

# Prostownik w zasilaczu

Do zasilania większości urządzeń elektronicznych stosuje się zasilacze o mocy do kilkuset VA. Coraz powszechniej stosowane są zasilacze impulsowe, chociaż nadal w wielu rozwiązaniach stosowane są zasilacze z transformatorami sieciowymi 50 Hz.

Podstawowym elementem jednego lub drugiego rozwiązania jest zazwyczaj prostownik z filtrem pojemnościowym. W artykule podano podstawowe informacje teoretyczne dotyczące funkcjonowania takiego prostownika oraz pokazano sposób, w który należy dobrać elementy wchodzące w skład prostownika.

Schemat blokowy zasilacza transformatorowego pokazano na **rysunku 1**. Składa się on z transformatora sieciowego, prostownika, filtra oraz jeśli jest to wymagane – również z regulatora (stabilizatora) napięcia. Transformator obniża napięcie, które następnie podawane jest na prostownik. Po wyprostowaniu, napięcie przechodzi przez filtr dolnoprzepustowy celem zmniejszenia jego tętnień. Często na wyjściu stosowany jest stabilizator, który minimalizuje tętnienia napięcia oraz powoduje, że jego wartość wyjściowa zmienia się w niewielkim stopniu w zależności od obciążenia. Stosuje się również układy zabezpieczające elementy zasilacza przed przeciążeniem, najczęściej są one zintegrowane ze stabilizatorem.

W artykule tym przeprowadzono analizę prostownika dwupołkowego z filtrem pojemnościowym, układu, który jest najczęściej wykorzystywany w praktyce.

## Nieco teorii – układ prostowniczy z filtrem pojemnościowym

W mostkowym prostowniku jednofazowym, obciążonym pojemnością C i rezystancją R (**rysunek 2**), pojawiają się przebiegi wywołane kolejnym ładowaniem i rozładowaniem kondensatora. Do rozważań teoretycznych zakładamy idealne charakterystyki diod prostowniczych. Kondensator jest ładowany, gdy napięcie zasilające  $u$  jest większe od napięcia na kondensatorze  $u_c$ . Napięcie na wejściu opisane jest wzorem  $u(t) = |U_M| \sin \omega t$ . Znana jest również wartość rezystancji R oraz pojemności C. Gdy chwilowa wartość napięcia zasilającego  $u(t)$  jest

większa od napięcia  $u_c(t)$  na kondensatorze, odpowiednie diody w mostku przewodzą prąd i następuje ładowanie kondensatora oraz wzrost napięcia na nim. Jeśli  $u(t)$  jest mniejsze od  $u_c(t)$ , diody nie przewodzą i kondensator rozładowuje się przez rezystor R. Dla  $\alpha_g < \omega t < \pi + \alpha_g$  ( $\alpha_g$  - moment w którym diody zaczynają przewodzić,  $\alpha_g$  - chwila w której diody przestają przewodzić) napięcie na kondensatorze równa się napięciu zasilającemu  $u(t)$ . Dla  $\alpha_z < \omega t < \pi + \alpha_g$  kondensator rozładowuje się przez rezystancję R. Przebieg napięcia na kondensatorze przedstawia **rysunek 3**.

Dla  $\alpha_z < \omega t < \alpha_g$  gdy diody przewodzą prąd, napięcie na kondensatorze i rezystorze jest równe napięciu źródła  $u(t)$  i wynosi

$$u_c(t) = |U_M| \sin \omega t \quad (1)$$

Prąd płynący przez rezystor jest równy

$$i_R(t) = \frac{|U_M| \sin \omega t}{R} \quad (2)$$

Prąd kondensatora wyraża się wzorem

$$i_C(t) = C \frac{du_C}{dt} = C \omega |U_M| \cos \omega t \quad (3)$$

Całkowity prąd pobierany z prostownika jest sumą

$$i(t) = i_R(t) + i_C(t) \quad (4)$$

i wynosi

$$i(t) = \frac{|U_M|}{R} \sqrt{1 + (\omega RC)^2} |\sin(\omega t + \varphi)| \quad (5)$$

gdzie

$$\varphi = \arctg(\omega RC) \quad (6)$$

i zawiera się między

$$0 < \varphi < \frac{\pi}{2} \quad (7)$$

$$\varphi = \pi - \alpha_g \quad (8)$$

Dla  $\alpha_g < \omega t < \pi + \alpha_g$  gdy diody nie przewodzą prądu, kondensator C jest rozładowywany przez rezystancję R, od napięcia, którego wartość wynosi

$$u_c \left( \frac{\alpha_g}{\omega} \right) = |U_M| \sin \alpha_g \quad (9)$$

Zaczynając od kąta  $\alpha_g$  napięcie na kondensatorze zmniejsza się wykładniczo, aż do osiągnięcia kąta  $\alpha_z$ , kiedy kondensator ponownie będzie ładowany. Napięcie zmniejsza się zgodnie ze wzorem

$$u_c(t) = |U_M| \sin \alpha_g \exp \left( -\frac{\omega t - \alpha_g}{\omega RC} \right) \quad (10)$$

Prąd rezystora i kondensatora podczas jego rozładowania opisany jest wzorem

$$i_R(t) = -i_C(t) = \frac{|U_M|}{\sqrt{R}} \sin \alpha_g \exp \left( -\frac{\omega t - \alpha_g}{\omega RC} \right) \quad (11)$$

Kąt w którym diody przestają przewodzić, oznaczony przez  $\alpha_g$  i wynosi  $\alpha_g = \pi - \varphi$  (12)

$$\alpha_g \text{ mieści się w zakresie } \frac{\pi}{2} < \alpha_g < \pi \quad (13)$$

Kąt  $\alpha_z$  jest kątem w którym opadające napięcie na kondensatorze  $u_c(t)$  według wzoru (10) zrównuje się z rosnącym napięciem źródła  $u(t)$  zgodnie ze wzorem (1) i wtedy diody zaczynają przewodzić prąd. Z poniższej zależności można wyznaczyć kąt  $\alpha_z$

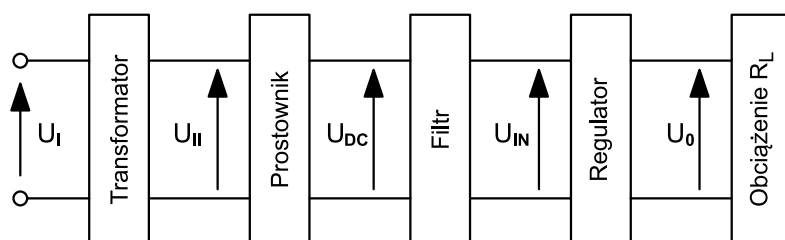
$$|U_M| \sin \alpha_g \exp \left( -\frac{\alpha_z + \pi - \alpha_g}{\omega RC} \right) = |U_M| \sin \alpha_z \quad (14)$$

Powyższy opis nie uwzględnia spadków napięcia na diodach oraz tak istotnej rzeczy jak zastępcza rezystancja źródła zasilania prostownika, a i tak rozwiązanie takiego równania nie jest trywialne. Ponieważ dokładne obliczenie przebiegów w prostowniku o obciążeniu RC jest bardzo trudne analitycznie, dlatego w praktyce stosuje się współczynniki obliczeniowe uzyskane z wykresów Schade, co zostanie przedstawione w dalszej części artykułu.

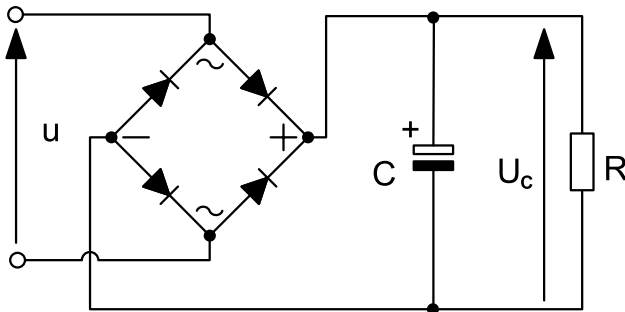
## Definicje wybranych wielkości

Poniżej przypomniano definicje wybranych wielkości prądu elektrycznego, które będą używane do analizy prostownika. **Wartość maksymalna  $I_M$**  jest to amplituda prądu przemiennego. Inne spotykane oznaczenie to  $I_{PEAK}$  lub  $I_{PK}$ . **Wartość średnia prądu**, oznaczana symbolem  $I_{SR}$ ,  $I_{AVG}$ ,  $I_{AV}$  lub  $I_{MED}$ , jest to wartość zastępczego prądu stałego, który w ciągu okresu przenosi taki sam ładunek elektryczny. Wartość ta wyraża się wzorem

$$I_{AV} = \frac{1}{T} \int_0^T i dt$$



Rysunek 1. Schemat blokowy zasilacza prądu stałego



Rysunek 2. Prostownik mostkowy z filtrem pojemnościowym

Dla prądu sinusoidalnego wyprostowanego

$$I_{AV} = \frac{2}{\pi} I_M$$

Dla prądu przemiennego, a w tym także o przebiegu sinusoidalnym  $I_{AV}=0$

**Wartość skuteczna prądu**, oznaczana  $I, I_{SK}, I_{RMS}$  lub  $I_{RS}$ , jest to wartość zastępczego prądu stałego, równoważnego prądowi przemiennemu pod względem przenoszonej energii elektrycznej. Wartość ta wyraża się wzorem

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}$$

Dla prądu o przebiegu sinusoidalnym  $I = \frac{I_M}{\sqrt{2}}$ . Analogicznie oznacza się wartości napięć.

**Wartość średnia napięcia**

$$U_{AV} = \frac{1}{T} \int_0^T u dt$$

Dla napięcia przemiennego, a w tym także o przebiegu sinusoidalnym  $U_{AV}=0$

Dla napięcia o przebiegu sinusoidalnym wyprostowanego

$$U_{AV} = \frac{2}{\pi} U_M$$

Niektórzy wartość średnią dla przebiegu przemiennego definiują wzorem

$$I_{AV} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} i dt \quad \text{i} \quad U_{AV} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} u dt$$

W domyśle zakładając, że jest to liczone dla prądu wyprostowanego. Obliczone wartości w obu przypadkach dają jednakowy wynik.

**Wartość skuteczna napięcia**

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt}$$

Dla napięcia o przebiegu sinusoidalnym  $U = \frac{U_M}{\sqrt{2}}$ . Wartość międzyszczytowa przebiegu elektrycznego zapisywana jest symbolem  $U_{pp}$  lub  $U_{SS}$ . Stosunek wartości skutecznej do wartości średniej prądu nazywa się **współczynnikiem kształtu** i oznacza się symbolem  $k_k$  lub  $F$ .  $F = \frac{I}{I_{AV}}$

Dla prądu o przebiegu sinusoidalnym

$$F = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \approx 1,11$$

$$r_f[\%] = \frac{\Delta U_{IN(M)}}{\sqrt{3} * U_{IN(AV)}} * 100 = \frac{\Delta U_{IN(PP)}}{2\sqrt{3} * U_{IN(AV)}} * 100$$

W literaturze spotykany jest również współczynnik tętnień, jako stosunek amplitudy składowej zmiennej do wartości średniej przebiegu

$$M_i[\%] = \frac{\Delta U_{IN(M)}}{U_{IN(AV)}} * 100$$

W analizie prostownika wykorzystywany będzie współczynnik  $r_f$ .

**Etapy projektowania zasilacza**

Projektowanie zasilacza zaczynamy od określenia maksymalnego prądu pobieranego z prostownika  $I_{IN(FL)}$ , napięcia  $U_{IN}$  oraz  $\Delta U_{IN(M)}$  przy jego maksymalnym obciążeniu. Wartości te zależą od urządzenia, które będzie zasilane prostownikiem lub rodzaju regulatora, który może być dodatkowym elementem składowym zasilacza. Pierwszym etapem projektowania prostownika jest wstępne określenie parametrów elektrycznych elementów potrzebnych do jego budowy. Robimy to na podstawie odpowiednich wzorów oraz diagramów Schade. Następnie dobieramy odpowiednie elementy z katalogów. W drugim etapie dokonywana jest analiza prostownika i weryfikacja otrzymanych danych ze wstępnymi **złożeniami**. Jeśli otrzymane dane z analizy prostownika nie spełniają określonych na wstępie wymogów, dobieramy nowe elementy (lub

Przebiegi prądów i napięć w prostowniku obciążonym pojemnościowo nie są sinusoidalne, dlatego wartości średnie i skuteczne najłatwiej wyznacza się za pomocą diagramów Schade.

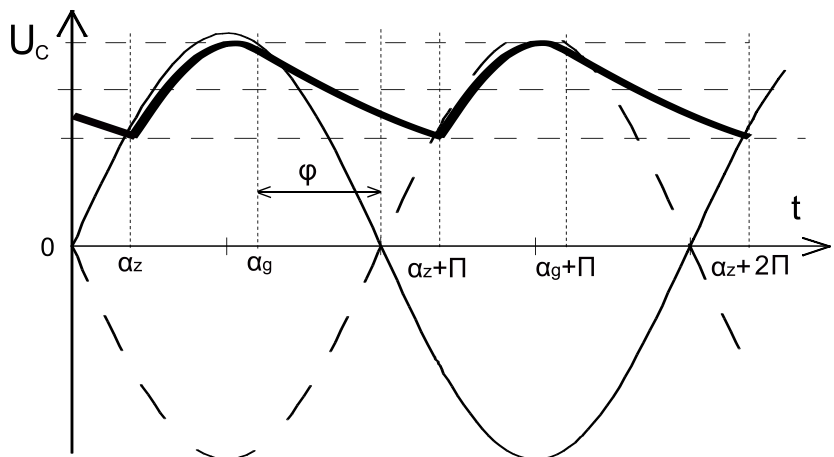
**Współczynnik tętnień**, przedstawiany jest symbolami  $r, r_f, RF, k_p, k_p$  lub  $K_{o,ripple}$  i zdefiniowany jest następująco:

$$r_f = \frac{U_{r(RMS)}}{U_{IN(AV)}}$$

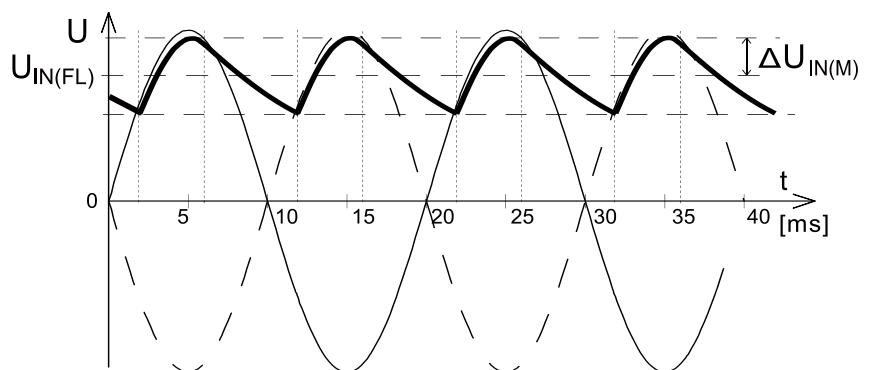
Jest to stosunek wartości skutecznej składowej zmiennej do wartości średniej przebiegu napięcia. Można go również wyrazić **wzorem:**

$$r_f = \frac{\sqrt{U_{IN(RMS)}^2 + U_{IN(AV)}^2}}{U_{IN(AV)}}$$

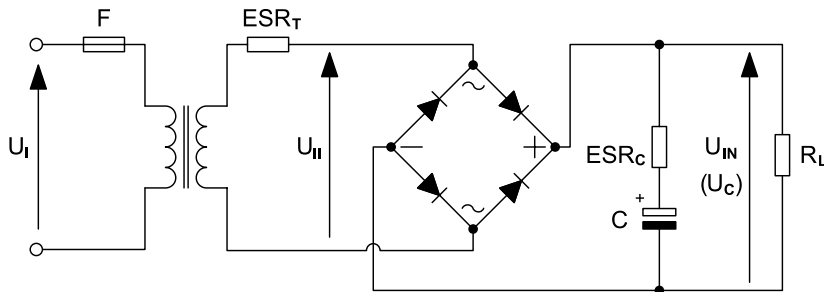
Aproksymując przebieg składowej zmiennej napięcia (rysunek 4), który otrzymujemy na wyjściu filtra pojemnościowego do przebiegu trójkątnego, przybliżony wzór na współczynnik tętnień wynosi



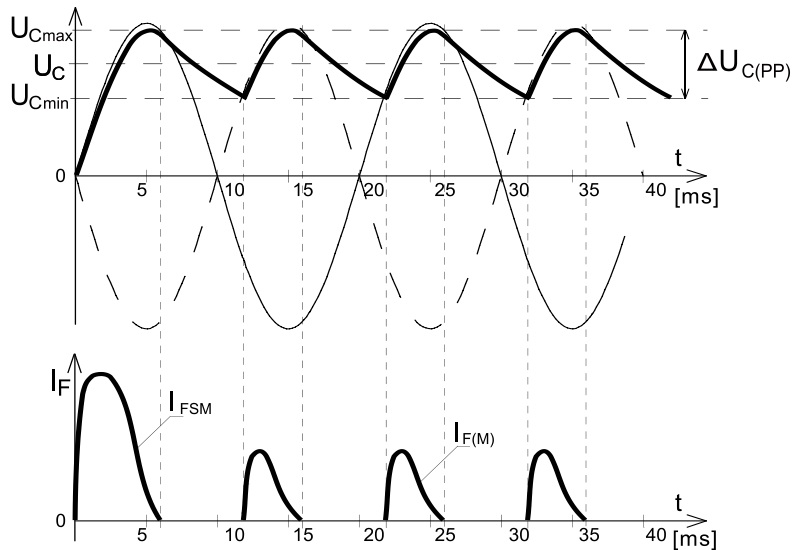
Rysunek 3. Przebiegi napięć w prostowniku Graetza obciążonego układem RC



Rysunek 4. Tętnienia napięcia na wyjściu filtra pojemnościowego



Rysunek 5. Prostownik jednofazowy dwupołkowy obciążony pojemniowo



Rysunek 6. Przebiegi napięcia i prądu w zasilaczu

element), które nie spełniły oczekiwań. Dobór nowych elementów przeprowadzamy na podstawie wykonanego badania. Następnie, jeśli jest taka potrzeba przeprowadzamy ponowną analizę prostownika, celem uzyskania dokładnych jego parametrów.

Podstawowym elementem zasilacza jest transformator sieciowy. W transformatorach o częstotliwości 50 Hz (częstotliwość sieci energetycznej w Polsce) pod obciążeniem występują spadki napięć na wyjściu, spowodowane rezystancją uzwojenia pierwotnego i wtórnego, rezystancją strat rdzenia oraz indukcyjnością rozproszenia uzwojenia pierwotnego i wtórnego (zwłaszcza dla transformatorów dużej mocy). Producenci transformatorów podają zazwyczaj tylko podstawowe parametry transformatora: jego moc oddawaną na uzwojeniu wtórnym, **napięcie pierwotne znamionowe, napięcie wtórne pod maksymalnym obciążeniem** rezystancyjnym, **prąd uzwojenia wtórnego** przy maksymalnym obciążeniu. Niestety rzadko podawana jest ekwiwalentna rezystancja szeregowo obwodu wyjściowego transformatora -  $R_s$  (oznaczana również  $ESR_T$ ), potrzebna do dokładnego wyznaczenia wartości napięć i prądów prostownika z filtrem. Producenci transformatorów zwykle nie podają też wartości napięcia wyjściowego transformatora bez obciążenia. Dla transformatorów o małej indukcyjności rozproszenia (tych o mniejszej mocy), wartość tej rezystancji z dużym

przybliżeniem możemy obliczyć, korzystając ze wzoru

$$R_s \approx \frac{R_1}{n^2} + R_{II}$$

$R_1$  - rezystancja uzwojenia pierwotnego

$R_{II}$  - rezystancja uzwojenia wtórnego

$n$  - przekładnia zwojowa transformatora

Dokładniej  $R_s$  obliczymy mierząc wartość skuteczną napięcia na uzwojeniu wtórnym bez żadnego obciążenia -  $U_{II(NL)}$ , a następnie mierząc napięcie na tym uzwojeniu przy maksymalnym obciążeniu rezystancyjnym -  $U_{II(FL)}$  i wykorzystując wzór

$$R_s \approx \frac{U_{II(NL)} - U_{II(FL)}}{I_{II(FL)}}$$

Przy obu pomiarach trzeba zadbać, aby napięcie na uzwojeniu pierwotnym transformatora było jednakowe (w przypadku gdy zdarzają się wahania napięcia w sieci). Tak naprawdę  $R_s$  nie jest liniowa w funkcji prądu obciążenia i minimalnie wzrasta wraz ze wzrostem prądu, ale powyższy wzór z dużym przybliżeniem podaje jej wartość.

Gdy mamy problemy z odpowiednim obciążeniem transformatora (np. bardzo duży prąd maksymalny uzwojenia wtórnego), wartości  $U_{II(FL)}$  i  $I_{II(FL)}$  bierzemy z karty katalogowej transformatora, a napięcie  $U_{II(NL)}$  mierzymy, sprawdzając jednocześnie czy napięcie na uzwojeniu pierwotnym jest zgodne z napięciem nominalnym dla tego uzwojenia, podawanym przez producenta (zazwyczaj 230 V).

## UKŁADY INTERNETOWE



### Karta przekazników sterowana przez Internet AVT5250



### Karta I/O sterowana przez Internet AVT966



### Karta wejść z interfejsem Ethernet AVT953



### Moduł I/O sterowany przez Internet AVTMOD05



[www.sklep.avt.pl](http://www.sklep.avt.pl)

AVT-Korporacja Sp. z o.o., 03-197 Warszawa, ul. Leszczyńska 11, tel.: 22 257 84 50, fax: 22 257 84 55, e-mail: handlowy@avt.pl

# ZESTAWY STARTOWE



**AVT701 Rezystory**  
Rezystory przewlekane 0,125 - 0,25 W



**AVT702 Kondensatory**  
Kondensatory przewlekane ceramiczne i styrofksose



**AVT703 Elektrolity**  
Kondensatory elektrolityczne przewlekane



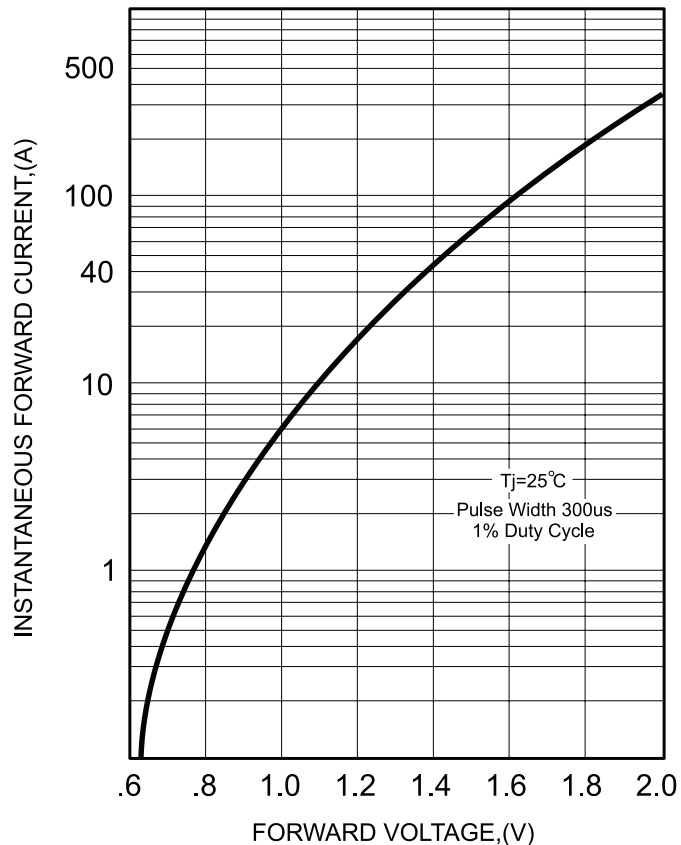
**AVT705 Elementy mechaniczne**  
Sruby, nakr tki i podk tki w rozmiarze 2,5...4 mm



**AVT719 Diody LED**  
Różne kolory i rozmiary

[www.sklep.avt.pl](http://www.sklep.avt.pl)

AVT-Korporacja Sp. z o.o., 03-197 Warszawa, ul. Leszczyñowa 11, tel.: 22 257 84 50, fax: 22 257 84 55, e-mail: handlowy@avt.pl

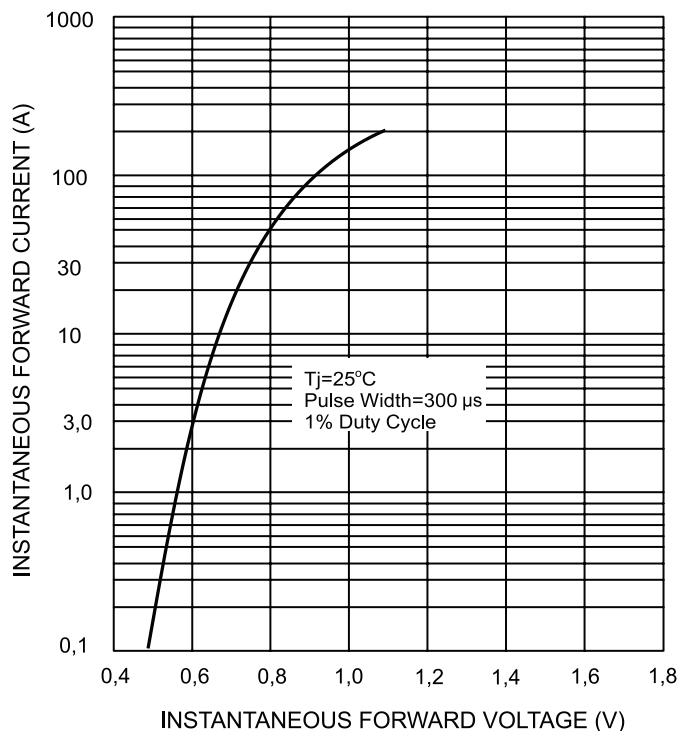


Rysunek 7. Charakterystyka chwilowego przewodzenia diody 6A05 Surge Components

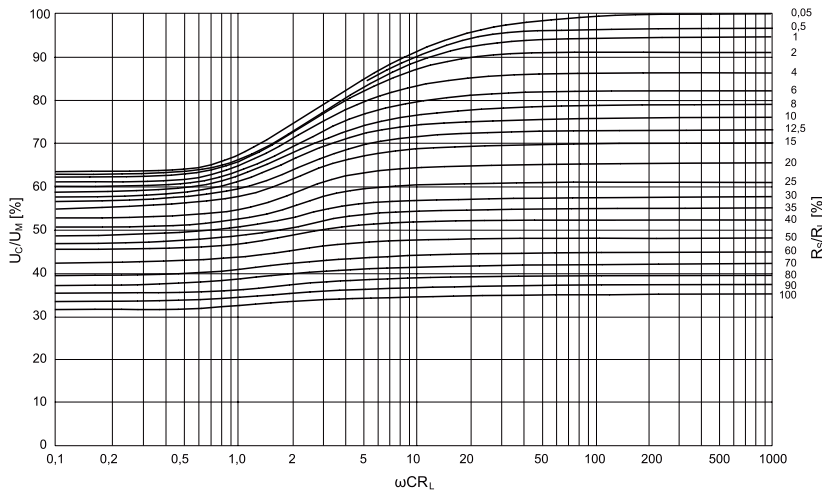
### Przykład

Zadaniem jest zaprojektowanie prostownika o wydajności prądowej 2,5 A i napięciu wyjściowym 13,5 V. Maksymalna amplituda napięcia tętnień, występująca przy maksymalnym obciążeniu nie może przekroczyć 1,4 V. Schemat prostownika przedstawiono na rysunku 5.

Przebiegi napięcia na wyjściu prostownika oraz prądu diody w mostku prostownika przedstawia rysunek 6. Napięcie na kondensatorze  $U_C$ , w układach często oznaczane jest symbolem  $U_{IN}$ , jako napięcie wejściowe dla stabilizatora. Na początku wstępnie określamy parametry elementów prostownika.



Rysunek 8. Charakterystyka chwilowego przewodzenia diody 6A05 GOOD-ARK Electronics



Rysunek 9. Współczynniki obliczeniowe jednofazowego prostownika dwupołówkowego obciążonego pojemnościowo

### Wybór transformatora

Prąd uzwojenia wtórnego transformatora  $I_{II}$  (wartość skuteczna) jest 1,5 do 2 razy większy od wartości prądu stałego obciążenia  $I_{RL(AV)}$ . Zakładamy, że:  $I_{II(FL)} = 1,75 * I_{RL(FL)}$ , co daje wartość prądu  $I_{II} = 4,375$  A. Index  $(FL)$  oznacza maksymalne obciążenie, natomiast  $(NL)$  brak obciążenia.

$$U_{II(FL)} = \frac{U_{C(FL)} + \Delta U_{C(M)} + 2U_{DF}}{\sqrt{2}}$$

gdzie  $U_{DF}$  jest napięciem przewodzenia diody prostowniczej.

Przyjmując  $U_{C(FL)} = 13,5$  V, maksymalną amplitudę napięcia tętnień  $\Delta U_{C(FL)M} = 1,4$  V i  $U_{DF} = 1$  V otrzymujemy  $U_{II(FL)} = 11,95$  V. Na podstawie wstępnie obliczonych wartości prądu i napięcia, moc wyjściowa transformatora powinna wynosić 52,28 VA. Z katalogu wybrano transformator toroidalny 60 VA, TS 60 (najbliższy wartości w górę od 52,28), którego nominalne parametry to 12 V przy maksymalnym obciążeniu 5 A. Dokonując pomiarów tego transformatora otrzymano następujące wartości

$U_{II(FL)} = 11,99$  V  $I_{II(FL)} = 5,03$  A  $U_{II(NL)} = 13,26$  V  
 $I_0 = 4,3$  mA  $\eta = 86$  %  
 gdzie  $I_0$  to prąd jałowy transformatora, a  $\eta$  to jego sprawność.

$$R_S = \frac{U_{II(NL)} - U_{II(FL)}}{I_{II(FL)}}$$

z czego otrzymujemy  $R_S = 0,253$   $\Omega$ , którą wykorzystamy do dalszych obliczeń. Dla porównania obliczona wartość  $R_S$  ze wzoru

$$R_S \approx \frac{R_l}{n^2} + R_{II}$$

$R_l = 35,1 \Omega$ ,  $R_{II} = 0,123 \Omega$ ,  $n = 17,42$  wyniosła 0,239  $\Omega$  i nie uwzględnia rezystancji strat rdzenia oraz indukcyjności rozprzelenia uzwojeń.

### Dobór kondensatora

Maksymalna wartość napięcia na kondensatorze pojawia się podczas braku obciążenia i wynosi

$$U_{C(NL)} = \sqrt{2} * U_{II(NL)} - 2 * U_{DF} = \sqrt{2} * 13,26 - 2 * 1 = 16,75$$

We wzorze założono, że spadek napięcia na diodzie  $U_{DF}$  wynosi 1 V. Do obliczenia pojemności kondensatora potrzebna jest wartość  $\omega C R_L$ , którą wyznaczamy z diagramów Schade, obliczając wcześniej potrzebne współczynniki.

$$80,6 \% \quad R_L = \frac{U_{C(E)}}{I_R(E)} = 5,4 <W>$$

REKLAMA

## AVTduino STARTER KIT

### Skład kompletu:

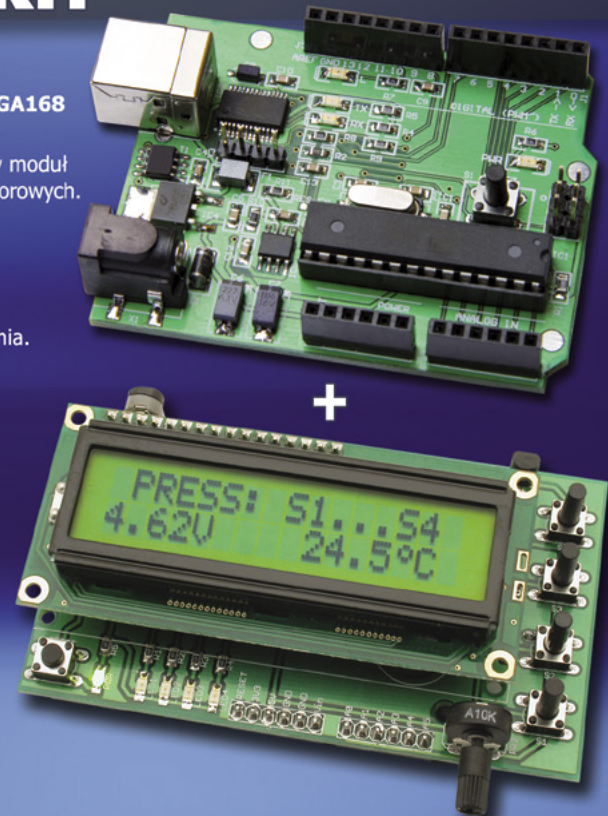
- AVT5272 B AVTduino - kompatybilna z Arduino płytka z ATMEGA168  
 Zastaw do samodzielnego montażu

Zastaw AVTduino z procesorem ATMEGA168 jest to podstawowy, bazowy moduł zgodny z Arduino. Jest to doskonała baza własnych systemów mikroprocesorowych.

- AVT1615 B AVTduino LCD WYŚWIETLACZ DLA ARDUINO  
 Zastaw do samodzielnego montażu

Podstawowy moduł dołączany do płytki bazowej bez konieczności lutowania. Płytkę zawiera elementy peryferyjne, niezbędne w każdym urządzeniu bazującym na mikrokontrolerach. Całość z wyświetlaczem i przyciskami w prosty sposób pomoże zbudować np.: miernik lub zegar.

- Płyta CD z kompletem materiałów dodatkowych



KOD HANDLOWY:  
 AVTduino KPL  
 CENA:  
**80Zł**

**AVTduino**  
 kompatybilne z ARDUINO

Więcej informacji:



AVT-Korporacja Sp. z o.o., 03-197 Warszawa, ul. Leszczynowa 11,  
 tel. 022 257 84 50, fax 022 257 84 55, e-mail: handlowy@avt.pl

www.sklep.avt.pl

$$\frac{U_{C(FL)}}{U_{C(NL)}} \min[\%] = \frac{13,5}{16,75} * 100 = 80,6 \%$$

$$R_L = \frac{U_{C(FL)}}{I_{RL(FL)}} = 5,4 \Omega$$

$$\frac{R_S}{R_L} [\%] = \frac{R_S}{U_{C(FL)}} * 100 = \frac{0,253}{13,5} * 100 = 4,69 \%$$

Z rysunku 9 odczytujemy wartość  $\omega CR_L$  dla powyższych współczynników. Wynosi ona 6,8. Z tego wynika, że  $\omega CR_L$  musi być większe od 6,8 (aby napięcie na wyjściu prostownika nie było niższe od 13,5 V). Mając  $\omega CR_L > 6,8$  możemy obliczyć wartość pojemności kondensatora.

$$C > \frac{6,8}{\omega R_L}, \quad C > \frac{6,8}{2\pi f R_L}, \quad C > \frac{6,8}{2\pi 50 * 5,4}$$

Z powyższych obliczeń wynika, że pojemność kondensatora powinna być większa od 4010  $\mu F$ . Musi jednak zostać spełniony drugi warunek, dotyczący współczynnika tętnień. Maksymalna wartość tego współczynnika dla zadeklarowanych danych wynosi

$$r_{f(max)} [\%] = \frac{\Delta U_{C(M)max}}{\sqrt{3} * U_{C(FL)}} * 100 = \frac{1,4}{\sqrt{3} * 13,5} * 100 = 5,99 \%$$

Dla tego współczynnika tętnień  $r_f$  oraz obliczonego wcześniej współczynnika  $R_S/R_L$ , z rysunku 13 odczytujemy wartość  $\omega CR_L$ , która wynosi 11,1 i umożliwia obliczenie pojemności kondensatora.

$$C > \frac{11,1}{\omega R_L}, \quad C > \frac{11,1}{2\pi f R_L}, \quad C > \frac{11,1}{2\pi 50 * 5,4}$$

Co daje pojemność 6546  $\mu F$ , która jest graniczna dla naszych obliczeń. Najbliższa wartość katalogowa w górę to 6800  $\mu F$ . Wybieramy kondensator 6800  $\mu F/40V$ , producenta BC Components, typu 050, który ma tolerancję pojemności od -10% do +30%. W szczególnym przypadku, teoretycznie kondensator ten może mieć pojemność 6120  $\mu F$ , co jest poniżej naszej wartości progowej 6546  $\mu F$ . W większości zastosowań wykorzystamy taki kondensator (zwłaszcza, że ta pojemność jest znacznie większa niż 3539  $\mu F$  i w związku z tym napięcie  $U_{C(FL)}$  będzie nieco wyższe od 13,5 V, co spowoduje niewielkie zmniejszenie współczynnika  $r_{f(max)}$ ). Musimy sobie jednak zdawać sprawę z tego, że pojemność kondensatorów elektrolitycznych z biegiem czasu się zmniejsza i pomimo iż zazwyczaj jest większa od podawanej pojemności nominalnej, to w przyszłości może osiągnąć wartość poniżej naszego progu. W rozwiązaniach gdzie dopuszczalny współczynnik tętnień jest istotnym parametrem zasilacza (i np. nie będzie wykorzystywany stabilizator), należy zastosować kondensator 10000  $\mu F$  np. BC Components, typu 051 (tolerancja od -20% do +20% co w najgorszym przypadku daje 8000  $\mu F$ ). W takich i podobnych przypadkach granicznych, kierujemy się doświadczeniem oceniając ewentualne konsekwencje (użytkowe oraz

ekonomiczne) podjętej decyzji. Do dalszej analizy wybieramy kondensator o wartości nominalnej 10000  $\mu F$ . Dobrą praktyką jest wybór kondensatora na napięcie ok. 50 % większe niż to wynika z obliczeń. Napięcie to wynosi  $U_{C(NL)} * 1,5$ , co daje 25,125 V. Z katalogu wybieramy kondensator BC Components, typu 051, 10000  $\mu F$  na 25 V, którego zastępuje rezystancja szeregową  $ESR_C = 0,034 \Omega$ .

### Wybór diod prostowniczych

Wartość średnia prądu przypadająca na diodę w układzie Graetza obliczana jest wzorem

$$I_{F(AVE)} = \frac{I_{FL}}{2} = \frac{2,5}{2} = 1,25 \text{ A}$$

Szczytowe napięcie wsteczne diody oznaczane przez  $U_{RWM}$  lub PIV równe jest  $U_{C(NL)}$  i wynosi 16,75 V. Niepowtarzalny szczytowy prąd przewodzenia diody  $I_{FS}$  to

$$I_{FS} = \frac{U_{IN(NL)}}{ESR_{TOTAL}}$$

Prąd ten jest również oznaczany symbolem  $I_{SURGE}$  (rys. 6.) i jest to prąd, który ładuje kondensator w momencie włączenia zasilania. Czas trwania takiego impulsu nie może przekraczać 10 ms (lub 8,3 ms dla sieci

60 Hz).  $I_{FSM}$  jest maksymalnym prądem impulsowym, który nie niszczy diody.

$$ESR_{TOTAL} = ESR_T + ESR_C$$

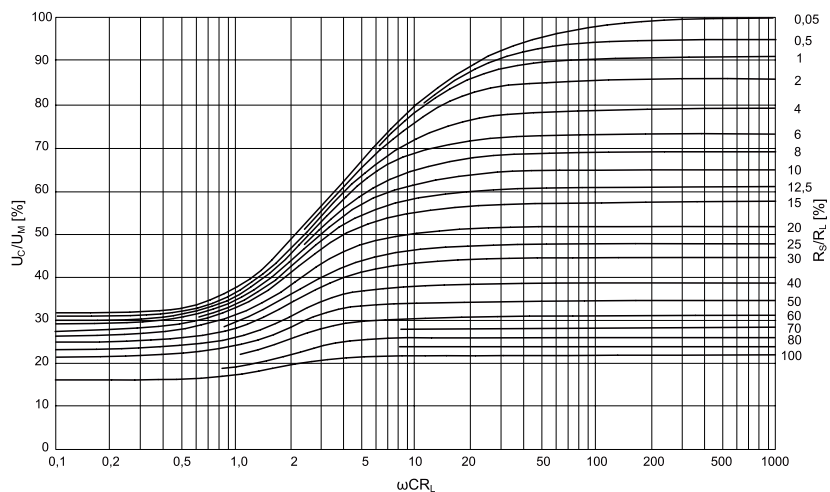
$ESR_{TOTAL}$  jest to suma zastępczych rezystancji szeregowych transformatora, diod oraz kondensatora. Do obliczeń zrezygnowano z  $ESR_D$ , uwzględniając tylko spadek napięcia na dwóch diodach, równy 2 V (po 1 V na diodę). Często rezygnuje się również z  $ESR_C$  (jest to bezpieczne, gdyż wtedy obliczona wartość prądu jest większa niż wartość faktyczna, przez co dobrana dioda na podstawie takiego obliczenia ma większy margines bezpieczeństwa).

Do naszych obliczeń przyjmujemy

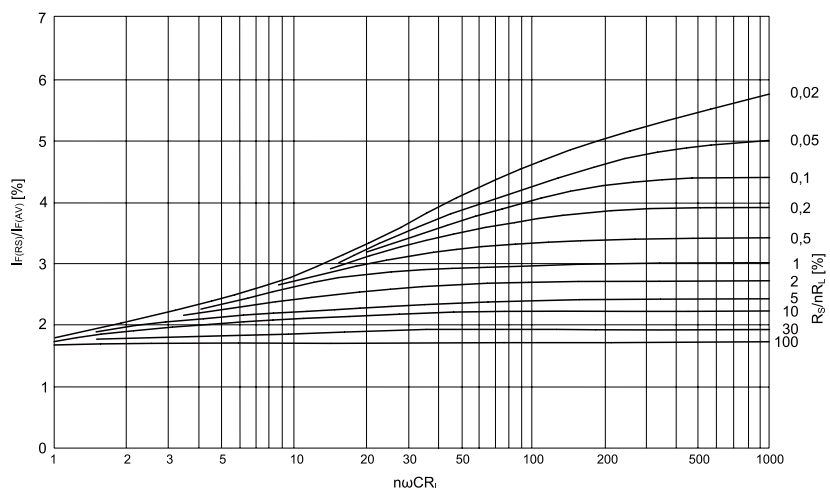
$$ESR_{TOTAL} = ESR_T + ESR_C = 0,253 + 0,034 = 0,287 \Omega$$

$$I_{FS} = \frac{U_{IN(NL)}}{ESR_{TOTAL}} = \frac{16,75}{0,287} = 58,36 \text{ A}$$

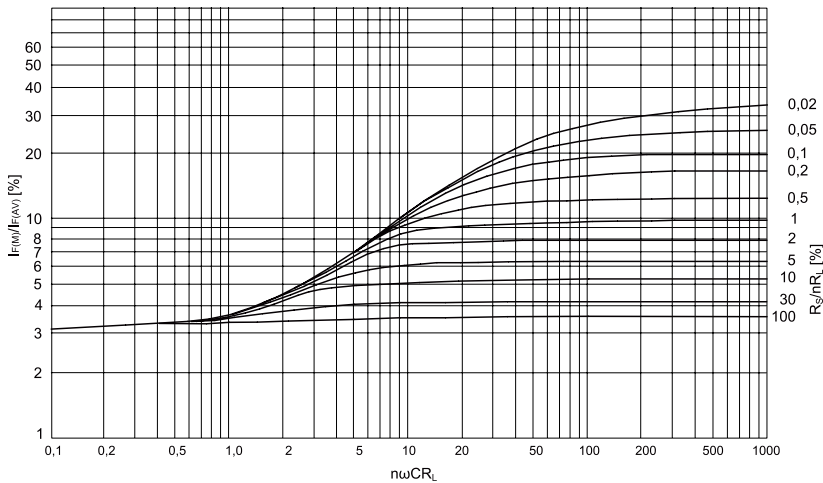
Na podstawie diagramu Schade możemy określić maksymalną, powtarzalną wartość prądu płynącego przez diodę przy maksymalnym obciążeniu prostownika. Do tego potrzebne nam będą dwa współczynniki, które wykorzystamy również do sprawdzenia transformatora. Obliczamy  $n\omega CR_L = 2 * 2\pi * 50 * 0,01 * 5,4 = 33,9$ , gdzie  $n = 1$



Rysunek 10. Współczynniki obliczeniowe jednofazowego prostownika jednopółkowego obciążonego pojemnościowo



Rysunek 11. Współczynnik kształtu prądu przewodzenia diody prostownika obciążonego pojemnościowo



Rysunek 12. Stosunek wartości maksymalnej do średniej prądu fazowego prostownika obciążonego pojemnościowo

dla prostownika jednopółkowego i  $n=2$  dla dwupółkowego oraz

$$\frac{R_S}{nR_L} [\%] = \frac{0,253}{2 * 5,4} * 100\% = 2,34\%$$

Z rysunku 12 odczytujemy stosunek wartości maksymalnej do średniej dla diody. Wynosi ona 7,8 co daje wartość prądu  $I_{F(M)} = 7,8 * 1,25 = 9,75$  A. Z katalogu wybieramy diody z co najmniej 100% marginesem bezpieczeństwa. Ze względu na wysokie temperatury złącza diody nawet przy poło-wie dopuszczalnego prądu średniego oraz często braku możliwości stosowania radiatorów dla diod kilkumeryowych najlepiej zastosować takie diody, których maksymalny prąd średni jest czterokrotnie większy od prądu średniego płynącego przez tą diodę. W związku z powyższym wybrano diody

## Czterokanałowy termometr z wyświetlaczem LED AVT5389



### Wybrane parametry:

- ilość kanałów pomiarowych (czujników): 1...4
- przełączanie kanałów: manualne - przyciskiem lub automatyczne – co 3 sek.
- zakres temperatur: -55...+125°C
- praca z czujnikami DS1820/18S20/18B20, automatyczne rozpoznawanie na każdym kanale
- dokładność wskazań: 0,1°C dla czujników DS18B20 lub 0,5°C dla czujników DS18S20
- nie wymaga kalibracji
- pole odczytowe: wyświetlacz LED 4 cyfry i 4 diody LED wskazujące aktualny kanał
- zasilanie: 7...16VDC, 100mA

Więcej informacji:



4-punktowy termometr elektroniczny z wyświetlaczem, mierzy temperaturę w czterech, oddalonych od siebie miejscach. Wynik pomiaru jest wyświetlany na dużym, czytelnym wyświetlaczu LED. Temperatura jest mierzona za pomocą popularnych układów scalonych DS1820 z interfejsem 1-Wire. Dołączenie czujnika wymaga jedynie dwóch przewodów. Ich długość maksymalna wynosi 30 m. Interfejs 1-Wire działa pewnie i jest odporny na zakłócenia. Czujniki są zasilane z płytki termometru i nie wymagają dodatkowych zasilaczy oraz kalibracji.

Układ jest wersją rozwojową zestawu AVT2389, który cieszy się ogromnym, niesłabnącym zainteresowaniem. W nowej konstrukcji uwzględniono wszystkie uwagi użytkowników starego zestawu i sugestie zmian układowych.

[www.sklep.avt.pl](http://www.sklep.avt.pl)

AVT-Korporacja Sp. z o.o., 03-197 Warszawa, ul. Leszczynowa 11,  
tel.: 22 257 84 50, fax: 22 257 84 55, e-mail: handlowy@avt.pl

**6A05** firmy Surge Components Inc. o następujących parametrach:  $U_{RWM}=50\text{ V}$ ,  $I_O=6\text{ A}$ ,  $I_{FSM}=250\text{ A}$ ,  $U_F=0,95\text{ V}$  przy  $I_F=6\text{ A}$ .

W tym miejscu warto poświęcić chwilę porównaniu diod o tej samej nazwie, ale różnych producentów. Dla przykładu, spadek napięcia na złączu diody 6A05, przy maksymalnym prądzie przewodzenia 6 A, firma Diodes Incorporated podaje 0,9 V, a maksymalny prąd niepowtarzalny  $I_{FSM}=250\text{ A}$ . Firma DC Components CO. LTD dla takiego samego prądu przewodzenia podaje wartości odpowiednio 1,1 V, a prąd  $I_{FSM}=400\text{ A}$ . Z kart katalogowych producentów wynika (nie wprost), że wartość napięcia  $U_F$  przez jednych jest podawana dla prądu  $I_F=6\text{ A}$  o przebiegu stałym, a przez innych  $I_F=6\text{ A}$  dla prądu pulsującego (znaczenie ma tutaj wartość maksymalna prądu impulsu). Inni producenci dla prądu przewodzenia 6 A podają napięcie przewodzenia 0,95 V i 1 V.

Wartość prądu  $I_{FSM}$  wyznaczana jest przez producentów podobnie (metoda JEDEC). Większość producentów dla diody 6A05 podaje wartość  $I_{FSM}=400\text{ A}$ .

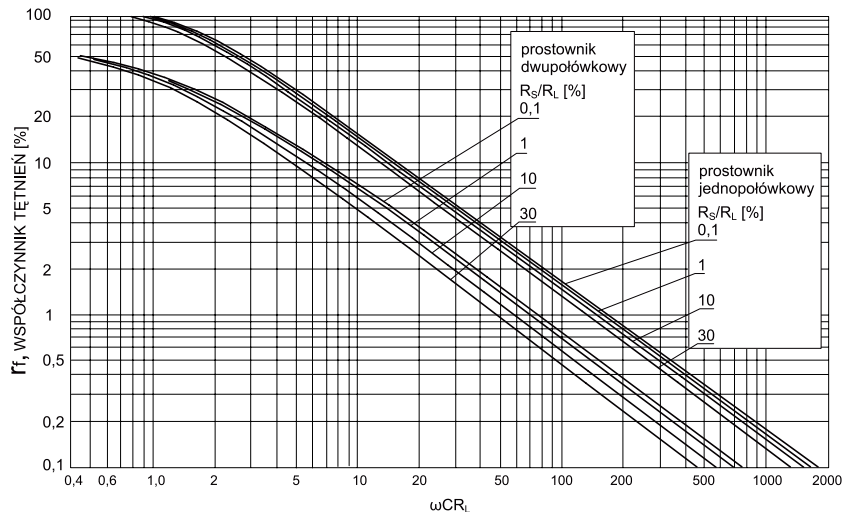
Do dokładnych obliczeń prostownika przydatna jest charakterystyka chwilowego przewodzenia diody. Charakterystyki te dla diody 6A05 także są różne w zależności od producenta. Poniżej przedstawiono wykresy dla takiej diody firmy Surge Components oraz GOOD-ARK Electronics.

Z powyższych wykresów wyznaczamy spadki napięć dla wcześniej obliczonej maksymalnej wartości chwilowego prądu przewodzenia  $I_{F(M)}=9,75\text{ A}$ . Dla diody Surge Components napięcie to wynosi 1,1 V, a dla diody GOOD-ARK Electronics 0,68 V (autor sceptycznie podchodzi do tej charakterystyki, chociaż nie spotkał się z diodami GOOD-ARK Electronics). Większość producentów tych diod przedstawia charakterystyki, które przy prądzie chwilowym 9,75 A pokazują napięcie 0,85 V do 1 V. Powyższe charakterystyki wyznaczane są w temperaturze pracy złącza diody  $T_j=25^\circ\text{C}$ . W rzeczywistości temperatura złącza nawet przy prądzie o wartości 25 % prądu  $I_{(AV)max}$  diody jest znacznie wyższa. Dlatego niektórzy producenci podają charakterystyki dla kilku temperatur złącza, np. Semicron dla  $-50, 25$  oraz  $100^\circ\text{C}$  (podawany przez producentów zakres temperatury pracy złącza  $T_j$  to zazwyczaj od  $-50$  do  $175^\circ\text{C}$ ). Wzrost temperatury złącza powoduje, że spadek napięcia na diodzie się zmniejsza.

W obliczeniach prostownika zazwyczaj pomija się dokładne wyznaczanie spadku napięcia na diodzie, przyjmując spadek napięcia równy 1 V, jednak w prezentowanym przykładzie skrupulatnie uwzględniono ten element obliczeń.

### Sprawdzenia transformatora

Z rys. 11. odczytujemy wartość współczynnika kształtu prądu płynącego przez



Rysunek 13. Współczynnik tętnień dla prostownika jedno i dwupołkowego

diodę prostowniczą. Dla współczynników obliczonych w punkcie 3.  $\omega CR_L=33,9$  oraz

$$\frac{R_S}{nR_L} = 2,34\% \quad \text{wynosi on } 2,6 \text{ czyli}$$

$$\frac{I_{F(RMS)}}{I_{F(AVE)}} = 2,6$$

z tego otrzymujemy

$$I_{F(RMS)} = 2,6 * I_{F(AVE)} = 2,6 * 1,25 = 3,25\text{ A}$$

Wartość skuteczną prądu płynącego przez uzwojenie wtórne transformatora wyraża się wzorem

$$I_{I(FL)RMS} = \sqrt{2} * I_{F(RMS)} = \sqrt{2} * 3,25 = 4,6\text{ A}$$

Jak pamiętamy, maksymalna wartość prądu obciążenia transformatora TS 60 wynosi 5 A, czyli wstępny wybór transformatora został prawidłowo dokonany.

### Dobór bezpiecznika

Obliczamy wartość prądu płynącego przez uzwojenie pierwotne przy maksymalnym obciążeniu

$$I_{I(RMS)} = \frac{I_{II(FL)RMS} * U_{II(NL)}}{U_I * \eta} = \frac{4,89 * 13,26}{230 * 0,86} = 0,328\text{ A}$$

gdzie  $\eta$  jest sprawnością transformatora. Sprawność ta dla tego transformatora wynosi ok. 86 %. Następnie wartość prądu mnożymy przez 1,5 otrzymując prąd 0,492 A. W układzie stosujemy bezpiecznik dla napięcia przemiennego o wartości 0,5 A i napięciu 250 V.

Dla transformatorów o większej mocy sprawność się zwiększa powyżej 90 % dla transformatorów o mocy 1 kVA. Dla transformatorów mniejszej mocy sprawność się zmniejsza, a poniżej 20 VA zmniejsza się drastycznie, osiągając 45 % dla mocy 1 VA (podane wartości są orientacyjne).

### Analiza

Założenia początkowe dla powyższego przykładowo  $U_{II(FL)}=13,5\text{ V}$ ,  $I_{FL}=2,5\text{ A}$ ,  $\Delta U_{II(M)MAX}=1,4\text{ V}$ . Na podstawie wstępnych obliczeń, do budowy prostownika wybraliśmy następujące elementy:

- Transformator TS 60 „Elektromechanika”  
 $U_{II(FL)}=11,99\text{ V}$ ,  $I_{II(FL)}=5,03\text{ A}$ ,  
 $U_{II(NL)}=13,26\text{ V}$ ,  $R_S=0,253\ \Omega$

- Kondensator „BC Components”  
 $C=10000\ \mu\text{F} / 25\text{ V}$ ,  $ESR_C=0,034\ \Omega$ , typ 051

- Diody 6A05 „Surge Components Inc.”

$$U_{RWM}=50\text{ V}, I_O=6\text{ A}, I_{FSM}=250\text{ A}$$

Z karty katalogowej tej diody, z wykresu wartości chwilowych prądu i napięcia na diodzie, wyznaczamy spadek napięcia na złączu tej diody przy maksymalnym prądzie złącza. Wartość prądu obliczona w punkcie 3. wynosi  $I_{F(M)}=9,75\text{ A}$ . Spadek napięcia przy tym prądzie wynosi 1,1 V. Aby dokładnie wyznaczyć wartości parametrów tego prostownika, musimy przeprowadzić jego analizę. Na początku obliczamy  $U_{C(NL)}$

$$U_{C(NL)} = \sqrt{2} * U_{II(NL)} - 2 * U_{DF} =$$

$$= \sqrt{2} * 13,26 - 2 * 1,1 = 16,55\text{ V}$$

Wartość ta zmienia się w porównaniu ze wstępnymi obliczeniami, ponieważ zastosowane diody mają nieco większe napięcie  $U_{DF}$  od przyjętego wcześniej do obliczeń. Następnie obliczamy wszystkie współczynniki, potrzebne do wyznaczanie parametrów prostownika z diagramów Schade (część z nich już wcześniej została obliczona). Jeśli obciążeniem prostownika jest układ stanowiący określoną rezystancję  $R_L$  (np. rezystor), odczytana wartość współczynnika  $\frac{U_{C(DC)}}{U_M}$

z wykresu, pozwala obliczyć napięcie wyjściowe, które jest poszukiwaną wartością. Jeśli obciążeniem jest przykładowo stabilizator napięcia (co często się zdarza), interesuje nas pobieranie określonej wartości maksymalnego prądu ze stabilizatora przy nie znanym dokładnie napięciu z prostownika. Wówczas kolejne iteracje, w których wykorzystujemy coraz dokładniejsze wartości zastępcze rezystancji stabilizatora widzianej od strony prostownika, przybliżają nas do poszukiwanej wartości napięcia. Druga iteracja daje wyniki o wystarczającej dokładności.

### Iteracja pierwsza

a)  $U_{C(FL)} = 13,5\text{ V}$



b)  $R_L = \frac{U_{C(FL)}}{I_{RL(FL)}} = 5,4\Omega$

c)  $\frac{R_S}{R_L} [\%] = \frac{0,253}{5,4} * 100 = 4,69 \%$

d)  $\omega CR_L = 2\pi f CR_L = 2\pi 50 * 0,01 * 5,4 = 16,96$

Z wykresu na **rysunku 9** odczytujemy wartość współczynnika  $\frac{U_{C(DC)}}{U_M}$  który jest równy 84%. Wartość tego współczynnika odpowiada stosunkowi  $\frac{U_{C(FL)}}{U_{C(NL)}}$

z czego obliczamy  $U_{C(FL)}$ :  
 $U_{C(FL)} = 0,84 * U_{C(NL)} = 0,84 * 16,55 = 13,9 \text{ V}$

**Iteracja druga**

a)  $U_{C(FL)} = 13,9\text{V}$

b)  $R_L = \frac{U_{C(FL)}}{I_{RL(FL)}} = 5,56$

c)  $\frac{R_S}{R_L} [\%] = \frac{0,253}{5,56} * 100 = 4,55$

d)  $\omega CR_L = 2\pi f CR_L = 2\pi 50 * 0,01 * 5,56 = 17,46$

Z wykresu na rys. 9. odczytujemy wartość współczynnika  $\frac{U_{C(DC)}}{U_M}$  który wynosi 84,3 %.

$U_{C(FL)} = 0,843 * U_{C(NL)} = 0,843 * 16,55 = 13,95 \text{ V}$

Jak widać z wykresu, przy tej wartości  $\omega CR_L$  (uzyskanej dzięki dużej wartości kondensatora), poruszamy się na płaskiej części wykresu i druga iteracja daje wynik bardzo zbliżony do pierwszej. Różnica między pierwszą i drugą iteracją jest najbardziej widoczna dla  $\omega CR_L$  mieszczącego się w zakresie 0,7 do 11.

Na zakończenie, mając wartości drugiej iteracji możemy precyzyjnie wyznaczyć współczynnik tętnień oraz obliczyć amplitudę napięcia tętnień.

Z wykresu (**rysunek 13**) dla  $\frac{R_S}{R_L} [\%] = 4,55 \%$  i  $\omega CR_L = 17,46$

odczytujemy wartość współczynnika  $r_f$ ,  
 $r_{f(\max)} = 3,8 \%$   
 Z zależności  $r_{f(\max)} [\%] = \frac{\Delta U_{C(M)\max}}{\sqrt{3} * U_{C(FL)}} * 100$

obliczamy  $\Delta U_{C(M)\max}$   
 $\Delta U_{C(M)\max} = \frac{\sqrt{3} * U_{C(FL)} * r_{f(\max)}}{100} = \frac{\sqrt{3} * 13,95 * 3,8}{100} = 0,92 \text{ V}$

$\Delta U_{C(PP)\max} = 2 * \Delta U_{C(M)\max} = 1,84 \text{ V}$

$\Delta U_{C(RMS)\max} = \frac{\Delta U_{C(M)\max}}{\sqrt{3}} = 0,53 \text{ V}$

**Transformator**

Obliczamy  $n\omega CR_L = 2 * 2\pi * 50 * 0,01 * 5,56 = 34,92$

oraz  $\frac{R_S}{nR_L} [\%] = \frac{0,253}{2 * 5,56} * 100 = 2,28 \%$

Dla takich zmian powyższych współczynników w porównaniu z wcześniejszymi obliczeniami, z **rysunku 11**. wynika, że zmiana współczynnika  $\frac{I_{F(RMS)}}{I_{F(AVE)}}$

jest niezauważalna w stosunku do wyników z punktu 4. *Sprawdzenie transformatora*. Dlatego wartość prądu uzwojenia wtórnego pozostawiamy z tamtych obliczeń.

$I_{II(FL)RMS} = 4,6 \text{ A}$  przy napięciu  
 $U_{II(FL)RMS} = U_{II(NL)RMS} * R_S = 13,26 * 4,6 * 0,253 = 12,1 \text{ V}$

Na koniec możemy obliczyć sprawność prostowania  $\eta_p$ , która jest stosunkiem mocy wydzielanej w obciążeniu do mocy źródła i wyraża się wzorem

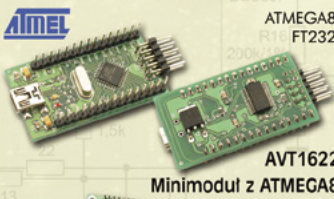
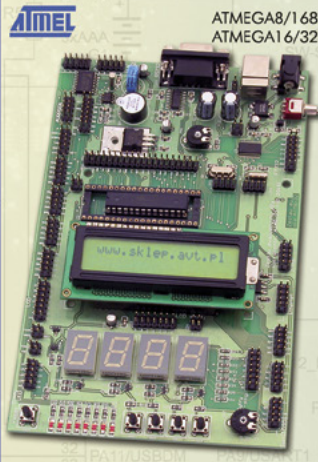




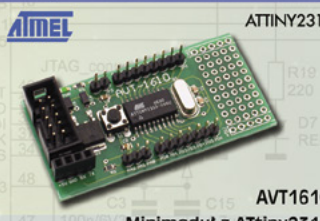


$\eta_p [\%] = \frac{U_{C(FL)} * I_{FL}}{U_{II(FL)RMS} * I_{II(FL)RMS}} * 100 = \frac{13,9 * 2,5}{12,1 * 4,6} * 100 = 62,4 \%$

Warto zwrócić uwagę na to jak kształtuje się sprawność prostowania w zależności od zastępczej rezystancji szeregowej obwodu wyjściowego transformatora -  $R_S$ .

Ze wzrostem rezystancji  $R_S$  sprawność prostowania w niewielkim stopniu zwiększa się, a napięcie wyjściowe znacznie się zmniejsza. Zmniejsza się również prąd maksymalny diody  $I_{F(M)}$ . W prostowniku o dużej mocy i filtrze pojemnościowym impulsy prądowe, przepływające przez diody są ogromne (w naszym przykładzie tylko przy mocy 60VA, wyniosły  $I_{F(M)} = 9,75 \text{ A}$ ). Dlatego w prostownikach o większej mocy, szerego-

REKLAMA

**Zestawy uruchomieniowe**

 <p>ATMEGA8 FT232 AVT1622 Minimodul z ATMEGA8</p>	 <p>ATMEGA8/168 ATMEGA16/32 AVT5311 Płytkę testowa dla mikrokontrolerów AVR</p>	 <p>PIC DIL40,28,20,18 AVT5275 Płytkę testowa dla mikrokontrolerów PIC</p>	 <p>ATMEGA8 FT232 AVT1665 Moduł z wyświetlaczem LCD i ATmega8</p>
 <p>ATMEGA162 AVT3505 Płytkę testowa do kursu C</p>	 <p>STM32F103C8T6 AVT1609 Moduł prototypowy STM32</p>	 <p>AVT1610 Minimodul z ATtiny2313</p>	 <p>ATTINY 2313 89C051 ATMEGA 8535, 8515, 16, 32, 162 ATTINYxx AVT992 Zestaw uruchomieniowy dla AVR i 51</p>
 <p>XILINX XC9572XL AVT2875 LOGICMASTER - płytka do CPLD</p>	<p>AVT-Korporacja Sp. z o.o., 03-197 Warszawa, ul. Leszczyńska 11,                  tel.: 22 257 84 50, fax: 22 257 84 55, e-mail: handlowy@avt.pl</p>		

[www.sklep.avt.pl](http://www.sklep.avt.pl)

wo z uzwojeniem wtórnym transformatora włącza się dodatkową rezystancję, zwiększającą  $R_s$  lub lepiej stosuje się filtr indukcyjny albo indukcyjno-pojemnościowy w miejsce pojemnościowego.

Podczas pomiaru prądu uzwojenia pierwotnego lub wtórnego transformatora obciążonego filtrem pojemnościowym, należy zwrócić uwagę na to, że większość mierników prądu zmiennego reaguje na wartość średnią lub szczytową mierzonego prądu, a wyskalowana jest w wartościach skutecznych (jest to wartość skuteczna dla sinusoidy, czyli dla przebiegu o współczynniku kształtu równym 1,11). Ponieważ prąd płynący przez uzwojenia tak obciążonego transformatora nawet nie przypomina sinusoidy, współczynnik kształtu dla niego może być kilkakrotnie większy od współczynnika kształtu dla sinusoidy. Pomiar takim przyrządem powoduje bardzo duży błąd pomiaru. Niektóre mierniki cyfrowe (zwłaszcza te z wyższej półki), mają przetworniki wartości skutecznej napięcia zmiennego na stałe i pomiar takim przyrządem nie jest obciążony tego rodzaju błędem (poza błędem samego przetwornika i błędami dotyczącymi pomiaru prądu stałego). Warto przypomnieć, że w przypadku mierników analogowych, magnetoelektryczny ustrój pomiarowy przyrządu, reaguje na wartość średnią przepływającego przez niego prądu, natomiast ustrój elektromagnetyczny na wartość skuteczną.

**Wyniki końcowe**

Dla prostownika zbudowanego z elementów:

- transformator TS 60 „Elektromechanika” 12 V, 5 A
- kondensator „BC Components” 10000  $\mu$ F / 25 V, typ 051
- diody 6A05 „Surge Components Inc.”
- przy obciążeniu 2,5 A, z obliczeń otrzyaliśmy napięcie wyjściowe  $U_{C(FL)}$  = 13,95 V i amplitudę napięcia tętnień  $\Delta U_{C(M)max}$  = 0,92 V.

Napięcia zmierzone na wykonanym prostowniku z takich elementów wyniosło:

- napięcie wyjściowe  $U_{C(FL)}$  = 13,73 V
- amplituda napięcia tętnień  $\Delta U_{C(M)max}$  = 0,81 V.

Jak widać różnica między wartością obliczoną, a zmierzaną napięcia wyjściowego jest niewielka i wynosi 1,6 %, co praktycznie mieści się w błędzie pomiaru. W przypadku amplitudy napięcia tętnień różnica wynosi 13,6 %. Jest to spowodowane przede wszystkim tym, że wartość kondensatora jest znacznie większa od jego wartości nominalnej co spowodowało zmniejszenie napięcia tętnień na wyjściu prostownika.

**Podsumowanie**

Na koniec zebrano wzory do wstępnych obliczeń, które wykonujemy celem późniejszego wyboru elementów prostownika (dla

**Opis stosowanych oznaczeń na wykresach**

- $\omega$  – pulsacja  $\omega = 2\pi f$
- $f$  – częstotliwość prądu [Hz]
- $C$  – pojemność kondensatora [F]
- $U_C$  – napięcie na kondensatorze (napięcie  $U_{IN}$ ) [V]
- $R_L$  – rezystancja obciążenia [ $\Omega$ ]
- $R_s$  – ekwiwalentna rezystancja szeregowo transformatora [ $\Omega$ ]
- $n=1$  dla prostownika jednopółkowego
- $n=2$  dla prostownika dwupółkowego  $F = \frac{I_{F(RS)}}{I_{F(AV)}}$
- $F$  – współczynnik kształtu
- $I_{F(RS)}$  – wartość skuteczna prądu przewodzenia diody prostownika [A]
- $I_{F(AV)}$  – wartość średnia prądu przewodzenia diody prostownika [A]
- $I_{F(M)}$  – wartość maksymalna prądu przewodzenia diody prostownika [A]
- $r_f$  – współczynnik tętnień [%]

$\omega CR_L > 11$  i  $R_s/R_L$  w zakresie od 1% do 15% już w pierwszej iteracji otrzymujemy stosunkowo dokładne wyniki).

**Wybór transformatora**

A1.) dla mostkowego prostownika dwupółkowego najczęściej

$$I_{II(FL)RMS} = 1,5 * I_{RL(FL)} \text{ do } 2 * I_{RL(FL)}$$

W początkowej fazie obliczeń zwykle przyjmuje się wartość 1,75 (średnia z 1,5 oraz 2), która podczas analizy prostownika zostanie skorygowana.

$$U_{II(FL)RMS} = \frac{U_{C(FL)} + \Delta U_{C(M)} + 2U_{DF}}{\sqrt{2}}$$

A2.) dla prostownika dwupółkowego (transformator ze środkowym odczepem)

$$I_{II(FL)RMS} = 1 * I_{RL(FL)} \text{ do } 1,5 * I_{RL(FL)} \text{ (średnio 1,25)}$$

$$U_{II(FL)RMS} = 2 * \frac{U_{C(FL)} + \Delta U_{C(M)} + U_{DF}}{\sqrt{2}}$$

A3.) dla prostownika jednopółkowego

$$I_{II(FL)RMS} = 2 * I_{RL(FL)} \text{ do } 3 * I_{RL(FL)} \text{ (średnio 2,5)}$$

$$U_{II(FL)RMS} = \frac{(U_{C(FL)} + \Delta U_{C(M)} + U_{DF})}{\sqrt{2}}$$

B.) wybór transformatora o wartościach nie mniejszych niż obliczone i wyznaczenie zastępczej rezystancji szeregowej ze wzoru

$$R_s = \frac{U_{II(NL)} - U_{II(FL)}}{I_{II(FL)}}$$

**Wybór kondensatora**

A.) Obliczamy napięcie kondensatora

$$U_{C(NL)} = \sqrt{2} * U_{II(NL)} - n * U_{DF}$$

gdzie  $n=1$  dla prostownika jednopółkowego i ze środkowym odczepem i  $n=2$  dla mostkowego prostownika dwupółkowego.

B.) Obliczamy współczynniki

$$\frac{U_{C(FL)}}{U_{C(NL)}} \min[\%] = \frac{U_{C(FL)min}}{U_{C(NL)}} * 100$$

$$\frac{R_s}{R_L} [\%] = \frac{R_s}{R_L} * 100$$

$$r_{f(max)} [\%] = \frac{\Delta U_{C(M)max}}{\sqrt{3} * U_{C(FL)}} * 100$$

C.) Z odpowiednich wykresów odczytujemy wartość  $\omega CR_L$  dla współczynników

$$\frac{U_{C(FL)}}{U_{C(NL)}} \text{ i } \frac{R_s}{R_L} \text{ oraz drugą wartość } \omega CR_L \text{ dla } \frac{R_s}{R_L} \text{ i } r_{f(max)}$$

Z większej wartości  $\omega CR_L$  obliczamy minimalną pojemność kondensatora. Wybieramy kondensator na napięcie  $U$  powyżej  $1,5 * U_{C(NL)}$ .

**Wybór diody**

Wartość średnia prądu przypadająca na diodę

$$A1.) I_{F(AVE)} = \frac{I_{FL}}{2} \text{ dla prostownika pełnookresowego}$$

A2.)  $I_{F(AVE)} = I_E$  dla prostownika jednopółkowego

Szczytowe napięcie wsteczne diody

B1.)  $U_{RWM} = V_{IN(NL)}$  dla mostkowego prostownika pełnookresowego

B2.)  $U_{RWM} = 2 * V_{IN(NL)}$  dla prostownika jednopółkowego i pełnookresowego ze środkowym odczepem

C.) Niepowtarzalny szczytowy prąd przewodzenia diody

$$I_{FSM} = \frac{U_{IN(NL)}}{R_s}$$

D.) Wartość skuteczną prądu  $I_{F(RMS)}$  płynącego przez diodę odczytujemy z odpowiedniego diagramu, wykorzystując wcześniej obliczone współczynniki.

Wybieramy diody, stosując co najmniej 100% współczynnik bezpieczeństwa.

**Sprawdzenie transformatora**

A1.)  $I_{II(RMS)} = \sqrt{2} * I_{F(RMS)}$  dla mostkowego prostownika pełnookresowego

A2.)  $I_{II(RMS)} = I_{F(RMS)}$  dla prostownika jednopółkowego i pełnookresowego ze środkowym odczepem.

**Krzysztof Kozdroń**  
kkozdron@prozap.com.pl

**Bibliografia**

- Furlan R.: *Eletrônica Experimental. Wykład - University of Puerto Rico at Humacao.*
- Niemcewicz L.: *Radiotechnika Wzory Definicje obliczenia.* WkiL, Warszawa 1973.
- Schade, O. H. "Analysis of Rectifier Operation". *Proc. I.R.E. Vol. 31, 1943.*
- Zagajewski T.: *Układy elektroniki przemysłowej.* WNT, Warszawa 1978.
- Praca zbiorowa pod redakcją Paszkowskiego B.: *Poradnik inżyniera elektronika.* WNT, Warszawa 1971.
- Praca zbiorowa pod redakcją Groszkowskiego J. Paszkowskiego B.: *Encyklopedia techniki teleelektryka.* WNT, Warszawa 1967.