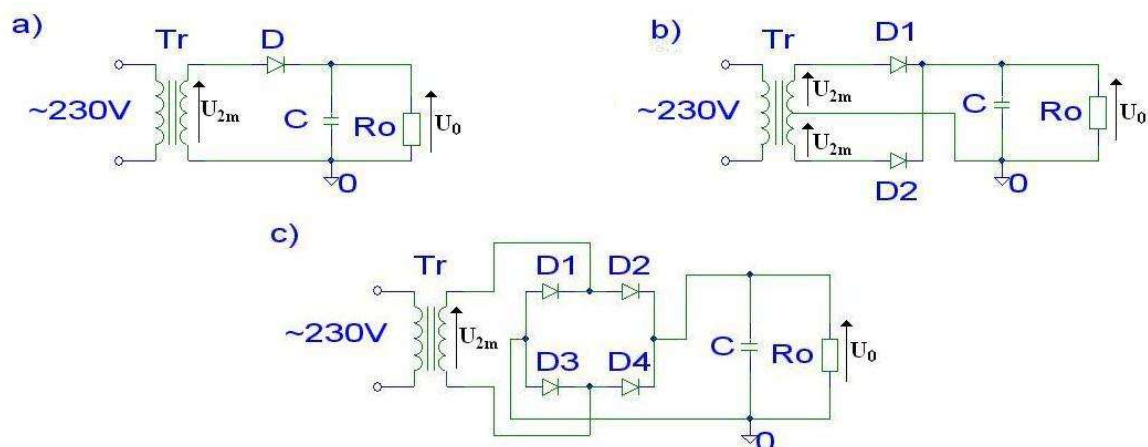


Projektowanie i analiza układów prostowniczych

1. Projektowanie układów prostowniczych z filtrem pojemnościowym

Na rys. 1 przedstawiono schematy trzech prostowników: jednopołówkowego, dwupołówkowego z dzielonym uzwojeniem transformatora, mostkowego. Wszystkie układy zawierają na wyjściu filtr pojemnościowy. Projekt tych układów można wykonać w oparciu o dwie proste metody: uproszczoną analityczną i graficzną. Obie metody nie uwzględniają stanów nieustalonych oraz nieliniowych zjawisk występujących w układach prostowniczych. Ze względu na to, że uzyskane wyniki projektowania są przybliżone obie metody pozwalają jedynie oszacować, z pewnym błędem, wartości elementów prostownika. Dlatego też po wykonaniu obliczeń należy wykonać symulację komputerową pracy układu i na podstawie uzyskanych wyników dokonać korekty wartości elementów prostownika. Następnie należy zmontować układ prostownika, wykonać pomiary jego parametrów i jeżeli zachodzi taka konieczność ponownie skorygować wartości elementów.



Rys. 1. Schematy układów prostowniczych: a) jednopołówkowego, b) dwupołówkowego z dzielonym uzwojeniem transformatora, c) mostkowego

1.1. Metoda analityczna uproszczona

Metoda analityczna uproszczona polega na wykorzystaniu do projektowania prostowników zależności przybliżonych pozwalających obliczyć parametry układów. Poniżej zostaną przedstawione równania opisujące parametry każdego z przedstawionych na rys. 1 układów prostowniczych.

1.1.1. Prostownik jednopołówkowy

- napięcie wyjściowe:

$$U_0 \cong (U_{2m0} - U_F) \left(1 - \sqrt{\frac{R_s}{R_0}} \right) \quad (1)$$

- międzyszczytowe napięcie tętnień:

$$U_{tpp} \cong \frac{I_0}{Cf} \left(1 - \sqrt[4]{\frac{R_s}{R_0}} \right) \quad (2)$$

- napięcie wyjściowe minimalne:

$$U_{0min} \cong U_0 - \frac{2}{3} U_{tpp} \quad (3)$$

- napięcie wyjściowe biegu jałowego (prostownika nie obciążonego):

$$U_{00} = U_{2m0} - U_F \quad (4)$$

- maksymalne napięcie wsteczne diody prostowniczej:

$$U_{RM} = 2U_{2m0} \quad (5)$$

- średni prąd przewodzenia diody prostowniczej:

$$I_{sr} \cong I_0 \quad (6)$$

- szczytowy prąd przewodzenia diody prostowniczej:

$$I_{max} \cong \frac{(U_{2m0} - U_F)}{\sqrt{R_s R_0}} \quad (7)$$

- szczytowy prąd przewodzenia diod w prostowniku bez pojemności filtrującej:

$$I_{max} = \frac{U_{2m0} - U_F}{R_s + R_0} \quad (7a)$$

- impuls prądu rozruchu prostownika:

$$I_r = \frac{U_{2m0} - U_F}{R_s} \quad (8)$$

1.1.2. Prostownik dwupółkowy z dzielonym uzwojeniem transformatora

- napięcie wyjściowe:

$$U_0 \cong (U_{2m0} - U_F) \left(1 - \sqrt{\frac{R_s}{2R_0}} \right) \quad (9)$$

- międzyszczytowe napięcie tętnień:

$$U_{tpp} \cong \frac{I_0}{2Cf} \left(1 - \sqrt[4]{\frac{R_s}{2R_0}} \right) \quad (10)$$

- napięcie wyjściowe minimalne:

$$U_{0min} \cong U_0 - \frac{2}{3} U_{tpp} \quad (11)$$

- napięcie wyjściowe biegu jałowego (prostownika nie obciążonego):

$$U_{00} = U_{2m0} - U_F \quad (12)$$

- maksymalne napięcie wsteczne diod prostowniczych:

$$U_{RM} = 2U_{2m0} \quad (13)$$

- średni prąd przewodzenia diod prostowniczych:

$$I_{sr} \cong \frac{1}{2} I_0 \quad (14)$$

- szczytowy prąd przewodzenia diod prostowniczych:

$$I_{max} \cong \frac{(U_{2m0} - U_F)}{\sqrt{2R_s R_0}} \quad (15)$$

- szczytowy prąd przewodzenia diod w prostowniku bez pojemności filtrującej:

$$I_{max} = \frac{U_{2m0} - U_F}{R_s + R_0} \quad (15a)$$

- impuls prądu rozruchu prostownika:

$$I_r = \frac{U_{2m} - U_F}{R_s} \quad (16)$$

1.1.3. Prostownik mostkowy

- napięcie wyjściowe:

$$U_0 \cong (U_{2m0} - 2U_F) \left(1 - \sqrt{\frac{R_s}{2R_0}} \right) \quad (17)$$

- międzyszczytowe napięcie tętnień:

$$U_{ipp} \cong \frac{I_0}{2Cf} \left(1 - \sqrt[4]{\frac{R_s}{2R_0}} \right) \quad (18)$$

- napięcie wyjściowe minimalne:

$$U_{0min} \cong U_0 - \frac{2}{3} U_{ipp} \quad (19)$$

- napięcie wyjściowe biegu jałowego (prostownika nie obciążonego):

$$U_{00} = U_{2m0} - 2U_F \quad (20)$$

- maksymalne napięcie wsteczne diod prostowniczych:

$$U_{RM} = U_{2m0} \quad (21)$$

- średni prąd przewodzenia diod prostowniczych:

$$I_{sr} \cong \frac{1}{2} I_0 \quad (22)$$

- szczytowy prąd przewodzenia diod prostowniczych:

$$I_{max} \cong \frac{(U_{2m0} - 2U_F)}{\sqrt{2R_s R_0}} \quad (23)$$

- szczytowy prąd przewodzenia diod w prostowniku bez pojemności filtrującej:

$$I_{max} = \frac{U_{2m0} - 2U_F}{R_s + R_0} \quad (23a)$$

- impuls prądu rozruchu prostownika:

$$I_r = \frac{U_{2m} - 2U_F}{R_s} \quad (24)$$

gdzie:

R_0 – rezystancja obciążenia prostownika

R_s – rezystancja wewnętrzna transformatora

U_0 – średnie napięcie wyjściowe prostownika (na obciążeniu R_0)

U_{00} – amplituda napięcia na wyjściu nie obciążonego prostownika (przy braku R_0)

U_{2m} – amplituda napięcia na zaciskach obciążonego transformatora (z obciążeniem R_0)

U_{2m0} – amplituda napięcia na zaciskach nie obciążonego transformatora (przy braku R_0)

U_F – spadek napięcia na diodzie prostowniczej

U_{tp} – międzyszczytowe napięcie tętnień na wyjściu prostownika (na obciążeniu R_0)

U_{RM} – napięcie wsteczne na diodzie prostowniczej (przy polaryzacji zaporowej)

I_0 – średni prąd wyjściowy prostownika (płynący przez R_0)

I_{sr} – średni prąd diody prostowniczej

I_{max} – maksymalny prąd diody prostowniczej

I_r – impuls prądu rozruchowego prostownika (po włączeniu napięcia)

C – pojemność filtrująca

f – częstotliwość napięcia sieciowego równa 50 Hz

Dla wszystkich rodzajów prostownika określa się także współczynnik tętnień napięcia wyjściowego:

$$k_t = \frac{U_{tp}}{U_0} 100\% . \quad (25)$$

1.2. Metoda graficzna

Metoda graficzna polega na wykorzystaniu do projektowania układów prostowniczych tzw. diagramów Schadego (rys. 13 – 24). Diagramy Schadego przedstawiają zależność parametrów układu prostowniczego od unormowanej pulsacji granicznej filtru prostownika $\frac{\omega}{\omega_0} = 2\pi f R_0 C$, gdzie: $\omega = 2\pi f$, $\omega_0 = \frac{1}{R_0 C}$, C jest pojemnością filtru prostownika, R_0 jego rezystancją obciążenia, a f częstotliwością sieci równą 50 Hz. Dla każdego z rodzajów prostowników, przedstawiono cztery diagramy:

- zależność współczynnika wykorzystania napięcia $\eta_U = \frac{U_0}{U_{2m0}} 100 [\%]$ od iloczynu $2\pi f R_0 C$ dla różnych wartości stosunku rezystancji obciążenia do rezystancji wewnętrznej transformatora $\left(\frac{R_0}{R_s} \right)$,
- zależność współczynnika tętnień $k_t = \frac{U_{tp}}{U_0} 100 [\%]$ od iloczynu $2\pi f R_0 C$ dla różnych wartości stosunku rezystancji obciążenia do rezystancji wewnętrznej transformatora $\left(\frac{R_0}{R_s} \right)$,

- zależność stosunku prądu skutecznego diod do prądu średniego $\left(\frac{I_{sk}}{I_{sr}}\right)$ od iloczynu $2\pi f R_0 C$ dla różnych wartości stosunku rezystancji obciążenia do rezystancji wewnętrznej transformatora $\left(\frac{R_0}{R_s}\right)$,
- zależność stosunku prądu maksymalnego diod do prądu średniego $\left(\frac{I_{max}}{I_{sr}}\right)$ od iloczynu $2\pi f R_0 C$ dla różnych wartości stosunku rezystancji obciążenia do rezystancji wewnętrznej transformatora $\left(\frac{R_0}{R_s}\right)$.

Sposób korzystania z poszczególnych diagramów zostanie przedstawiony niżej w przykładowym projekcie prostownika.

1.3. Transformator sieciowy

Przy projektowaniu układu prostowniczego należy oszacować parametry transformatora sieciowego. Poniżej zostaną przedstawione zależności umożliwiające wyznaczenie wymaganych przybliżonych parametrów transformatora sieciowego. W klasycznym przypadku przez pojęcie zasilacza niestabilizowanego rozumiemy transformator i współpracujący z nim prostownik. Istnieją także zasilacze pracujące bez transformatora, np. gdy prostowane napięcie przemienne jest brane bezpośrednio z sieci energetycznej.

Należy pamiętać o tym, że producenci podają parametry znamionowe transformatorów: napięcie i prąd uzwojenia wtórnego, w wartościach skutecznych (U_{2sk} , I_{2sk}). Parametry te dla napięć sinusoidalnych są powiązane z wcześniej podanymi wartościami szczytowymi zależnościami:

$$U_{2sk} = \frac{U_{2m}}{\sqrt{2}} \quad (26)$$

$$I_{2sk} = \frac{I_{2m}}{\sqrt{2}}. \quad (27)$$

Skuteczna wartość napięcia biegu jałowego transformatora dana jest zależnością:

$$U_{2sk0} = \frac{U_{2m0}}{\sqrt{2}}. \quad (28)$$

Parametry transformatora:

- moc znamionowa (skuteczna) transformatora

$$P_N \cong \alpha I_0 (U_0 + U_F) \text{ - prostownik jednopółkowy i dwupółkowy} \quad (29)$$

z dzielonym uzwojeniem transformatora

$$P_N \cong \alpha I_0 (U_0 + 2U_F) \text{ - prostownik mostkowy} \quad (30)$$

$$P_N = U_{2sk} I_{2sk} - \text{wyrażona parametrami transformatora podawanymi przez producentów} \quad (31)$$

- współczynnik określający spadek napięcia przy obciążeniu znamionowym

$$s_U = \frac{U_{2sk0}}{U_{2sk}} = \frac{U_{2m0}}{U_{2m}} \quad (32)$$

- obciążenie znamionowe

$$R_N = \frac{U_{2sk}}{I_{2sk}} \quad (33)$$

- rezystancja wewnętrzna transformatora:

$$R_S = R_N (s_U - 1) \quad (34)$$

- przekładnia transformatora:

$$p = \frac{U_{1sk}}{U_{2sk0}} = \frac{z_1}{z_2} \quad (35)$$

- rezystancja wewnętrzna transformatora widziana z zacisków uzwojenia wtórnego:

$$R_S = r_{wtorne} + \frac{r_{pierwotne}}{p^2} \quad (36)$$

gdzie:

z_1, z_2 – są liczbami zwojów uzwojeń kolejno: pierwotnego i wtórnego,

$r_{pierwotne}, r_{wtorne}$ – rezystancje uzwojeń kolejno: pierwotnego i wtórnego,

α - współczynnik kształtu prądu; dla prostownika jednopołówkowego $\alpha = 3.09$, dla prostownika dwupołówkowego z dzielonym uzwojeniem transformatora $\alpha = 1.48$, a dla prostownika mostkowego $\alpha = 1.23$. Aby nie przekroczyć obciążalności termicznej transformatora, określonej zależnościami (29) i (30), wybiera się współczynnik α nieco większy od podanego. Zwiększa to sprawność transformatora kosztem wzrostu jego rozmiarów. Dlatego zamiast transformatora o rdzeniu typu EI można zastosować transformator toroidalny, który posiada mniejsze rozmiary przy zachowaniu takiej samej mocy znamionowej. Jednakże zastosowanie transformatora toroidalnego zwiększa cenę projektowanego układu.

W Tabelach 1 i 2 przedstawiono typowe dane techniczne transformatorów sieciowych z rdzeniami: typu EI i toroidalnymi (pierścieniowymi). Są to dane szacunkowe i poszczególne typy transformatorów mogą posiadać parametry różniące się od umieszczonych w tabelach. Tabele te pozwalają określić przybliżone parametry transformatora, który ma współpracować z projektowanym prostownikiem.

Tabela 1. Typowe dane transformatorów z rdzeniem typu EI dla napięć pierwotnych $U_{1sk} = 230V$, $f = 50Hz$

Typ rdzenia (długość boku w mm)	Moc znamionowa P_N [W]	Współczynnik strat napięcia s_U	Liczba zwo- jów uzwojenia pierwotnego z_1	Średnica prze- wodu uzwoje- nia pierwotne- go d_1	Liczba zwo- jów uzwojenia wtórnego na wolt napięcia skutecznego $\frac{z_2 \sqrt{2}}{U_{2m}}$ [1/V]	Znormalizo- wana średnica przewodu uzwojenia wtórnego $\frac{d_2}{\sqrt{\frac{I_{2m}}{\sqrt{2}}}}$ [mm / \sqrt{A}]
M 42	4	1.31	4716	0.09	28	0.61
M 55	15	1.2	3671	0.18	14.62	0.62
M 65	33	1.14	1677	0.26	8.68	0.64
M 74	55	1.11	1235	0.34	6.24	0.65
M 85a	80	1.09	978	0.42	4.83	0.66
M 85b	105	1.06	655	0.48	3.17	0.67
M 102a	135	1.07	763	0.56	3.72	0.69
M 102b	195	1.05	513	0.69	2.45	0.71

Tabela 2. Typowe dane transformatorów z rdzeniem toroidalnym dla napięć pierwotnych
 $U_{1sk} = 230V$, $f = 50Hz$

Średnica ze- wnętrzna D [mm]	Moc znamionowa P_N [W]	Współczynnik strat napięcia s_U	Liczba zwo- jów uzwojenia pierwotnego z_1	Średnica prze- wodu uzwoje- nia pierwotne- go d_1	Liczba zwo- jów uzwojenia wtórnego na wolt napięcia skutecznego $\frac{z_2 \sqrt{2}}{U_{2m}}$ [1/V]	Znormalizo- wana średnica przewodu uzwojenia wtórnego $\frac{d_2}{\sqrt{\frac{I_{2m}}{\sqrt{2}}}}$ [mm / \sqrt{A}]
60	10	1.18	3500	0.15	19.83	0.49
61	20	1.18	2720	0.18	14.83	0.54
70	30	1.16	2300	0.22	12.33	0.55
80	50	1.15	2140	0.3	11.25	0.56
94	75	1.12	1765	0.36	9.08	0.58
95	100	1.11	1410	0.4	7.08	0.6
100	150	1.09	1100	0.56	5.42	0.61
115	200	1.08	820	0.6	4	0.62
120	300	1.07	715	0.71	3.42	0.63

Wybór transformatora może być podyktowany wieloma czynnikami. Oba typy: z rdzeniem typu EI i toroidalnym posiadają wady i zalety. Na przykład transformatory toroidalne są trudniejsza do nawijania, a co za tym idzie ich cena jest wyższa, zwłaszcza przy małych mocach. Posiadają one jednak zalety w porównaniu do transformatorów z rdzeniem płaszcowym: znacznie mniejsze rozproszenie pola magnetycznego, mniejszy prąd magnesujący i straty biegu jałowego.

1.4. Przykładowy projekt

Poniżej zostanie przedstawiony przykład projektowania prostownika dwupołkowego mostkowego. Projekt będzie wykonany dwoma alternatywnymi metodami: analityczną i graficzną. Metodę graficzną można stosować dla dowolnych wartości współczynnika tętnień, natomiast metodą analityczną można zastosować w przypadku małej wartości współczynnika tętnień ($k_t \leq 20\%$). W przypadku prostownika jednapołówkowego zastosowanie metody analitycznej nie wprowadza dużych błędów obliczeniowych jedynie przy małych obciążeniach prostownika ($I_0 < 200$ mA). Dla większych obciążeń parametry prostownika jednapołówkowego należy wyznaczać w oparciu o diagramy Schadego.

1.4.1. Zadanie

Zaprojektować prostownik mostkowy z filtrem pojemnościowym współpracujący z 9V stabilizatorem napięcia LM7809. Maksymalnym prąd obciążenia prostownika jest równy 1A. Napięcie tętnień nie powinno przekraczać wartości 1.5V.

1.4.1.1. Rozwiązanie metodą analityczną

Według danych katalogowych stabilizatora LM7809 minimalne napięcie wejściowe układu zapewniające poprawną pracę jest o 2V większe od napięcia wyjściowego. Czyli minimalne napięcie wyjściowe prostownika powinno wynosić:

$$U_{0\min} = 11\text{ V}.$$

Stąd po przekształceniu zależności (19) otrzymujemy:

$$U_0 = U_{0\min} + \frac{2}{3} U_{tpp} = 11\text{ V} + 1\text{ V} = 12\text{ V}.$$

Stąd rezystancja obciążenia prostownika R_0 wynosi:

$$R_0 = \frac{U_0}{I_0} = \frac{12\text{ V}}{1\text{ A}} = 12\Omega.$$

Kolejnym krokiem jest wyznaczenie wartości rezystancji wewnętrznej transformatora R_s . Aby wyznaczyć jej wartość musimy znać moc znamionową transformatora P_N , wartość współczynnika strat napięcia s_U oraz wartości napięcia znamionowego transformatora U_{2sk} . Korzystając z zależności (30), zakładając spadek napięcia na diodzie prostowniczej $U_F = 1\text{ V}$, dla $\alpha = 1.4$ otrzymujemy:

$$P_N = \alpha I_0 (U_0 + 2U_F) = 1.4\text{ A}(12\text{ V} + 2\text{ V}) = 19.6\text{ W}.$$

Zakładając użycie transformatora toroidalnego, z Tabeli 2 odczytujemy dane transformatora: średnica $D = 61$ mm, $s_U = 1.18$. W celu wyznaczenia wartości rezystancji wewnętrznej transformatora musimy założyć wartość napięcia znamionowego transformatora U_{2sk} , a następnie korzystając z zależności (17), (26), (32), (33) i (34) rozwiązać iteracyjnie układ równań nieliniowych:

Krok 1: - przyjmując $U_{2sk} \approx U_{0min} = 11\text{ V}$ z równań (33) i (34) wynika:

$$R_S = R_N(s_U - 1) = \frac{U_{2sk}^2}{P_N}(s_U - 1) = \frac{(11V)^2}{19.6W}(1.18 - 1) = 1.11\Omega.$$

Następnie sprawdzamy czy dla wyznaczonej wartości R_S napięcie U_0 jest takie jakie obliczono wcześniej. Korzystając z zależności (17), (26) i (32) otrzymujemy:

$$\begin{aligned} U_0 &= (U_{2m0} - 2U_F) \left(1 - \sqrt{\frac{R_S}{2R_0}} \right) \sqrt{2}U_{2sk}s_U - 2U_F \left(1 - \sqrt{\frac{R_S}{2R_0}} \right) = \\ &= (\sqrt{2} \cdot 11V \cdot 1.18 - 2 \cdot 1V) \left(1 - \sqrt{\frac{1.11\Omega}{2 \cdot 12\Omega}} \right) = 12.83V \end{aligned}$$

Uzyskana wartość jest o 0.83V za duża.

Krok 2 - w kolejnej iteracji zmniejszamy wcześniej założoną wartość U_{2sk} o 0.83V (czyli $U_{2sk} = 10.17V$) i ponownie wyznaczamy rezystancję R_S :

$$R_S = R_N(s_U - 1) = \frac{U_{2sk}^2}{P_N}(s_U - 1) = \frac{(10.17V)^2}{19.6W}(1.18 - 1) = 0.95\Omega.$$

Dla nowej wartości R_S wyznaczamy wartość napięcia U_0 :

$$\begin{aligned} U_0 &= (U_{2m0} - 2U_F) \left(1 - \sqrt{\frac{R_S}{2R_0}} \right) \sqrt{2}U_{2sk}s_U - 2U_F \left(1 - \sqrt{\frac{R_S}{2R_0}} \right) = \\ &= (\sqrt{2} \cdot 10.17V \cdot 1.18 - 2 \cdot 1V) \left(1 - \sqrt{\frac{0.95\Omega}{2 \cdot 12\Omega}} \right) = 11.99V \approx 12V \end{aligned}$$

Uzyskana wartość jest równa żądanej wartości U_0 . Teraz możemy określić dane transformatora. Po zaokrągleniu napięcie $U_{2sk} = 10.2V$. Na podstawie zależności (31) wyznaczamy prąd znamionowy:

$$I_{2sk} = \frac{P_N}{U_{2sk}} \approx 2A.$$

Teraz z Tabeli 2 odczytujemy pozostałe dane transformatora:

- uzwojenie pierwotne (dla napięcia sieciowego 230V):

$$z_1 = 2720 \text{ zwojów; średnica przewodu } 0.18 \text{ mm,}$$

- uzwojenie wtórne:

$$z_2 = 14.83 \frac{1}{V} \cdot 10.2V = 152 \text{ zwoje};$$

$$\text{średnica przewodu } d_2 = 0.54 \frac{mm}{\sqrt{A}} \cdot \sqrt{2A} = 0.76 \text{ mm}.$$

W kolejnym kroku, korzystając z przekształconej zależności (18), obliczamy wartość pojemności filtrującej C:

$$C \cong \frac{I_0}{2U_{tpp}f} \left(1 - \sqrt[4]{\frac{R_s}{2R_0}} \right) = \frac{1A}{2 \cdot 1.5V \cdot 50Hz} \left(1 - \sqrt[4]{\frac{0.95\Omega}{2 \cdot 12\Omega}} \right) = 3693\mu F.$$

Szereg wartości pojemności elektrolitycznych posiada niewiele wartości. Wyznaczona pojemność mieści się pomiędzy dostępnymi wartościami 3300μF i 4700μF. Przybliżenie wyznaczonej wartości do pojemności 3300μF może spowodować wzrost tętnień na wyjściu prostownika w porównaniu do wartości wymaganej. Dlatego wybieramy wartość pojemności równą 4700μF. Wybór większej wartości pojemności, aniżeli wyznaczona, spowoduje polepszenie parametrów układu poprzez zmniejszenie wartości napięcia tętnień na wyjściu prostownika.

Drugim ważnym parametrem kondensatora, oprócz wartości pojemności, jest napięcie przebicia, czyli maksymalne napięcia jakie może być przyłożone pomiędzy okładki kondensatora. Maksymalne napięcie jakie może się pojawić na pojemności filtrującej jest równe napięciu wyjściowemu nie obciążonego prostownika. Obliczamy je korzystając z zależności (20):

$$U_{00} = U_{2m0} - 2U_F = \sqrt{2}U_{2sk}s_u - 2U_F = \sqrt{2} \cdot 10.2V \cdot 1.18 - 2 \cdot 1V = 15.02V.$$

Wynika z tego, że napięcie przebicia zastosowanej w prostowniku pojemności musi być większe niż 15.02V. Dlatego w prostowniku powinien być użyty kondensator elektrolityczny o minimalnych parametrach 4700μ/16V, choć bezpieczniej (ze względu na możliwość przebicia) byłoby zastosować kondensator 4700μ/25V.

Ostatnim elementem, którego parametry należy określić są diody prostownicze. Wartość średniego prądu przewodzenia diod wyznaczamy z zależności (22):

$$I_{sr} \cong \frac{1}{2} I_0 = 0.5A.$$

Następnie, z równania (23), wyznaczamy wartość prądu maksymalnego jaki popłynie przez diody:

$$I_{\max} \cong \frac{U_{2m0} - 2U_F}{\sqrt{2R_s R_0}} = \frac{\sqrt{2}U_{2sk}s_u - 2U_F}{\sqrt{2R_s R_0}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 10.2V \cdot 1.18 - 2 \cdot 1V}{\sqrt{2 \cdot 0.95\Omega \cdot 12\Omega}} = 3.14A$$

Kolejnym ważnym parametrem jest maksymalne napięcie wsteczne jakie może wystąpić na diodach. Wyznaczamy je korzystając z zależności (21):

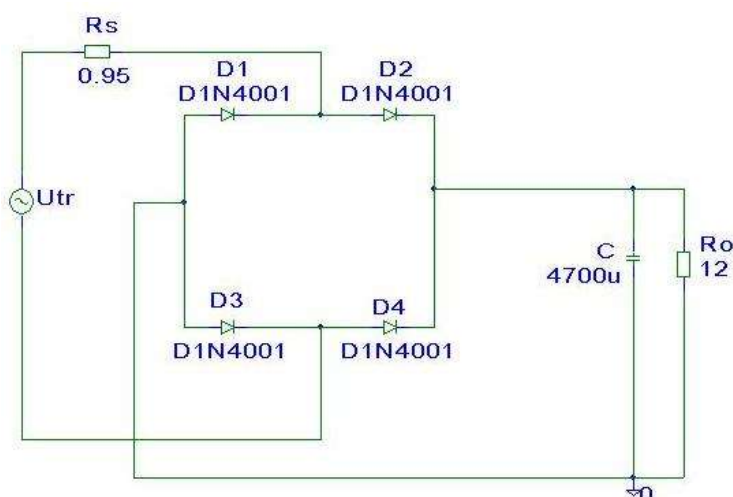
$$U_{RM} = U_{2m0} = \sqrt{2}U_{2sk}s_u = \sqrt{2} \cdot 10.2V \cdot 1.18 = 17.02V.$$

Ostatnim ważnym parametrem, jeżeli chodzi o diody prostownicze, jest prądowy impuls powstający przy włączeniu prostownika. Jego wartość może być wielokrotnie wyższa niż prąd maksymalny płynący przez diody. Obliczamy wartość impulsu prądowego korzystając z zależności (24):

$$I_r = \frac{U_{2m} - 2U_F}{R_s} = \frac{\sqrt{2}U_{2sk} - 2U_F}{R_s} = \frac{\sqrt{2} \cdot 10.2V - 2 \cdot 1V}{0.95\Omega} = 13.07A.$$

Znając wszystkie parametry można wybrać, korzystając z katalogu, odpowiednią diodę prostowniczą. W prostowniku można zastosować np. popularną diodę typu 1N4001. Posiada ona następujące parametry $I_{srMAX} = 1A$, $U_{Rfmax} = 50V$, $I_{rMAX} = 30A$ w impulsie prądowym o kształcie wyprostowanej sinusoidy (połowa okresu przebiegu sinusoidalnego) i czasie trwania 8.3mS. W przypadku naszego prostownika impuls prądowy diod w najgorszym przypadku trwa dłużej, czyli 10 mS czyli połowę okresu napięcia sieciowego. Jednakże wyznaczone wartości prądów I_r oraz I_{max} są dużo mniejsze od prądu I_{rMAX} diody 1N4001. Warto dodać, że w układzie zamiast czterech pojedynczych diod można użyć gotowego mostka prostowniczego. Mostki takie są także dostępne w handlu, a parametry je opisujące są takie same jak parametry pojedynczych diod prostowniczych.

W celu sprawdzenia parametrów projektowanego prostownika wykonano symulację układu z wykorzystaniem programu Pspice. Na rys. 2 przedstawiono o schemat symulowanego prostownika.



Rys. 2. Schemat układu symulowanego prostownika

Symulację wykonano dla następujących parametrów źródła U_{tr} : $DC = 0$, $AC = 1$, $VAMPL = 17V$, $FREQ = 50Hz$. Otrzymano następujące parametry układu: $U_0 = 11.485V$, $U_{0min} = 10.91V$, $U_{tpp} = 1.22V$, $I_0 = 0.957A$. Uzyskane parametry nieznacznie różnią się od zakładanych, jednakże trzeba skorygować wartości elementów układu aby prostownik mógł współpracować z stabilizatorem LM7809 (chodzi o U_{0min} , które nie może być mniejsze od 11V przy prądzie obciążenia $I_0 = 1A$). Po zwiększeniu amplitudy napięcia generatora o 0.5V ($VAMP = 17.5V$) prostownik osiągnął wymaganą wartość $U_{0min} = 11V$. Zwiększenie napięcia wyjściowego transformatora U_{2m0} o 0.5V jest równe zwiększeniu wartości U_{2sk} o 0.35V co pociąga za sobą zwiększenie liczby zwojów uzwojenia wtórnego o $14.83 \frac{1}{V} \cdot 0.35 = 5.19 \approx 5$ zwojów co nie wpływa na zmianę parametrów transformatora. Skorygowana liczba zwojów uzwojenia wtórnego transformatora wynosi $z_2 = 157$ zwojów.

Dla nowej wartości U_{2m0} wartość napięcia tętnień nie wzrosła znacznie i wynosi $U_{ipp} = 1.24V$. Napięcie U_0 jest równe $11.66V$, a prąd $I_0 = 0.97A$. W celu sprawdzenia parametrów układu przy prądzie $I_0 = 1A$, zmniejszono wartość rezystancji obciążenia do wartości $R_0 = 11.6\Omega$ i ponownie wykonano symulację pracy układu. Osiągnięto następujące parametry: $U_{0min} = 11.006V$, $U_0 = 11.6V$, $U_{ipp} = 1.27V$, $I_0 = 0.99A$, $I_r = 9.36A$, $I_{max} = 3.5A$, $I_{sr} = 0.514A$. Użyte parametry są zgodne z założeniami. W następnym kroku układ powinien być zmontowany w celu pomiaru jego rzeczywistych parametrów.

Należy jeszcze wspomnieć, że przy obliczeniach nie brano pod uwagę wahań napięcia sieci energetycznej, które mają także wpływ na pracę prostownika.

1.4.1.2. Rozwiązanie metodą graficzną

W pierwszym kroku, podobnie jak dla metody analitycznej, określamy minimalną wartość napięcia wyjściowego. Ze względu na to, że minimalne napięcie wejściowe stabilizatora LM 7809 powinno być o $2V$ większe od napięcia wyjściowego $U_{0min} = 9V + 2V = 11V$. Znając napięcie minimalne i napięcie tętnień wyznaczamy, korzystając z zależności (19) wartość napięcia wyjściowego prostownika:

$$U_0 = U_{0min} + \frac{2}{3} U_{ipp} = 11V + 1V = 12V$$

oraz wartość rezystancji obciążenia prostownika:

$$R_0 = \frac{U_0}{I_0} = \frac{12V}{1A} = 12\Omega.$$

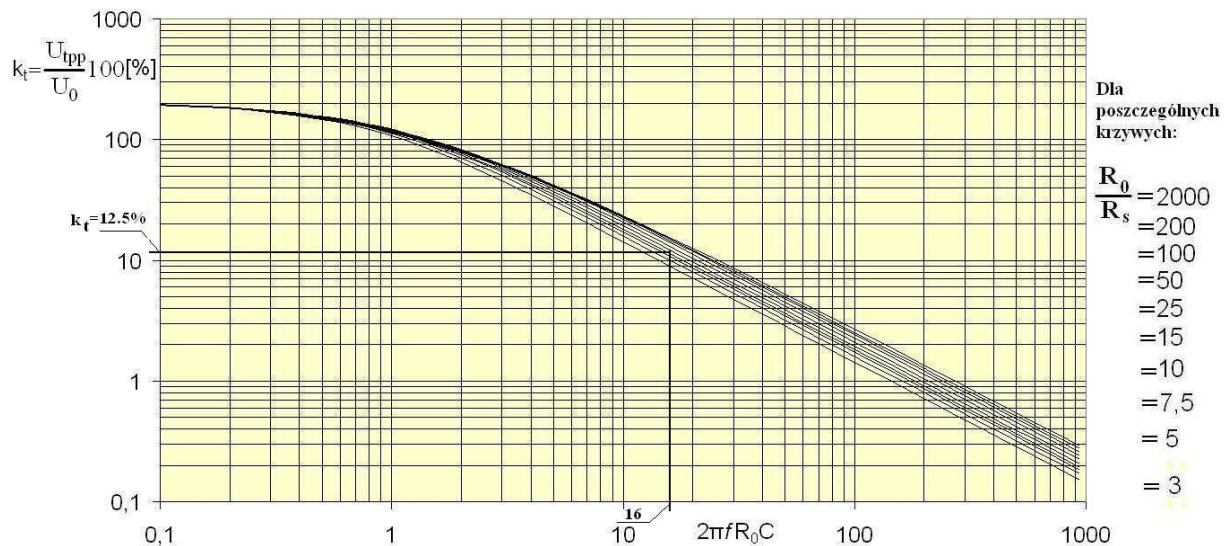
Korzystając z metody graficznej nie obliczamy parametrów transformatora lecz zakładamy wartość jego rezystancji wewnętrznej R_s oraz, co będzie pokazane w dalszej części projektu, wyznaczamy wartość napięcia U_{2m0} . Wartość rezystancji R_s przyjmuje się zazwyczaj w granicach 1% do 10% wartości R_0 . Do obliczeń założono $R_s = 1.2\Omega$. Następnie należy określić wartość stosunku rezystancji obciążenia do rezystancji wewnętrznej transformatora:

$$\frac{R_0}{R_s} = \frac{12\Omega}{1.2\Omega} = 10.$$

Kolejnym krokiem jest określenie wartości współczynnika tętnień k_t (zależność (25)):

$$k_t = \frac{U_{ipp}}{U_0} 100\% = \frac{1.5V}{12V} 100\% = 12.5\%.$$

Znając wartość współczynnika tętnień i stosunku R_0/R_s , z diagramu przedstawionego na rys. 22 odczytujemy wartość iloczynu $2\pi f R_0 C = 16$ (rys.3).



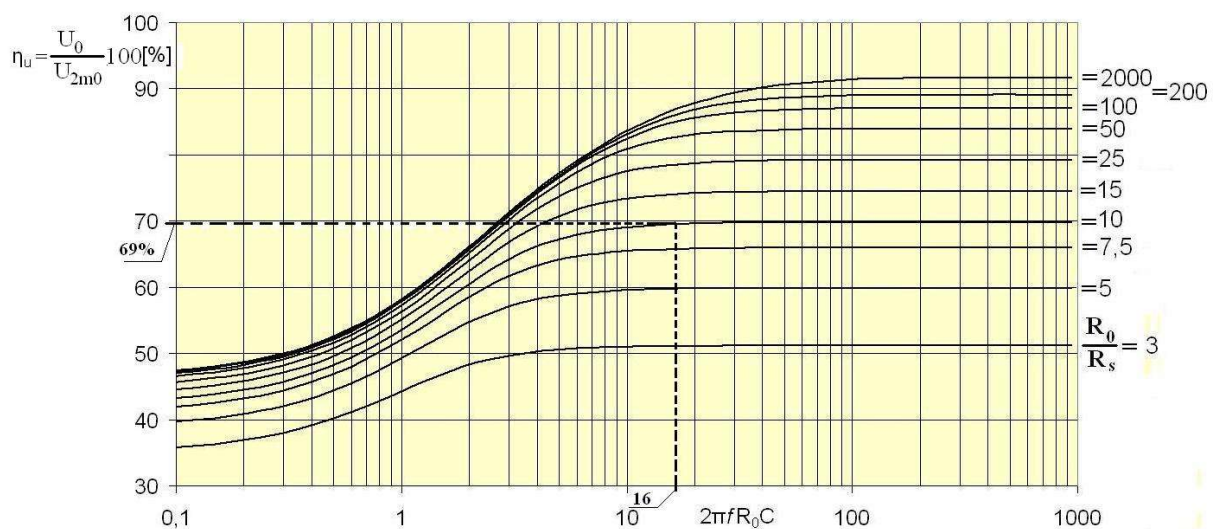
Rys. 3. Wyznaczanie wartości iloczynu $2\pi f R_0 C$

Na podstawie odczytanej wartości możemy wyznaczyć wartość pojemności C:

$$C = \frac{16}{2\pi f R_0} = \frac{16}{2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 12 \Omega} = 4244 \mu\text{F}.$$

Aby tętnienia nie były większe od założonych wyznaczoną wartość pojemności zaokrąglamy w górę, do najbliższej wartości z szeregu czyli $4700 \mu\text{F}$. W następnym kroku, korzystając z diagramu przedstawionego na rys. 21, dla danej wartości stosunku R_0/R_s , wyznaczamy wartość współczynnika wykorzystania napięcia prostownika (rys. 4):

$$\eta_U = \frac{U_0}{U_{2m0}} 100\% = 69\%.$$



Rys. 4. Wyznaczanie wartości współczynnika wykorzystania napięcia

Znając współczynnik η_U możemy wyznaczyć wartość napięcia U_{2m0} :

$$U_{2m0} = \frac{U_0}{\eta_U} 100\% = \frac{12}{69\%} 100\% = 17.39V.$$

Następnie wyznaczamy, korzystając z zależności (20) i przyjmując spadek napięcia na diodach prostowniczych $U_F = 1V$, wartość maksymalnego napięcia jakie może się pojawić na pojemności filtrującej C , które jest równe napięciu wyjściowemu nie obciążonego prostownika:

$$U_{00} = U_{2m0} - 2U_F = 17.39V - 2 \cdot 1V = 15.39V.$$

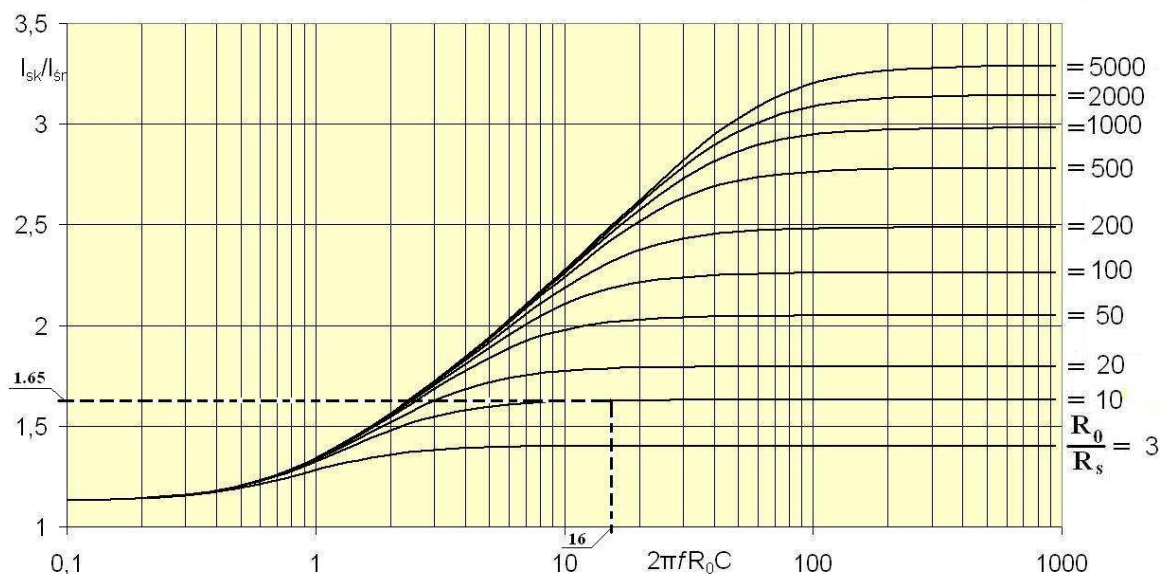
Znając wartość tego napięcia można określić parametry kondensatora elektrolitycznego jaki należy użyć w układzie $4700\mu F/16V$. Jednak ze względu na możliwość przebicia kondensatora wybieramy pojemność o wyższym dopuszczalnym napięciu $4700\mu F/25V$.

W kolejnym kroku wyznaczamy z zależności (22) średni prąd diod prostowniczych:

$$I_{sr} \cong \frac{1}{2} I_0 = \frac{1}{2} \cdot 1A = 0.5A.$$

Znając wartość prądu średniego, dla danej wartości stosunku R_0/R_s , korzystając z diagramu przedstawionego na rys. 23 określamy wartość stosunku prądu skutecznego diod do prądu

średniego $\frac{I_{sk}}{I_{sr}} = 1.65$ (rys.5).

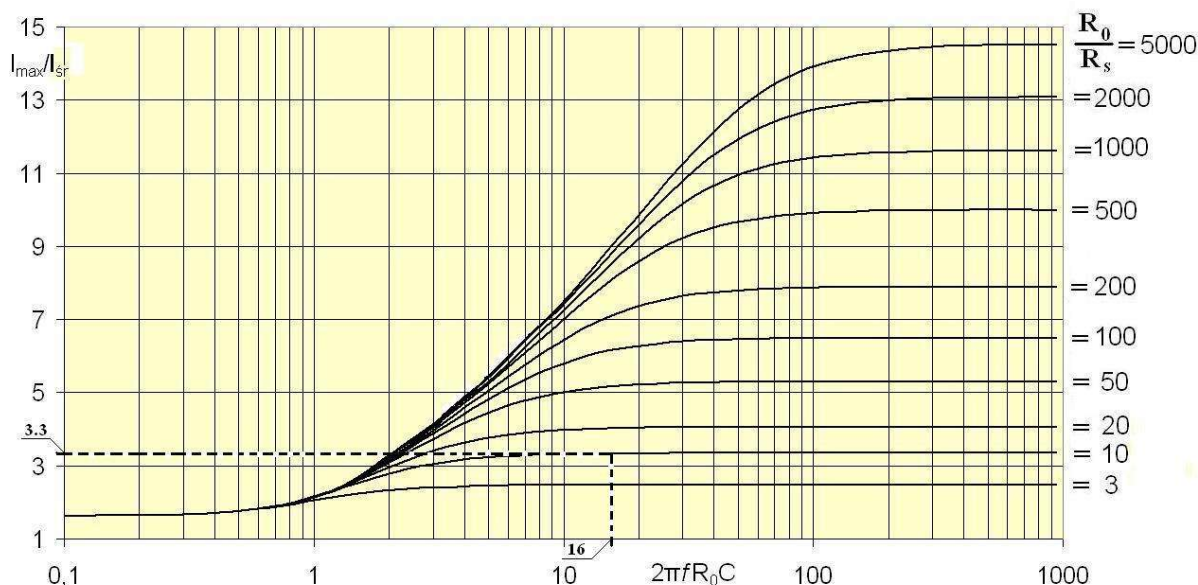


Rys. 5. Określenie wartości stosunku prądu skutecznego diod do prądu średniego

Można teraz wyznaczyć wartość prądu skutecznego płynącego przez diody prostownicze:

$$I_{sk} = 1.65 I_{sr} = 1.65 \cdot 0.5A = 0.825A.$$

Korzystając z diagramu przedstawionego na rys. 24, dla danej wartości stosunku R_0/R_S , możemy wyznaczyć stosunek prądu maksymalnego diod do prądu średniego $\frac{I_{\max}}{I_{\text{sr}}} = 3.3$ (rys.6).



Rys. 6. Wyznaczanie stosunku prądu maksymalnego diod do prądu średniego

Prąd maksymalny diod wynosi:

$$I_{\max} = 3.3 I_{\text{sr}} = 3.3 \cdot 0.5 A = 1.65 A .$$

Maksymalne napięcie wsteczne na diodach wyznaczamy korzystając z zależności (21):

$$U_{RM} = U_{2m0} = 17.39 V .$$

Natomiast wartość prądu rozruchowego wyznaczamy z zależności:

$$I_r = \frac{U_{2m0} - 2U_F}{R_S} = \frac{17.39 V - 2 \cdot 1 V}{1.2 \Omega} = 12.825 A .$$

Mając wyznaczone wszystkie parametry opisujące diody prostownicze korzystając z katalogu można wybrać typ diody. Podobnie jak w przypadku projektowania metodą analityczną wybieramy diodę typu 1N4001 o parametrach: $I_{\text{srMAX}} = 1 A$, $U_{\text{Rfmax}} = 50 V$, $I_{\text{rMAX}} = 30 A$ w impulsie prądowym o kształcie wyprostowanej sinusoidy (połowa okresu przebiegu sinusoidalnego) i czasie trwania 8.3ms.

Symulację komputerową zaprojektowanego prostownika przeprowadzono dla schematu pokazanego na rys. 2, dla $R_S = 1.2 \Omega$. Symulację wykonano dla następujących parametrów źródła U_{tr} : DC = 0, AC = 1, VAMPL = 17.5V, FREQ = 50Hz. Otrzymano następujące parametry układu: $U_0 = 11.3 V$, $U_{0\min} = 10.7 V$, $U_{\text{tpp}} = 1.16 V$, $I_0 = 0.94 A$. W celu uzyskania wymaganej wartości $U_{0\min} = 11 V$, przy $I_0 = 1 A$, zwiększono amplitudę generatora VAMPL do wartości 18V. Dla takiej wartości napięcia, zmniejszając R_0 do wartości 11.6Ω , układ osiągnął żądane parametry: $U_{0\min} = 11 V$, $U_0 = 11.6 V$, $U_{\text{tpp}} = 1.22 V$, $I_0 = 1 A$, $I_r = 8.45 A$, $I_{\max} = 3.31 A$, $I_{\text{sr}} = 0.52 A$.

Należy jeszcze wspomnieć, że przy obliczeniach nie brano pod uwagę wahań napięcia sieci energetycznej, które mają także wpływ na pracę prostownika.

2. Analiza parametrów układu prostowniczego

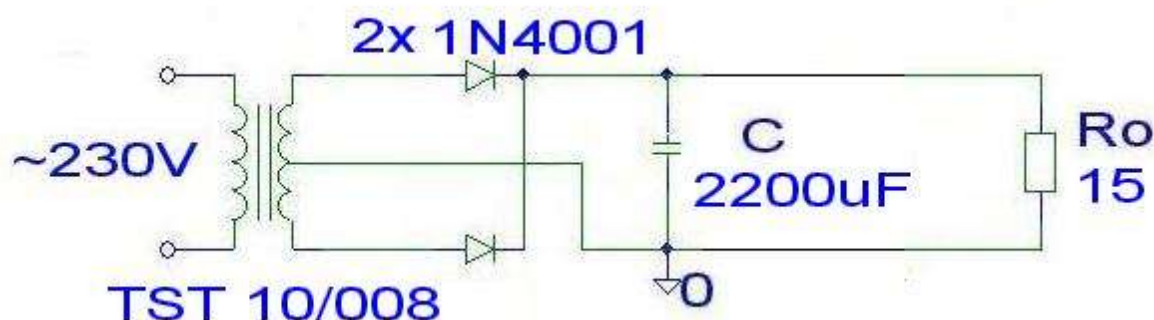
Przed realizacją student otrzymuje informacje o układzie prostowniczym i wartości elementów jakie zostaną użyte do jego budowy. Dlatego w ramach przygotowania do ćwiczenia konieczne będzie wyznaczenie parametrów badanego układu prostowniczego jedną z opisanych wcześniej metod: graficzną lub analityczną oraz przy pomocy symulacji komputerowej.

2.1. Parametry transformatora

Na stanowisku laboratoryjnym dostępny jest transformator TST 10/008 o następujących parametrach znamionowych: $U_{2sk} = 10V$, $I_{2sk} = 0.63A$, napięciu skutecznym biegu jałowego $U_{2sk0} = 12.5V$, przekładni $p = 18.4$, współczynnika strat napięcia $s_U = 1.25$, rezystancji uzwojenia pierwotnego $r_{pierwotne} = 279\Omega$ i rezystancji uzwojenia wtórnego $r_{wtorne} = 3.85\Omega$.

2.2. Zadanie

Na rys. 7 przedstawiono schemat ideowy prostownika dwupołwkowego z dzielonym uzwojeniem transformatora.



Rys. 7. Schemat prostownika dwupołwkowego z dzielonym uzwojeniem transformatora

Należy wyznaczyć następujące parametry układu: rezystancję wewnętrzną transformatora R_s , średnie napięcie wyjściowe U_0 , międzyszczytowe napięcie tętnień U_{tpp} , minimalną wartość napięcia wyjściowego U_{0min} , napięcie biegu jałowego U_{00} , maksymalne napięcie wsteczne diod prostowniczych U_{RM} , średni prąd płynący przez obciążenie I_0 oraz średni (I_{sr}). Należy wyznaczyć także maksymalny (I_{max}) prąd diod dla dwóch układów prostownika: z i bez pojemności filtrującej.

2.2.1. Rozwiązanie metodą analityczną

Mając dane parametry transformatora TST 10/008 rezystancję wewnętrzną R_s wyznaczamy wykorzystując zależność (36):

$$R_s = r_{wtorne} + \frac{r_{pierwotne}}{p^2} = 3.85\Omega + \frac{279\Omega}{(18.5)^2} = 4.66\Omega.$$

Zakładając spadek napięcia na diodzie 1N4001 $U_F = 1V$, z zależności (9) i (28), wyznaczamy średnią wartość napięcia wyjściowego układu:

$$\begin{aligned} U_0 &\cong (U_{2m0} - U_F) \left(1 - \sqrt{\frac{R_s}{2R_0}} \right) = (\sqrt{2}U_{2sk0} - U_F) \left(1 - \sqrt{\frac{R_s}{2R_0}} \right) = \\ &= (\sqrt{2} \cdot 12.5V - 1V) \left(1 - \sqrt{\frac{4.66\Omega}{2 \cdot 15\Omega}} \right) = 10.1V \end{aligned}$$

Następnie wyznaczamy wartość średniego prądu płynącego przez obciążenie:

$$I_0 = \frac{U_0}{R_0} = 0.67A.$$

Znając wartość prądu pobieranego przez obciążenie możemy wyznaczyć, korzystając z zależności (10) i (11), wartości międzyszczytowego napięcia tętnień oraz minimalnego napięcia wyjściowego:

$$\begin{aligned} U_{tpp} &\cong \frac{I_0}{2Cf} \left(1 - \sqrt{\frac{R_s}{2R_0}} \right) = \frac{0.67A}{2 \cdot 2000\mu F \cdot 50Hz} \left(1 - \sqrt{\frac{4.66\Omega}{2 \cdot 15\Omega}} \right) = 1.13V \\ U_{0min} &\cong U_0 - \frac{2}{3}U_{tpp} = 10.1V - \frac{2}{3} \cdot 1.13V = 9.34V. \end{aligned}$$

Napięcie biegu jałowego prostownika (nie obciążonego) obliczamy korzystając z zależności (12) i (28):

$$U_{00} = U_{2m0} - U_F = \sqrt{2}U_{2sk} - U_F = \sqrt{2} \cdot 12.5V - 1V = 16.67V.$$

Maksymalne napięcie wsteczne diod wyznaczamy za pomocą równania (13) i (28):

$$U_{RM} = 2U_{2m0} = 2\sqrt{2}U_{2sk0} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot 12.5V = 35.35V.$$

Na końcu wyznaczamy średni i maksymalny prąd diod korzystając z zależności (14), (15) i (28):

$$\begin{aligned} I_{sr} &\cong \frac{1}{2}I_0 = \frac{1}{2} \cdot 0.67A = 0.335A, \\ I_{max} &\cong \frac{U_{2m0} - U_F}{\sqrt{2R_s R_0}} = \frac{\sqrt{2}U_{2sk0} - U_F}{\sqrt{2R_s R_0}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 12.5V - 1V}{\sqrt{2 \cdot 4.66\Omega \cdot 15\Omega}} = 1.4A. \end{aligned}$$

Maksymalny prąd diod dla prostownika bez pojemności filtrującej wyznaczamy korzystając z zależności (15a) i (28):

$$I_{\max} = \frac{U_{2m0} - U_F}{R_s + R_0} = \frac{\sqrt{2}U_{2sk0} - U_F}{R_s + R_0} = \frac{\sqrt{2} \cdot 12.5V - 1V}{4.66\Omega + 15\Omega} = 0.85A.$$

2.2.2. Rozwiązanie metodą graficzną

Podobnie, jak w przypadku rozwiązania zadania metodą analityczną, rozpoczynamy wyznaczanie parametrów prostownika od obliczenia przy pomocy zależności (36) rezystancji wewnętrznej transformatora:

$$R_s = r_{\text{wtorne}} + \frac{r_{\text{pierwotne}}}{p^2} = 3.85\Omega + \frac{279\Omega}{(18.5)^2} = 4.66\Omega.$$

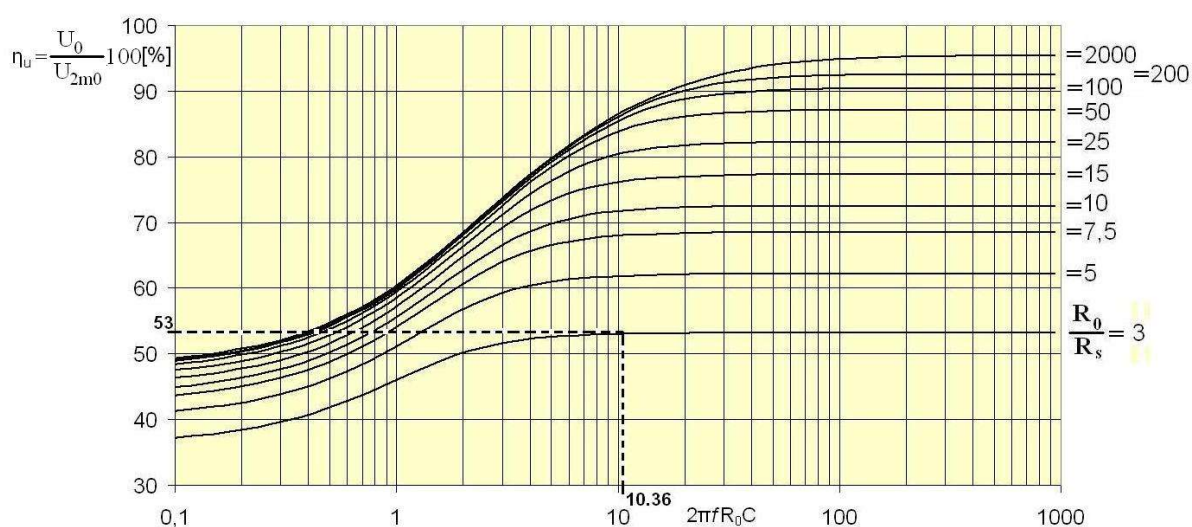
Następnie wyznaczamy wartość stosunku rezystancji obciążenia do rezystancji wewnętrznej transformatora:

$$\frac{R_0}{R_s} = \frac{15\Omega}{4.66\Omega} = 3.2$$

oraz wartość znormalizowanej pulsacji granicznej filtru prostownika:

$$2\pi f R_0 C = 2 \cdot \pi \cdot 50Hz \cdot 15\Omega \cdot 2200\mu F = 10.36.$$

Następnie z diagramu przedstawionego na rys.17 odczytujemy wartość współczynnika wykorzystania napięcia prostownika (rys. 8).

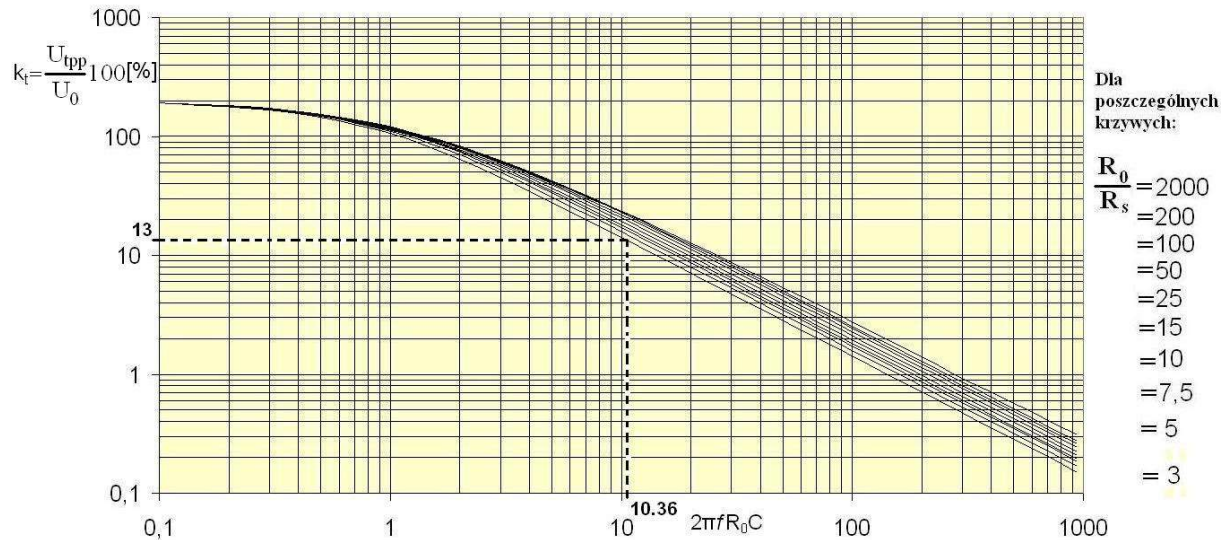


Rys. 8. Wyznaczanie wartości współczynnika wykorzystania napięcia

Znając wartość współczynnika wykorzystania napięcia, wykorzystując zależność (28), możemy wyznaczyć wartość średniego napięcia wyjściowego prostownika:

$$U_0 = U_{2m0} \eta_u = \frac{\sqrt{2} U_{2sk0} \eta}{100\%} = \frac{\sqrt{2} \cdot 12.5V \cdot 53\%}{100\%} = 9.36V.$$

Następnie z diagramu przedstawionego na rys.18, dla danych $R_0/R_s = 3.2$ i $2\pi f R_0 C = 10.36$, odczytujemy wartość współczynnika tętnień prostownika (rys.9).



Rys. 9. Wyznaczanie wartości współczynnika tętnień

Znając wartość współczynnika tętnień możemy wyznaczyć, z zależności (25), międzyszczytowe napięcie tętnień, a następnie, z zależności (11), wartość minimalnego napięcia wyjściowego prostownika :

$$U_{tpp} = \frac{U_0 k_t}{100\%} = \frac{9.36V \cdot 13\%}{100\%} = 1.21V,$$

$$U_{0min} = U_0 - \frac{2}{3} U_{tpp} = 9.36V - \frac{2}{3} \cdot 1.21V = 8.55V.$$

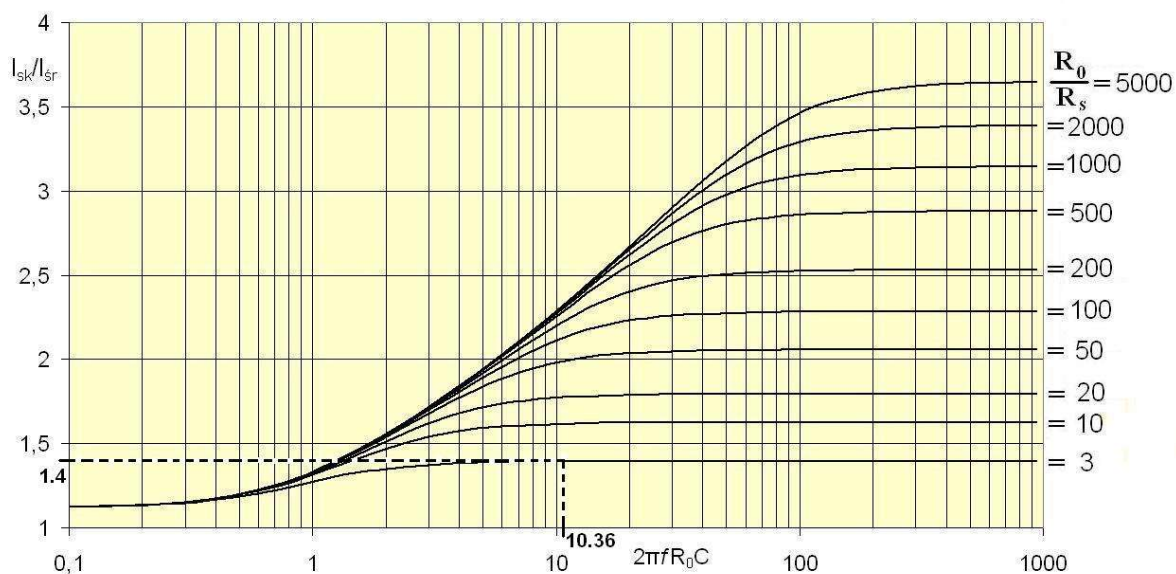
W kolejnym kroku wyznaczamy wartość prądu płynącego przez obciążenie prostownika:

$$I_0 = \frac{U_0}{R_0} = \frac{9.36V}{15\Omega} = 0.624A.$$

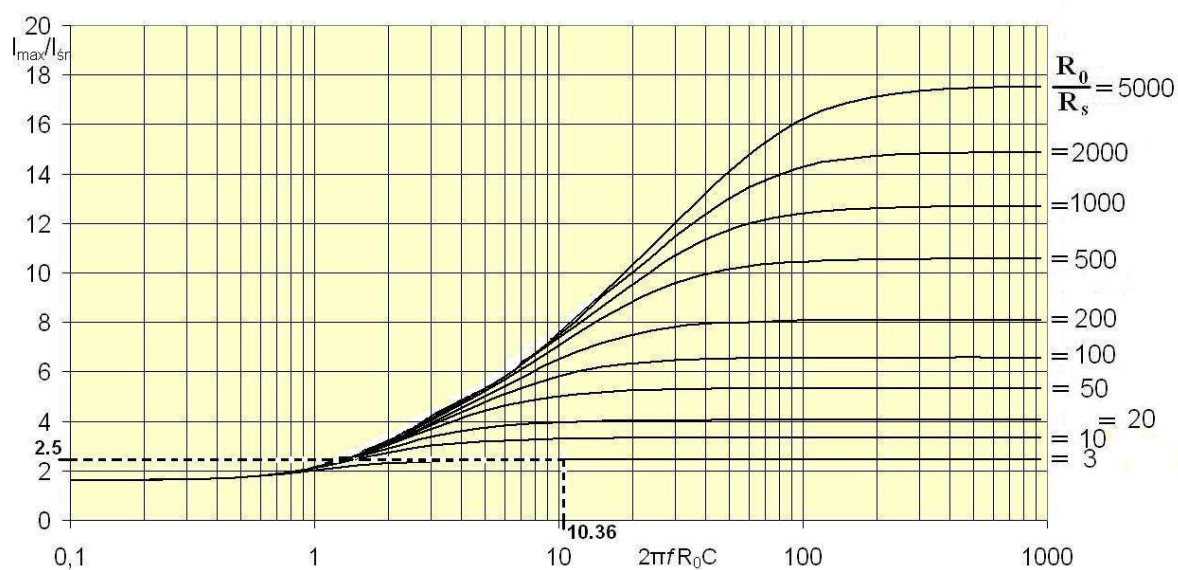
Średni prąd diod prostowniczych obliczamy z zależności (14):

$$I_{sr} = \frac{1}{2} I_0 = \frac{1}{2} \cdot 0.624A = 0.312A.$$

Następnie, korzystając z diagramów przedstawionych na rys. 19 i 20, możemy odczytać wartości stosunków: prądu skutecznego i maksymalnego diod do ich prądu średniego (rys. 10 i 11).



Rys. 10. Wyznaczanie wartości stosunku prądu skutecznego do prądu średniego diod



Rys. 11. Wyznaczanie wartości stosunku prądu maksymalnego do prądu średniego diod

Teraz wyznaczamy wartości prądów skutecznego i maksymalnego diod prostowniczych:

$$I_{sk} = 1.4 I_{sr} = 1.4 \cdot 0.312 A = 0.437 A ,$$

$$I_{max} = 2.5 I_{sr} = 2.5 \cdot 0.312 A = 0.78 A .$$

W przypadku prostownika pracującego bez pojemności filtrującej maksymalny prąd diod wyznaczamy z zależności (15a) i (28):

$$I_{\max} = \frac{U_{2m0} - U_F}{R_s + R_0} = \frac{\sqrt{2}U_{2sk0} - U_F}{R_s + R_0} = \frac{\sqrt{2} \cdot 12.5V - 1V}{4.66\Omega + 15\Omega} = 0.85A$$

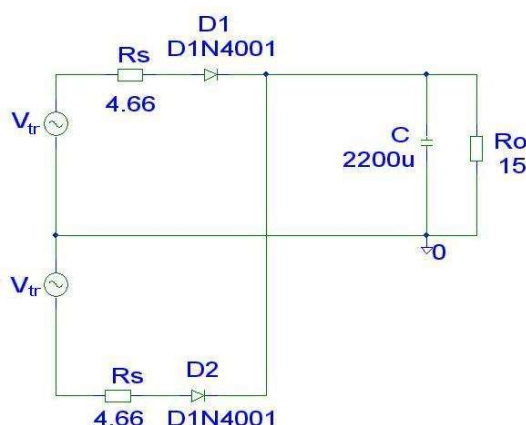
Pozostałe parametry: maksymalne napięcie biegu jałowego prostownika oraz maksymalne napięcie wsteczne diod prostowniczych obliczamy z wykorzystaniem zależności (12), (13) i (28), zakładając spadek napięcia na diodzie $U_F = 1V$:

$$U_{00} = U_{2m0} - U_F = \sqrt{2}U_{2sk} - U_F = \sqrt{2} \cdot 12.5V - 1V = 16.67V$$

$$U_{RM} = 2U_{2m0} = 2\sqrt{2}U_{2sk0} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot 12.5V = 35.35V$$

2.2.3. Wyznaczanie parametrów prostownika za pomocą symulacji komputerowej

Z wykorzystaniem programu Pspice przeprowadzono symulację pracy układu dla schematu przedstawionego na rys. 12.



Rys. 12. Schemat układu prostownika dwupołówkowego użyty w symulacji komputerowej

Symulację wykonano dla następujących parametrów źródeł U_{tr} : DC = 0, AC = 1, VAMPL = 17.67V, FREQ = 50Hz. W Tabeli 3 przedstawiono zestawienie wyznaczonych parametrów prostownika metodami: analityczną i graficzną oraz wyników symulacji komputerowej.

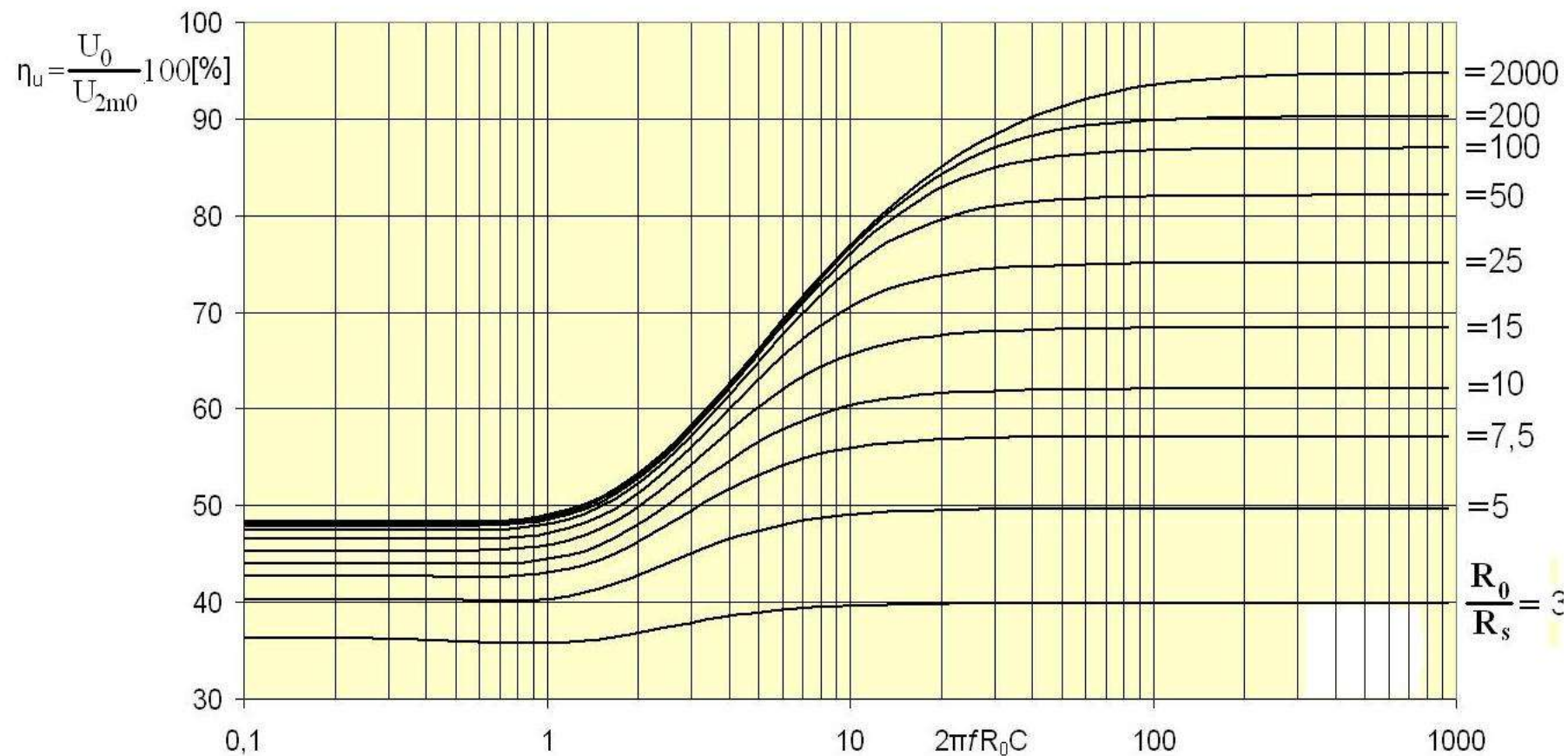
Tabela 3. Zestawienie wyników obliczenia parametrów prostownika metodami: analityczną i graficzną z wynikami symulacji komputerowej

Parametr	Metoda analityczna	Metoda graficzna	Wyniki analizy komputerowej
U_0 [V]	10.1	9.36	9.3
U_{tpp} [V]	1.13	1.21	1.16
U_{0min} [V]	9.34	8.55	8.68
U_{00} [V]	16.67	16.67	17
I_0 [A]	0.67	0.624	0.62
I_{sr} [A]	0.335	0.312	0.316
I_{\max} [A]	1.4	0.78	1.55

Analizując uzyskane wyniki metoda graficzna, w przypadku większości parametrów, jest bardziej dokładna aniżeli metoda analityczna. Jedynie wartość prądu maksymalnego diod, wyznaczonego graficznie, różni się znacznie od wyniku symulacji komputerowej. Wyniki uzyskane metoda analityczną mogą być obarczone błędem sięgającym 10%. Warto tutaj wspomnieć, że w przypadku nie analizowanego tutaj prostownika jednopołówkowego, błąd ten może się jeszcze zwiększyć i dlatego analiza parametrów tego układu powinna być przeprowadzona przy pomocy metody graficznej.

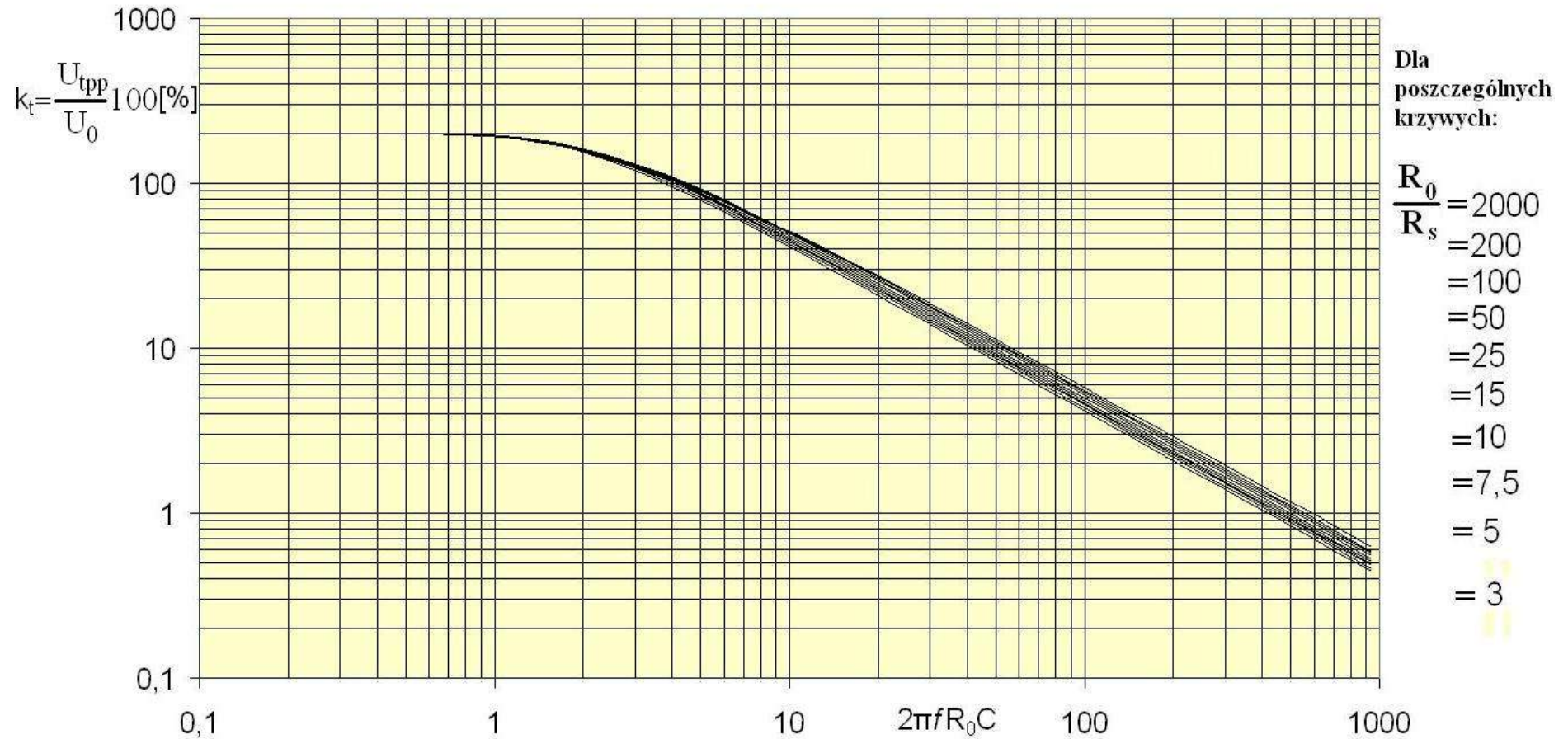
3. Diagramy Schadego

PROSTOWNIK JEDNOPOŁÓWKOWY



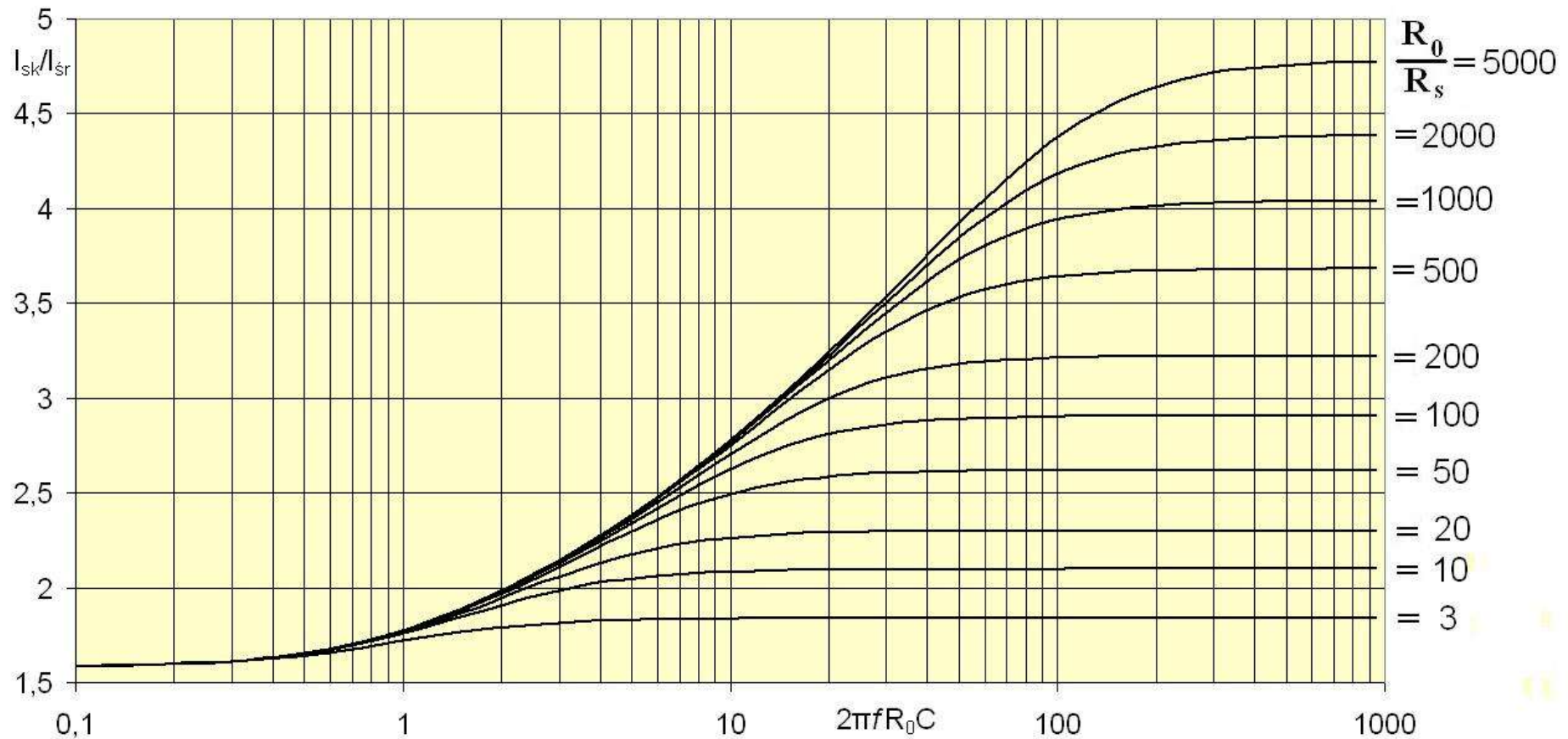
Rys. 13. Rodzina charakterystyk określających zależność współczynnika wykorzystania napięcia η_u od unormowanej pulsacji granicznej filtra wygładzającego napięcie wyjściowe prostownika dla różnych wartości stosunku rezystancji obciążenie prostownika do rezystancji szeregowej prostownika R_0/R_s

PROSTOWNIK JEDNOPOŁÓWKOWY



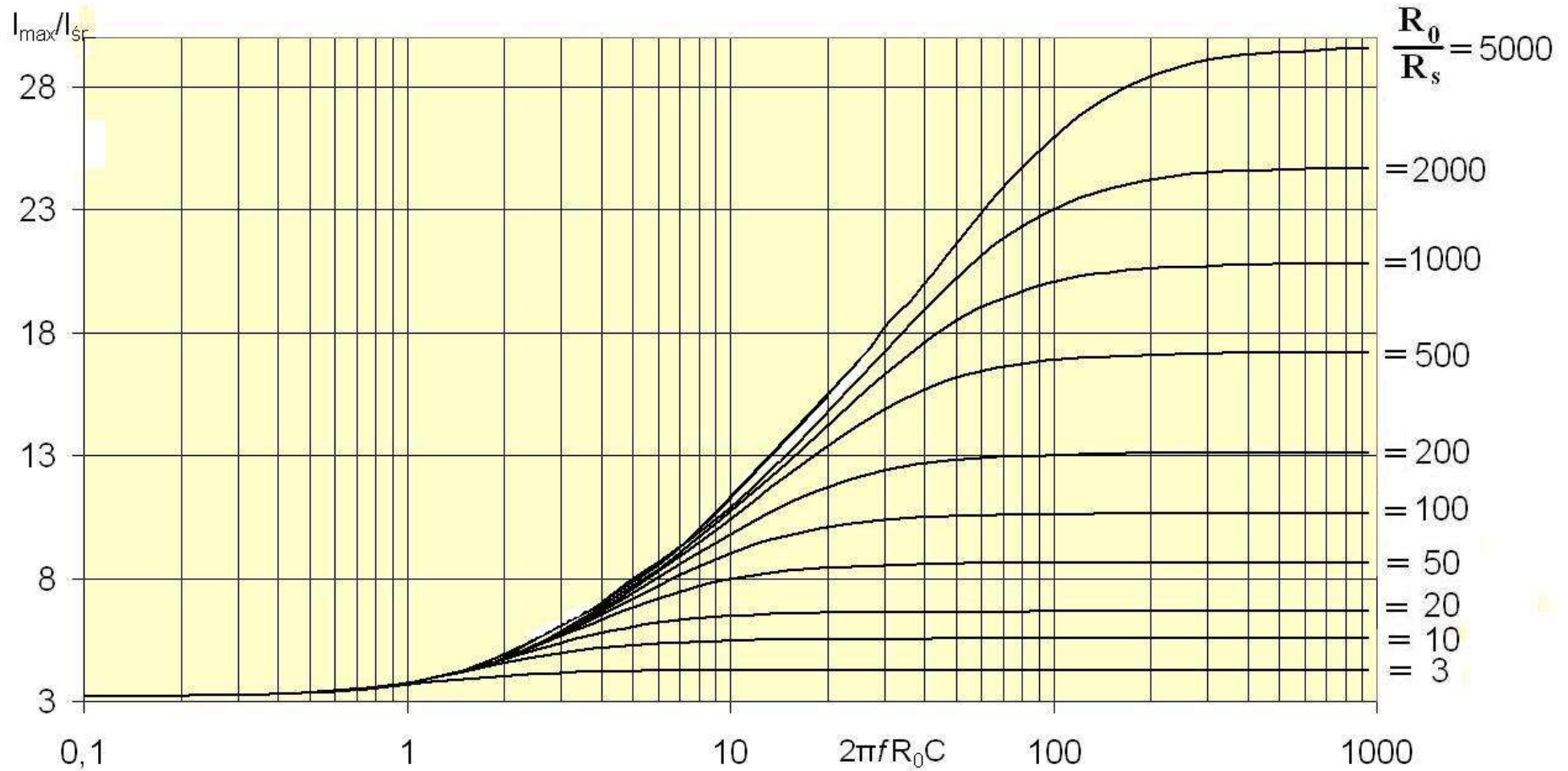
Rys.14. Rodzina charakterystyk określających zależność współczynnika tętnień k_t od unormowanej pulsacji granicznej filtra wygładzającego napięcie wyjściowe prostownika dla różnych wartości stosunku rezystancji obciążenie prostownika do rezystancji szeregowej prostownika R_0/R_s

PROSTOWNIK JEDNOPOŁÓWKOWY



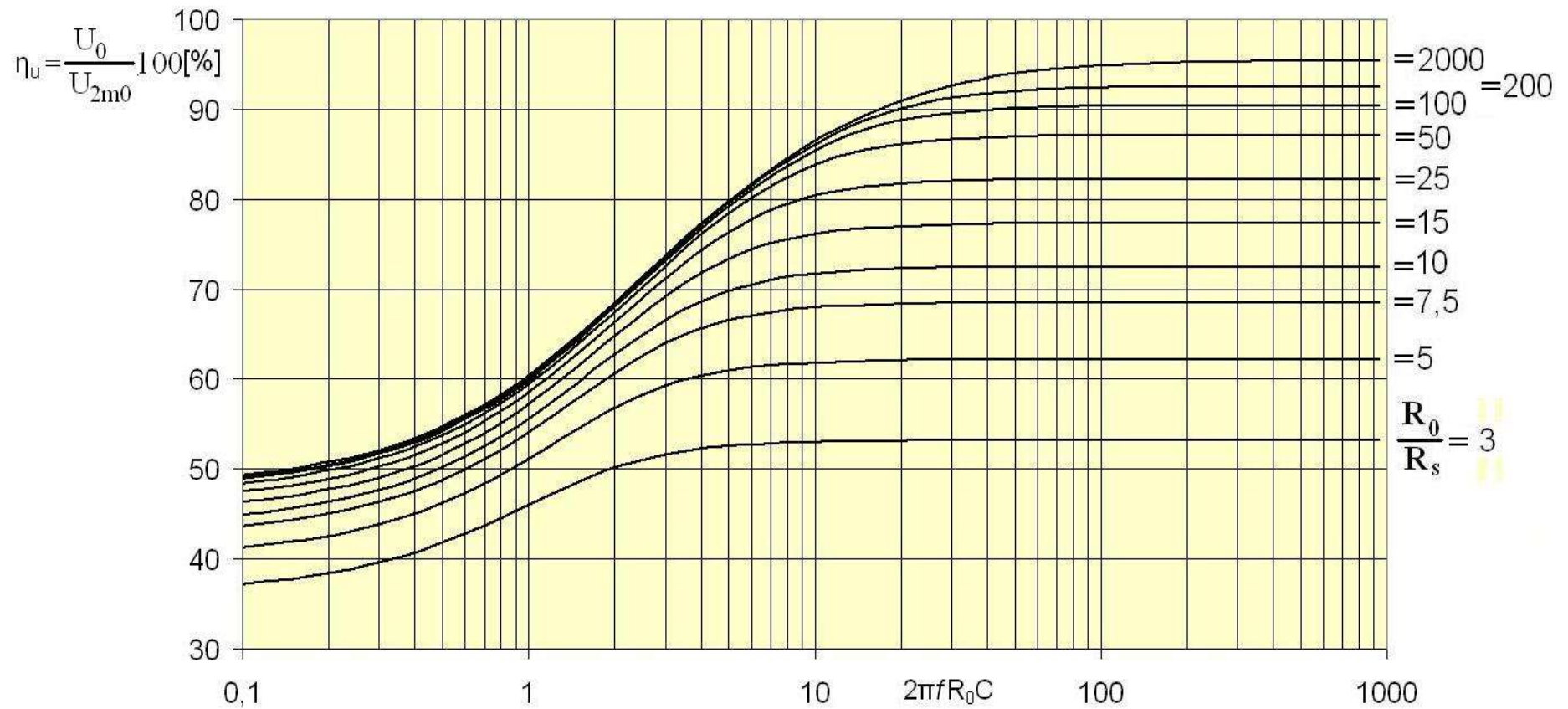
Rys.15. Rodzina charakterystyk określających zależność prądu skutecznego diod do prądu średniego w płynącego przez obciążenie (I_{sk}/I_{sr}) od unormowanej pulsacji granicznej filtru wygładzającego napięcie wyjściowe prostownika dla różnych wartości stosunku rezystancji obciążenie prostownika do rezystancji szeregowej prostownika R_0/R_s

PROSTOWNIK JEDNOPOŁÓWKOWY



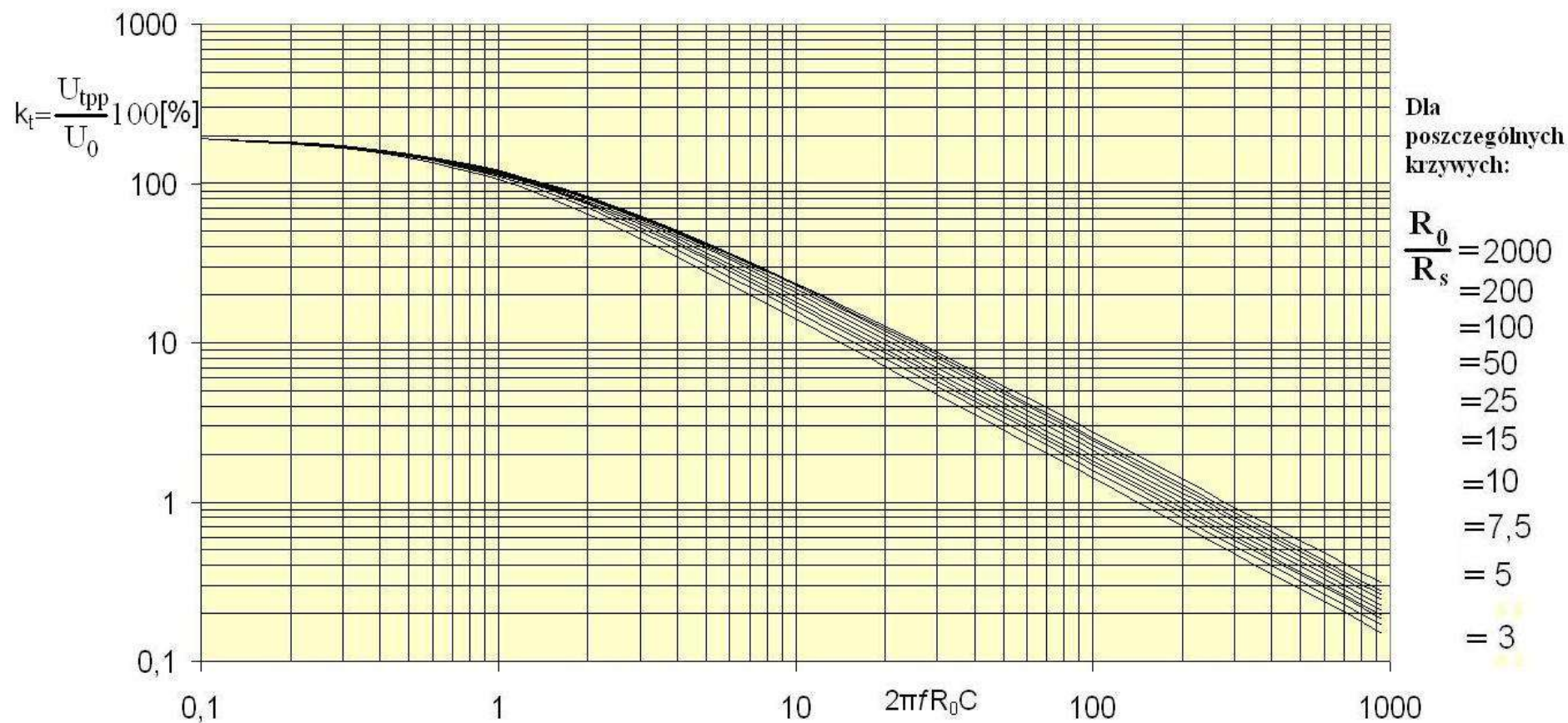
Rys.16. Rodzina charakterystyk określających zależność prądu maksymalnego diod do prądu średniego w płynącego przez obciążenie (I_{\max}/I_{sr}) od unormowanej pulsacji granicznej filtra wygładzającego napięcie wyjściowe prostownika dla różnych wartości stosunku rezystancji obciążenie prostownika do rezystancji szeregowej prostownika R_0/R_s

PROSTOWNIK DWUPOLÓWKOWY Z DZIELONYM UZWOJENIEM TRANSFORMATORA



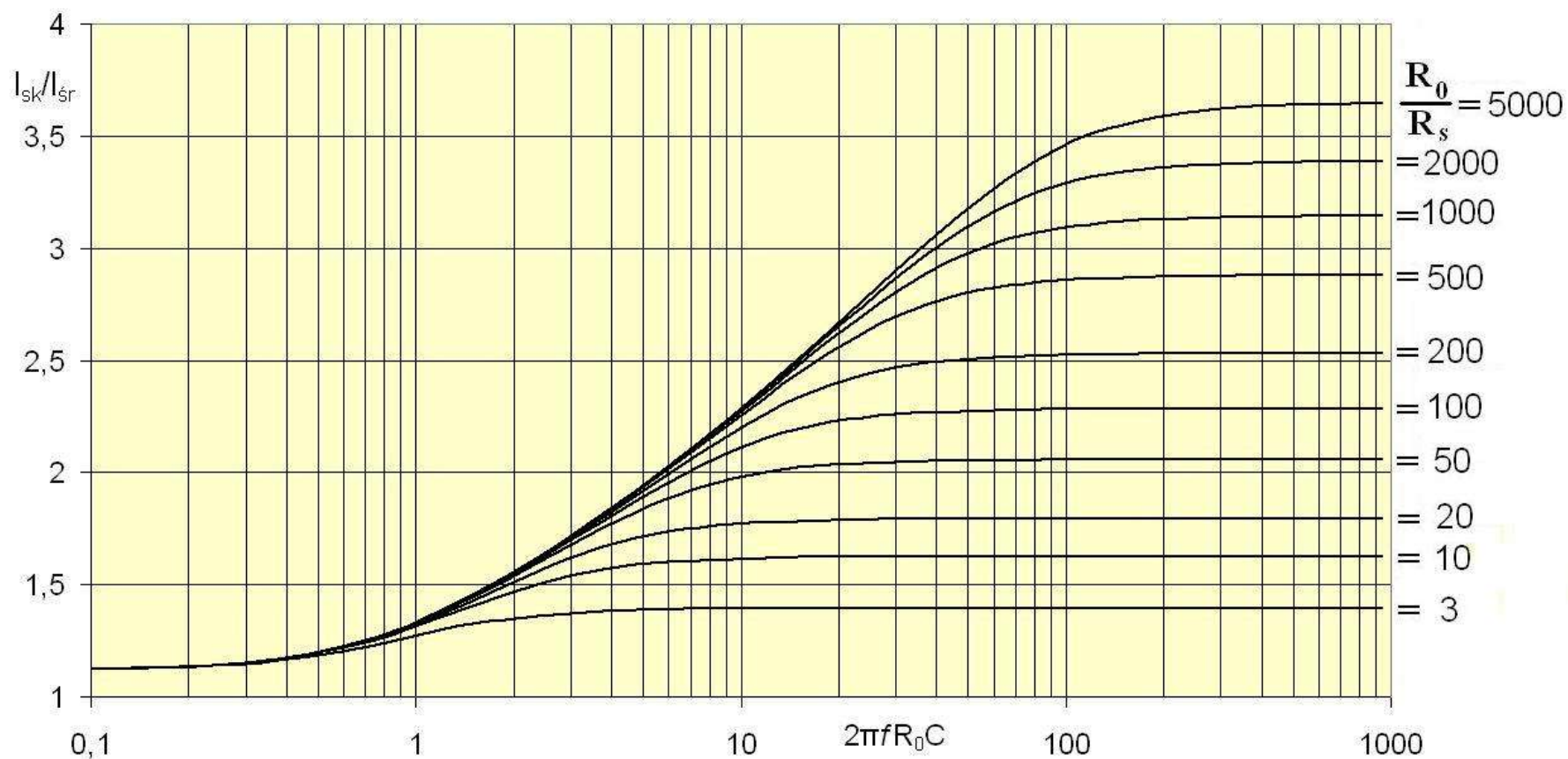
Rys.17. Rodzina charakterystyk określających zależność współczynnika wykorzystania napięcia η_u od unormowanej pulsacji granicznej filtra wygładzającego napięcie wyjściowe prostownika dla różnych wartości stosunku rezystancji obciążenie prostownika do rezystancji szeregowej prostownika R_0/R_s

PROSTOWNIK DWUPOLÓWKOWY Z DZIELONYM UZWOJENIEM TRANSFORMATORA



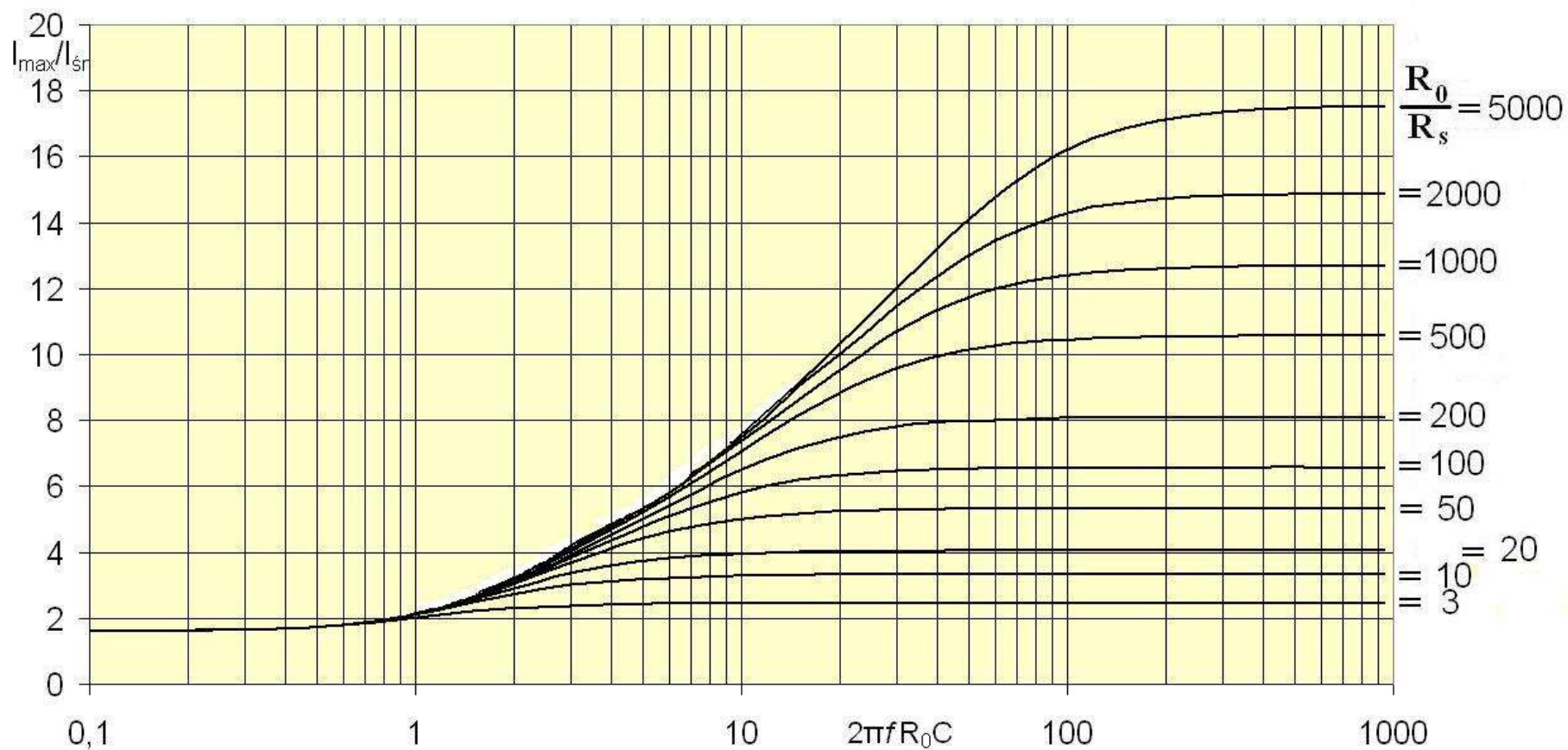
Rys.18. Rodzina charakterystyk określających zależność współczynnika tętnień k_t od unormowanej pulsacji granicznej filtra wygładzającego napięcie wyjściowe prostownika dla różnych wartości stosunku rezystancji obciążenie prostownika do rezystancji szeregowej prostownika R_0/R_s

PROSTOWNIK DWUPOLÓWKOWY Z DZIELONYM UZWOJENIEM TRANSFORMATORA



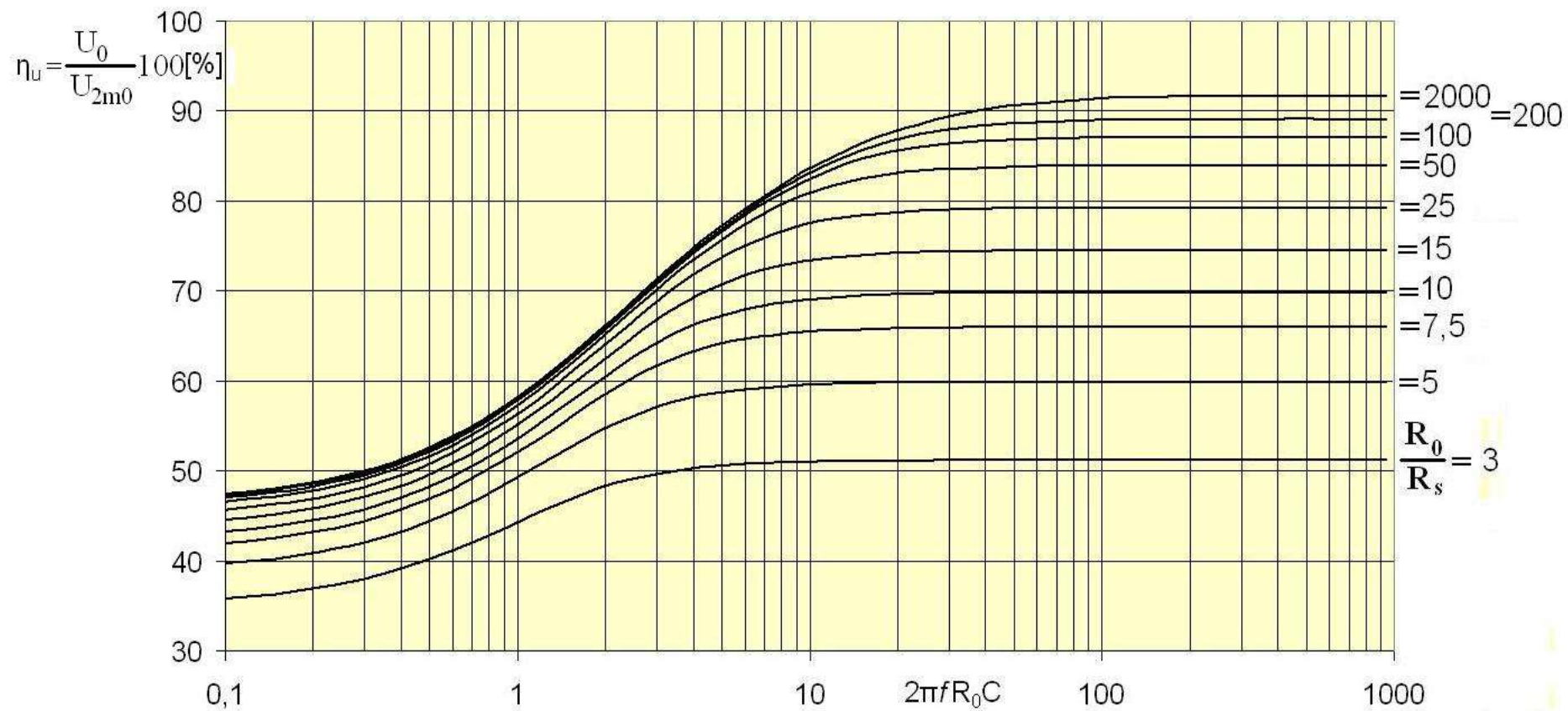
Rys.19. Rodzina charakterystyk określających zależność prądu skutecznego diod do prądu średniego w płynącego przez obciążenie (I_{sk}/I_{sr}) od unormowanej pulsacji granicznej filtra wygładzającego napięcie wyjściowe prostownika dla różnych wartości stosunku rezystancji obciążenie prostownika do rezystancji szeregowej prostownika R_0/R_s

PROSTOWNIK DWUPOLÓWKOWY Z DZIELONYM UZWOJENIEM TRANSFORMATORA



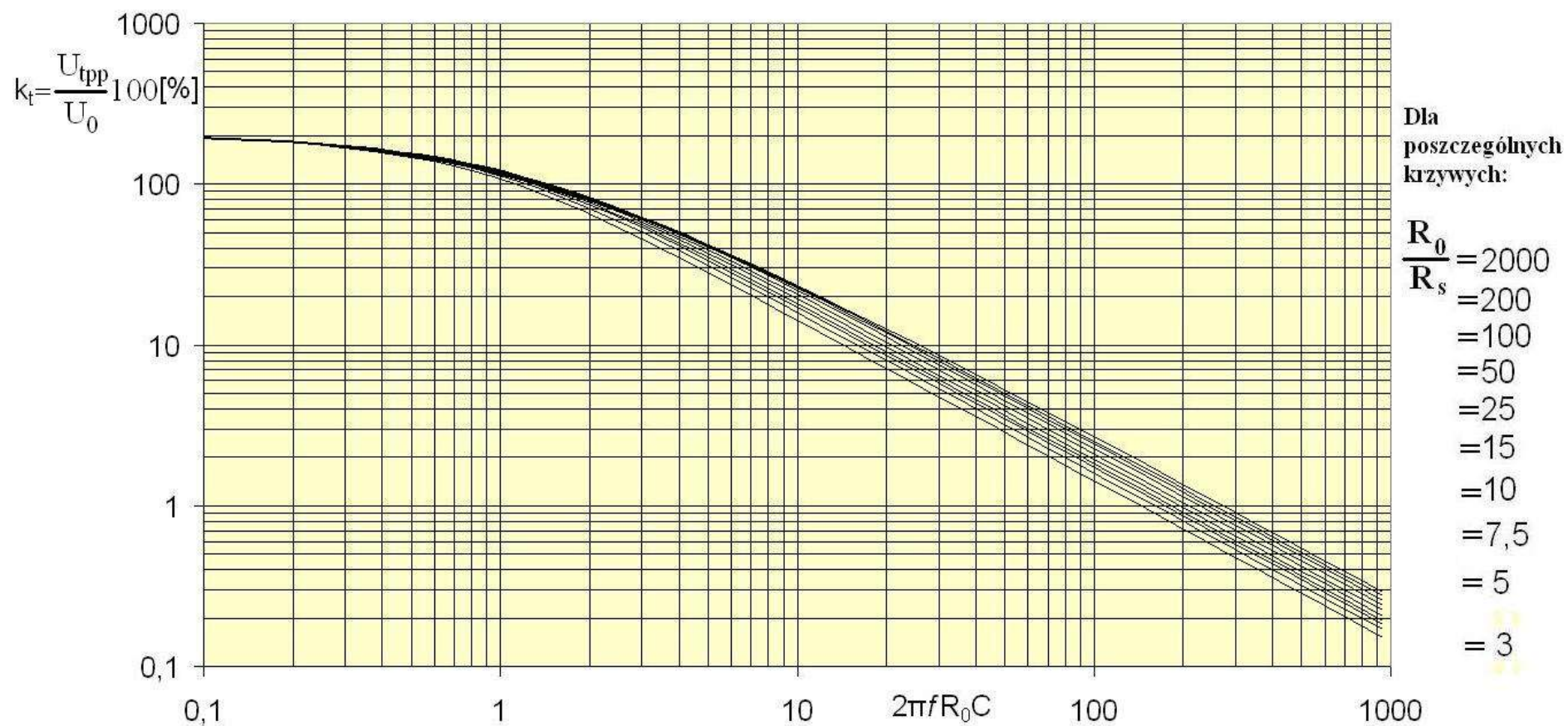
Rys.20. Rodzina charakterystyk określających zależność prądu maksymalnego diod do prądu średniego w płynącego przez obciążenie (I_{\max}/I_{sr}) od unormowanej pulsacji granicznej filtra wygładzającego napięcie wyjściowe prostownika dla różnych wartości stosunku rezystancji obciążenie prostownika do rezystancji szeregowej prostownika R_0/R_s

PROSTOWNIK MOSTKOWY



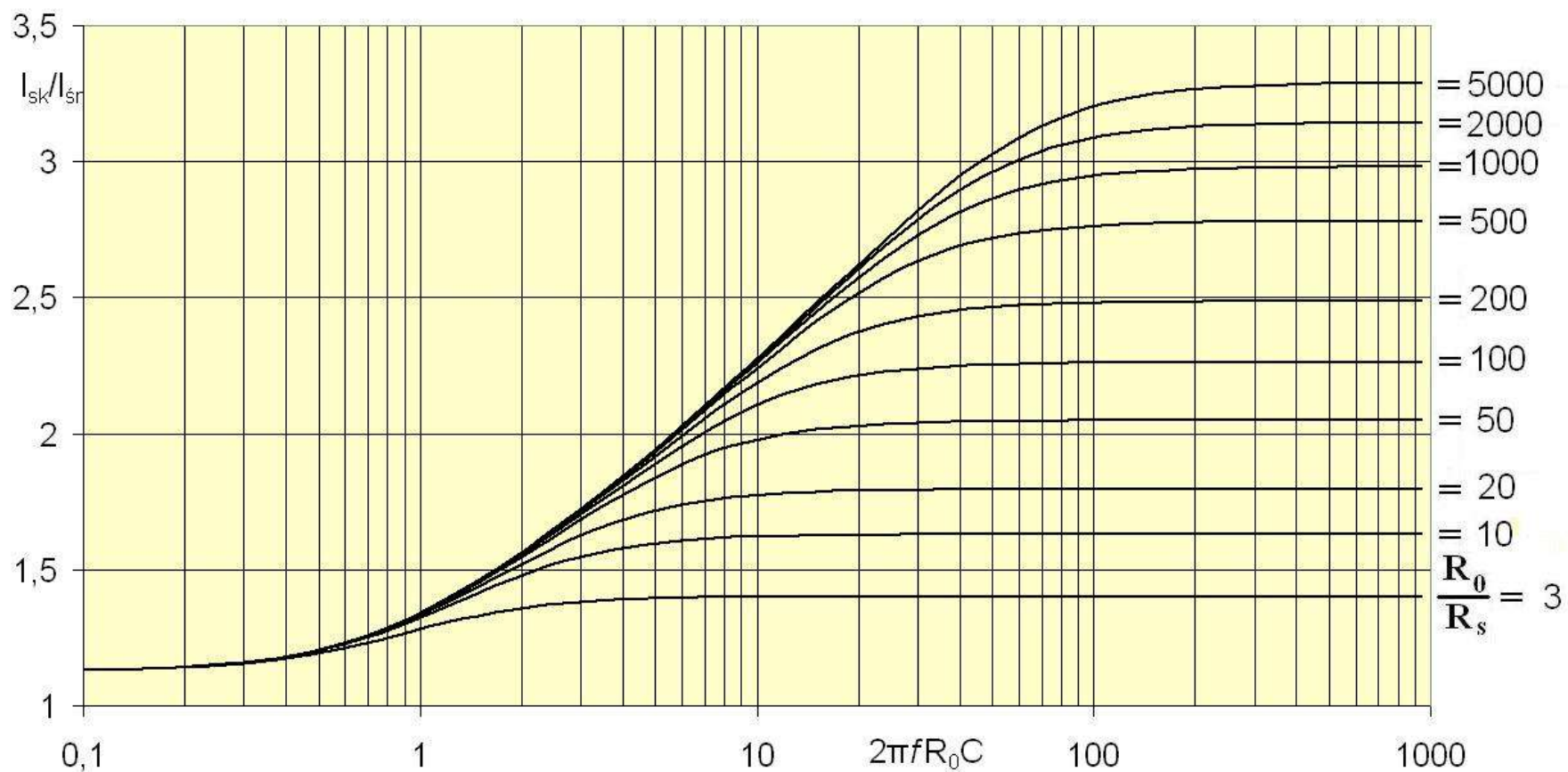
Rys.21. Rodzina charakterystyk określających zależność współczynnika wykorzystania napięcia η_u od unormowanej pulsacji granicznej filtru wygładzającego napięcie wyjściowe prostownika dla różnych wartości stosunku rezystancji obciążenie prostownika do rezystancji szeregowej prostownika R_0/R_s

PROSTOWNIK MOSTKOWY



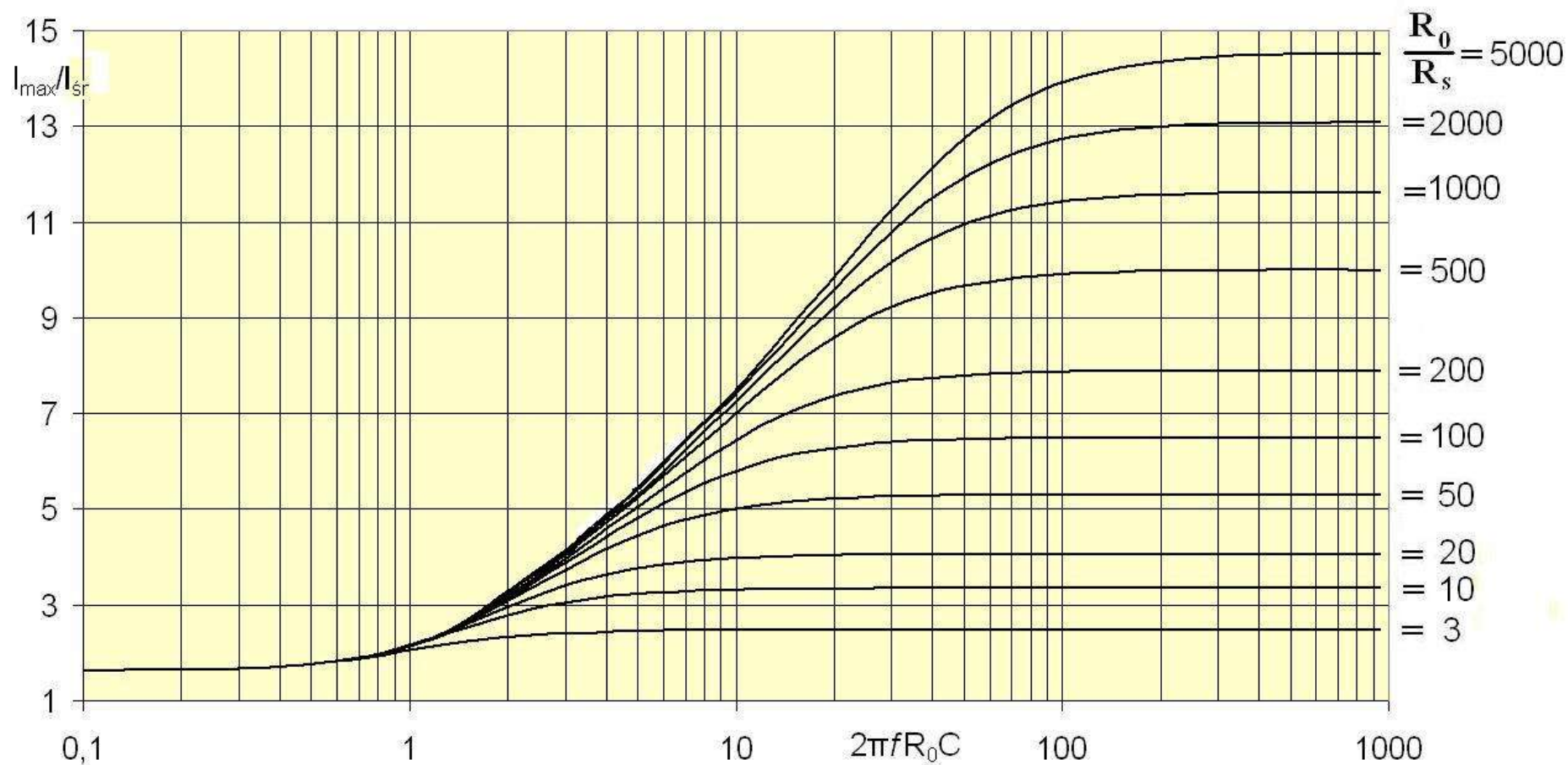
Rys.22. Rodzina charakterystyk określających zależność współczynnika tętnień k_t od unormowanej pulsacji granicznej filtru wygładzającego napięcie wyjściowe prostownika dla różnych wartości stosunku rezystancji obciążenie prostownika do rezystancji szeregowej prostownika R_0/R_s

PROSTOWNIK MOSTKOWY



Rys.23. Rodzina charakterystyk określających zależność prądu skutecznego diod do prądu średniego w płynącego przez obciążenie (I_{sk}/I_{sr}) od unormowanej pulsacji granicznej filtru wygładzającego napięcie wyjściowe prostownika dla różnych wartości stosunku rezystancji obciążenie prostownika do rezystancji szeregowej prostownika R_0/R_s

PROSTOWNIK MOSTKOWY



Rys.24. Rodzina charakterystyk określających zależność prądu maksymalnego diod do prądu średniego w płynącego przez obciążenie (I_{\max}/I_{sr}) od unormowanej pulsacji granicznej filtru wygładzającego napięcie wyjściowe prostownika dla różnych wartości stosunku rezystancji obciążenie prostownika do rezystancji szeregowej prostownika R_0/R_s