

WITOLD PAPUŻYŃSKI

Katedra Wysokich Napięć

**METODA ANALITYCZNO-GRAFICZNEGO WYZNACZANIA
STRAT W KONDENSATORACH IMPULSOWYCH**

Streszczenie. W artykule przedstawiono metodę analityczną oraz analityczno-graficzną, służące do wyznaczenia strat w kondensatorach impulsowych. Ułatwienia obliczeniowe, wynikłe z zastosowania omówionych metod, umożliwiły wprowadzenie uproszczonej analizy harmonicznej do wyznaczenia składowych harmonicznych potrzebnych do wyznaczenia strat.

Wprowadzenie

Zagadnienie obliczania strat, wydzielających się w kondensatorach impulsowych pod wpływem tłumionych wyładowań oscylacyjnych, próbowano rozwiązać np. metodą tzw. równoważnej częstotliwości polegającej na porównywaniu pół okresów tłumionego przebiegu do połówek sinusoidy o tym samym czasie trwania [1].

Założenia takie, szczególnie w przypadku przebiegów silnie tłumionych, daje znacze błędy wynikające między innymi z silnych zniekształceń półokresów przebiegu różniących się kształtem od połówek sinusoidy.

Przedstawione poniżej metody dają możliwość obliczania strat zarówno w okładzinach jak i izolacji kondensatorów, w szerokim zakresie możliwych wariantów przebiegów ładowania i wyładowania.

Straty wydzielające się w kondensatorze w postaci ciepła, są sumą strat powstających w dielektryku w procesie ładowania i wyładowania oraz strat w okładzinach, wywołanych przepływem bardzo znacznych prądów w procesie wyładowania.

Straty w okładzinach, w procesie ładowania, są praktycznie równe zero, z uwagi na zazwyczaj bardzo długi czas ładowania w porównaniu z czasem wyładowania.

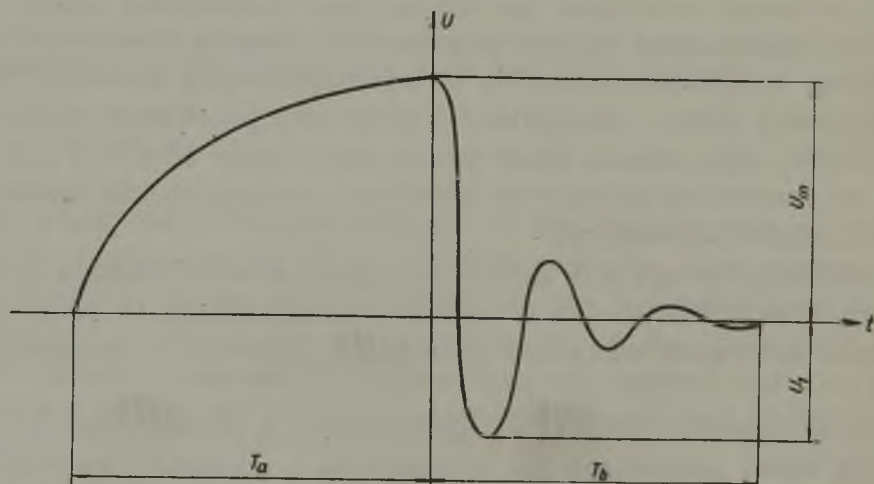
Opracowana metoda polega na rozłożeniu równań przebiegu ładowania i wyładowania w szereg Fouriera.

Po rozłożeniu przebiegów w szereg Fouriera, oblicza się sumaryczne straty w dielektryku, sumując straty wyznaczone dla każdej składowej harmoniczej z uwzględnieniem stratności odpowiadającej częstotliwości każdej harmoniczej.

Powyższy sposób obliczania strat jest wówczas słuszny jeżeli zostaje spełniony warunek, że straty dielektryczne rosną z kwadratem napięcia. Dla rzeczywistych układów izolacyjnych warunek ten jest spełniony jeżeli izolacja jest starannie wysuszona i odgazowana oraz napięcie pracy leży poniżej progu jonizacji. Straty wydzielające się w okładzinach oblicza się jako iloczyn sumy kwadratów prądów pojemnościowych składowych harmoniczych i oporności okładzin kondensatora [2].

Metoda analityczna

Rzeczywisty przebieg napięcia w obwodzie roboczym kondensatora impulsowego przedstawiony jest na rys. 1.



Rys. 1. Rzeczywisty przebieg napięcia w obwodzie roboczym

Na rysunku 1 celem przedstawienia całego przebiegu na jednym wykresie skala czasowa przebiegu wyładowania została roz-

ciągnięta około 1000 razy w porównaniu z przebiegiem ładowania.

Rozłożenie przebiegu przedstawionego na rys. 1 w szereg Fouriera daje szereg wolno zbieżny, dlatego też zastosowano oddzielną analizę przebiegu ładowania i wyładowania. Celem uniknięcia rozpatrywania funkcji nieciągłych, uzupełniono otrzymane przebiegi przebiegami dopełniającymi (rys. 2 i 3).

Przebieg ładowania rys. 2 uzupełniono nie lustrzanym odbiciem, a dopełniającym przebiegiem wyładowania, w czasie którego wydziela się ta sama ilość energii co i w procesie ładowania. Uzupełnienie takie daje szereg o większej zbieżności.

Równania przebiegów, ładowania i tłumionego oscylacyjnego wyładowania, przedstawionych na rys. 2 i 3 mają postać

$$U_{\text{ład}} = U_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) + U_0 e^{-\frac{t - \frac{T_1}{2}}{\tau_1}} - U_0 e^{-\frac{T_1}{2\tau_1}} \quad (1)$$

$$U_{\text{wył}} = U_m \frac{e^{-bt}}{\sqrt{1 - \left(\frac{b}{\omega_0}\right)^2}} \cos \left(\sqrt{\omega_0^2 - b^2} t - \beta \right) \quad (2)$$

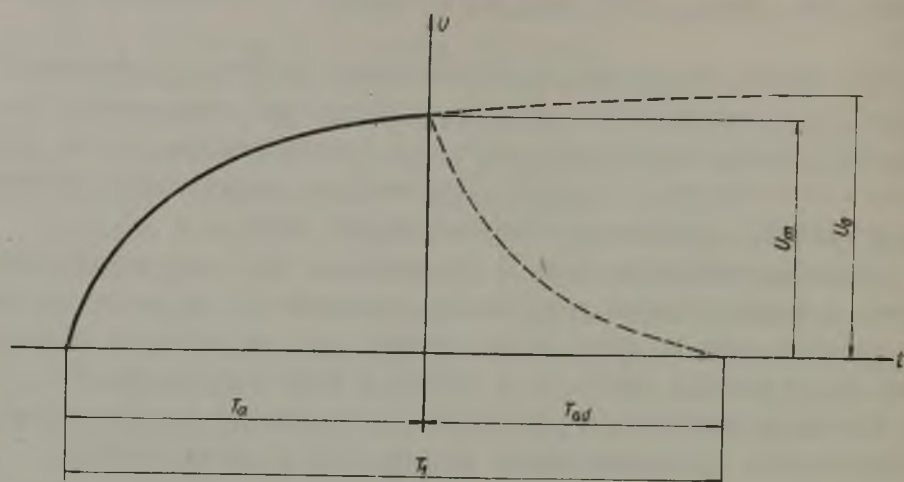
Między wartościami U_0 i U_m zachodzi związek

$$U_0 = U_m \frac{1}{1 - e^{-\frac{T_1}{2\tau_1}}}$$

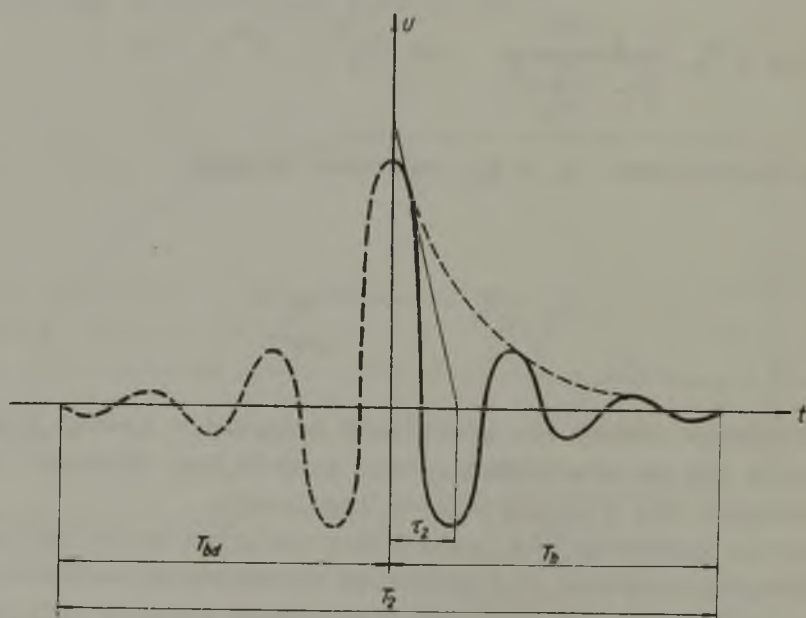
Po rozłożeniu równań obu przebiegów z osobna w szereg Fouriera otrzymuje się po przeliczeniu wzór pozwalający obliczyć straty wydzielające się w kondensatorze impulsowym.

Istotne znaczenie dla dokładności obliczeń całek szeregu Fouriera, szczególnie dla przebiegu wyładowania, ma ustalenie granic całkowania. Do obliczeń zastosowano granice całkowania od 0 do T_b

$$T_b = 5 \tau_2 = \frac{5}{b} \quad (\text{rys. 3})$$



Rys. 2. Przebieg ładowania uzupełniony dopełniającym przebiegiem wyładowania



Rys. 3. Przebieg wyładowania uzupełniony dopełniającym przebiegiem ładowania

Przyjęcie takich granic całkowania daje dużą dokładność obliczeń, ponieważ po czasie $5 \tau_2$ amplituda napięcia osiąga zaledwie 0,67% wartości napięcia początkowego.

Moc strat

$$P = P_u \pi \left[\sum_{k=1}^{k=\infty} k m_k^2 \operatorname{tg} \delta_k + \sum_{n=1}^{n=\infty} n m_n^2 \operatorname{tg} \delta_n + \frac{rc\pi}{b} \sum_{n=1}^{n=\infty} n^2 m_n^2 \right] \quad (3)$$

we wzorze (3)

$$P_u = \frac{C U_m^2}{2} S \quad \text{jest energią dostarczoną kondensatorowi w czasie jednej sekundy przy czym,}$$

S - jest ilością cykli roboczych na sekundę,

$k, n,$ - numery harmoniczných przebiegu ładowania (k) i wyładowania (n),

$$m_k = \frac{2\alpha}{\pi k \sqrt{\alpha^2 + \pi^2 k^2}} \cdot \frac{1 + e^{-\alpha}}{1 - e^{-\alpha}} \quad \text{jest amplitudą } k\text{-tej harmonicznej,}$$

$\operatorname{tg} \delta_k, \operatorname{tg} \delta_n$ stratność dielektryczna odpowiadająca częstotliwości k -tej i n -tej harmonicznej,

$$m_n = \frac{\left(\frac{\omega_0}{b}\right)^2}{\left[\left(\frac{\omega_0}{b}\right)^2 - \frac{\pi^2 n^2}{25}\right]^2 + \frac{4}{25} n^2 \pi^2} \quad \text{jest amplitudą } n\text{-tej harmonicznej, gdzie}$$

$\frac{\omega_0}{b}$ jest stosunkiem pulsacji rezonansowej ω_0 do współczynnika tłumienia b ,

r oporność zastępcza obu okładzin kondensatora, zależna od sposobu nawinięcia,

C pojemność kondensatora.

Trzeci człon wyrażenia w nawiasie wzoru (3) uwzględnia straty w okładzinach.

Częstotliwość poszczególnych składowych harmonicznym przebiegu wyładowania wyraża się zależnością.

$$f_n = \frac{n}{2T_b}$$

Metoda analityczno-graficzna

Dokładna analiza wzoru (3), szczególnie w przypadku przebiegów silnie tłumionych, pozwala znacznie ten wzór uprościć. Jak wynika z przeprowadzonych obliczeń, np. dla $\delta = 2$, amplituda 6 harmonicznym przebiegu wyładowania osiąga po upływie pół okresu zaledwie 0,03 Um. Amplitudy składowych harmonicznym przebiegu ładowania są jeszcze niższe.

Można zatem dla przebiegów silnie tłumionych $\delta \geq 2$, zachowując praktycznie dokładność metody analitycznej, uwzględnić jedynie pierwszą harmoniczną przebiegu ładowania oraz pięć harmonicznym przebiegu wyładowania

$$P = P_u \pi \left[m_1^2 \operatorname{tg} \delta_1 + \sum_{n=1}^{n=5} n m_n^2 \operatorname{tg} \delta_n + \frac{\pi r c}{T_b} \sum_{n=1}^{n=5} n^2 m_n^2 \right] \quad (4)$$

Przytoczony wzór, wymaga znajomości $\operatorname{tg} \delta$ dla pierwszej harmonicznym przebiegu ładowania oraz dla pięciu harmonicznym przebiegu wyładowania.

Celem uproszczenia tego złożonego wzoru, obliczono i przedstawiono na rys. 4 zależność $n m_n^2 = f\left(\frac{\omega_0}{b}\right)$ dla kolejnych pięciu harmonicznym przebiegu wyładowania.

Z rys. 4 wynika, że wpływ poszczególnych harmonicznym na straty jest zależny od stosunku $\frac{\omega_0}{b}$ i decydujący wpływ na wielkość strat mają jedna względnie dwie harmoniczne. Np. dla $\frac{\omega_0}{b} = 2$ decydujący wpływ na straty będą miały 2 i 3 - harmoniczna natomiast dla $\frac{\omega_0}{b} = 2,8$ wpływ ten ma tylko 4 harmoniczna.

Fakt ten daje możliwość dalszego uproszczenia wzoru (4) polegający na zastosowaniu do obliczeń jednej wartości $\operatorname{tg} \delta_u$ dla wszystkich pięciu harmonicznych. Umowny $\operatorname{tg} \delta_u$ musi odpowiadać stratności harmonicznej, która na podstawie rys. 4 została oceniona jako mająca decydujący wpływ na straty. W przypadku jednakowego wpływu dwóch harmonicznych, dla $\frac{\omega_0}{b} < 2$ należy przyjąć stratność harmonicznej o wyższym numerze dla $\frac{\omega_0}{b} > 2$ harmonicznej o niższym numerze.

Wynikający z tego uproszczenia błąd jest rzędu 3-4% w stosunku do obliczeń uwzględniających odpowiednie $\operatorname{tg} \delta$ dla poszczególnych harmonicznych

$$P = P_u \left[m_1^2 \operatorname{tg} \delta_1 + \operatorname{tg} \delta_u \sum_{n=1}^{n=5} n m_n^2 + \frac{R_{rc}}{T_b} \sum_{n=1}^{n=5} n^2 m_n^2 \right] \quad (5)$$

Dla wzoru w tej postaci zostały opracowane wykresy

$$m_1^2 = f(\alpha) \text{ (rys. 5)}, \quad \sum_{n=1}^{n=5} n m_n^2 = f\left(\frac{\omega_0}{b}\right) \text{ (rys. 6)}$$

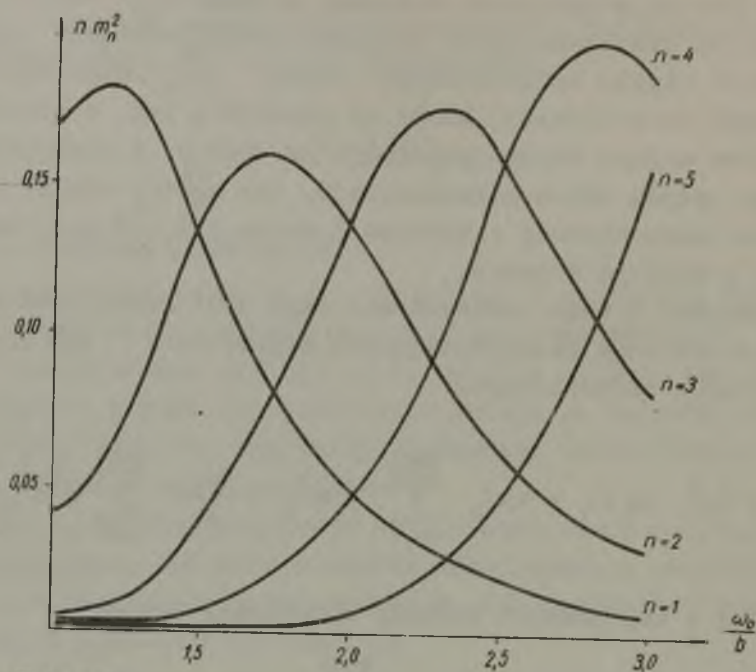
oraz

$$\sum_{n=1}^{n=5} n^2 m_n^2 = f\left(\frac{\omega_0}{b}\right) \text{ również (rys. 6)}$$

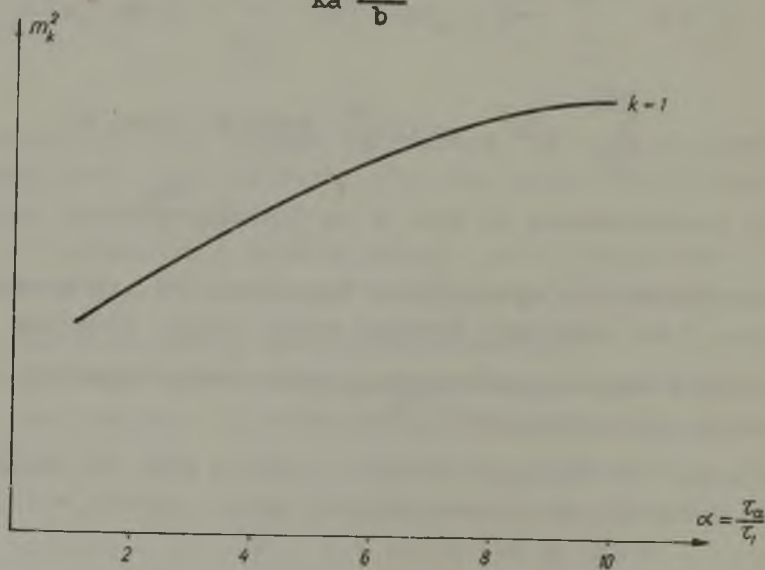
Wykresy przedstawione na rys. 6 są funkcją $\frac{\omega_0}{b}$.

Celem ułatwienia wyznaczenia tego stosunku, opracowano wykres rys. 7 na podstawie którego można znając stosunek $\frac{U_1}{U_m}$, wyznaczony z oscylogramu zdjętego dla obwodu roboczego badanego kondensatora, wyznaczyć $\frac{\omega_0}{b}$.

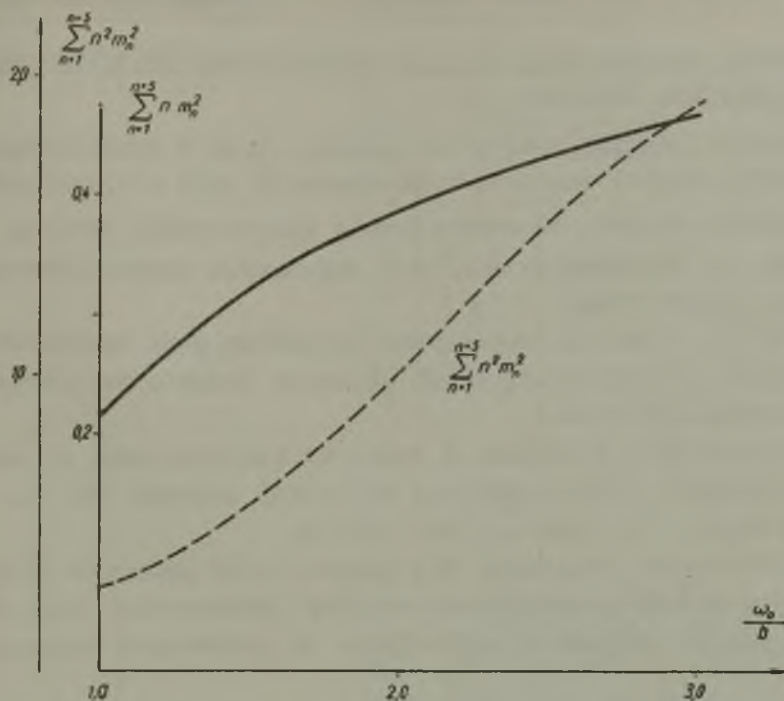
Potrzebne do obliczeń wartości $\operatorname{tg} \delta = f(f)$ dla kondensatorowej izolacji papierowo-olejowej można znaleźć w (3).



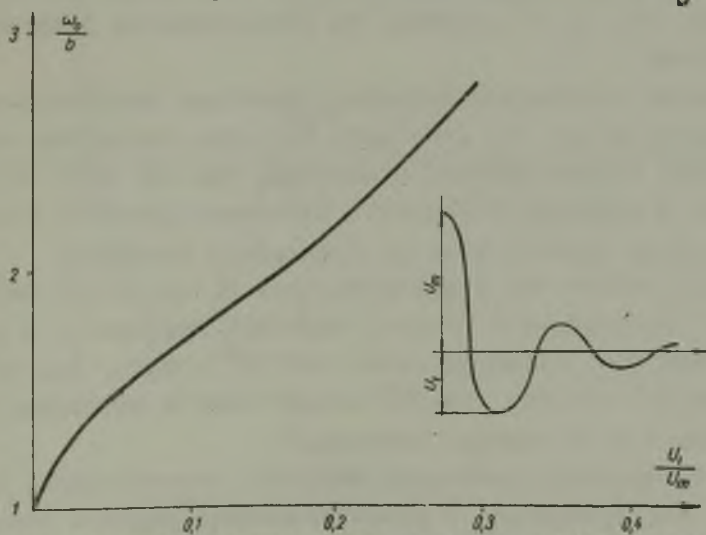
Rys. 4. Wykresy iloczynów numeru harmonicznej i kwadratu współczynnika amplitudy przebiegu wyładowania w funkcji współczynnika $\frac{\omega_0}{b}$



Rys. 5. Wykres kwadratu współczynnika amplitudy pierwszej harmonicznej przebiegu ładowania w funkcji współczynnika α .



Rys. 6. Wykres sumy iloczynów numerów harmoniczných i kwadratów współczynników amplitud oraz wykres sumy iloczynów kwadratów numerów harmoniczných i kwadratów współczynników amplitud dla pięciu harmoniczných w funkcji współczynnika $\frac{\omega_0}{b}$



Rys. 7. Wykres pomocniczy do wyznaczania współczynnika $\frac{\omega_0}{b}$ na podstawie stosunku amplitud przebiegu po czasie $\frac{T}{2}$

Zastosowanie uproszczonej analizy harmonicznej do wyznaczania amplitud szeregu Fouriera

Przedstawione powyżej metody obliczania strat w kondensatorach impulsowych, dzięki znacznemu uproszczeniu toku obliczeń, stwarzają dogodne warunki do zastosowania uproszczonej analizy harmonicznej, do wyznaczania amplitud składowych harmonicznych przebiegu wyładowania.

Jak wynika z rys. 3 rozpatrywany przebieg jest symetryczny względem osi y , wystarczy zatem obliczać jedynie współczynniki "a" szeregu Fouriera.

Można jednocześnie w związku z symetrią względem osi y rozpatrywać jedynie część przebiegu po jednej stronie osi y , o czasie trwania T_D rys. 3 oraz rys. 8.

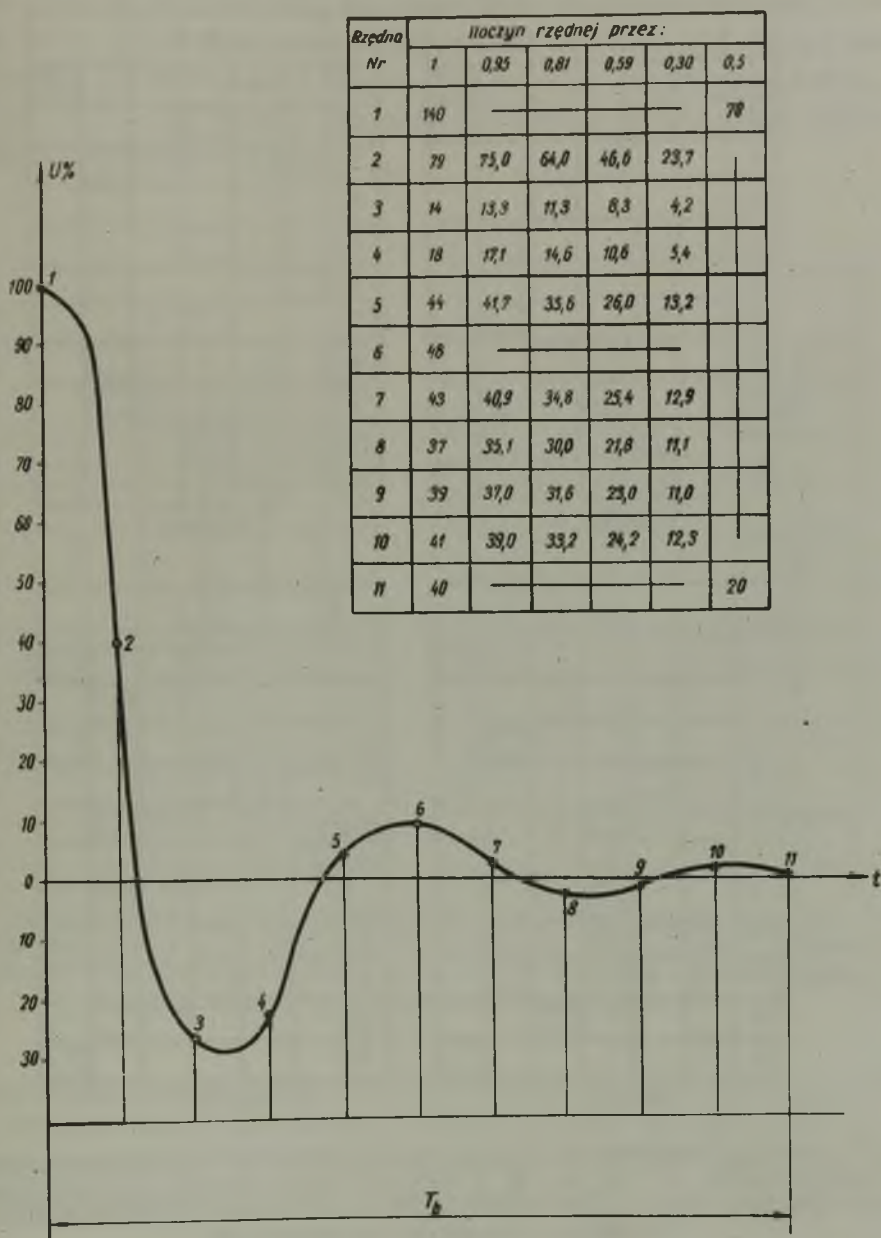
W obliczeniach uwzględnia się jedynie pięć harmonicznych. Jak wiadomo metody przybliżonej analizy harmonicznej dają dość dokładne wyniki jedynie w odniesieniu do pierwszych harmonicznych.

Za pomocą obliczonych amplitud składowych harmonicznych przebiegu napięcia, można obliczyć straty w okładzinach wg wzoru (5). Pomijając dowody matematyczne, które można znaleźć w literaturze [4, 5, 6] zostanie tu przedstawiona jedynie metoda obliczeń.

Powiększony oscylogram badanego przebiegu oscylacyjnego przedstawiony na rys. 8, uzupełnia się osią odciętych narysowaną możliwie blisko krzywej przebiegu, tak aby mieć do czynienia jedynie z rzędnymi dodatnimi. Otrzymany przebieg dzieli się na dziesięć części, kreśląc jednaście rzędnych.

Następnie układa się tabelkę wg rys. 8, na której nanosi się w rubryce 1 nr rzędnej w drugiej wartości rzędnych a w następnych iloczyny tych rzędnych przez $\cos 18^\circ = 0,95$, $\cos 36^\circ = 0,81$, $\cos 54^\circ = 0,59$, $\cos 72^\circ = 0,30$ oraz w ostatniej kolumnie iloczyny 1 i 11 rzędnej przez 0,5.

W celu wyznaczenia szukanych amplitud harmonicznych należy posługiwać się szablonami z przezroczystego papieru wykonanych wg rys. 9a-9b które są opracowane dla 6 harmonicznych.



Rys. 8. Oscylogram przebiegu wraz z таблицą rzędnych i iloczynów rzędnych

Nr	$a=1$				
1.					
2.					
3.					
4.					
5.					
6.					
7.					
8.					
9.					
10.					
11.					

Rys. 9a

Nr	$a=2$				
1.					
2.					
3.					
4.					
5.					
6.					
7.					
8.					
9.					
10.					
11.					

Rys. 9b

Nr	$a=3$				
1.					
2.					
3.					
4.					
5.					
6.					
7.					
8.					
9.					
10.					
11.					

Rys. 9c

Nr	$a=4$				
1.					
2.					
3.					
4.					
5.					
6.					
7.					
8.					
9.					
10.					
11.					

Rys. 9d

Rys. 9a-9d. Szablony do wyznaczenia amplitud składowych harmonicznych od $a = 1$ do $a = 6$. Z klatek oznaczonych grubymi konturami oblicza się $(\Sigma +)$ oraz $(\Sigma -)$ z liczb wypełniających klatki o konturze przerywanym

Po nałożeniu odpowiedniego przezroczystego szablonu na tablice rys. 8, oblicza się kolejno $\sum(+)$ oznaczone grubymi liniami oraz $\sum(-)$ oznaczone przerywanymi liniami dla każdej harmonicznej. Po zsumowaniu tworzy się różnice odpowiednich sum $[\sum(+)-\sum(-)]$ i dzieli przez 5. Otrzymane wyniki dają szukane amplitudy harmonicznych.

e)

Nr	a=5				
1.					
2.					
3.					
4.					
5.					
6.					
7.					
8.					
9.					
10.					
11.					

f)

Nr	a=6				
1.					
2.					
3.					
4.					
5.					
6.					
7.					
8.					
9.					
10.					
11.					

Rys. 9e-9f. Szablony do wyznaczania amplitud składowych harmonicznych od $a = 1$ do $a = 6$. Z klatek oznaczonych grubymi konturami oblicza się $(\sum+)$ oraz $(\sum-)$ z liczb wypełniających klatki o konturze przerywanym

Obliczone wartości amplitud składowych harmonicznych po uwzględnieniu skali napięciowej należy wstawić do wzoru (5) i po przeprowadzeniu omówionych poprzednio obliczeń otrzymuje się straty wydzielające się w kondensatorze.

Np. dla wykresu przebiegu przedstawionego na rys. 8 otrzymano następujące amplitudy składowych harmonicznych.

Metoda	Oznac.	Amplituda harmonicznej K w mm					
		1	2	3	4	5	6
Analityczna	U'_k	110	138	192	227	145	65
Uproszczona	U''_k	109	135	194	225	151	68
Różnica	$U'_k - U''_k$	- 1	- 3	+ 2	- 2	+ 8	+3

WNIOSKI

W artykule przedstawiono metody: analityczną oraz analityczno-graficzną, służące do obliczania strat w izolacji i okładzinach kondensatorów impulsowych.

Metoda analityczna, z uwagi na złożony tok obliczeń, jest praktycznie mało przydatna, szczególnie przy dokonywaniu wstępnych czy orientacyjnych przeliczeń.

Metoda analityczno-graficzna, opracowana z myślą o możliwie maksymalnym uproszczeniu toku obliczeń, dając wyniki zbliżone dokładnością do metody analitycznej, została jednak opracowana jedynie dla przebiegów wyładowania o logarytmicznym dekreście tłumienia $\delta \geq 2$, typowych dla pracy kondensatorów impulsowych.

Uprozczone wzory analityczne, zastosowane w metodzie analityczno-graficznej pozwalają łącznie z metodą uproszczonej analizy harmonicznej, obliczać straty zarówno dla przebiegów silnie tłumionych jak i słabo tłumionych o $\delta \ll 2$.

Rękopis złożono w redakcji w czerwcu 1966 r.

LITERATURA

- [1] Gogolicyn L.Z.: Opriedlielenije potier w impulsnych kondensatorach. Elektrichestwo 8/1957.
- [2] Papużyński W.: Obliczanie strat oraz modelowe badania zjawisk jonizacyjnych w kondensatorach impulsowych. Praca doktorska 1964.
- [3] Renne W.T.: Elektrieszeskije kondensatory Gosenergoizdat 1959.
- [4] Krug K.A.: Osnovy elektrotiechniki. ONTI 1936.
- [5] Smirnow W.I.: Matematyka Wyższa. PWT 1960.
- [6] Bouvier A.: Graphische Fourieranalyse. ETZ-A H23/1965.

МЕТОД АНАЛИТИЧЕСКИ-ГРАФИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ
В ИМПУЛЬСНЫХ КОНДЕНСАТОРАХ

Р е з ю м е

В статье представлен аналитический, а также аналитически-графический метод, служащий для определения потерь в импульсных конденсаторах.

Расчетные облегчения, следующие из применения рассматриваемых методов, дали возможность ввести упрощенный гармонический анализ для определения гармонических составляющих, необходимых для вычисления потерь.

METHOD OF THE ANALYTICAL AND GRAPHICAL DETERMINATION
OF THE LOSSES IN THE IMPULSE CONDENSERS.

S u m m a r y

The paper describes the analytical method and the analytical and graphical method for the losses determination in the impulse condensers. Calculation facilities, resulted from the applying of the discussed method have enabled the applying of the simplified harmonic analysis for the determination of the harmonics necessary for the losses determination.