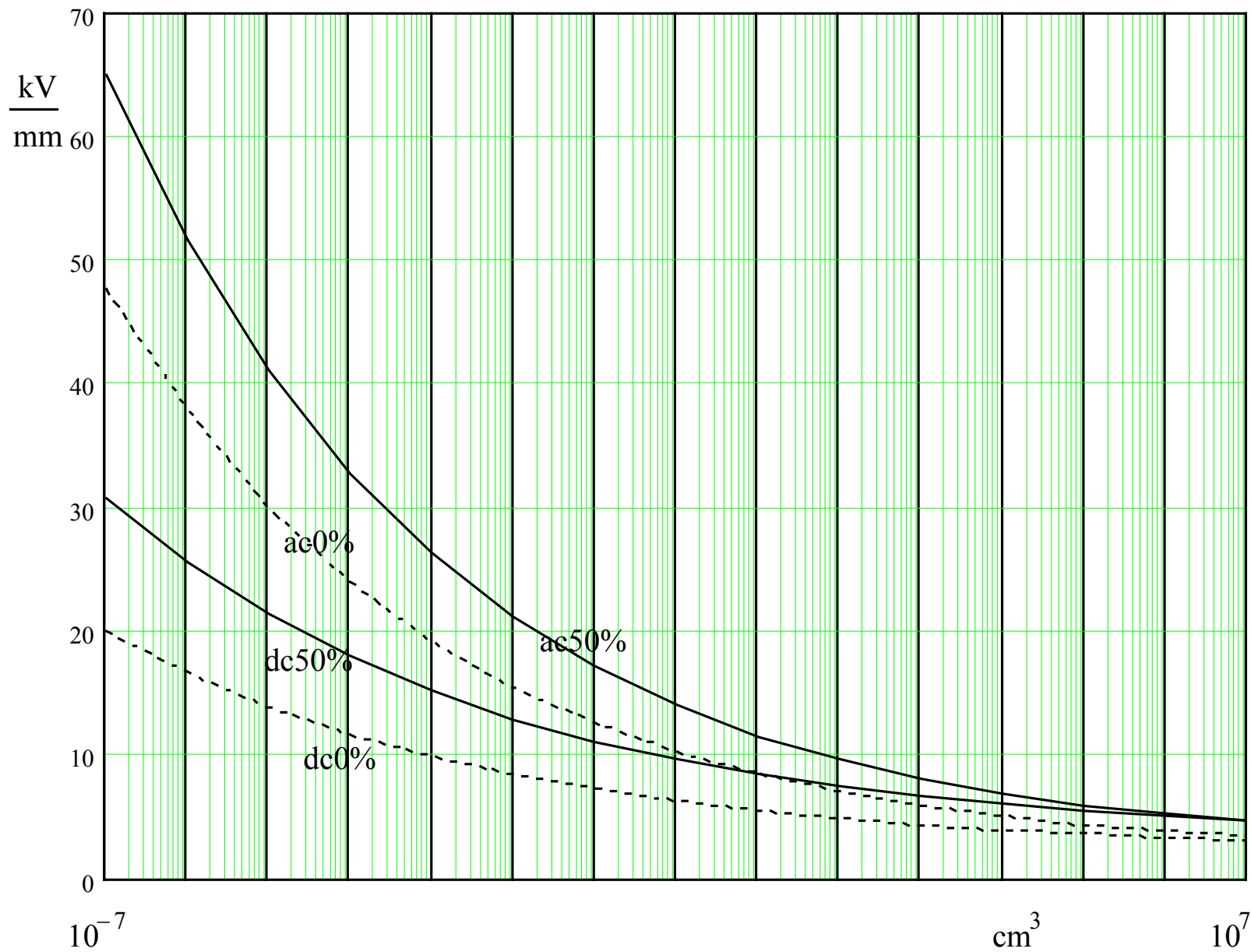
Zależności takie opracowano w Zakładzie Wysokich Napięć przy następujących uwarunkowaniach:

- wykorzystano dostępne dane literaturowe, głównie japońskie, dotyczące olejów transformatorowych o stopniu czystości odpowiadającym wymaganiom dla transformatorów grupy I według określeń polskich;
- zweryfikowano tak uzyskane krzywe dla izolacji papierowo-olejowej, podobnej do izolacji międzycewkowej.

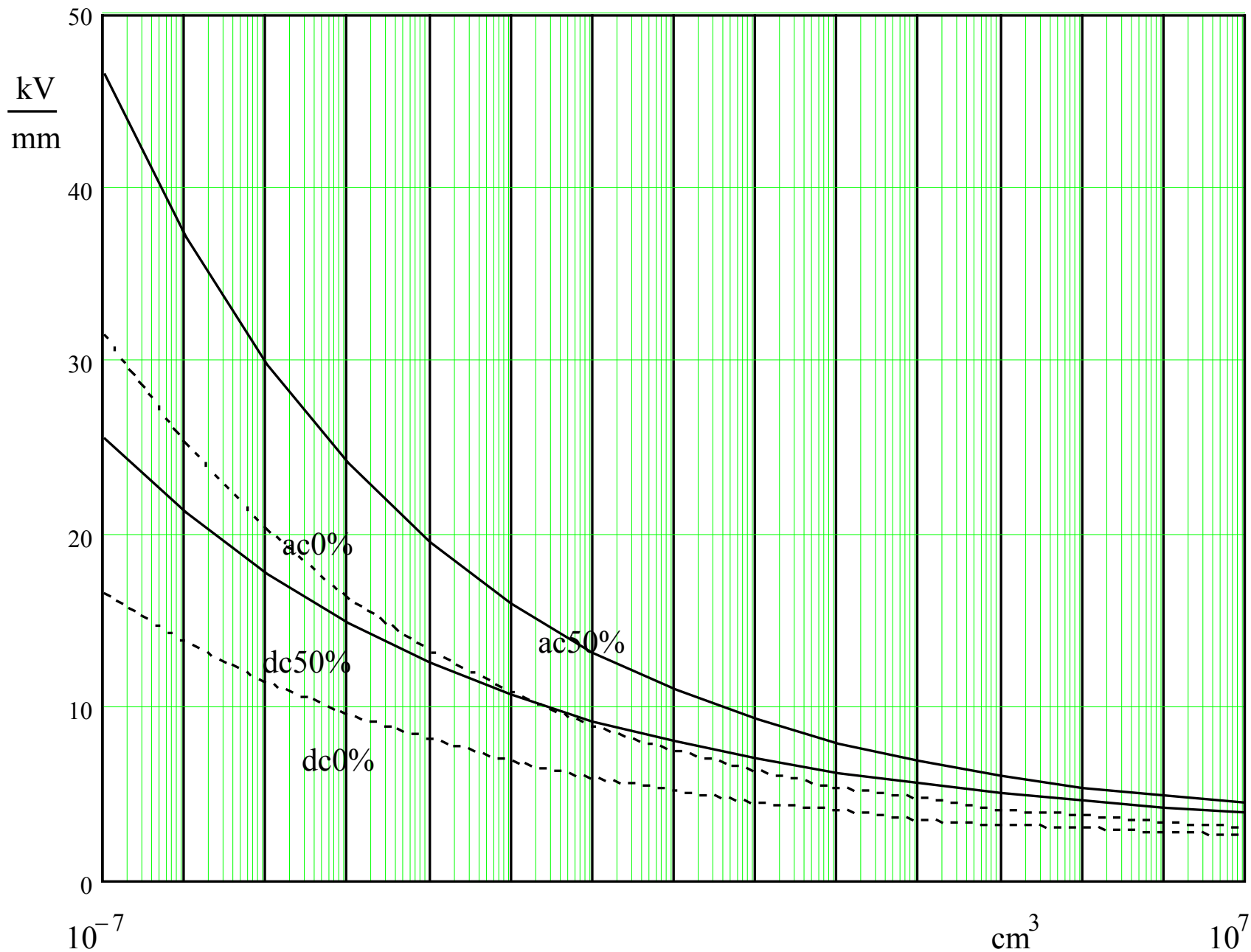
Wyniki prezentują kolejne wykresy:

b)

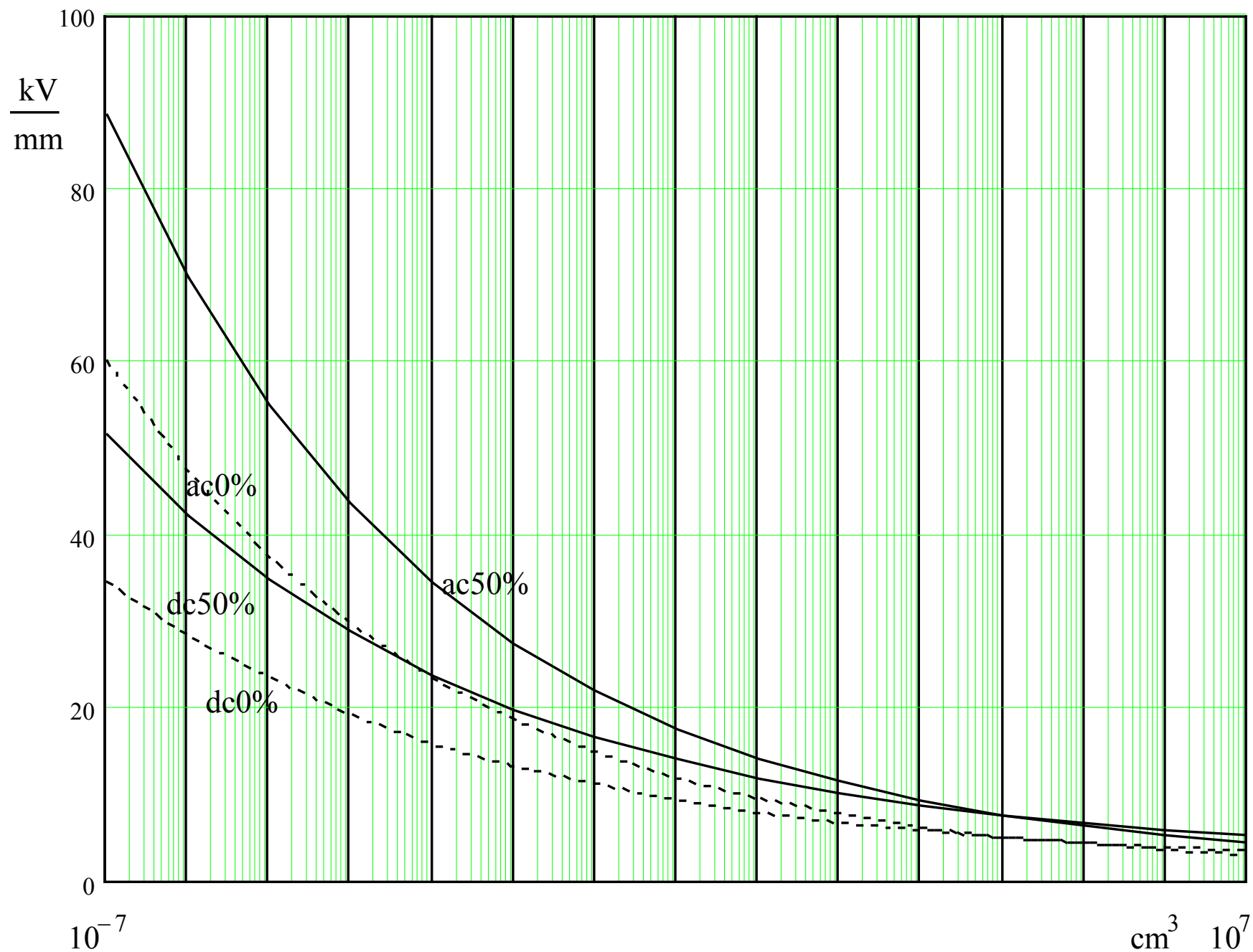




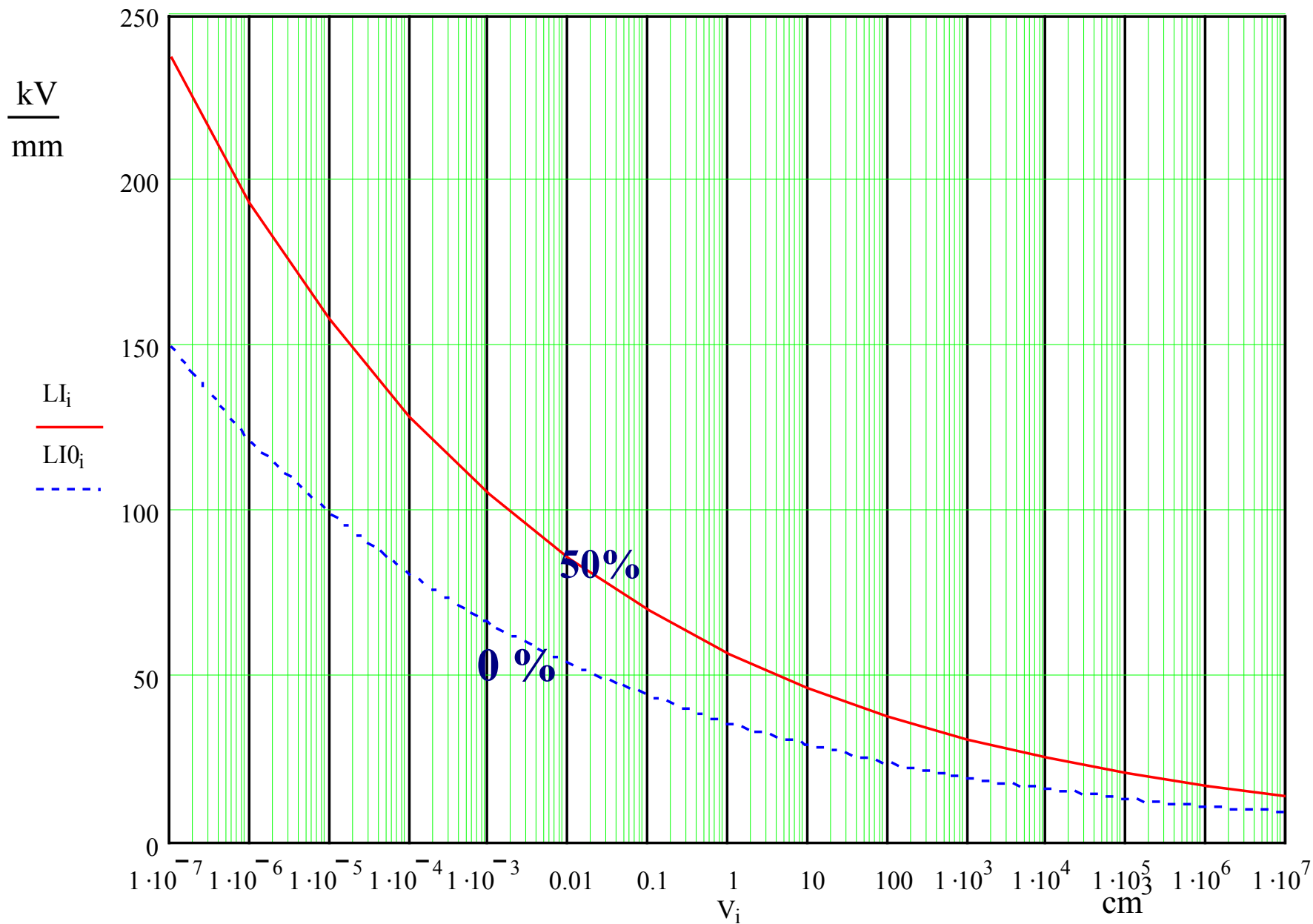
Rys. 5a. Efekt objętości - wytrzymałość jednorodna



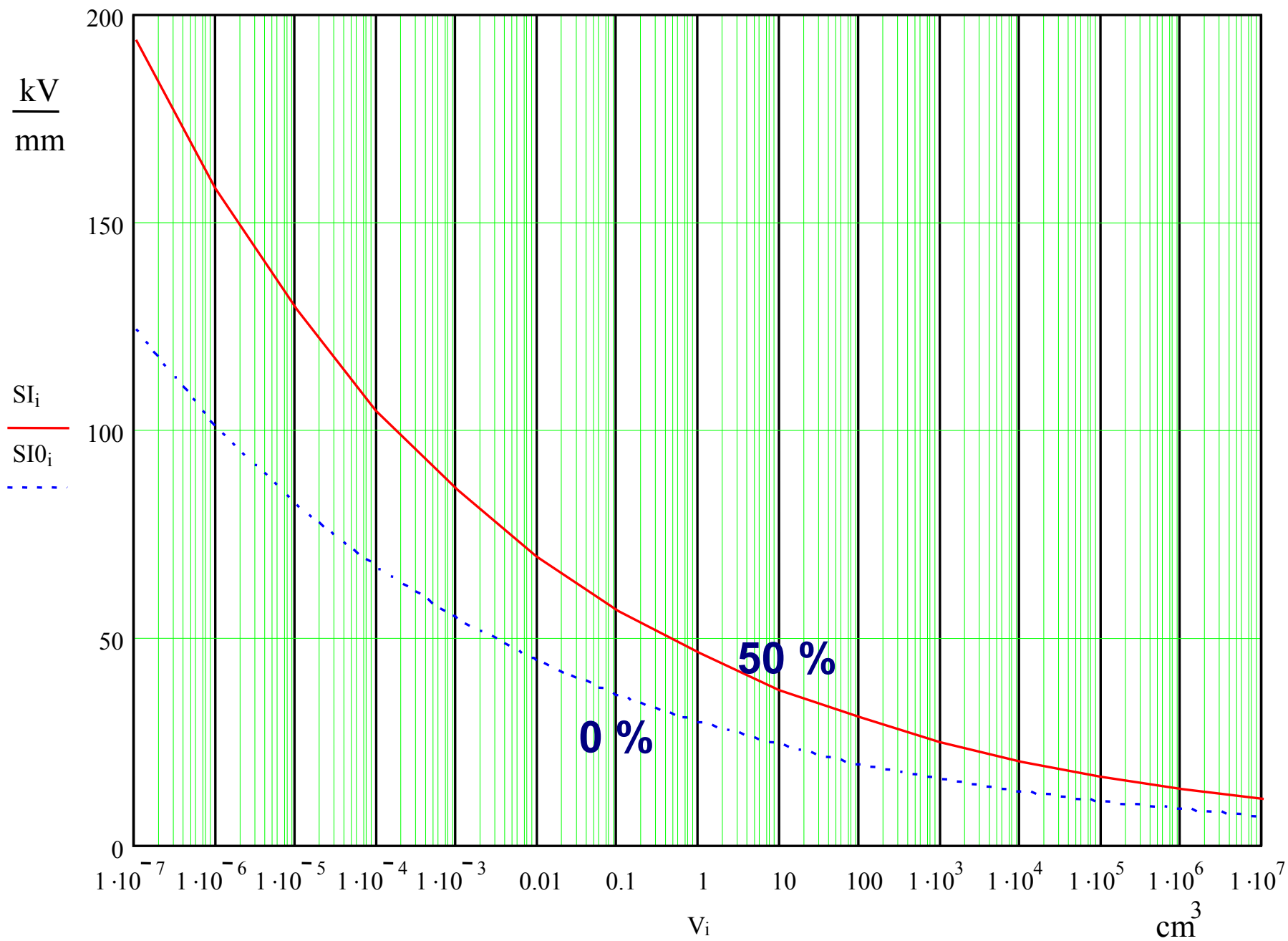
Rys. 5b. Efekt objętości - wytrzymałość trzydziestominutowa



Rys. 5c. Efekt objętości - ciągły wzrost napięcia



Rys. 5d. Efekt objętości - uder piorunowy



Rys. 5e. Efekt objętości - udar łączeniowy

WNIOSKI

1. Efekt objętości jest słuszny nie tylko dla izolacji olejowej ale także dla izolacji papierowo-olejowej dla przypadku odstępów izolacyjnych dla których o wytrzymałości decyduje odstęp olejowy.

2. Wykorzystując wykresy pokazane na rys. 5a do 5e można wysnuć dodatkowe wnioski:

- wykreślając iloraz wytrzymałości LI/SI można stwierdzić, że krotność ta maleje dla dużych objętości MSOV;
- gdyby wykreślić charakterystyki napięcie-czas ($U-t$) dla różnych wartości MSOV to charakterystyki te będą różne.

3. Ze wzrostem objętości szczególnie naprężanej MSOV naprężenia przebicia wykazują tendencję do asymptotycznego osiągnięcia wartości ustalonej, poniżej której wytrzymałość już dalej nie maleje. Te asymptoty zostały obliczone przy założeniu, że napięcie przebicia podlega rozkładowi Weibulla i stąd obowiązuje wzór:

$$E_w = E_0 = E_{50} - 3.17 \sigma$$

gdzie: E_{50} – mediana naprężeń przebicia, σ - odchylenie standardowe naprężeń (napięcie przebicia).

Tak obliczone dolne granice wytrzymałości wynoszą odpowiednio:

Graniczne wartości wytrzymałości:

Rodzaj napięcia	Wartość	Jednostki
LI	8.6 or 8	kV/mm
SI	7	kV/mm
AC cont	3.5	kV/mm
AC 1 min	3.4 or 2÷3	kV/mm
AC 30 min	3	kV/mm
DC cont	3.5	kV/mm
DC 1 min	3.0	kV/mm
DC 30 min	2.6	kV/mm

Te limity zależą od stopnia czystości oleju w ten sposób, że jeśli stopień czystości jest lepszy to asymptotyczna objętość MSOV jest większa, lecz graniczna wytrzymałość pozostaje taka sama.

Podane wartości są słuszne dla współczesnych wysokonapięciowych transformatorów energetycznych, dla których czystość oleju jest ściśle kontrolowana.

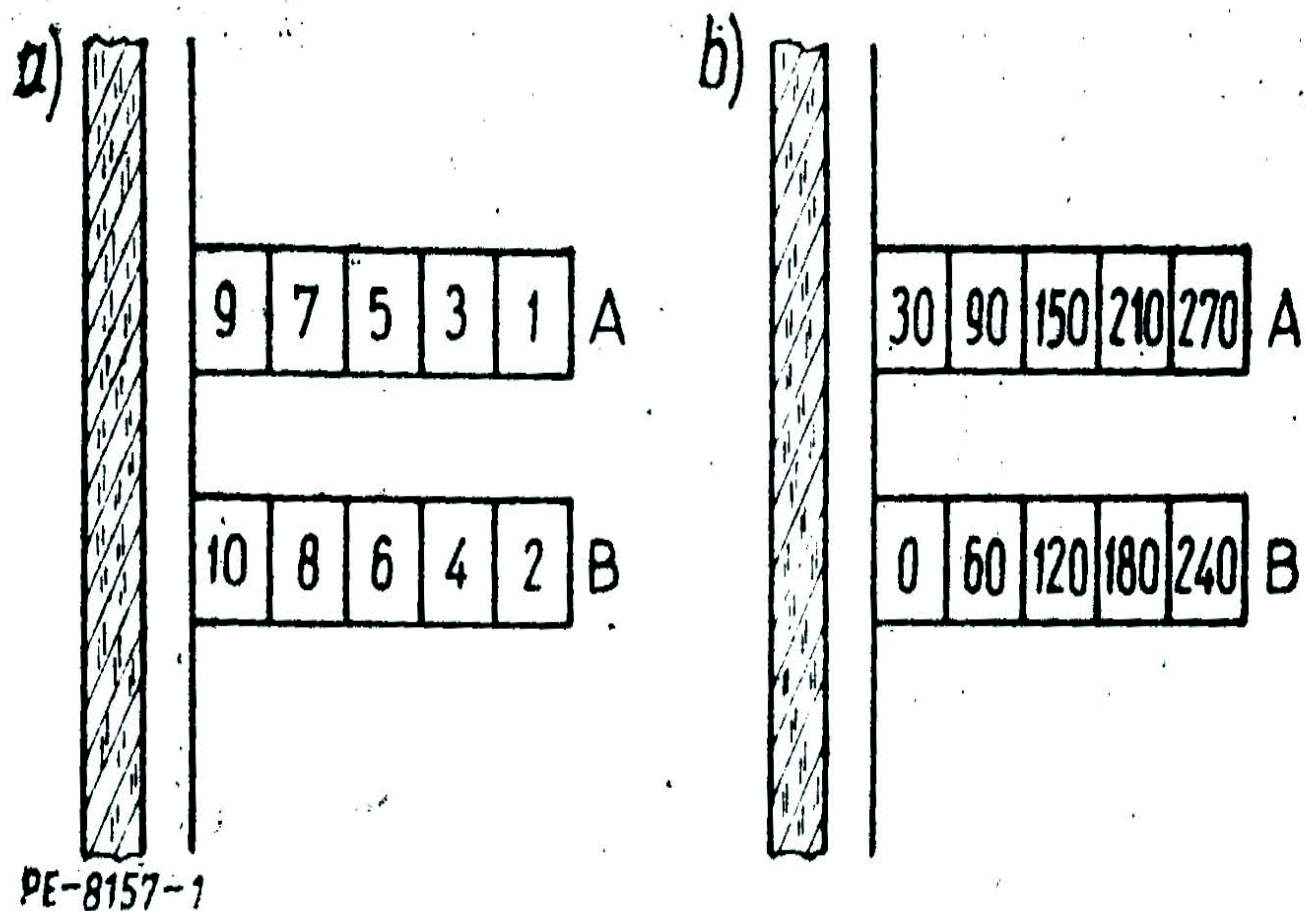
PRZYKŁAD

Uzwojenie śrubowe

Rozważmy uzwojenie regulacyjne typu „podwójna śruba”. Stopnie regulacji są utworzone przez poszczególne przewody składowe uzwojenia, którego fragment przedstawiono na rys. 1.

Podczas normalnej pracy transformatora między kolejnymi przewodami leżącymi obok siebie występuje napięcie dwóch stopni, natomiast między przewodami leżącymi nad sobą, rozdzielonymi kanałem międzycewkowym, występuje napięcie jednego stopnia.

Podobna sytuacja występuje podczas prób wytrzymałości elektrycznej, w tym także podczas prób wytrzymałości elektrycznej piorunowej. Podczas tej ostatniej próby można przyjąć, że różnica potencjałów pomiędzy poszczególnymi zwojami, na całej wysokości uzwojenia, jest jednakowa. Zakładając przykładowo, że podczas próby LI napięcie między zwojami o kolejnych numerach (1-2, 3-4, ... , 9-10) wynosi 30 kV oraz przyjmując, że zwój nr 10 jest uziemiony, uzyskuje się rozkład potencjałów jak na rys. 1b.



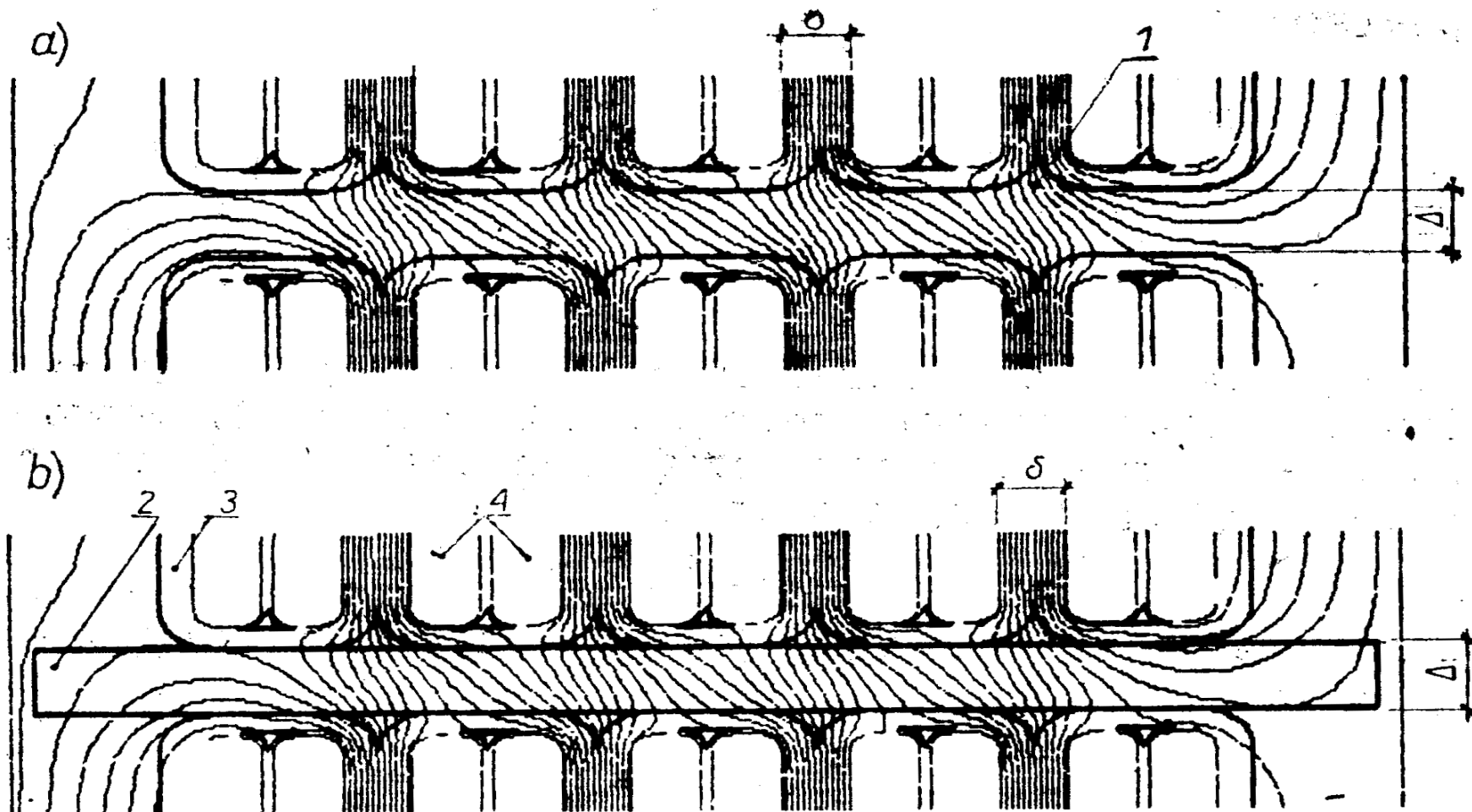
Rys. 1. Układ fragmentu uzwojenia regulacyjnego śrubowego: a) wzajemne położenie przewodów stanowiących stopnie regulacyjne [3]; b) przykład rozkładu potencjałów na poszczególne stopnie regulacyjne przy próbie udarem napięciowym piorunowym, w kV

Zwoje 1, 3, 5, 7, 9 należą do cewki uzwojenia śrubowego A, zwoje 2, 4, 6, 8, 10 należą do cewki uzwojenia śrubowego B

Cechą charakterystyczną rozważanego uzwojenia śrubowego jest występowanie dużej wartości napięcia na izolacji zwojowej, przy czym napięcie to występuje na całej wysokości uzwojenia lub inaczej na całej długości izolacji międzyzwojowej. Należy więc sprawdzić, czy wytrzymałość elektryczna takiego układu izolacyjnego zależy nie tylko od grubości izolacji zwojowej, lecz także od średnicy uzwojenia i długości przewodu (liczby zwojów) w jednym stopniu regulacji.

Pole elektryczne w kanale międzycewkowym

Dla dwóch cewek (jak na rys. 1b) obliczono, przy użyciu metody elementów skończonych, rozkład pola elektrycznego w kanale międzycewkowym. Przykład wydruku linii ekwipotencjalnych pokazano na rys. 2.



PE-8157-2

Rys. 2. Obraz linii ekwipotencjalnych w kanale międzycewkowym podwójnego uzwojenia śrubowego: a) bez przekładki międzycewkowej; b) z przekładką międzycewkową. Każdy zwoj uzwojenia nawijany jest dwoma przewodami równoległymi (przewodem bliźniaczym); linie ekwipotencjalne co 2°; δ — grubość dwustronna izolacji zwojowej (izolacja międzyzwojowa); Δ — szerokość kanału międzycewkowego; 1 — klin olejowy; 2 — przekładka preszpanowa; 3 — obwój papierowy; 4 — przewody bliźniacze

Jak wynika z tego rysunku, maksymalne zagęszczenie linii ekwipotencjalnych (a więc i maksymalne natężenie pola) występuje w klinach olejowych między sąsiednimi zwojami cewki, niezależnie od tego, czy w kanale między cewkami znajduje się przekładka preszpanowa czy nie.

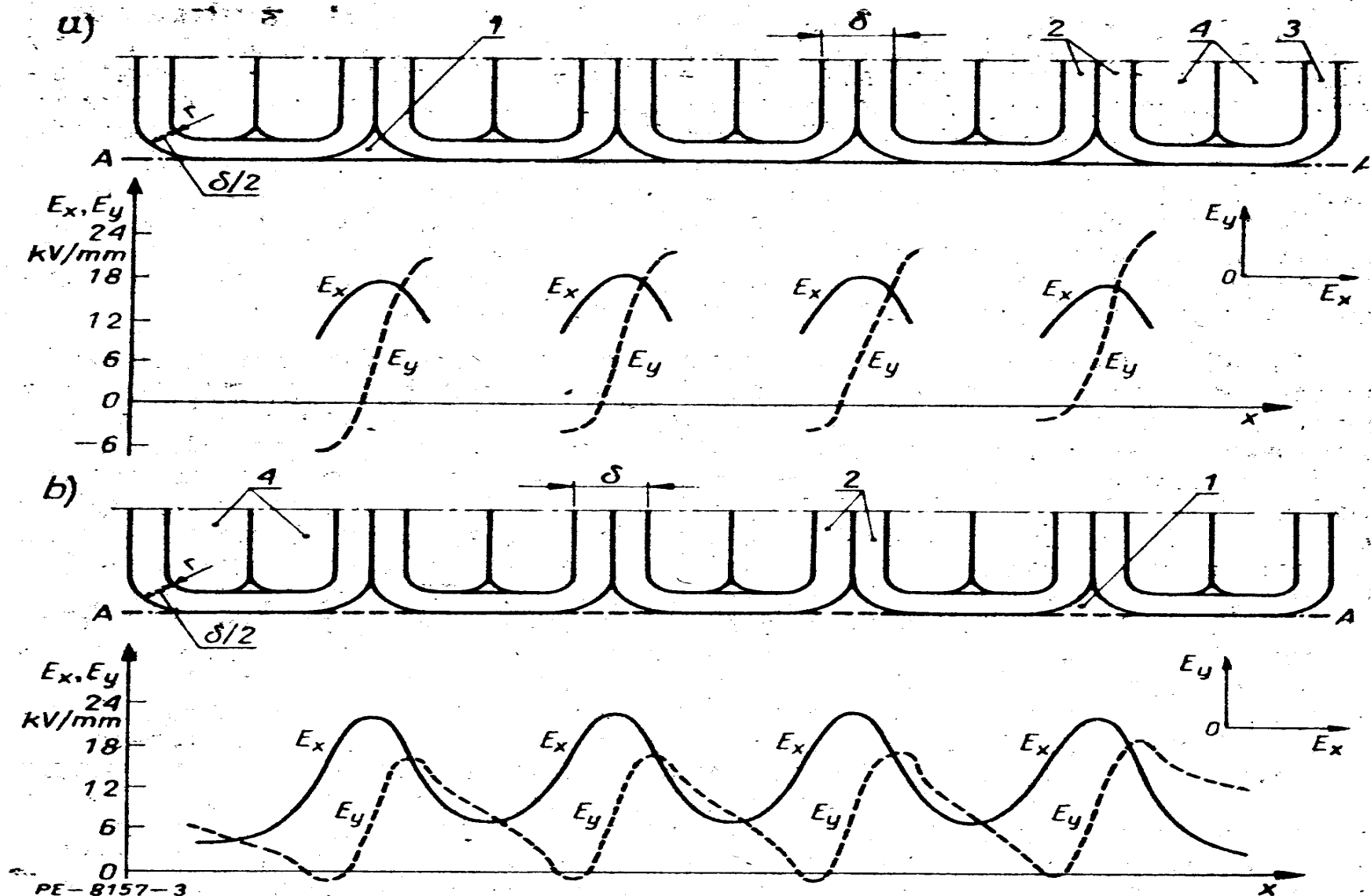
Na rys. 3 wykreślono przebieg natężenia pola elektrycznego wzdłuż powierzchni stycznej do przewodów cewki. Naprężenia odpowiadają wartościom potencjałów z rys. 1b. Do obliczeń przyjęto przenikalności elektryczne względne papieru $\varepsilon_p = 3.5$, oraz oleju $\varepsilon_o = 2.2$ i preszpanu $\varepsilon_{pr} = 4.0$.

Zjawisko decydującego wpływu naprężeń w klinach olejowych na wytrzymałość izolacji zwojowej jest znane od dawna, a zwiększenie tych naprężeń w stosunku do naprężeń pola równomiernego

$$U/\delta$$

(gdzie δ jest dwustronną grubością izolacji zwojowej w [mm])

w środkowej (płaskiej) części przewodu, szacuje się na około 40 %



Rys. 3. Naprężenia na powierzchni stycznej A—A do przewodów cewki: a) w przekroju z międzycewkową przekładką preszpanową; b) w przekroju bez przekładki preszpanowej
 $\delta/2$ — odstęp izolacji zwojowej, r — promień zaokrąglenia przewodu
 1 — klin olejowy; 2 — izolacja międzyzwojowa; 3 — obwód papierowy (izolacja zwojowa); 4 — przewody bliźniacze

Z analiz numerycznych wynika, że natężenia maksymalne w klinach olejowych można oszacować z zależności:

$$E_k = \frac{2 \cdot \Delta U}{\delta} \cdot \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_o} \quad (1)$$

gdzie: ΔU – napięcie na jednym stopniu regulacji w [kV]; δ jest dwustronną grubością izolacji zwojowej w [mm];

Przy założonych wartościach: $\Delta U = 30$ kV, $\varepsilon_p = 3.5$, oraz oleju $\varepsilon_o = 2.2$ i $\delta = 2$ mm uzyskuje się $E_k = 47.7$ [kV/mm].

Zgodnie z wynikami badań modelowych [1], wytrzymałość elektryczna odstępów izolacji międzyzwojowej, w [kV], wynosi:

$$U_{dop} = 55 \cdot \delta^{0.9} \quad (2)$$

Z tego wzoru, dla dwustronnej grubości izolacji zwojowej $\delta = 2$ mm, napięcie $U_{dop} \approx 103$ kV. Wartość ta, przy pominięciu wymiarów wzdłużnych układu izolacyjnego, wskazuje na istnienie bardzo dużego zapasu izolacji przedstawionej na rys. 2.

Objętość oleju szczególnie naprężanego

Zakładając, że powierzchnią elektrody pod napięciem jest zewnętrzna powierzchnia izolacji zwojowej (obwodu papierowego) przewodów uzwojenia obliczono objętość oleju szczególnie naprężanego i stwierdzono, że przekrój tej objętości można oszacować za pomocą wzoru:

$$S_{MSOV} = k \cdot \left(r + \frac{\delta}{2} \right)^{2.2} \cdot 10^{-5} \quad [cm^2] \quad (3)$$

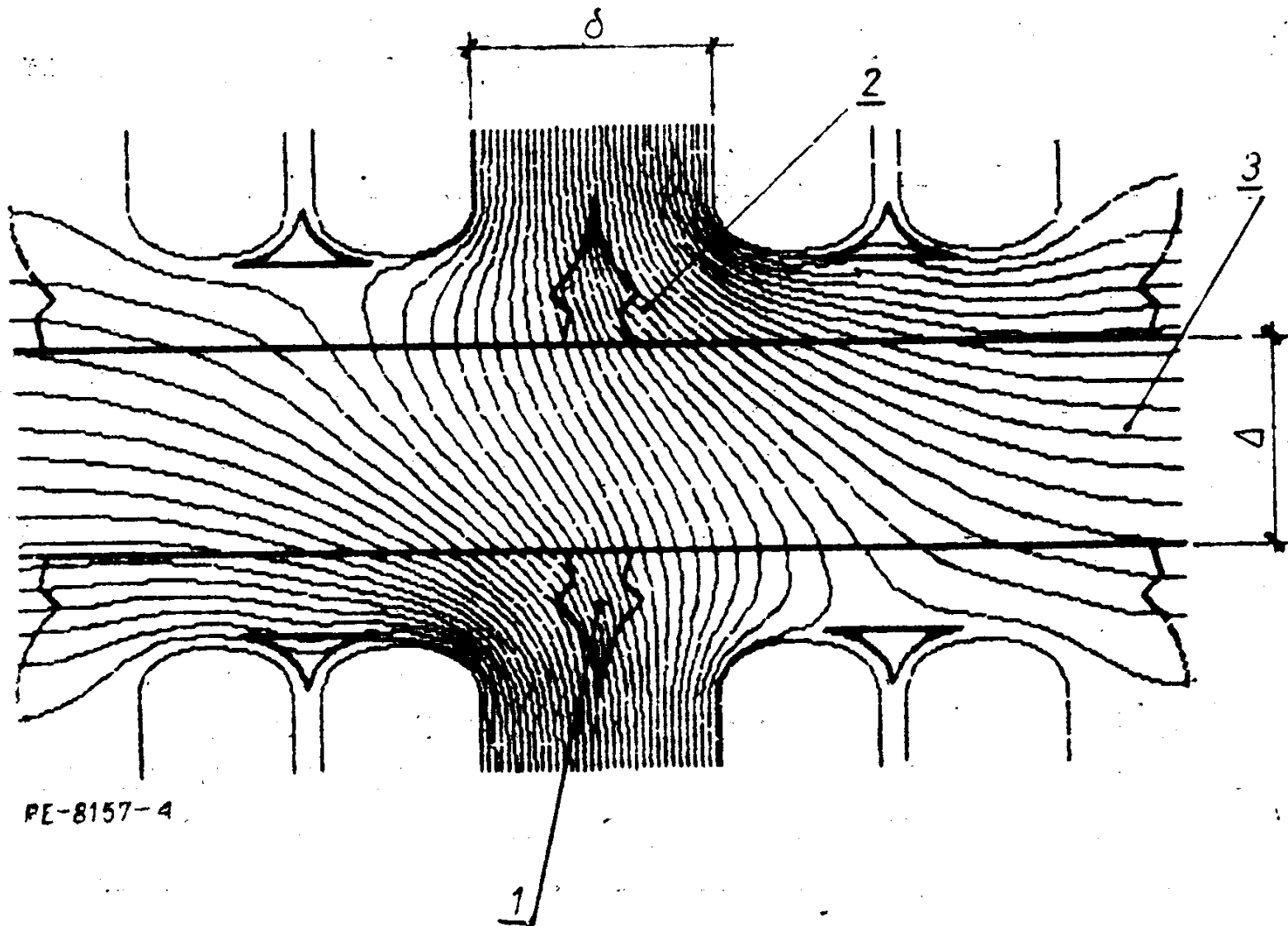
gdzie: k- współczynnik eksperymentalny; r – promień zaokrąglenia przewodu [mm],
 $\delta = 2 \text{ mm}$.

Przykładowo dla typowych wymiarów $r = 1$ mm, i $\delta = 2$ mm oraz przy $k = 1.8$ uzyskano $S_{\text{MSOV}} = 8.3 \cdot 10^{-5}$ cm². Przyjmując, że naprężenia maksymalne występowały w niewielkim fragmencie uzwojenia, np. na długości 10 cm, wzdłuż przewodu uzwojenia i tylko w pojedynczym klinie olejowym, otrzymuje się objętość oleju szczególnie naprężanego $V_{\text{MSOV}} = 10 S_{\text{MSOV}} = 8.3 \cdot 10^{-4}$ cm³. Dla tej wartości, z krzywych efektu objętości, dla naprężeń wytrzymywanych w oleju, dla napięć LI otrzymuje się $E_w = 67.3$ kV/mm.

Na podstawie wzoru (1), przy uprzednio założonych danych $\Delta U = \Delta U_w$, $U_{\text{dop}} = 2 \Delta U_w = 84.7$ kV. Jest to wartość nadal stosunkowo duża, ale oczywiście nieco mniejsza niż uzyskana ze wzoru (2) aproksymującego wyniki badań modelowych dla izolacji zwojowej [1]. W badaniach modelowych, z których wynika wzór (2) zajmowano się bowiem napięciem przebicia, a nie wyładowaniami niezupełnymi w klinach olejowych, na czym jest oparta teoria MSOV.

Należy zwrócić także uwagę na to, że ze zmniejszeniem promienia zaokrąglenia krawędzi przewodu „ r ” zmniejsza się również przekrój S_{MSOV} objętości oleju szczególnie naprężanego. W skrajnym przypadku, w którym $r = 0$, kliny olejowe znikają i o wytrzymałości decyduje cała objętość izolacji w kanale między cewkami: czyli odpowiednia objętość oleju i lub papieru i preszpanu w poszczególnych przekrojach kanału (bez przekładki lub z przekładką preszpanową). W rzeczywistych konstrukcjach uzwojeń prasowanych odpowiednio dobranymi siłami, kliny olejowe izolacji międzycewkowej mogą odkształcać się w miejscach, w których kanał międzycewkowy jest wypełniony przekładką preszpanową.

Przykład takiego odkształcenia pokazano na rys. 4. Z numerycznych obliczeń rozkładu pola elektrycznego wynika jednak, że w takich przypadkach zarówno zmiany naprężeń maksymalnych jak i zmiany przekroju objętości MSOV są niewielkie, mieszczące się w granicach błędu obliczeń. Zatem to zjawisko fizyczne nie ma wpływu na rozumowanie oparte o MSOV.



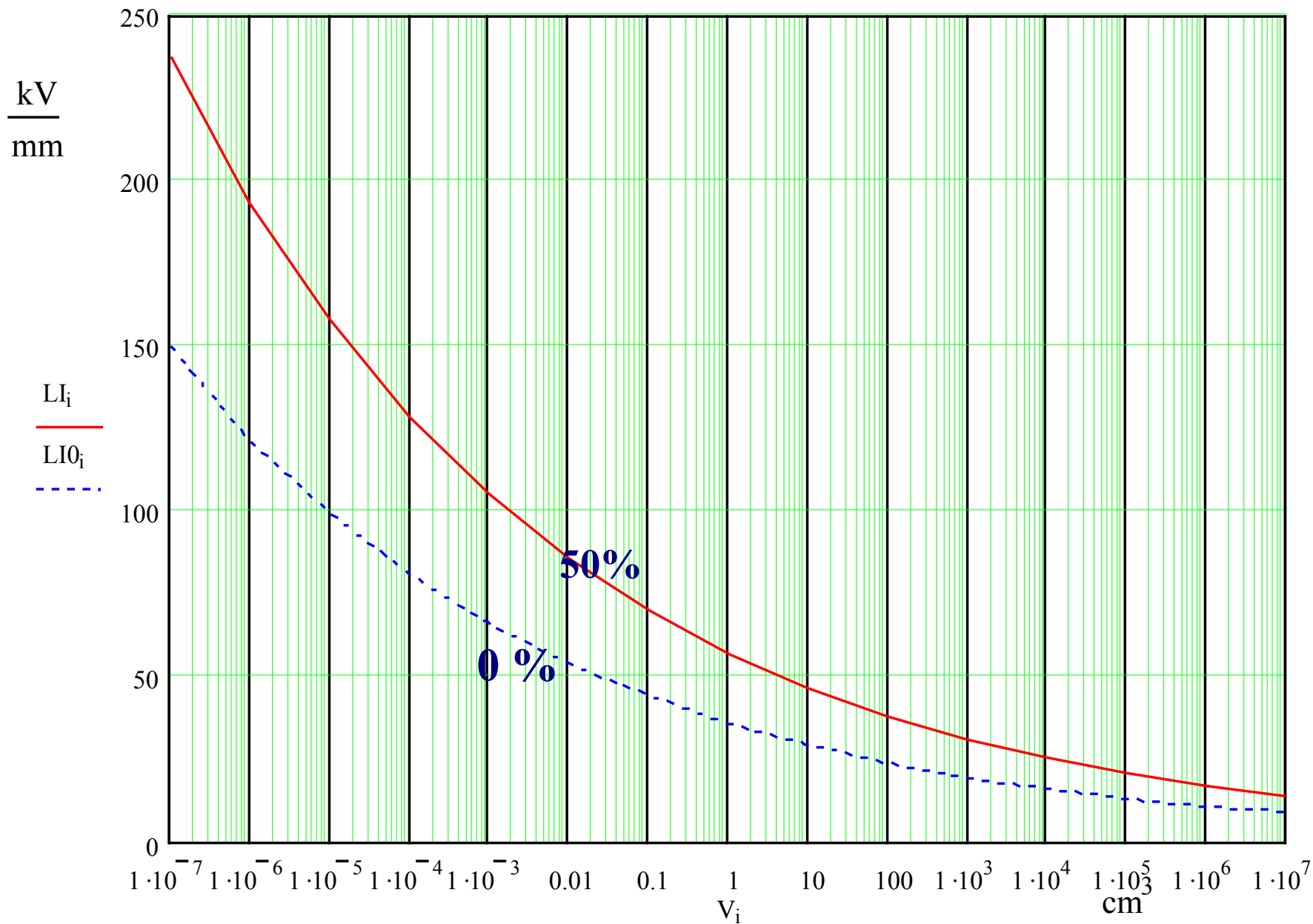
Rys. 4. Przykład odkształcenia izolacji preszpanowej w klinie olejowym izolacji międzyzwojowej δ
1 — klin olejowy; 2 — odkształcenie obwoju papierowego;
3 — przekładka preszpanowa

W rzeczywistym układzie uzwojenia objętość o przekroju obliczonym według wzoru (3) występuje nie na długości 10 cm jak to założono obliczając $V_{MSOV} = 8.3 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^3$ lecz na długości całego przewodu uzwojenia i w $L = n-2$ klinach olejowych, gdzie n – jest liczbą zwojów dwóch cewek (dla rys. 1 jest $n = 10$). Ogólny wzór na MSOV dla takiego przypadku przyjmuje postać:

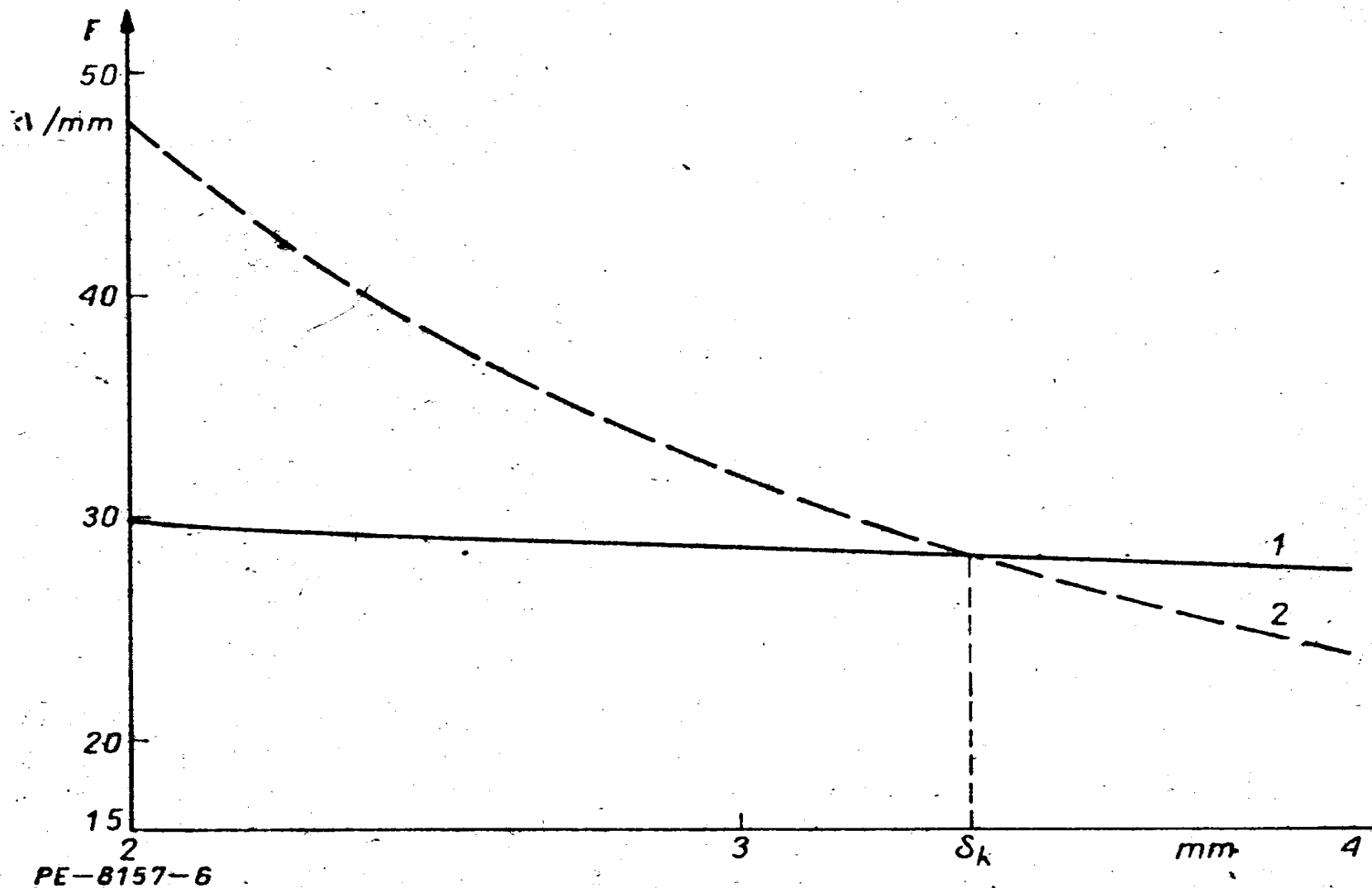
$$V_{MSOV} = L \cdot N \cdot \pi \cdot D_{\text{śr}} \cdot S_{MSOV} \quad (4)$$

gdzie: S_{MSOV} – przekrój MSOV według wzoru (3) [cm^2], $D_{\text{śr}}$ – średnia średnica uzwojenia [cm], L – liczba klinów olejowych w jednym kanale międzycewkowym, N – liczba jednakowo naprężanych kanałów międzycewkowych.

Do dalszych rozważań przyjęto typowe parametry uzwojenia, tj. $D_{sr} = 200$ cm, $L = 8$, $N = 20$. Wykorzystując zależność naprężeń wytrzymywanych LI w oleju E_w od objętości V_{MSOV} (rys. 5d, krzywa 0%) oraz wzór (3), można dla danego uzwojenia wyznaczyć zależność $E_w = f(\delta)$. Zależność tę, przy założeniu $r = 1$ mm, zilustrowano na rys. 6, na którym podano również krzywą $E_k = f(\delta)$, wyznaczoną przy $\Delta U = 30$ kV ze wzoru (1).



Rys. 5d. Efekt objętości - udar piorunowy



Rys. 6. Zależność naprężeń w klinach olejowych izolacji międzyzwojowej od dwustronnej grubości izolacji zwojowej δ
1 — naprężenia wytrzymałwane $E_w = f(\delta)$; 2 — naprężenia maksymalne $E_k = f(\delta)$; δ_k — grubość krytyczna izolacji międzyzwojowej

Jak widać, naprężenia dopuszczalne wynikające z efektu objętości oleju szczególnie naprężanego stają się większe niż naprężenia panujące w klinach olejowych izolacji międzyzwojowej dopiero przy $\delta \geq 3.4$ mm, podczas gdy z wzoru (2) wynika, że układ izolacji jest przewymiarowany już przy $\delta = 2$ mm.

Prawdopodobieństwo wyładowań w klinach olejowych

Zilustrowana na rys. 5 zależność $E_w = f(V_{MSOV})$ nazwana tu zależnością efektu objętości dla naprężeń wytrzymywanych, została wyznaczona przy teoretycznym założeniu, że prawdopodobieństwo wystąpienia wyładowań w oleju, jest równe zeru, jeśli olej spełnia wymagania dla transformatorów najwyższych napięć, dotyczące zawilgocenia, odgazowania i oczyszczenia z zanieczyszczeń stałych. Oznacza to, że przy spełnieniu warunku

$$E_k \leq E_w \quad (5)$$

wyładowania w klinach olejowych izolacji międzyzwojowej nie występują.

Jeśli nierówność (5) nie jest spełniona, to przy, uzasadnionym eksperymentalnie założeniu, że rozkład prawdopodobieństwa jest rozkładem Weibulla o parametrze kształtu $k = 3.5$, dla jednego udaru probierczego można ocenić prawdopodobieństwo zaistnienia wyładowania jako równe:

$$P_1 = \exp \left[- \left(\frac{E_k - E_w}{E_{63\%} - E_w} \right)^{3.5} \right] \quad (6)$$

Parametr skali rozkładu Weibulla $E_{63\%}$, wobec znajomości E_w , $E_{50\%}$ i k jest wyznaczalny z teorii tego rozkładu.

Podczas prób fabrycznych aplikuje się trzy jednakowe udary probiercze. Stąd, z teorii statystycznego prawa wzrostu, prawdopodobieństwo wyładowania w klinach olejowych można oszacować jako równe:

$$P_3 = 1 - (1 - P_1)^3 \quad (7)$$

Przykładowo, przyjmując grubość izolacji $\delta \geq 3.2$ mm – mniejszą niż bezpieczna grubość $\delta_k \geq 3.4$ mm (rys. 6), uzyskuje się prawdopodobieństwo $P_3 = 4.2 \cdot 10^{-4}$. Przy grubości $\delta \geq 3$ mm prawdopodobieństwo wynosi $P_3 = 6.6 \cdot 10^{-3}$.

Przy takim postępowaniu uzyskano możliwość prognozowania wyniku próby udarem LI przy danej grubości izolacji zwojowej.

Wnioski

- Gdy rozkład przepięć piorunowych jest równomierny wzdłuż całej wysokości uzwojenia transformatora, wówczas kryteria projektowania wytrzymałości elektrycznej izolacji papierowo-olejowej uzwojeń, uzyskane z badań modeli o wymiarach znacznie mniejszych niż wymiary kompletnego uzwojenia, należy stosować z dużą ostrożnością.
- Bardziej poprawne oszacowania wytrzymałości elektrycznej zapewnia w takich przypadkach korzystanie z tzw. efektu objętości, pozwalającego uwzględnić wymiary wzdłużne układu izolacyjnego.
- Przedstawiona procedura pozwala również oszacować prawdopodobieństwo pozytywnego wyniku próby udarem LI.
- Wykorzystując podany algorytm opracowano program numeryczny do zastosowań konstruktorskich.

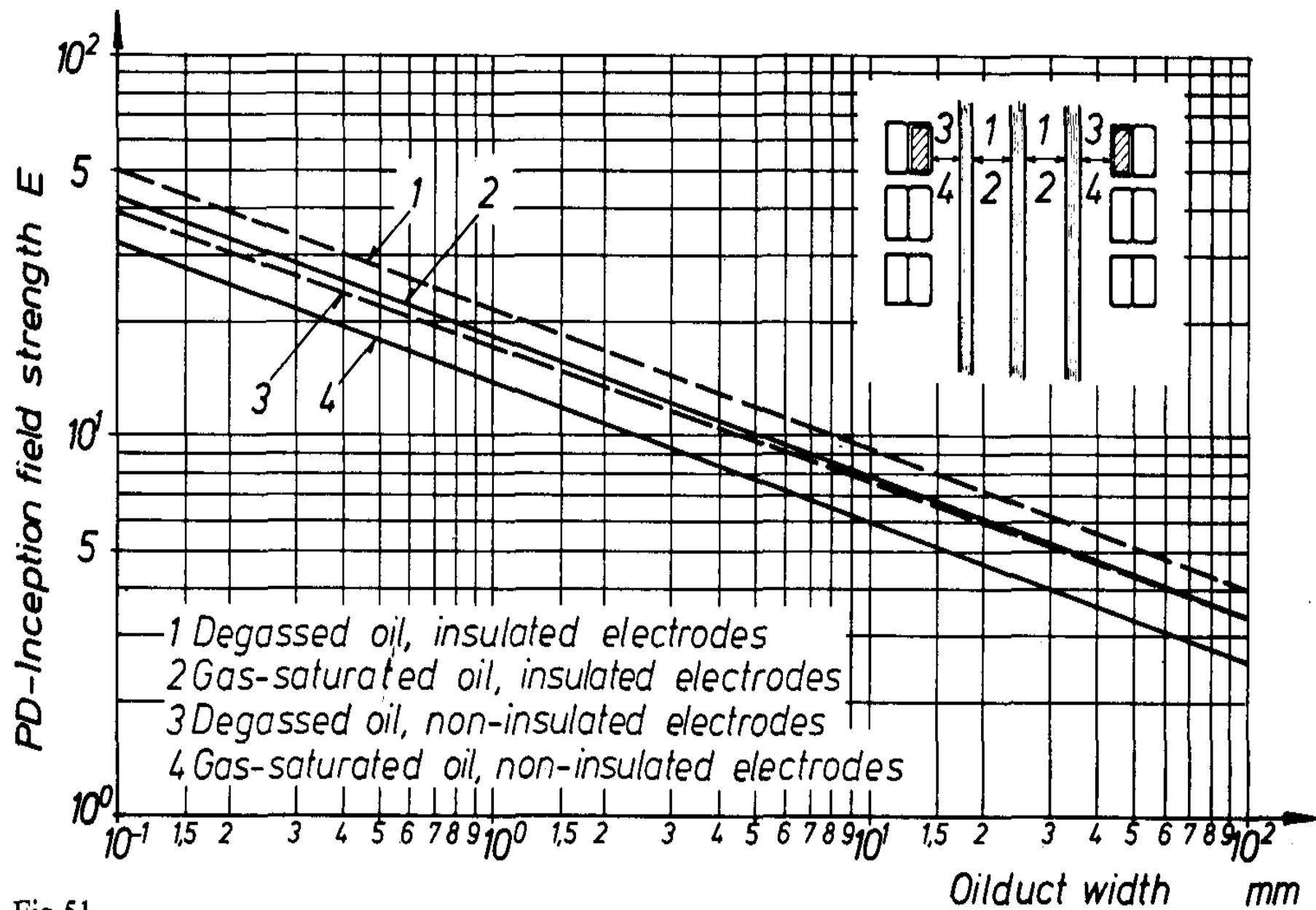
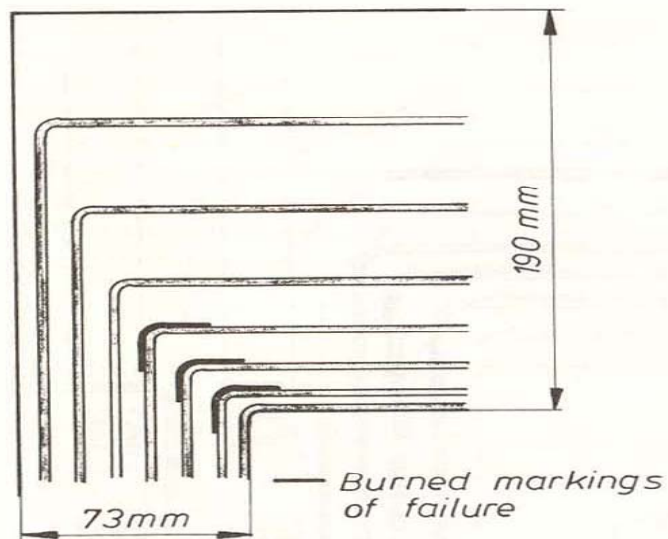
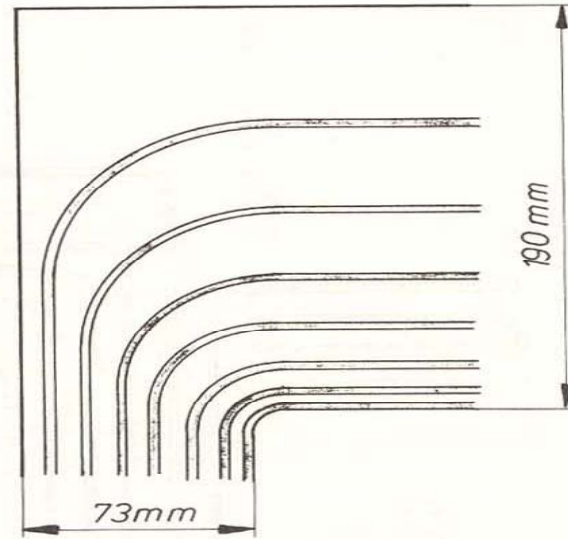


Fig.51
 Electric strength of transformer oil



Constant radii
PD-inception voltage
 $U = 140 \text{ kV} / 50 \text{ c} / 1 \text{ min}$



Contoured insulation
PD-inception voltage
 $U = 630 \text{ kV} / 50 \text{ c} / 1 \text{ min}$

Fig. 56

Electrical strength of insulation between HV and LV according to the radii of angle rings.

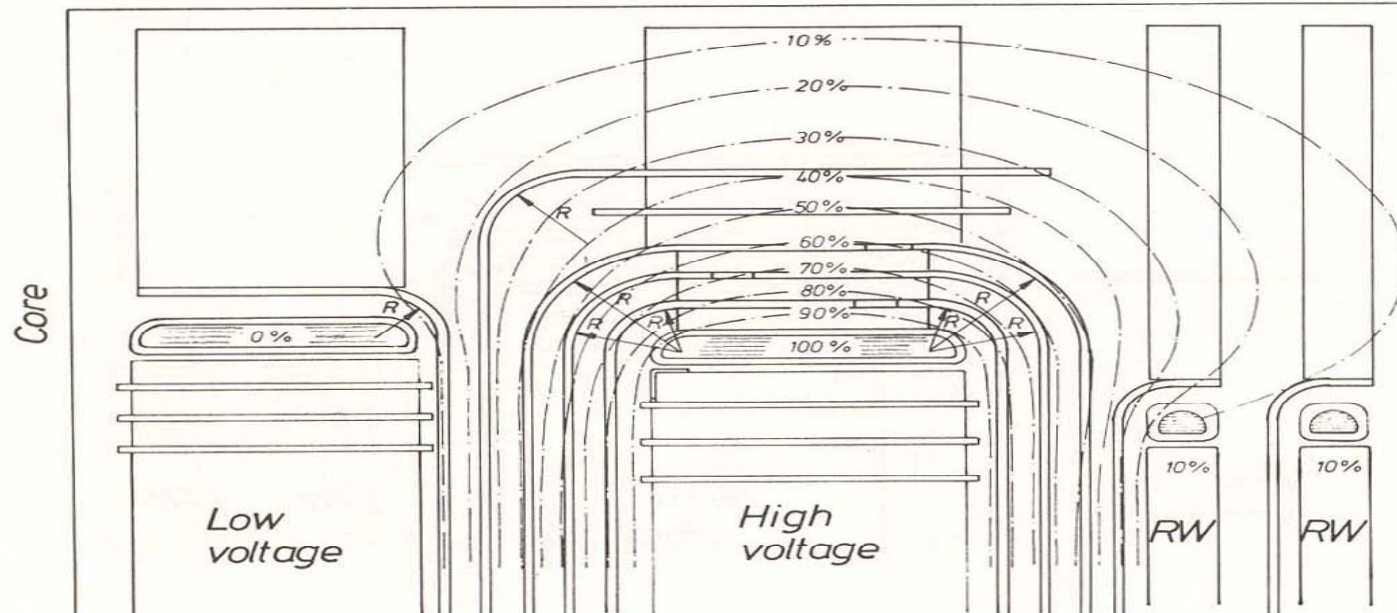


Fig. 57

End distance insulation with field conforming angle rings and caps

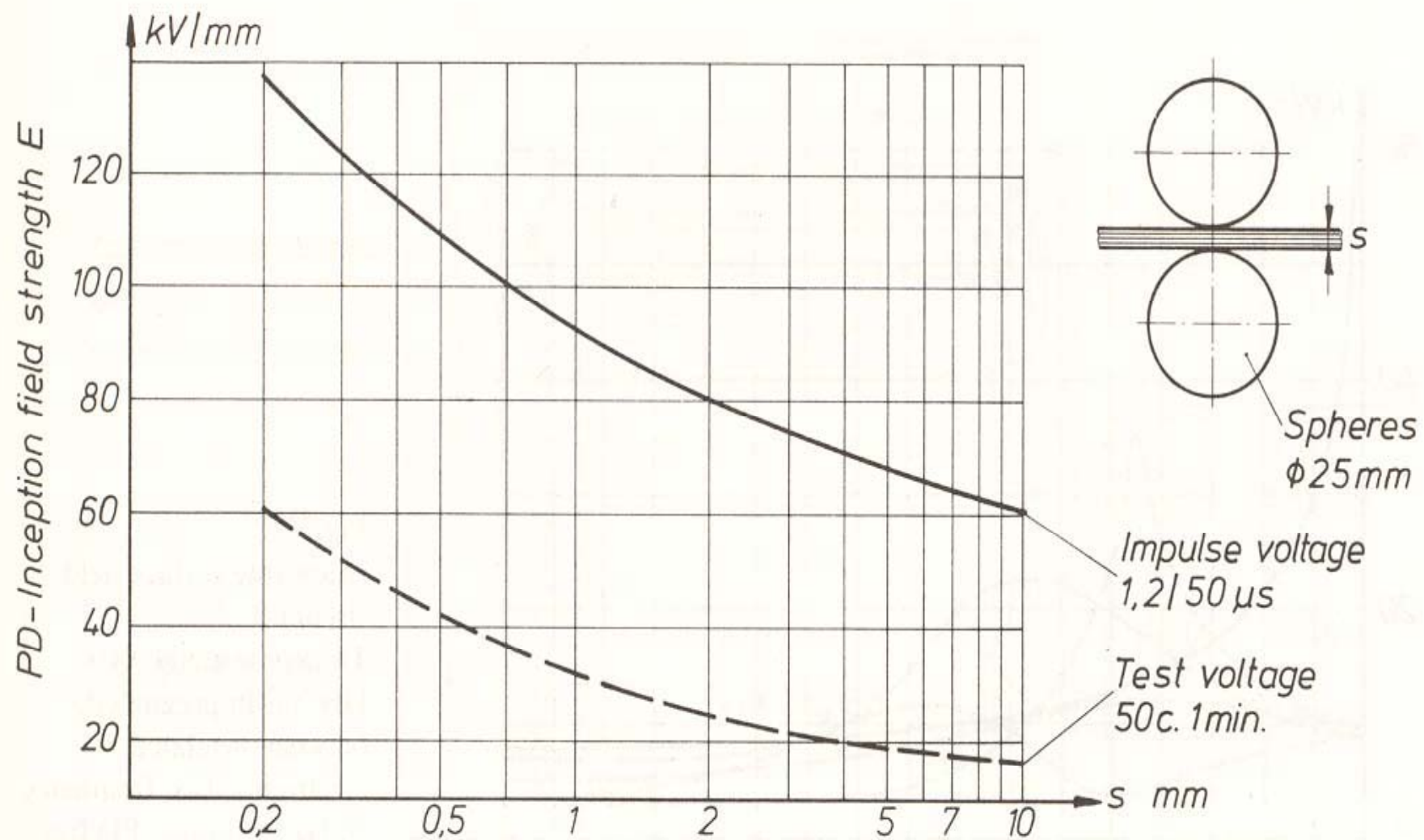
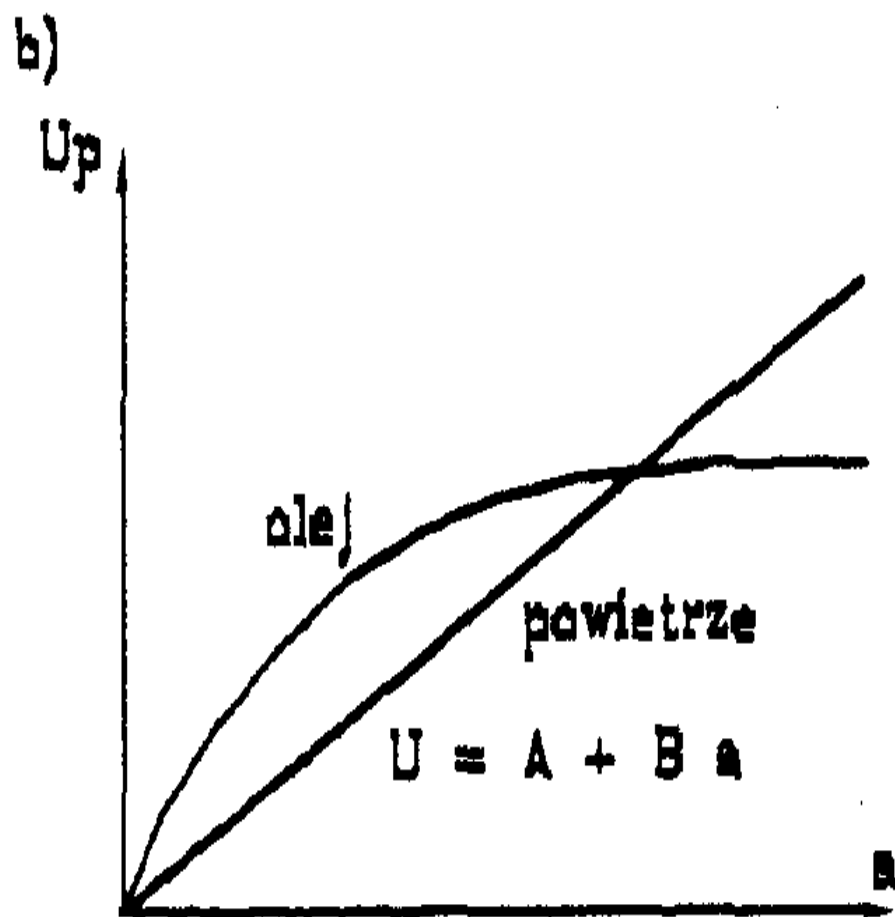
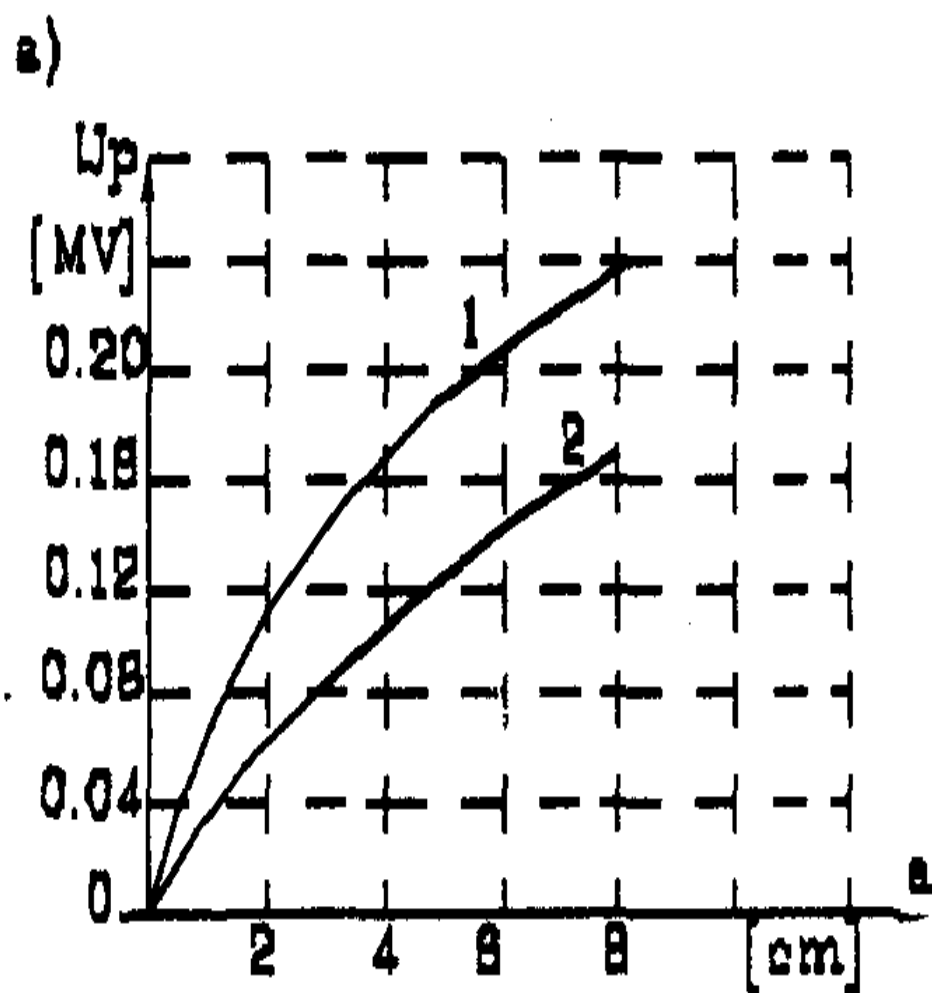


Fig.52
Electric strength of TRANSFORMERBOARD

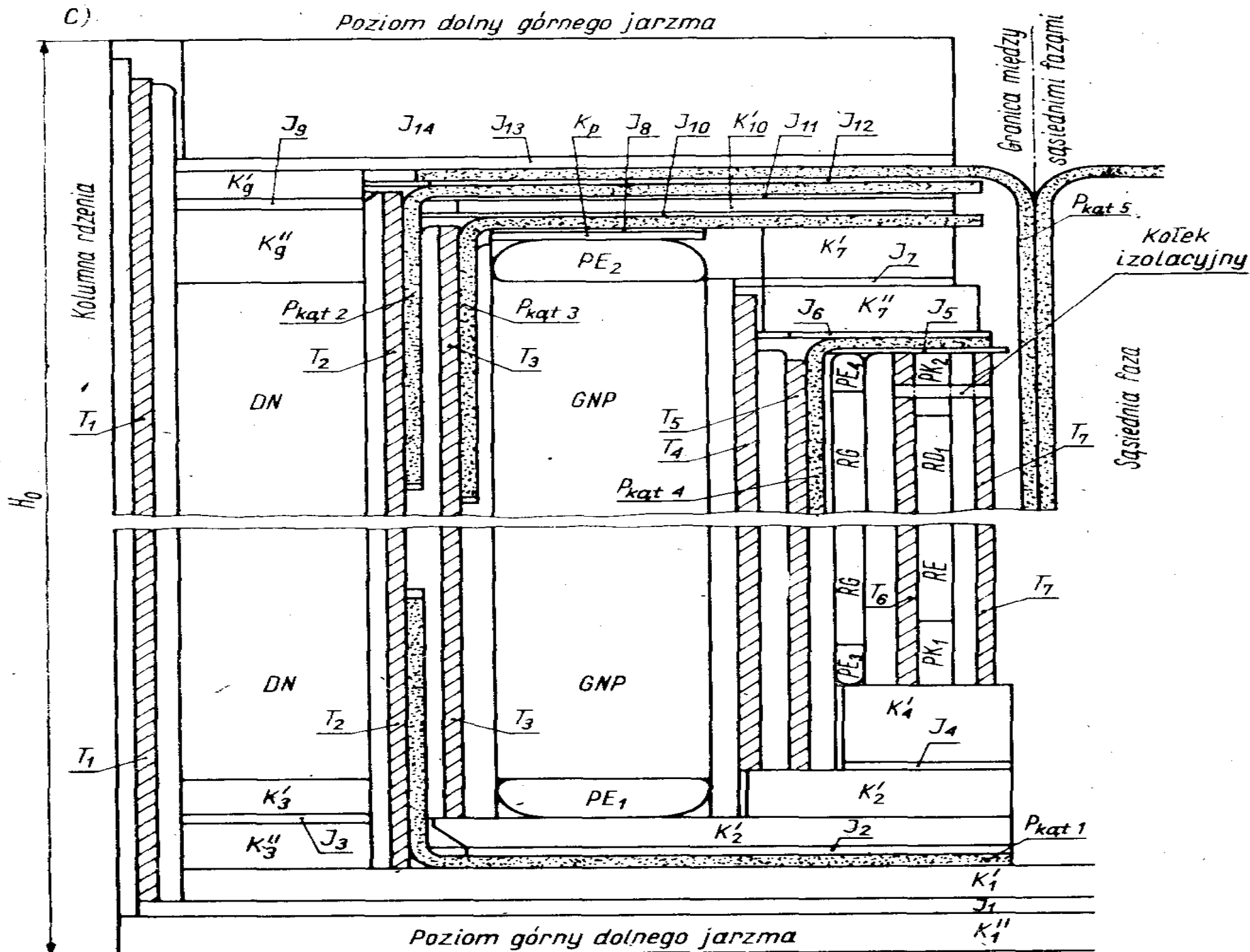
W układach ostrzowych zanieczyszczenia nie odgrywają tak dużej roli jak w układach zbliżonych do płaskiego. Zależność przemiennej napięcia przebicia dla układu ostrze-płyta w oleju ma charakter krzywej nasycającej się (rys. 6.5). Na rysunku 6.5 wykreślono, dla porównania, zależność dla odstepu powietrznego według równania (5.38). Jak widać dla odstępów powyżej 1.2 m wytrzymałość oleju jest mniejsza niż powietrza. Zatem przy takich odległościach stosowanie izolacji olejowej traci sens.



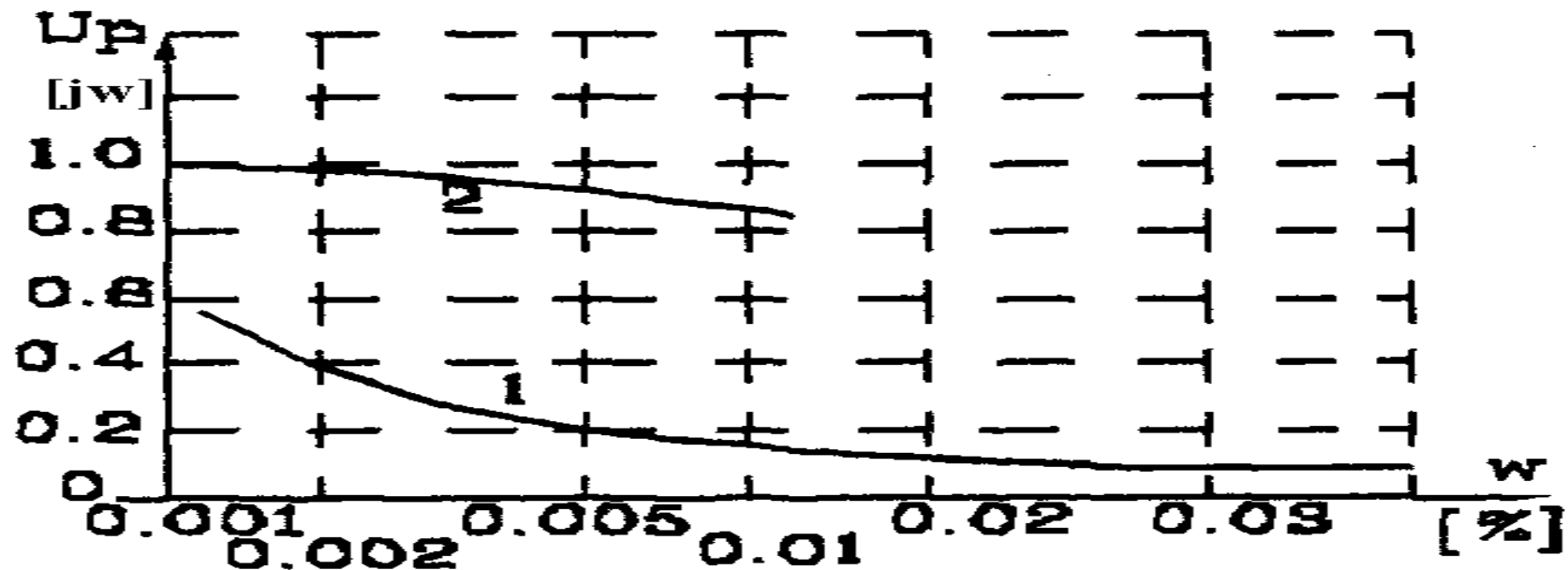
Rys. 6.5. Przemienne napięcia przebicia oleju transformatorowego w układzie ostrze-płyta:
 a) zależność ilościowa, b) porównanie z napięciem przeskoku w powietrzu
 1 - dla ujemnej połówki sinusoidy, 2 - dla dodatniej połówki sinusoidy, a - odległość elektrod

Z powyższych rozważań wynikają dwa wnioski praktyczne:

1. Należy unikać wszelkich ostrych krawędzi metalowych; w oleju stosowanie elektrod ostrzowych jest niedopuszczalne.
2. Nie wolno stosować układów płaskich o dużych odstępach. Należy wówczas przestrzeń olejową podzielić za pomocą dowolnie cienkich przegród z dielektryka stałego na podobszary. Wytrzymałość elektryczna w poszczególnych kanałach po takim podziale wzrasta. Przykładem jest tu izolacja między uzwojeniami transformatora (rys. 6.6). Wprowadzenie cienkich przegród, praktycznie nie zmieniających natężeń pola elektrycznego w oleju podnosi, w układzie jak na rysunku 6.6, wytrzymałość nawet kilkakrotnie.

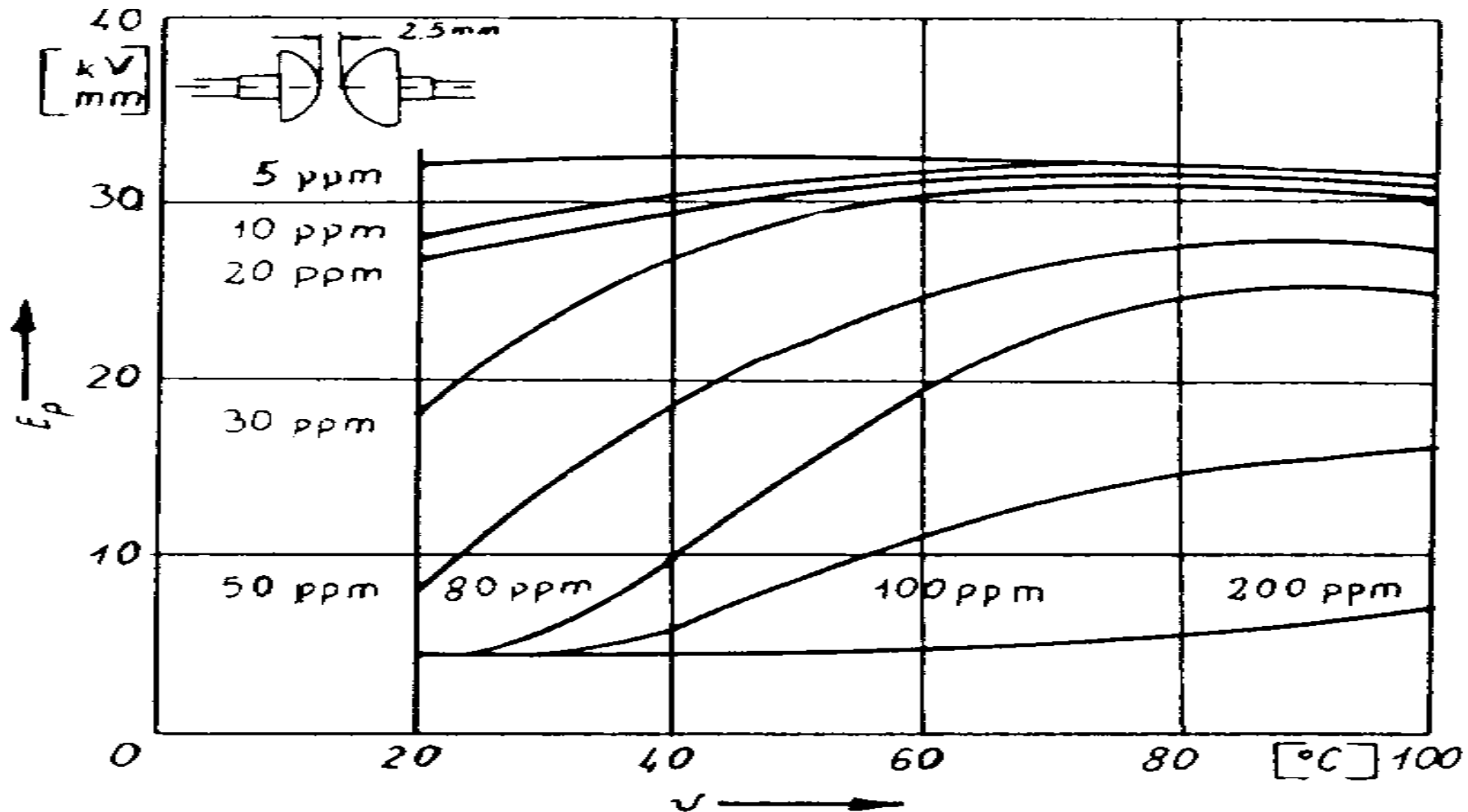


Szczególny wpływ na wytrzymałość elektryczną oleju ma współpraca zanieczyszczeń stałych i wilgoci (rys. 6.7). Jak widać współdziałanie włókien zanieczyszczeń i wilgoci prowadzi do katastrofalnego obniżenia wytrzymałości..



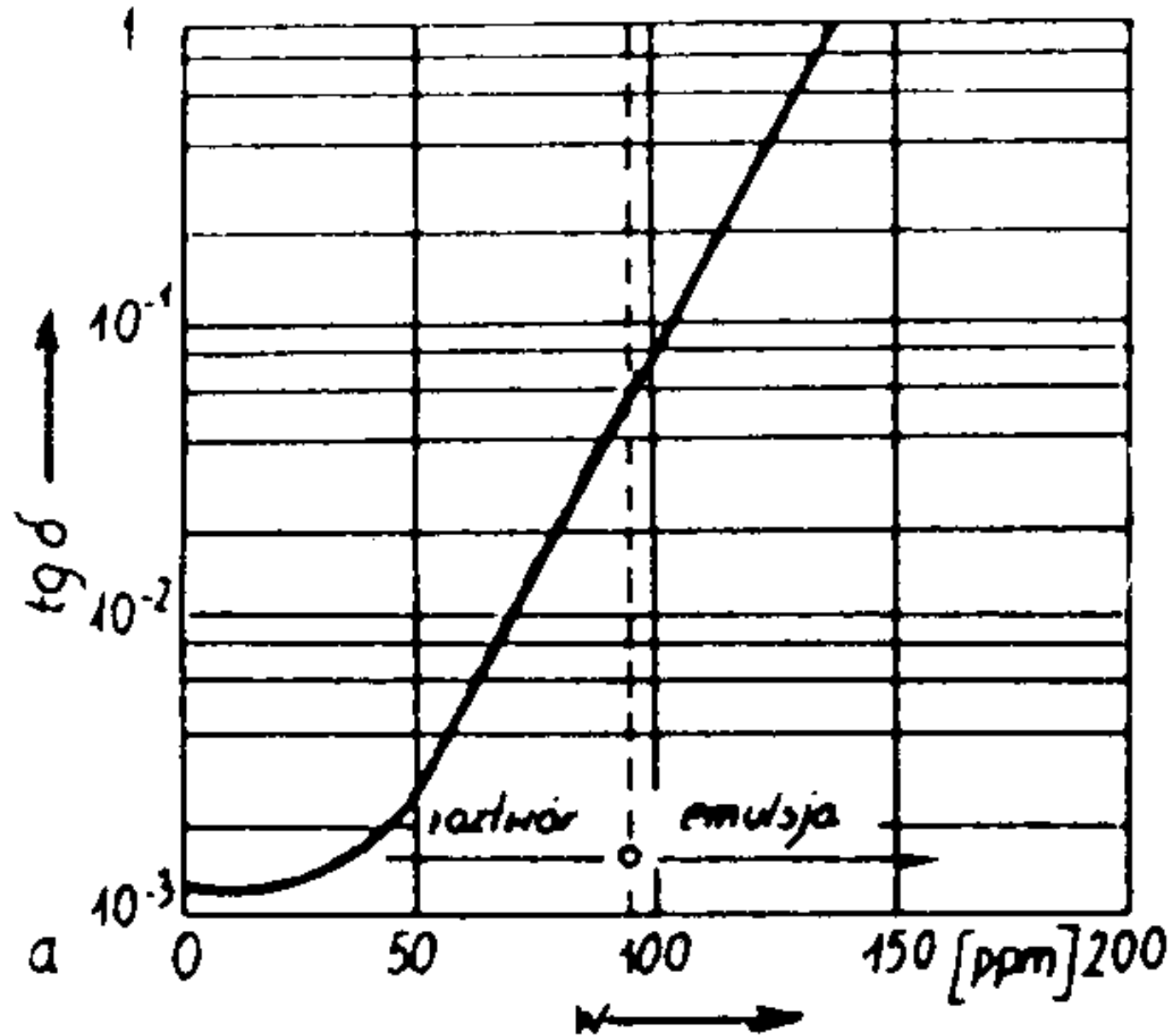
Rys. 6.7. Wpływ zawilgocenia i zanieczyszczenia oleju na jego napięcie przebicia w znormalizowanym iskierniku
 1 - dla oleju zanieczyszczonego, 2 - dla oleju dobrze oczyszczonego

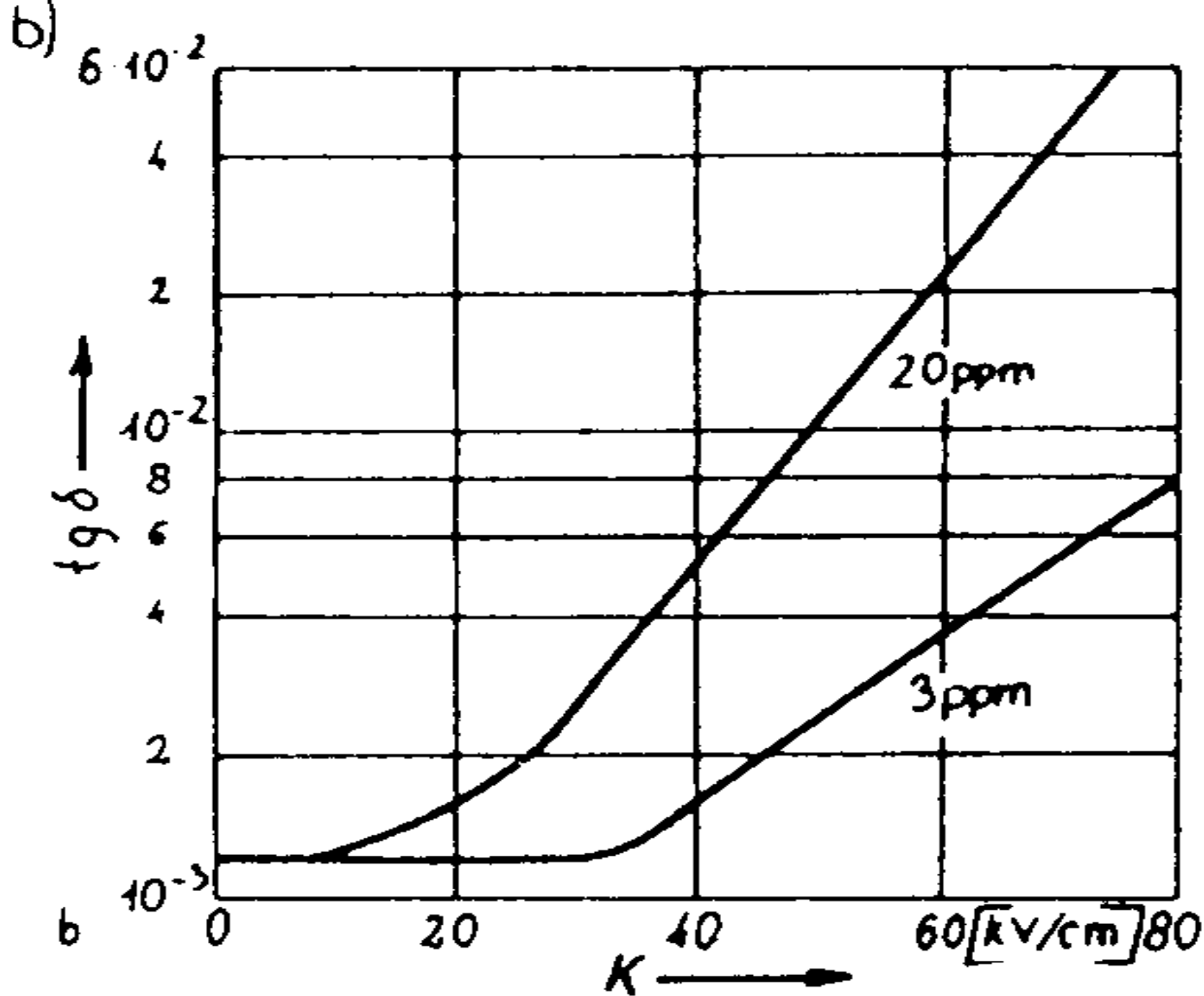
Na rysunku 6.8 pokazano dodatkowo wpływ zawilgocenia w funkcji temperatury na wytrzymałość elektryczną oleju w znormalizowanym iskierniku o elektrodach jak na rysunku 6.1

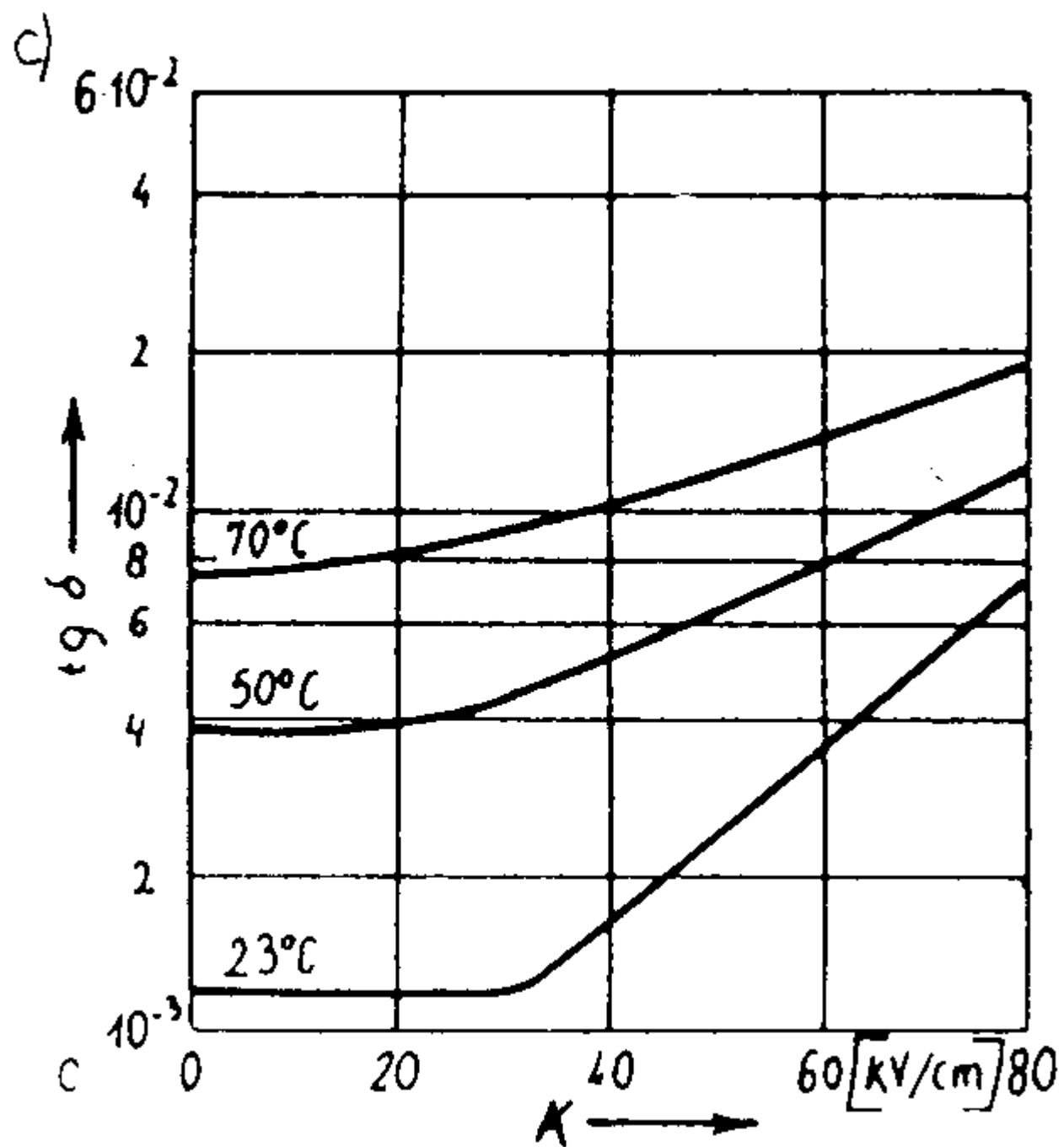


Rys. 6.8. Wytrzymałość elektryczna oleju transformatorowego w funkcji temperatury przy różnych stopniach zawilgocenia [21]

a)



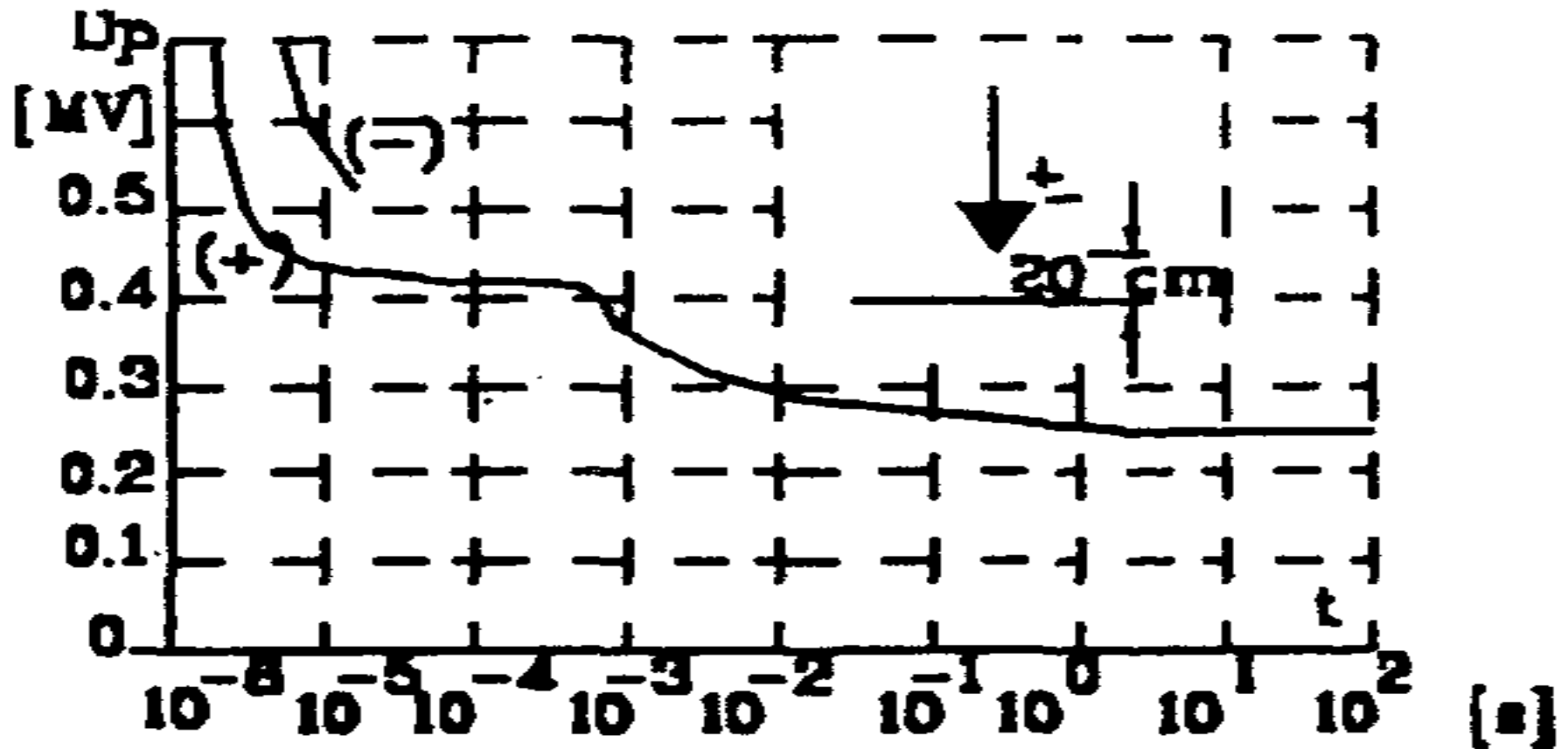




Rysunki 6.7÷6.9 wykazują, że zawilgocenie oleju bardzo silnie pogarsza jego właściwości. Stąd w praktycznych układach izolacyjnych stosuje się środki zapobiegające zawilgoceniu się oleju, takie jak:

1. Hermetyzację układów zawierających olej;
2. Osuszacze pochłaniające wilgoć z oleju (np. wysuszony żel bezwodnika dwutlenku krzemu SiO_2 zwany silikażelem);
3. Stosowanie poduszki azotowej.
4. W przypadku bardzo odpowiedzialnych układów izolacji olejowej (np. transformatory na najwyższe moce i napięcia) stosuje się nawet ciągłą kontrolę stanu zawilgocenia oleju oraz układy do automatycznego, obiegowego suszenia oleju.

Zjawiska związane z mechanizmem mostkowym są stosunkowo wolne. Jest to jedna z przyczyn silnej zależności wytrzymałości oleju od czasu oddziaływania napięcia (rys. 6.10).

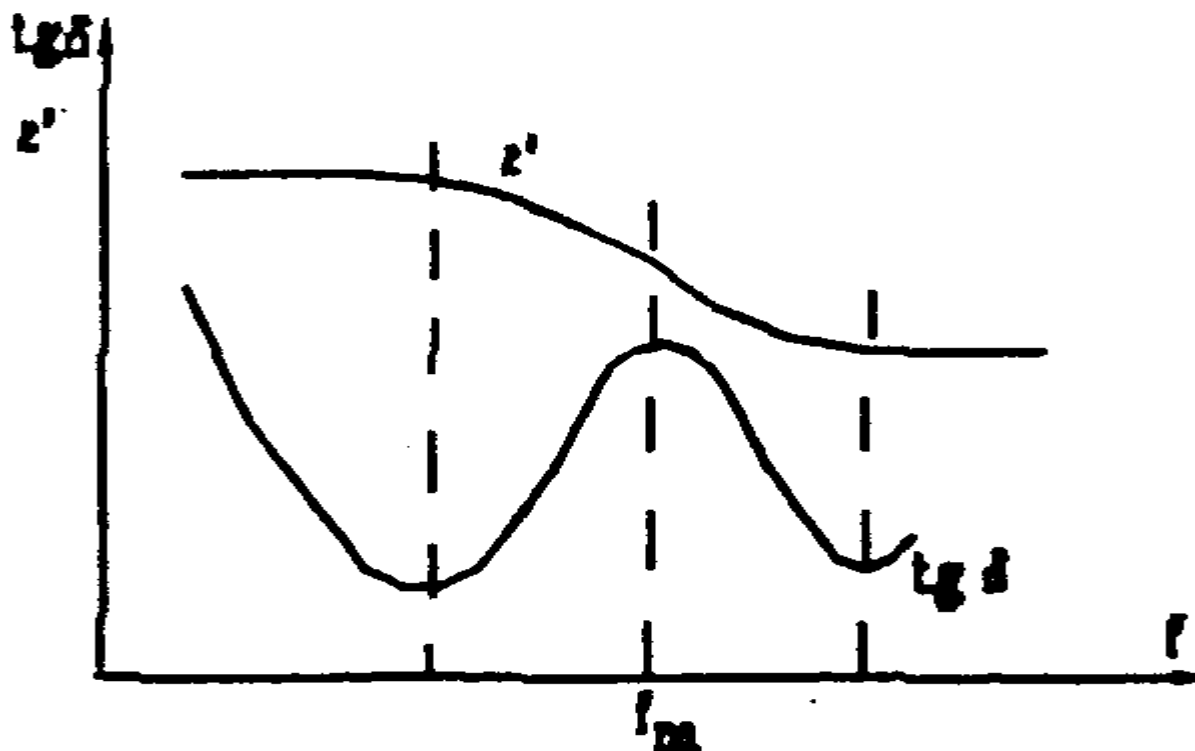


Rys. 6.10. Przykładowa charakterystyka napięciowo-czasowa odstępów olejowych

Przy napięciach udarowych o czasach rzędu **ms** zanieczyszczenia i wilgoć odgrywają mniejszą rolę i dominuje wówczas mechanizm strimerowy. Jest to przyczyną dużej wytrzymałości udarowej olejów. Dla dobrze oczyszczonych olejów, w polach stosunkowo równomiernych, iloraz wytrzymałości udarowej piorunowej (przy udarze 1.2/50 ms) do wytrzymałości przy napięciu przemiennym jest niewielki w granicach **1.2÷1.4**. Natomiast dla olejów zanieczyszczonych znacznie rośnie, nawet do **3**, wskutek spadku wytrzymałości przy napięciu przemiennym.

Jak wynika z rysunków 6.2 oraz 6.8 wytrzymałość oleju o technicznym stopniu czystości znacznie zależy od temperatury. Jest to szczególnie wyraźne dla krzywych z rysunku 6.8 przy zawilgoceniu w granicach 30÷80 ppm. Można to również wytłumaczyć w oparciu o mechanizm mostkowy, według którego ze wzrostem temperatury wilgoć z włókien zanieczyszczeń przechodzi do oleju. Zanieczyszczenia ulegają osuszeniu, co powoduje, iż maleje ich przenikalność elektryczna i w konsekwencji maleje skłonność do ustawiania się w mostki. Jednakże tendencja ta jest ograniczona do zakresu temperatur 60÷80 °C. W tych temperaturach rozpoczyna się wydzielanie gazów z oleju (np. wskutek parowania niezwiązanej wody lub, w wyższych temperaturach, wskutek rozkładu oleju).

Przenikalność elektryczna względna ϵ' oleju transformatorowego jest stosunkowo stała i w warunkach normalnych i przy częstotliwości technicznej wynosi 2.2. Ze wzrostem częstotliwości przenikalność elektryczna nieco maleje (rys. 6.11).



Rys. 6.11. Zależność współczynnika strat dielektrycznych i przenikalności elektrycznej względnej oleju transformatorowego od częstotliwości [21]

6.3. SYNTETYCZNE OLEJE SILIKONOWE

Oprócz olejów mineralnych są stosowane również oleje syntetyczne. Główne cechy, jakie skłaniają do stosowania olejów syntetycznych, to:

- niepalność;
- wyższa przenikalność elektryczna w granicach $\varepsilon' = 4 \div 6$;

Ta druga cecha znacznie poprawia warunki współpracy oleju z dielektrykami stałymi.

Spośród stosowanych olejów syntetycznych można wymienić następujące:

- polichlorodifenyle;
- askarele;
- oleje silikonowe.

Polichlorodifenyly to oleje przeszłości, które po stwierdzeniu ich wysokiej toksyczności, całkowicie zaprzestano stosować.

Askarele to syntetyczne ciecze elektroizolacyjne będące mieszaniną polichlorodifenyli i trójchlorobenzolu.

Oleje silikonowe to polimerowe związki krzemu o wysokiej odporności cieplnej, odporności na starzenie, małym niebezpieczeństwie zapalenia się.

Estry organiczne niepalne ciecze o dużej higroskopijności.

Właściwości fizyczne oleju silikonowego, askarelu i oleju mineralnego zestawiono w tabeli 17.

Tabela 17
Porównanie właściwości fizycznych różnych grup olejów izolacyjnych

Wielkość fizyczna	Jednostka	Olej mineralny	Olej silikonowy	Askarel	Midel 7131	RTEmp
Gęstość przy 20 °C	g/cm ³	< 0.900	0.960	1.50	0.98	0.88
Lepkość przy 25 °C	mm ² /s	16.0	50.0	15.0	70	570
100 °C					6	130
Pojemność cieplna	J/(g·K)	2.28	1.55	1.19	1.81	1.92
Współczynnik przewodności cieplnej	W/(K·m)	0.147	0.151	0.105	0.168	0.13
Współczynnik rozszerzalności cieplnej	K ⁻¹	0.00086	0.001	0.0007	0.00069	0.00075
Temperatura zapłonu	°C	> 130	> 300	195	257	285
Temperatura palenia	°C	165	> 360	-	435	540
Rezystywność skrośna	Ωcm	10 ¹⁴	10 ¹³	10 ¹²	10 ¹³	-
tgδ przy 50 Hz i 20 °C	-	< 4·10 ⁻⁵	2·10 ⁻⁴	5·10 ⁻³	< 1·10 ⁻³	-
ε' przy 50 Hz i 20 °C	-	2.2	2.7	4.5	3.2	2.
Napięcie przebicia na 2.5 mm	kV	60.0	50.0	50.0	50.0	-
Toksyczność		Słaba toksyczność biodegradalny	Mała toksyczność biodegradalny	Silnie toksyczne praktycznie niezniszczalne odkładają się w organizmie	Bardzo mało toksyczne lub całkowicie nietoksyczne	

Tabela

Określenia chemiczne poszczególnych olejów syntetycznych

Olej	Określenie chemiczne
Askarel	Mieszanina polichlorodifenyli i trójchlorobenzolu
Sowtoł	Mieszanina pentachlorodifenyłu (do 90%) i trójchlorobenzolu (10 %)
Pyralene	Mieszanina polichlorodifenyli i trójchlorobenzolu
Light Ugilec	Mieszanina czterochlorobenzylotoluenu (60 %) i trójchlorobenzolu
Rhodosil	Polimetylosiloksan
Midel	Czteroester pentaeritrolu
FDO (Polska)	Ftalan bis-dwuetyloheksylowy
DOC	Złożony ester dwuetyloheksylowy
ПЭТ-5СЖК	Złożony ester pentaerytrytu i syntetycznych kwasów alifatycznych (tłuszczowych) o długości łańcucha 5-9 atomów
RTEmp	Ciekłe węglowodory o podwyższonej masie molekularnej – węglowodory parafinowe
Delor	Trójchlorobifenyl
Lukooil	Polimetylosiloksan
DC 561	Polimetylosiloksan
Envirotemp	Złożony ester

Oleje silikonowe

Oleje silikonowe są stosowane w transformatorach elektrowozów trakcyjnych, w transformatorach do budynków użyteczności publicznej itd., gdzie wypierają oleje chloropochodne, które mając wysoką temperaturę zapłonu były traktowane jako niepalne. Jednakże w przypadku pożaru zewnętrznego były nie do ugaszenia i dodatkowo rozkładały się na związki trujące.

Temperatura zapłonu oleju silikonowego przekracza 300 °C, co oznacza, że jeśli zapalić ten olej odkrytym płomieniem to po oddaleniu źródła ognia olej gaśnie. Zatem oleje silikonowe stanowią znacznie mniejsze zagrożenie pożarowe niż oleje mineralne.

W odróżnieniu od oleju mineralnego lepkość oleju silikonowego mało zależy od temperatury, co stanowi pewną wadę z punktu widzenia odprowadzania ciepła. Jednakże kompensowane jest to, w dużym stopniu, dzięki większej zależności gęstości olejów silikonowych od temperatury. Właściwości izolacyjne mało zależą od temperatury i częstotliwości.

Oleje silikonowe są związkami fizjologicznie neutralnymi, czyli nie wykazują wpływu na organizmy żywe. Przy dodaniu wody wchodzący w związek krzem przechodzi w produkty rozpuszczalne w wodzie, które pod działaniem promieniowania ultrafioletowego wolno rozkładają się na związki pochodzenia naturalnego np. metan i tlenek krzemu. Lotne związki z krzemem unoszą się do atmosfery, gdzie rozszczepiają się na proste, nieagresywne związki np. wodę, tlenek węgla i tlenek krzemu. Zatem produkty krzemowe nie mogą gromadzić się w znacznych ilościach w biosferze.

Oleje silikonowe mogą pracować w temperaturach znacznie wyższych niż temperatura zapłonu oleju mineralnego. Olej silikonowy nie starzeje się do temperatury 150 °C. W temperaturach powyżej 300 °C (ale poniżej temperatury palenia) olej silikonowy może się palić jedynie wówczas, gdy go zmieszać z cieczą łatwopalną np. benzyną. Jednak nawet wtedy szybko gaśnie. Przy działaniu łuku elektrycznego należy się liczyć z powstawaniem mieszaniny gazowej o składzie podobnym jak w przypadku oleju mineralnego. Dominuje wodór, co przy dostatecznie dużym dostępie tlenu może tworzyć mieszanekę wybuchową.

Oleje silikonowe są związkami pasywnymi chemicznie, dobrze współpracującymi ze zwykle stosowanymi np. w transformatorach materiałami. Nie pogarszają dobrych właściwości izolacji impregnowanej olejem mineralnym. Należy tylko pamiętać o zastąpieniu klejów silikonowych innymi, mogłyby bowiem ulec rozpuszczeniu. Nieduże zanieczyszczenie olejów silikonowych olejami mineralnymi lub askarelem nie obniża ich właściwości izolacyjnych. Np. przy obecności domieszki 5% oleju mineralnego temperatura zapłonu maleje o około 90 °C. Ta sama zawartość askarelu obniża temperaturę zapłonu o 30 °C.

Przy konstrukcji urządzeń przeznaczonych do wypełnienia olejem silikonowym należy pamiętać, że współczynnik rozszerzalności cieplnej jest o 20÷40% większy niż dla oleju mineralnego lub askarelu, czyli objętości pozostawione na rozszerzanie się oleju pod wpływem wzrostu temperatury muszą być odpowiednio większe.

Dzięki stałości charakterystyk izolacyjnych urządzenia wypełnione olejem silikonowym nie wymagają zwykle konserwacji. W określonych odstępach czasu np. raz do roku należy jedynie wykonać badania oleju w celu sprawdzenia czy nie uległ zawilgoceniu. Jeśli zawartość wody bardzo wzrasta lub po wyładowaniach elektrycznych powstały cząstki stałe to olej można oczyścić i osuszyć tymi samymi metodami, co w przypadku oleju mineralnego.

Koszt np. transformatora wypełnionego olejem silikonowym jest wyższy niż w przypadku oleju mineralnego czy askarelu. Jednakże przy transformatorach z olejem mineralnym pracujących w warunkach zwiększonego zagrożenia pożarowego stosuje się sporą liczbę urządzeń zabezpieczających, podczas gdy w przypadku oleju silikonowego urządzenia takie są zbędne co istotnie zmniejsza koszty.

Złożone estry organiczne

Ze względu na odporność na wyładowania niezupełne i dużą wytrzymałość elektryczną, ciecze te mogą konkurować z olejami silikonowymi.

Higroskopijność cieczy opartych o złożone estry organiczne jest dziesięciokrotnie większa niż w przypadku oleju mineralnego. Handlowa postać może zawierać do 300 ppm wody. Po osuszeniu do 10 ppm wartość $\tan \delta$ prawie nie ulega zmianie. Handlowe (nie wysuszone) ciecze, mimo iż zawierają 10 razy więcej rozpuszczonej wody niż olej mineralny, to nadal mają napięcie przebicia około 30 kV/2.5 m, czyli więcej niż surowy olej w stanie dostawy. Ta osobliwość, w połączeniu z możliwością wysysania wody z izolacji papierowej, stanowi poważną zaletę.

Pod działaniem wyładowań niezupełnych wydziela się podobna ilość gazów jak w oleju mineralnym. Przy działaniu łuku objętość gazów może być nawet trzykrotnie mniejsza niż w wysokiej jakości oleju mineralnym.

Wytrzymałość elektryczna, szczególnie przy udarach piorunowych jest znacznie lepsza niż dla cieczy PCB, co daje możliwość stosowania w transformatorach dołączonych do linii napowietrznych. Przykładowo literatura opisuje przypadki zamiany oleju z grupy PCB o nazwie Sowtoł na ester DOC lub ПЭТ-5СЖК, co pozwoliło zmniejszyć odstępów izolacyjne transformatora, aż o ponad 30 %.

Bez antyutleniaczy ciecze te ulegają utlenianiu, z powstawaniem lotnych kwasów. Jednakże nawet przy głębokim utlenieniu (do 10 mgKOH lotnych kwasów) nie wytwarzają się osady (w odróżnieniu od oleju mineralnego). Produkty utleniania nie są skłonne do reakcji kondensacji i polimeryzacji. Dodatki przeciwko utlenianiu (antyutleniacze) pozwalają uzyskać stabilność przeciwko utlenianiu, nie ustępującą lepszym gatunkom oleju mineralnego.

W Polsce prowadzono prace nad produkcją złożonego estru organicznego już w końcu lat 80-tych ubiegłego stulecia [Zalewski, Janiszewski, Kamińska, Jurkowski – Int. Conf. On Insul. Problems in Power Transformer, Łódź 1987, s. 97]

Oleje parafinowe

W USA jako niepalne ciecze izolacyjne proponuje się stosować oleje oparte o węglowodory parafinowe, o podwyższonej masie molekularnej i temperaturze palenia powyżej 300 °C. W tabeli jest to olej o nazwie RTemp.

Literatura

- [1] Hasterman Z., Mosiński F., Maliszewski A. – „Wytrzymałość elektryczna transformatorów energetycznych”, Warszawa WNT 1983
- [2] Mosiński F., Galoch J., Zbudniewek A. – „Prognozowanie wytrzymałości elektrycznej piorunowej izolacji uzwojeń wysokonapięciowych transformatorów energetycznych”, Przegląd Elektrotechniczny, rok LXIV, nr 11, 1988, s. 324-326