

Wybrane Zagadnienia Elektrotechniki i Elektroniki
WZEE'2003
Warszawa-Jadwisin, 12-14 maja 2003r



Zarząd Główny PTETiS
Oddział Warszawski PTETiS
Wydział Elektryczny Politechniki Warszawskiej
Instytut Elektrotechniki (W-wa Międzylesie)
Instytut Energetyki (W-wa Mory)



**ZAGADNIENIA OPTIMALIZACYJNE W PROJEKTOWANIU
EKRANÓW STERUJĄCYCH IZOLACJI KONDENSATOROWEJ**

Włodzimierz KAŁAT

Politechnika Warszawska

Streszczenie: Referat analizuje zagadnienie optymalnego doboru długości głównych i pośrednich przekładek ekranujących izolatora cylindrycznego sterowanego pojemnościowo, respektując narzucone warunki natury elektrycznej i geometrycznej. Do rozwiązania zagadnienia optymalizacyjnego zastosowano dodatek Solver z arkusza kalkulacyjnego Excel.

Słowa kluczowe: izolacja kondensatorowa, przekładki ekranujące

1. WPROWADZENIE

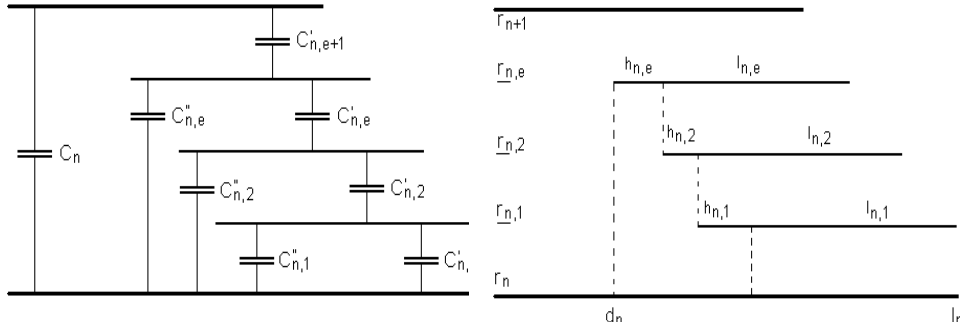
Najczęściej stosowaną w konstrukcjach przekładników prądowych, głowic i muf kablowych z izolacją papierowo-olejową jest izolacja uwarstwiona, składająca się zazwyczaj z pewnej liczby ekranów głównych oraz pośrednich. Ich zasadniczym celem jest odpowiednie wysterowanie rozkładu pola elektrycznego zarówno w kierunku wzdłużnym jak i poprzecznym tj. radialnym. Znaczne wymiary liniowe w porównaniu z grubością przekroju oraz symetria osiowa upoważniają do rozwiązania konfiguracji odpowiadającej idealnemu przepustowi typu kondensatorowego.

Podstawowy problem związany jest z kwestią doboru wielu czynników jednocześnie, którymi są: liczba i długość ekranów głównych i pośrednich oraz grubości warstw między ekranami głównymi. Oczekuje się, że układ ekranów powinien być tak dobrany, aby zapewniał uzyskanie równomiernego rozkładu naprężeń wzdłużnych, równomiernego rozkładu naprężeń poprzecznych lub nierównomiernego rozkładu zarówno naprężeń wzdłużnych jak i poprzecznych przy określonym współczynniku nierównomierności. Dodatkowe warunki ograniczające mogą dotyczyć wymiarów geometrycznych, jak choćby minimalny i maksymalny promień oraz długość.

Celem dalszej części referatu będzie wyprowadzenie związków analitycznych wiążących wielkości geometryczne i polowe, pozwalających uformować bliski liniowego kształt zbrocza układu izolacyjnego. Towarzyszy mu jednocześnie pełna zdolność kontroli natężeń wzdłużnych i poprzecznych.

2. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU

Przyjmując oznaczenia zgodne z rys. 1, a także pozycjami [1] [2] [3] w spisie literatury, można określić szereg pojemności wzajemnych:



Rys. 1. Oznaczenia dotyczące przekroju warstwy

- pojemność izolacji między ekranami głównymi (międzywarstwowa):

$$C_{n,i} = \frac{2\pi\epsilon d_n}{\ln \frac{r_{n+1}}{r_n}} \quad (1)$$

- pojemność izolacji między ekranami pośrednimi (wewnątrzwarstwowa):

$$C'_{n,i} = \frac{2\pi\epsilon l_{n,i}}{\ln \frac{r_{n,i}}{r_{n,i-1}}} \quad (2)$$

- pojemność izolacji pomiędzy częścią wystającą i-tego ekranu pośredniego względem n-tego ekranu głównego:

$$C''_{n,i} = \frac{2\pi\epsilon h_{n,i}}{\ln \frac{r_{n,i}}{r_n}} \quad \text{oraz} \quad C''_{n,e+1} = 0 \quad (3)$$

- pojemność izolacji między kolejnym i-tym ekranem pośrednim n-tej warstwy a n-tym ekranem głównym:

$$C_{n,1} = C'_{n,1} + C''_{n,1} \quad (4)$$

$$C_{n,i} = \frac{C_{n,i-1} C'_{n,i}}{C_{n,i-1} + C'_{n,i}} + C''_{n,i} \quad (5)$$

- pojemność zastępcza między ekranami głównymi:

$$C_{z,n} = C_n + 2 \cdot C_{n,e+1} \quad (6)$$

- pojemność całkowita układu izolacyjnego:

$$C = \frac{1}{\sum_{n=1}^k \frac{1}{C_{z,n}}} \quad (7)$$

Możliwe jest także określenie niezbędnych napięć i natężeń dotyczących przekroju poprzecznego:

- napięcie między kolejnymi ekranami głównymi:

$$\Delta U_n = U \cdot \frac{C}{C_{z,n}} \quad (8)$$

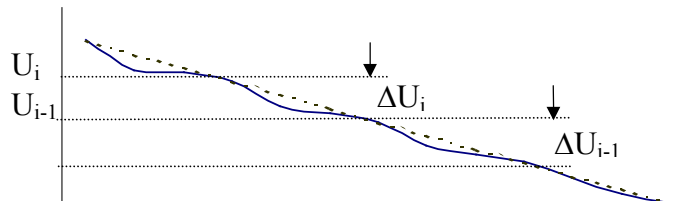
- maksymalne natężenie radialne w n-tej warstwie między ekranami głównymi:

$$E_{r,n} = \frac{\Delta U_n}{r_n \ln \frac{r_{n+1}}{r_n}} \quad (9)$$

Wzory (1)-(9) posłużą do sformułowania warunków realizujących kryteria: $\Delta U_n = \text{const}$ lub $E_{r,n} = \text{const}$.

3. RÓWNOŚĆ PRZYROSTÓW NAPIĘĆ MIĘDZYWARSTWOWYCH ($\Delta U_N = \text{CONST}$)

Postulat ten ma dwa aspekty. Pierwszy dotyczy równomiernego rozkładu napięć między kolejnymi ekranami głównymi, zaś drugi jest żądaniem silniejszym, gdyż zakłada dodatkowo liniowość rozkładu w ramach poszczególnych warstw (rys.2).



Rys.2. Podział napięć międzywarstwowych

Rozpatrzmy zatem dowolnie wybraną warstwę z obecnością e ekranów pośrednich jak na rys.1. Oznaczmy też jako U napięcia ekranów pośrednich względem ekranu głównego, dzięki czemu możliwe będzie wyrażenie pojemności zastępczych w każdej warstwie układu izolacyjnego. W tym celu wygodnie jest posłużyć się pojęciem ładunku elektrycznego zgromadzonego na powierzchni kolejnych ekranów pośrednich. Mamy więc dla pierwszego ekranu pośredniego:

$$Q'_{n,1} = C'_{n,1} \cdot U_{n,1}; \quad Q''_{n,1} = C''_{n,1} \cdot U_{n,1}; \quad Q_{n,1} = Q'_{n,1} + Q''_{n,1} \quad (10)$$

skąd wynika, że:

$$C_{n,1} = C'_{n,1} + C''_{n,1} \quad (11)$$

Ładunek drugiego ekranu pośredniego wynosi:

$$Q_{2,n} = Q_{n,1} + Q_{n,2}'' \quad \text{lub inaczej} \quad U_{n,2} \cdot C_{n,2} = U_{n,1} \cdot C_{n,1} + U_{n,2} \cdot C_{n,2}''$$

skąd otrzymuje się:

$$C_{n,2} = \frac{U_{n,1}}{U_{n,2}} \cdot C_{n,1} + C_{n,2}'' \quad (12)$$

Stosując wielokrotnie tę zasadę, otrzymamy rekurencyjną postać wzoru, przy założeniu, że $C_{n,e+1}'' = 0$

$$C_{n,i+1} = \frac{U_{n,i}}{U_{n,i+1}} \cdot C_{n,i} + C_{n,i+1}'' \quad (13)$$

Z drugiej jednak strony wiadomo, że pojemność zastępcza $C_{n,i+1}$ może być wyrażona jako szeregowe połączenie pojemności $C_{n,i}$, $C_{n,i+1}'$ oraz równoległe dołączonej pojemności $C_{n,i+1}''$. Tak więc słuszny jest wzór:

$$C_{n,i+1} = \frac{C_{n,i} \cdot C_{n,i+1}'}{C_{n,i} + C_{n,i+1}'} \cdot C_{n,i} + C_{n,i+1}'' \quad (14)$$

Porównanie wzorów (13) i (14) pozwala ustalić związek dotyczący podziału napięć i pojemności we wszystkich warstwach naraz:

$$\frac{U_{n,i}}{U_{n,i+1}} = \frac{C_{n,i+1}'}{C_{n,i} + C_{n,i+1}'} = \alpha_{i+1} \quad (15)$$

który może być wyrażony również jako

$$(1 - \alpha_{i+1}) \cdot C_{n,i+1}' = \alpha_{i+1} \cdot C_{n,i} \quad (16)$$

gdzie α_i oznaczają współczynniki proporcjonalności podziału napięcia w każdej warstwie jednocześnie.

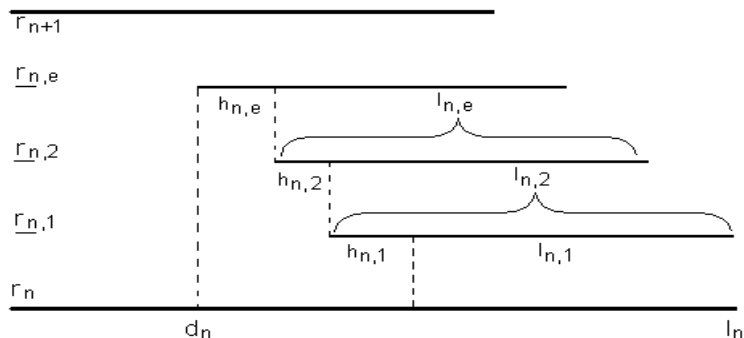
Wykorzystanie wzoru (16) w związku rekurencyjnym (13) z odpowiednią adaptacją numerów porządkowych prowadzi do wyrażenia:

$$(1 - \alpha_i) \cdot C_{n,i}' = \alpha_i \cdot (1 - \alpha_{i-1}) \cdot C_{n,i-1}' + \alpha_i \cdot C_{n,i-1}'' \quad (17)$$

Posłuży ono do określenia związków geometrycznych dotyczących długości sąsiadujących ekranów pośrednich w ramach jednej warstwy.

$$l_{n,i} = \frac{\alpha_i}{1 - \alpha_i} \cdot \ln \frac{r_{n,i}}{r_{n,i-1}} \left(\frac{(1 - \alpha_{i-1})l_{n,i-1}}{\ln \frac{r_{n,i-1}}{r_{n,i-2}}} + \frac{h_{n,i-1}}{\ln \frac{r_{n,i-1}}{r_n}} \right) \quad (18)$$

Wzór ten określa regułę wyznaczania części całkowitej długości i -tego ekranu pośredniego w oparciu o całkowitą długość $(i-1)$ -ego ekranu pośredniego, jak widać na rysunku 3.



Rys.3. Wyznaczanie długości cząstkowej $l_{n,i}$ przekładki wewnątrzwarstwowej

Równomierność rozkładu w ramach warstwy nastąpi wtedy, gdy napięcia kolejnych ekranów pośrednich będą proporcjonalne, tj.:

$$U_{n,i} = i \cdot U_{n,1} \quad (19)$$

$$\alpha_i = \frac{U_{n,i-1}}{U_{n,i}} = \frac{i-1}{i} \quad (20)$$

Jest to szczególny przypadek rozkładu napięć w obrębie warstwy i wtedy wzór (18) upraszcza się do postaci:

$$l_{n,i} = \ln \frac{r_{n,i}}{r_{n,i-1}} \left(\frac{l_{n,i-1}}{\ln \frac{r_{n,i-1}}{r_{n,i-2}}} + (i-1) \cdot \frac{h_{n,i-1}}{\ln \frac{r_{n,i-1}}{r_n}} \right) \quad (21)$$

Rozpatrzmy dla przykładu warstwę n z $e = 4$ ekranami pośrednimi. Chcąc w niej zapewnić równomierność rozkładu napięć na ekranach pośrednich należy przyjąć następujące wartości współczynników α_i :

i	1	2	3	4	$5 = e+1$
α_i	0	1/2	2/3	3/4	4/5

W praktyce wygodniej jest posługiwać się procentowym podziałem napięć w ramach n -tej warstwy i dlatego wprowadza się nowy rodzaj zależności:

$$\alpha_i = \frac{p_i}{p_{i+1}} \quad \text{oraz} \quad \alpha_i = \frac{p_{e+1}}{100} \quad (22)$$

gdzie p_i są liczbami wyrażonymi w procentach. Dla rozważanego przykładu wynoszą one odpowiednio:

i	1	2	3	4	5
$p_i \%$	0	20	40	60	80

Pozostaje do rozpatrzenia postulat równości napięć między kolejnymi ekranami głównymi, który sprowadza się do żądania, aby: $\Delta U_{n-1} = \Delta U_n = \text{const}$. Posługując się wzorem (7) dostaniemy warunek dotyczący pojemności: $C_{z,n-1} = C_{z,n} = \text{const}$. Wykorzystanie równości (5) przekształca je do postaci:

$$C_n + 2 \cdot C_{n,e+1} = C_{n-1} + 2 \cdot C_{n-1,e+1} \quad (23)$$

Wielokrotne zastosowanie wzoru (4) prowadzi do związku:

$$C_{n,e+1} = 2\alpha_e \left(\alpha_{e-1} \left(\dots \left(\alpha_1 (C'_{n,1} + C''_{n,1}) + C''_{n,2} \right) + \dots C''_{n,e-2} \right) + C''_{n,e-1} \right) \quad (24)$$

oraz analogicznego dla numeru (n-1)-go:

$$C_{n-1,e+1} = 2\alpha_e \left(\alpha_{e-1} \left(\dots \left(\alpha_1 (C'_{n-1,1} + C''_{n-1,1}) + C''_{n-1,2} \right) + \dots C''_{n-1,e-2} \right) + C''_{n-1,e-1} \right) \quad (25)$$

Pozwala to na inny zapis równania (23), w postaci różnicy pojemności:

$$\begin{aligned} & (C_n - C_{n-1}) + 2 \left(\alpha_e \left(\dots \left(\alpha_1 \left((C'_{n,1} - C'_{n-1,1}) + (C''_{n,1} - C''_{n-1,1}) \right) + (C''_{n,2} - C''_{n-1,2}) \right) + \dots \right) \right) \\ & \dots + (C''_{n,e} - C''_{n-1,e}) = 0 \end{aligned} \quad (26)$$

Dowolność wyboru liczby warstw k , a także liczby e ekranów pośrednich wskazuje, że równanie (26) będzie prawdziwe jedynie wtedy, gdy ujęte w nawiasy różnice będą liczbami stałymi. Oznacza to, że sąsiednie pojemności muszą tworzyć ciągi arytmetyczne:

$$\begin{aligned} C_n &= C_{n-1} + R_1 \\ C'_{n,1} &= C'_{n-1,1} + R_2 \\ C''_{n,1} &= C''_{n-1,1} + R_{3,1} \\ C''_{n,2} &= C''_{n-1,2} + R_{3,2} \\ &\dots \\ C''_{n,e} &= C''_{n-1,e} + R_{3,e} \end{aligned} \quad (27)$$

a równanie (26) przyjmuje wtedy postać:

$$\frac{1}{2} R_1 + \alpha_e \left(\dots \alpha_2 \left(\alpha_1 (R_2 + R_{3,1}) + R_{3,2} \right) + \dots R_{3,e} \right) = 0 \quad (28)$$

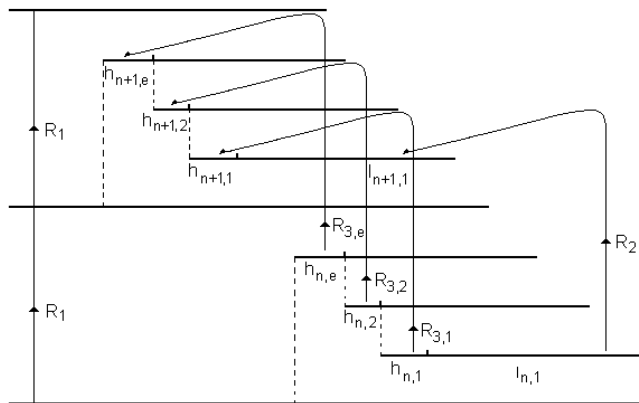
Jest to fundamentalne równanie o $e+2$ nieznanym parametrach, którego spełnienie jest równoważne równomierności rozkładu napięć w kolejnych warstwach izolatora. Narzucenie warunków na pojemności układu pozwala określić rekurencyjną zasadę doboru długości ekranów głównych i pośrednich:

– dla ekranów głównych

$$d_n = \ln \frac{r_{n+1}}{r_n} \cdot \left(\frac{R_1}{2\pi\epsilon} + \frac{d_{n-1}}{\ln \frac{r_n}{r_{n-1}}} \right) \quad (29)$$

- dla części schowanej pierwszych ekranów pośrednich oraz dla części wystającej kolejnych ekranów pośrednich

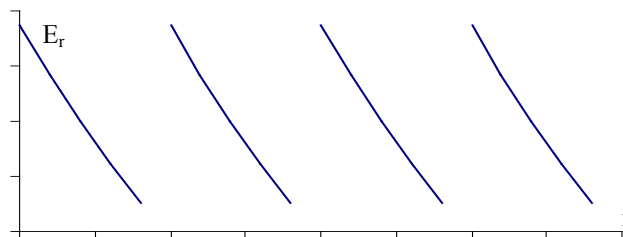
$$l_{n,1} = \ln \frac{r_{n,1}}{r_n} \cdot \left(\frac{R_2}{2\pi\epsilon} + \frac{l_{n-1,1}}{\ln \frac{r_{n-1,1}}{r_{n-1}}} \right); \quad h_{n,i} = \ln \frac{r_{n,i}}{r_n} \cdot \left(\frac{R_{3,i}}{2\pi\epsilon} + \frac{h_{n-1,i}}{\ln \frac{r_{n-1,i}}{r_{n-1}}} \right) \quad (30)$$



Rys.4. Ilustracja rekurencyjnych związków (29)-(30) pomiędzy warstwami

4. RÓWNOŚĆ NATĘŻEŃ POPRZECZNYCH W KOLEJNYCH WARSTWACH UKŁADU IZOLACYJNEGO

Ideę tej zasady przedstawia rys.5, gdzie postuluje się zrównanie natężeń maksymalnych w kolejnych warstwach.



Rys.5. Rozkład natężeń poprzecznych

W sensie matematycznym oznacza to spełnienie równości:

$$E_{r,n}^{max} = E_{r,n-1}^{max} \quad (31)$$

lub inaczej:

$$\frac{\Delta U_n}{r_n \ln \frac{r_{n+1}}{r_n}} = \frac{\Delta U_{n-1}}{r_{n-1} \ln \frac{r_n}{r_{n-1}}} \quad (32)$$

Jest od razu widoczne, że jego spełnienie narzuca określony podział napięć między ekranami głównymi:

$$\Delta U_n = \Delta U_{n-1} \cdot \left(\frac{r_n}{r_{n-1}} \right) \cdot \frac{\ln \frac{r_{n+1}}{r_n}}{\ln \frac{r_n}{r_{n-1}}} = \Delta U_{n-1} \cdot a_n \quad (33)$$

gdzie a_n oznacza ciąg liczb o wyrazach $a_n > 1$ na mocy założenia, że $r_{n+1} > r_n$.

W praktyce oznacza to potwierdzenie znanego faktu, że niemożliwe jest jednoczesne zrealizowanie obydwu postulatów jednocześnie. Stałość maksymalnych wartości składowej radialnej natężenia pola tym silniej zakłóca liniowość rozkładu napięcia, im bardziej wyrazy a_n różnią się od jedności. Zależy to w sposób oczywisty od grubości $d = r_n - r_{n-1}$ oraz od samego promienia początkowego r_1 .

Wykorzystując równanie (7) i dzieląc je obustronnie przez wspólny czynnik $U \cdot C$ dostajemy:

$$C_{z,n} = \frac{C_{z,n-1}}{a_n} = C_{z,n-1} \cdot b_n \quad (34)$$

co oznacza konieczność sukcesywnego zmniejszania się pojemności międzywarstwowych. Pojawienie się czynnika $b_n = 1/a_n$ nieznacznie zmienia postać wzoru (26), czego dalszą konsekwencją będzie seria zmodyfikowanych zależności:

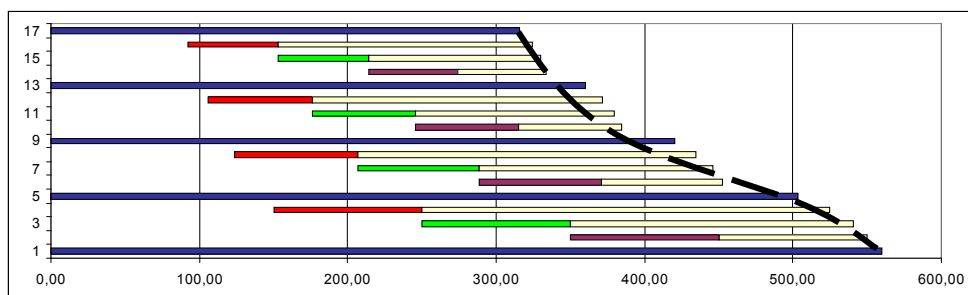
$$d_n = \ln \frac{r_{n+1}}{r_n} \cdot \left(\frac{R_1}{2\pi\epsilon} + b_n \cdot \frac{d_{n-1}}{\ln \frac{r_n}{r_{n-1}}} \right) \quad (35)$$

$$l_{n,1} = \ln \frac{r_{n,1}}{r_n} \cdot \left(\frac{R_2}{2\pi\epsilon} + b_n \cdot \frac{l_{n-1,1}}{\ln \frac{r_{n-1,1}}{r_{n-1}}} \right); \quad h_{n,i} = \ln \frac{r_{n,i}}{r_n} \cdot \left(\frac{R_{3,i}}{2\pi\epsilon} + b_n \cdot \frac{h_{n-1,i}}{\ln \frac{r_{n-1,i}}{r_{n-1}}} \right) \quad (36)$$

5. ZAGADNIENIA OPTIMALIZACYJNE W DOBORZE PRZEKŁADEK EKCRANUJĄCYCH

5.1. Kształtowanie linii zbrocza izolacyjnego dla $\Delta r = \text{const}$

Wprowadzone wzory pozwalają stwierdzić, że postulat równomierności rozkładu napięć sprowadza się do dobrania $e+2$ liczb $R_1, R_2, R_{3,1}, \dots, R_{3,e}$, które powinny spełniać równanie (29). Nietrudno zauważyć, że jednym z nieskończenie wielu rozwiązań jest choćby dopuszczenie liczb równych zero, lecz nie da się z góry przewidzieć, czy zapewnią one sensowne wymiary konstrukcji izolacji przekładnika i poprawny kształt zbrocza jego krawędzi. Właśnie kształtowanie tego zbrocza okazało się być najbardziej efektywnym czynnikiem podlegającym optymalizacji.



Rys.6. Nieoptymalne ukształtowanie zbocza izolacyjnego na tle hipotetycznej krzywej stopnia trzeciego

Jako kryterium optymalizacyjne przyjęto minimalizację błędu średniokwadratowego z odchyłek między końcami wszystkich przekładek ekranujących, a hipotetyczną linią o postaci wielomianu określonego stopnia (linia przerywana na rys. 6). Za miarę jakości dopasowania przyjęto tzw. współczynnik dopasowania R^2 związany z pojęciem analizy regresji.

Do sformułowania i rozwiązania problemu wykorzystano metodę pseudoinwersji służącą do rozwiązywania nadokreślonych układów algebraicznych równań liniowych. Środowisko i narzędzia arkusza kalkulacyjnego Excel, a zwłaszcza dodatek optymalizacyjny Solver, okazały się w pełni wystarczające do wykonania postawionego zadania o charakterze nieliniowym.

Jako komórkę celu wskazano średni błąd kwadratowy z odchyłek ε , a komórkami zmieniającymi uczyniono:

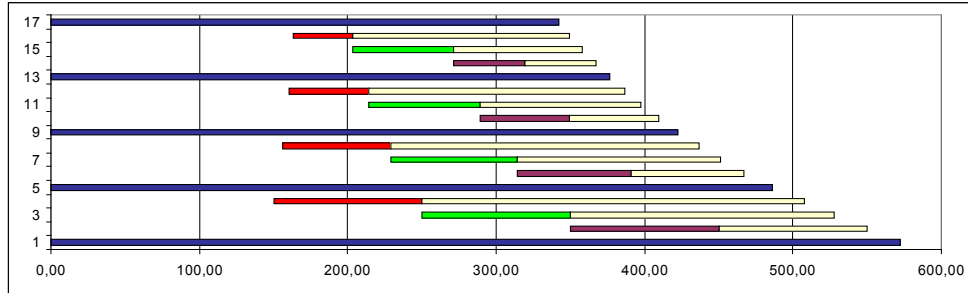
- $e+2$ nieznanymi liczb $R_1, R_2, R_{3,1}, \dots, R_{3,e}$
- procentowy podział p_i ($i=1,2,\dots,e-1$) rozkładu napięcia w ramach jednej warstwy,
- długości początkowe przekładek $l_{1,1}, h_{1,1}, h_{1,2}, \dots, h_{1,e}$,
- długość d_l części międzywarstwowej

z następującymi ograniczeniami:

- spełnienie równania (28)
- $p_i \leq i/(e+1)$ dla ($i = 1, 2, \dots, e$)
- $l_{1,1}, h_{1,1}, h_{1,2}, \dots, h_{1,e} \geq 0$
- $d_l \geq 0$
- $E_{st \min} \geq 0$ oraz $E_{st \max} \leq M$, gdzie $E_{st \min}, E_{st \max}$ są minimalną i maksymalną zaobserwowaną wartością natężenia wzdłużnego, a M – dowolnie ustalona liczba, której poziomowi nie chcemy przekroczyć.

Stwierdzono, że dla izolacji o stałej grubości między wszystkimi przekładkami ($\Delta r = \text{const}$) linia zbocza realizująca minimum błędu średniokwadratowego przyjmuje kształt funkcji parabolicznej tj. wielomianu drugiego stopnia.

Nieliniowy kształt zbocza izolacyjnego w prostej ocenie wzrokowej budzi pewne obawy o wzrost naprężeń wzdłużnych w miarę wzrostu promienia przekładki. Nie uwzględniają one jednak faktu, że o naprężeniach $E_{st} = \Delta U / \Delta L$ decydują zarówno licznik, jak i mianownik, które podlegają zmianom według nieliniowych reguł, a skutek ich wzajemnego działania jest trudny do przewidzenia.



Rys.7. Optymalne ukształtowanie zbocza izolacyjnego na tle krzywej parabolicznej

5.2. Kształtowanie linii zbocza izolacyjnego dla $\Delta r = \text{var}$

Pomysłem na uczynienie kształtu zbocza bardziej równomiernym jest odstępnie od zasady jednakowej grubości poszczególnych warstw między przekładkami.

Zaproponowano następujące reguły uzmienniania promieni:

- pierwszych ekranów pośrednich w kolejnych warstwach ($i = 1$)

$$\frac{\ln \frac{r_{n+1,1}}{r_{n+1}}}{\ln \frac{r_{n,1}}{r_n}} = 1 \text{ skąd } r_{n+1,1} = \left(\frac{r_{n+1}}{r_n} \right) \cdot r_{n,1} = q \cdot r_{n,1} \quad (37)$$

- następnych ekranów pośrednich ($i > 1$)

$$\frac{\ln \frac{r_{n,i+1}}{r_{n,i}}}{\ln \frac{r_{n,i}}{r_{n,i-1}}} = \text{const} = A \text{ skąd } r_{n,i+1} = \left(\frac{r_{n,i}}{r_{n,i-1}} \right)^A \cdot r_{n,i} \quad (38)$$

- ekranów głównych

$$\frac{\ln \frac{r_{n+2}}{r_{n+1}}}{\ln \frac{r_{n+1}}{r_n}} = 1 \text{ skąd } r_{n+2} = \left(\frac{r_{n+1}}{r_n} \right) \cdot r_{n+1} = q \cdot r_{n+1} \quad (39)$$

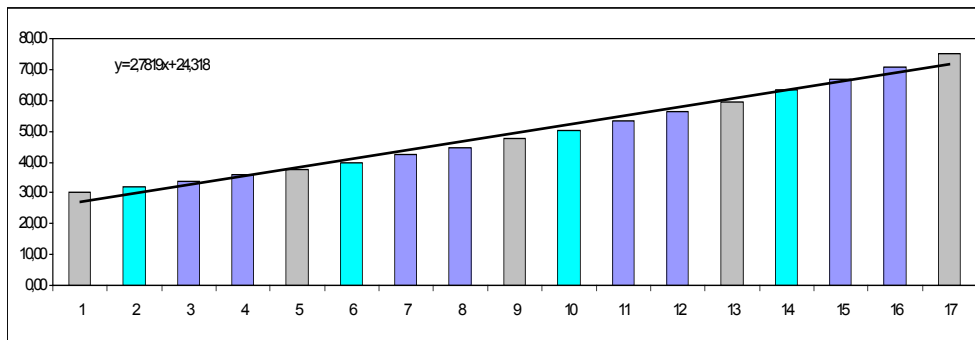
Dobór promieni ekranów głównych i pośrednich przebiega zgodnie z następującym algorytmem:

- ustalenie promieni granicznych r_1 i r_{k+1} ekranów głównych, często narzuconych przez wymagania natury gabarytowej,
- wyznaczenie ilorazu postępu geometrycznego q z określonych wyżej

promieni $q = \sqrt[k]{\frac{r_{k+1}}{r_1}}$

- ustalenie grubości warstwy między pierwszym ekranem głównym a pierwszym ekranem pośrednim $d = r_{1,1} - r_1$
- wyznaczenie promieni pierwszych ekranów pośrednich w pozostałych warstwach $r_{n+1,1} = q \cdot r_{n,1}$
- wyznaczenie promieni ekranów pośrednich w ramach warstwy wg wzoru (38)

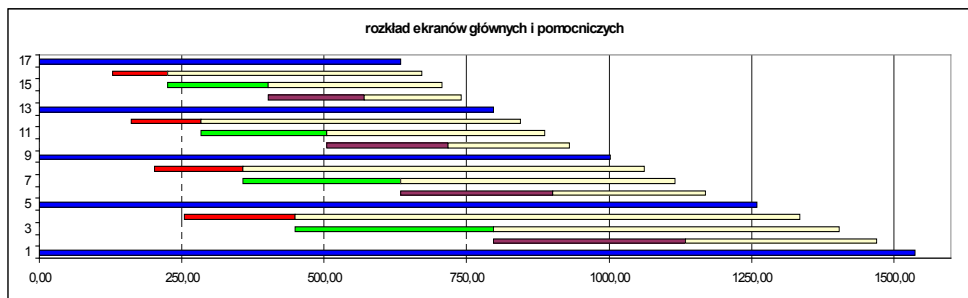
Jak widać, dwa nieznanne współczynniki liczbowe A i d decydują o rozkładzie promieni w/w ekranów głównych i pomocniczych. Ich dobór przybiera sens zagadnienia optymalizacyjnego, a rozwiązania dokonuje się z użyciem excelowego Solvera.



Rys.8. Przykład optymalnego rozkładu promieni przekładek głównych i pomocniczych

6. Prezentacja wyników

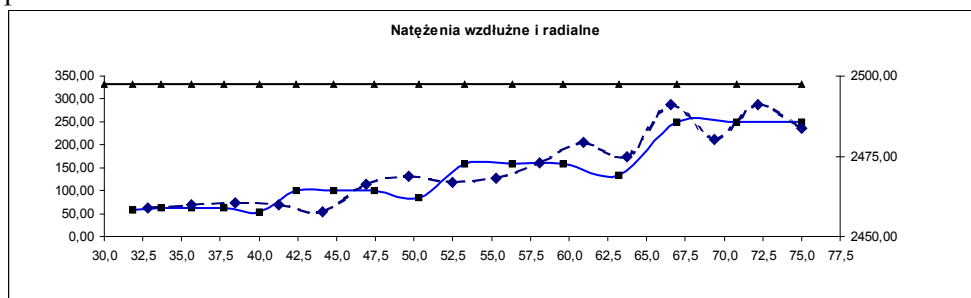
Dokonano porównania wpływu obydwu wariantów rozkładu promieni ($\Delta r = \text{const}$ oraz $\Delta r = \text{var}$) na kształt zbrocza izolacyjnego ze zwróceniem uwagi na wielkość natężenia wzdłużnego i promieniowego. Dla przykładu rozważono izolację kondensatorową z $k = 4$ ekranami głównymi o $e = 3$ przekładkach pośrednich z promieniem początkowym $r_1 = 30\text{mm}$ i końcowym $r_{4+1} = 70\text{mm}$ oraz napięciem roboczym 100kV .



Rys.8. „Zlinearyzowany” kształt zbrocza izolacyjnego dla przypadku $\Delta r = \text{var}$.

Jak widać, konsekwencją przypadku $\Delta r = \text{var}$ jest uzyskanie przez zbrocze izolacyjne kształtu zbliżonego do liniowego. Odbywa się to kosztem wydłużenia ekranów głównych i pomocniczych. Ich dalsze wydłużanie spowodowane jest też

żądaniem zejścia z maksymalnym naprężeniem wzdłużnym $E_{st\ max}$ poniżej przyjętego poziomu. Jeśliby taki warunek nie został w ogóle narzucony, wtedy wartość ta sięgałaby rzędu 0.8÷1.0kV/cm, co oznacza, że zabieg $\Delta r = var$ pozwolił obniżyć ją prawie 3÷4 krotnie.



Rys.9. Rozkład napięć radialnych (lewa skala) i wzdłużnych (prawa skala) dla dwóch sposobu propagacji promieni z narzuconym warunkiem $E_{stmax} \leq 0.25kV/cm$

Zgodnie z oczekiwaniem, nie stwierdzono żadnego wpływu na rozkład napięcia w kierunku promieniowym E_{rn} , które zachowuje stałą wartość rzędu 2.95kV/cm, niezależnie od sposobu propagacji promieni przekładek ekranujących.

7. Wnioski

W referacie zostały wyprowadzone rekurencyjne zależności służące sformułowaniu zagadnienia optymalizacyjnego do określania długości przekładek ekranujących w izolacji typu kondensatorowego przy spełnieniu określonych ograniczeń. Ich postać sprzyja zapisaniu powstałego algorytmu w arkuszu kalkulacyjnym Excel wspomaganym Solverem, co czyni proces rozwiązania zagadnień optymalizacyjnych łatwym i łatwo dostępnym.

LITERATURA

1. Olak J.: Przekładniki prądowe. WNT, Warszawa 1986
2. Giaro J. A.: Referat CIGRE, Paryż 1952

OPTIMIZATION PROBLEMS IN DESIGNING OF CAPACITIVE INSULATOR SHIELDS

Abstract: *The paper formulates optimization problems in designing of capacitive insulator shields regarding an electrical and geometrical requirements. An Excel supplementary Solver optimization tool was applied to solve them in order to determine the length of main and auxiliary shields.*

Key words: *capacitive insulator, shielding*