

Prostowniki i filtry

W nadsyłanych do Redakcji formularzach Miniankiety oraz pytaniach skierowanych do Skrzynki porad stosunkowo często pojawiają się prośby o artykuł wyjaśniający zasady doboru transformatorów, prostowników i kondensatorów w zasilaczach.

Tylko początkującym wydaje się, że zadanie jest łatwe i wystarczy poznać kilka prostych wzorów czy zasad.

Okazuje się, że precyzyjne zaprojektowanie zasilacza o zadanych parametrach wcale nie jest zadaniem łatwym.

Do mniej odpowiedzialnych zastosowań można zastosować prostą procedurę: mając dane wymagane napięcie i prąd wyjściowy, najpierw należy obliczyć moc wyjściową, mnożąc prąd i napięcie wyjściowe. Jeśli w zasilaczu będzie pracował stabilizator, należy zastosować transformator o mocy 1,6...2,5 razy większej, niż obliczona moc wyjściowa. Do zasilacza niestabilizowanego wybierzemy transformator o mocy 1,4...2 razy większej. W układach ze stabilizatorem katalogowe zmienne napięcie wyjściowe transformatora powinno być równe lub trochę wyższe od potrzebnego stałego napięcia wyjściowego. W zasilaczu niestabilizowanym może wynosić 80...100% potrzebnego stałego napięcia wyjściowego.

Zastosowany kondensator filtrujący musi mieć odpowiednio duże napięcie nominalne, żeby nie uległ przebiciu, gdy przy małych prądach obciążenia, przy nominalnym napięciu sieci, napięcie na nim będzie dużo wyższe od katalogowego napięcia transformatora.

Nie sposób podać tu dokładniejszych wskazówek, bo wiele zależy od parametrów zastosowanego transformatora i od zakresu napięć sieci, przy których zasilacz ma dostarczyć wymagane napięcia i prądy.

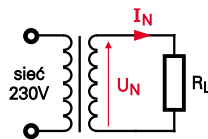
Niestety, często okazuje się, że tego typu szacunkowe obliczenia zawodzą. Niniejszy artykuł prezentuje od strony praktycznej najważniejsze problemy, dotyczące tego zagadnienia.

Transformator

Typowy fabryczny transformator sieciowy ma oznaczenie TSxx/yy, gdzie TS - transformator sieciowy, xx to liczba określająca moc tego transformatora, natomiast yy to numer porządkowy. W oznaczeniu zawarta jest więc informacja o mocy transformatora,

nie ma natomiast żadnych danych na temat prądu i napięcia. Takich informacji trzeba szukać w katalogu.

W skróconych katalogach podane są zazwyczaj dwa główne parametry transformatora: napięcie i prąd. **Są to napięcia i prądy zmienne**, mierzone przy nominalnym napięciu sieci i przy obciążeniu rezystancją, np. zestawem oporników lub żarówką - patrz **rysunek 1**. Pomnożenie napięcia i wielkości prądu daje moc - moc czynną, jaką można pobrać z transformatora w określonych warunkach pracy (gdy obciążeniem jest rezystancja). Warto zauważyć, że tak obliczona moc zazwyczaj nieco różni się od mocy (pozornej, wyrażanej w woltoamperach, a nie w watach) transformatora, o której informuje pierwsza liczba oznaczenia (xx). Ten fakt nie ma jednak większego znaczenia praktycznego.

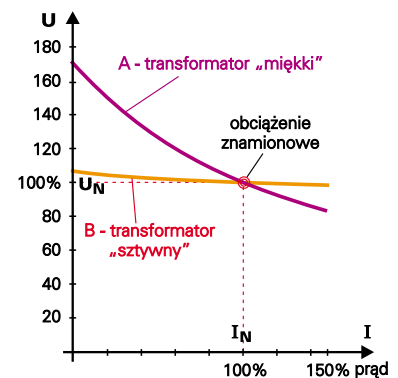


Rys. 1

Trzeba jednak zawsze pamiętać, że podany w katalogu prąd, napięcie i moc można uzyskać **przy nominalnym napięciu sieci**. Tymczasem w wielu regionach kraju napięcie sieci często spada poniżej dopuszczalnych norm i bywa mniejsze niż 200V. Przy obniżonym napięciu sieci nie da się „wyduścić” z transformatora katalogowych parametrów. I to jest czynnik, który zawsze trzeba uwzględnić przy projektowaniu zasilaczy. Nie sposób podać dokładnych recept - trzeba po prostu zastosować transformator o większej mocy, o napięciach i prądach wyższych niż wynikałoby z najprostszyc oszacowań.

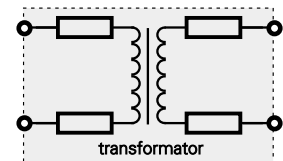
Podane w katalogu napięcie to napięcie zmienne przy obciążeniu znamionowym. Przy braku obciążenia napięcie transformatora jest wyższe. Nie ma sposobu na obliczenie, o ile wyższe. Poszczególne transformatory istotnie różnią się pod tym względem. Na **rysunku 2** pokazane są dwie przykładowe charakterystyki. Na osiach zaznaczono nie bezwzględne, tylko procentowe wartości prądu i napięcia, odniesione do katalogowych wartości nominalnych U_N , I_N . Krzywa A dotyczy jednego transformatora, Krzywa B - innego. Napięcie wyjściowe

pierwszego transformatora znacznie zmienia się przy zmianach prądu obciążenia. Poczciwie mówimy, że transformator o charakterystyce A jest **miękki**, a o charakterystyce B - **twardy** lub **sztwywny**. Przebieg zmian napięcia zależy głównie od rezystancji obu uzwojeń (a ta związana jest ze średnicą drutu, liczbą zwojów, ale to wyższa szkoła jazdy). W uproszczeniu pokazuje to **rysunek 3** - oba uzwojenia mają jakąś rezystancję i przepływ prądu przez te rezystancje powoduje zmniejszanie napięcia wyjściowego. Jednocześnie w rezystancjach tych wydzielą się moc strat w postaci ciepła - transformator grzeje się.



Rys. 2

Rys. 3

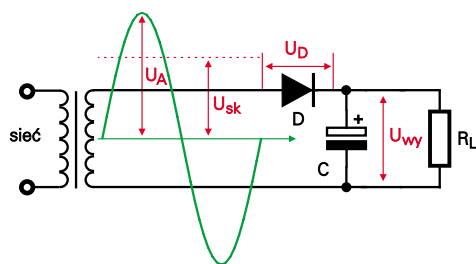


Na pierwszy rzut oka zdecydowanie lepszy wydaje się być „sztywny” transformator o charakterystyce B, mający mniejsze rezystancje uzwojeń. Nie zawsze tak jest. Wiele transformatorów o małej mocy specjalnie konstruuje się tak, by były bardzo „miękkie”. Rezystancja ich uzwojeń jest tak duża, że nawet przy zwarciu prąd i moc strat nie są wielkie. W rezultacie nawet po zwarciu uzwojenia wtórnego uzwojenie transformatora nie podgrzeje się więcej niż o 130 stopni. Takie transformatory nazywamy zwarciobezpiecznymi, bo nawet zwarcie uzwojenia wtórnego nie spowoduje uszkodzenia transformatora.

Powyższe rozważania oraz rysunki 2 i 3 sugerują, że moc użyteczna, prąd i napięcie nominalne nie są dla danego transformatora ściśle określonymi punktami granicznymi, których przekroczenie od razu grozi katastrofą. Są to wartości wynikające głównie ze spodziewanego wzrostu temperatury w normalnych warunkach pracy. Oznacza to, że z transformatora, zwłaszcza „sztywnego”, można przez krótki czas pobrać znacznie więcej mocy, niż wynika z jego danych katalogowych. Przy pracy w niskiej temperaturze można z danego transformatora „wydusić” trochę więcej prądu. Z kolei jeśli transformator ma pracować w szczelnej obudowie, słabo oddającej ciepło, już obciążenie go mocą nominalną spowoduje nadmierny wzrost temperatury uzwojeń, co może skończyć się awarią. Dla bezpieczeństwa trzeba wtedy zastosować nieco większy transformator.

Napięcia

Powróćmy jeszcze raz do napięć. Schemat prostego zasilacza niestabilizowanego oraz przebiegi napięć są pokazane na **rysunku 4**.



Rys. 4

Wiadomo, że amplituda napięcia sinusoidalnego (U_A) jest $\sqrt{2}$

czyli około 1,41 razy większa od wartości skutecznej (U_{sk}), którą mierzymy woltmierzem.

Teoretycznie przy napięciu na uzwojeniu równym 12V (U_{sk}) po wyprostowaniu uzyskuje się na kondensatorze napięcie $12 \cdot \sqrt{2}$ pomniejszone o spadek napięcia na diodzie prostowniczej, czyli około:

$$12 \cdot 1,41 - 0,6V = 16,4V$$

Przy zastosowaniu prostownika pełnokresowego według **rysunku 5** napięcie będzie pomniejszone o spadek napięcia na dwóch diodach, czyli wyniesie około 15,8V.

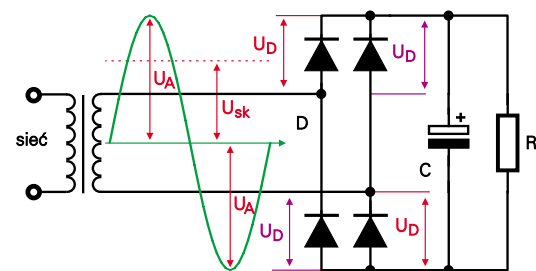
Omawiana prosta zasada pozwala łatwo obliczyć, jakie będzie napięcie wyjściowe w sytuacji bez obciążenia. Wystarczy zmierzyć napięcie zmienne transformatora w stanie jałowym (które na pewno jest większe od nominalnego, podanego w katalogu), pomnożyć przez pierwiastek z dwóch (około 1,4) i odjąć 1V, jako spadek napięcia na dwóch diodach przy znikomym prądzie.

Przy większych prądach sytuacja się komplikuje. Czy w układzie z **rysunku 5**

z transformatora o katalogowym napięciu nominalnym 12V uda się uzyskać stałe napięcie wyjściowe równe 15,8V przy prądzie obciążenia I_L równym katalogowemu prądowi nominalnemu I_N ?

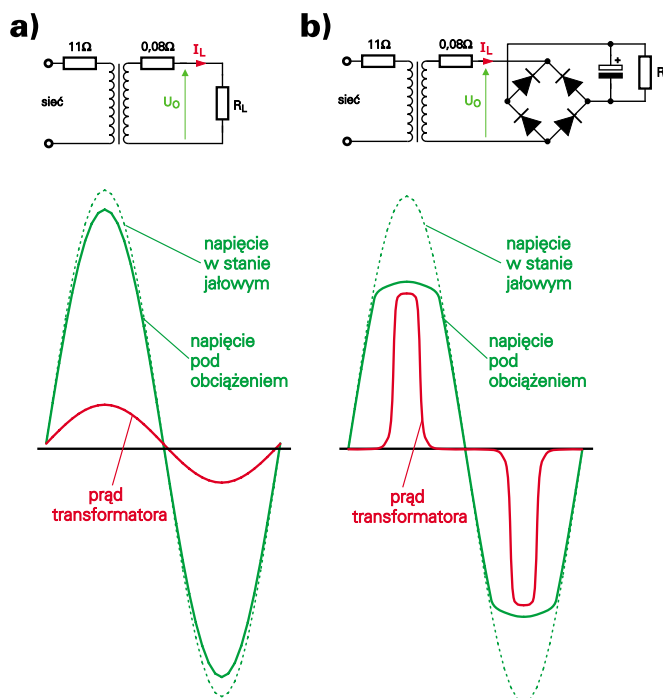
Nie!

Rys. 5



I to z kilku powodów. Kluczowe znaczenie ma tu okoliczność, że prąd uzwojenia wtórnego transformatora płynie tylko w krótkich chwilach, ale za to ma wtedy wartość dużo większą, niż przebieg sinusoidalny w układzie z **rysunku 1**. Przy tak dużej chwilowej wartości prądu, spadki napięcia na rezystancjach uzwojeń i na diodach są dużo większe, niż w „spokojnym” układzie z **rysunku 1**. W praktyce oznacza to po prostu, że napięcie wyprostowane przy większych prądach jest dużo niższe, niż wynikałoby z przemnożenia katalogowego napięcia nominalnego transformatora przez pierwiastek z dwóch.

Rys. 6



Na **rysunku 6** pokazano w dużym uproszczeniu porównanie spadków napięć na rezystancjach uzwojenia w dwóch układach, zawierających ten sam „sztywny” transformator toroidalny o katalogowej mocy nominalnej 150W, napięciu 12V i prądzie 13A. Porównanie napięć i prądów wskazuje, że w układzie zasilacza sytuacja jest dużo gorsza, niż w układzie z obciążeniem rezystancyjnym. Gwałtowny impuls prądu ładujący kondensator powoduje duże spadki napięć na rezystancjach uzwojeń transformatora. Wielkość spadków napięć zależy oczywiście od tych rezystancji, czyli od „sztywności” transformatora, niemniej nawet w przypadku bardzo „sztywnych” transformatorów, jakimi są na przykład toroidalne, omawiane spadki napięcia są zaskakująco duże. To kolejny powód, by w zasilaczach stosować transformatory o mocy nominalnej dużo większej (na przykład dwukrotnie większej), niż wynikałoby z porównania potrzebnej mocy wyjściowej i katalogowej mocy transformatora.

Diody prostownicze

W prostownikach omawianych tu klasycznych zasilaczy można stosować dowolne diody lub mostki prostownicze. Warto pamiętać, że mostek złożony z pojedynczych diod może prostować prąd o wartości dwa razy większej, niż prąd jednej diody. Ilustruje to **rysunek 7**. Mostek z popularnych diod

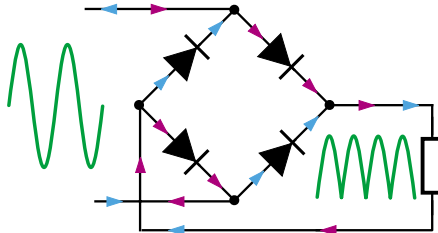
1N4001...1N4007 może pracować przy prądach do 2A.

Ponieważ w zasilaczu przez diody płynie prąd impulsowy o dużej wartości, spadek napięcia w stanie przewodzenia jest większy, niż „standardowe” 0,6...0,7V. **Rysunek 8** pokazuje charakterystykę diody prostowniczej, która ma katalogowy prąd wyprostowany równy 1A, przy czym dopuszczalna wartość prądu w impulsie może dochodzić do 20A. Jak widać, już przy prądzie 1A spadek napięcia może wynosić ponad 1V, natomiast w układzie prostownika z filtrem prądu będzie

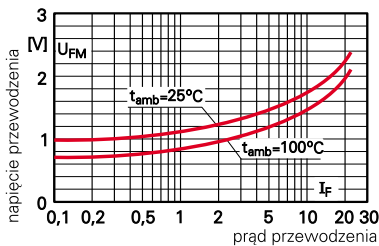
większy i chwilowy spadek napięcia może sięgnąć nawet 1,5V, czyli 3V na dwóch diodach mostka! Fakt ten trzeba brać pod uwagę w zasilaczach o niskim napięciu.

Aby znacząco zmniejszyć takie straty, warto w prostownikach stosować diody Schottky'ego, które mają spadek napięcia i straty mocy co najmniej dwukrotnie mniejsze.

Rys. 7

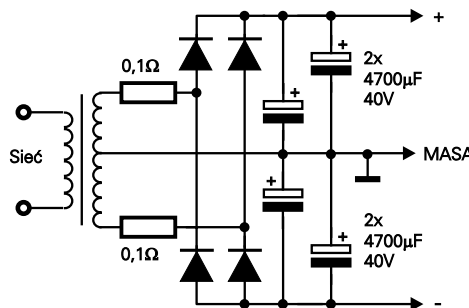


Trzeba też pamiętać, że w pierwszej chwili po włączeniu zasilania, gdy kondensator filtru jest zupełnie pusty, prąd ładowania jest bardzo duży, praktycznie równy prądowi zwarcia zastosowanego transformatora. W dużych zasilaczach, zawierających „sztywne” transformatory, ten prąd może mieć wartość dziesiątków i setek amperów. Choć płynie on krótko, chwilę po włączeniu zasilania, może uszkodzić diody prostowniczego. Dlatego w wielu zasilaczach dużej mocy dodaje się niewielki szeregowy rezystor, który ograniczy prąd szczytowy do wartości bezpiecznej dla diod. Przykład pokazany jest na rysunku 9 - jest to fragment schematu wzmacniacza mocy audio.



Rys. 8

Rys. 9



Problemu tego nie należy mylić z potężnym impulsem prądu, jaki często występuje podczas włączania do sieci w dużych transformatorach toroidalnych - tam przyczyny są zupełnie inne.

Kondensator filtrujący

Pojemność filtrująca decyduje o wielkości tętnień napięcia wyjściowego. Ogólna zasada jest prosta - czym większa pojemność kondensatora filtrującego, tym lepiej - tętnienia będą mniejsze. Czym większy prąd pobierany, tym większa pojemność jest potrzebna.

W filtrze należy zastosować kondensator o odpowiednio dużym napięciu pracy. Najwyższe napięcie wystąpi na kondensatorze przy braku obciążenia. Zwłaszcza przy transformatorach „miękkich” w stanie jałowym napięcie stale na kondensatorze jest większe nie 1,4x, tylko 2...2,5x od podanego w katalogu zmiennego napięcia nominalnego. W praktyce należałoby sprawdzić napięcie na kondensatorze przy napięciu 230V, bo takie jest obecnie nominalne napięcie sieci energetycznej.

Kondensator filtrujący jest ładowany w szczytach przebiegu sinusoidy. Gdy wypadkowa rezystancja transformatora jest mała (sztywny transformator), kondensator jest ładowany dużym prądem w ciągu krótkiego czasu - patrz rysunek 10a. W transformatorze „miękkim”, gdzie wypadkowa rezystancja transformatora jest znaczna (dotyczy głównie transformatorów małej mocy), kondensator jest ładowany mniejszym prądem przez dłuższy czas - patrz rysunek 10b. Jeszcze wyraźniej pokazuje to rysunek 11. W pierwszym przypadku czas ładowania zaznaczony kolorem różowym jest krótki, około 1,7ms, natomiast zaznaczony niebieskim kolorem czas rozładowania jest długi, niewiele krótszy od połowy okresu (dotyczy prostownika dwupołkowego). W drugim przypadku czas rozładowania będzie zauważalnie krótszy, co jest korzystniejsze w aspekcie pojemności filtrującej i tętnień. W praktyce nie trzeba wgłębiać się w szczegóły, tylko przeprowadzić obliczenia dla najgorszego przypadku, czyli bardzo

krótkich impulsów ładujących i czasu rozładowania równego 10ms bądź 20ms.

Pojemność filtru dobieramy biorąc pod uwagę dwa główne czynniki: maksymalny pobór prądu i dopuszczalne napięcie tętnień. Korzystamy z prostej zależności:

$$C \cdot \Delta U = I \cdot t$$

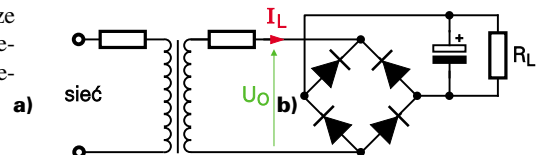
gdzie C - pojemność filtrująca, ΔU - międzyszczytowa amplituda tętnień, I - maksymalny prąd obciążenia, t - okres 20ms dla prostownika półokresowego, 10ms dla prostownika mostkowego.

Skąd po przekształceniu mamy wzór:

$$C = I \cdot t / \Delta U$$

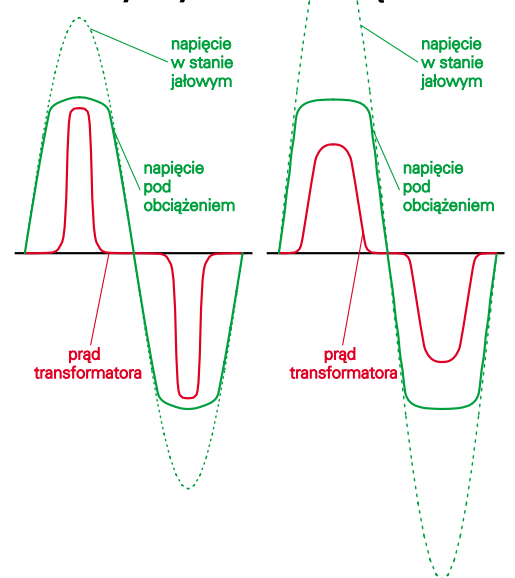
Przykład 1. Maksymalny pobór prądu z zasilacza z prostownikiem mostkowym wyniesie 0,1A. Dopuszczamy, by międzyszczytowa amplituda tętnień wynosiła 1V. Pojemność filtru nie może być mniejsza niż:

$$C = 0,1A \cdot 10ms / 1V = 1mF = 1000\mu F$$



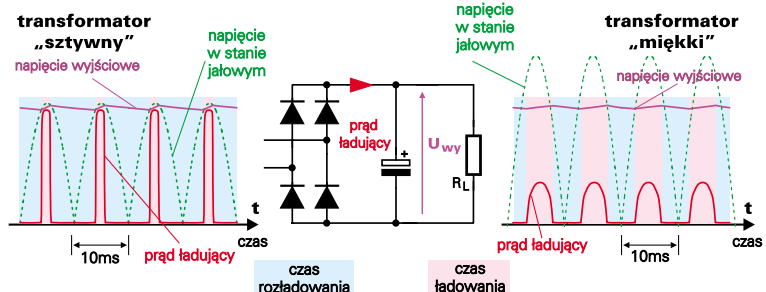
transformator „sztywny”

transformator „miękki”



Rys. 10

Rys. 11



Przykład 2. W zasilaczu stabilizowanym o napięciu wyjściowym 5V i prądzie 2A napięcie przed stabilizatorem nie powinno zawierać tętnień większych niż 0,5V.

$$C = 2A \cdot 10ms / 0,5V = 40mF = 40000\mu F$$

Wymagana pojemność jest niepraktycznie duża, w układzie zastosujemy kondensator o pojemności 10000 μF , z konieczności godząc się na większe tętnienia (2V).

Stabilizator

Gdy w zasilaczu będzie pracował stabilizator (zazwyczaj w postaci układu scalonego), trzeba uwzględnić, że do poprawnej pracy każdego stabilizatora wymagany jest jakiś spadek napięcia na tym stabilizatorze. W katalogach napięcie to oznaczane jest drop out. Dla popularnych stabilizatorów serii 78xx, 79xx, LM317, LM337 napięcie to wynosi 1,5...2V, zależnie od prądu pracy. Dostępne są także stabilizatory typu Low Drop Out (LDO), pracujące poprawnie już przy różnicy napięć wej-wy rzędu 1V lub nawet mniej. Szczegółów trzeba szukać w katalogach. Temat stabilizatorów był omawiany szerzej w EdW 9-10/96.

Ogólnie biorąc, najniższe chwilowe napięcie na wejściu stabilizatora musi być wyższe o te 1,5...2V od wymaganego napięcia wyjściowego. Problem ilustruje rysunek 12.

Przy większych prądach stabilizator musi być umieszczony na stosowanym radiatorze, by temperatura struktury nie przekroczyła +150°C. Zazwyczaj radiator nie musi być wielki. Sytuacja jest tu w miarę korzystna, ponieważ gdy zwiększa się pobór prądu, spada napięcie przed stabilizatorem i straty mocy nie

rosną proporcjonalnie do wartości prądu. Nie sposób podać tu szczegółowych wskazówek ani wzorów, bo wiele zależy od sztywności transformatora i napięcia tętnień.

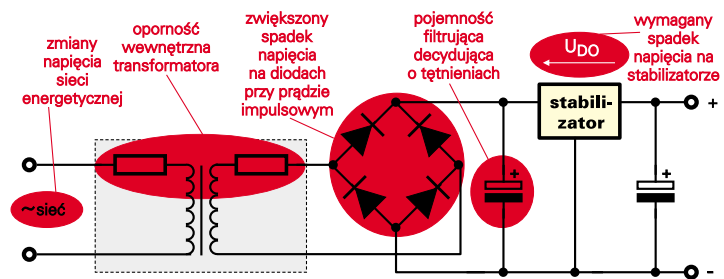
Wnioski

Jak wspomniano na wstępie, zaprojektowanie zasilacza wcale nie jest zadaniem łatwym. O ile dobranie diod prostowniczych, kondensatora filtra i stabilizatora jest stosunkowo proste, o tyle dobór transformatora jest trudniejszy. Przy dokładnej analizie należałoby uwzględnić wiele czynników, co zwykle jest niemożliwe. W ogromnej większości przypadków wykorzystuje się bowiem gotowe, fabryczne transformatory. W skróconym katalogu podane są tylko prąd i napięcie nominalne, skąd można obliczyć moc. Nie ma tam natomiast żadnych informacji o rezystancjach wewnętrznych, czyli „sztywności” transformatora, a zapre-

zentowane rozważania wskazują, jak wiele zależy od tej „sztywności”. Kolejnym decydującym czynnikiem jest zakres dopuszczalnych napięć sieci, przy których zasilacz ma zagwarantować wymagane napięcia i prądy wyjściowe.

Rysunek 13 pokazuje obrazowo wpływ niekorzystnych zjawisk, które ograniczają możliwości zasilacza. Jeśli przy wymaganym prądzie na wyjściu ma występować dobrze stabilizowane napięcie, i to nawet przy obniżonym napięciu sieci, trzeba dobrać transformator ze znacznym zapasem, jak podano na wstępie.

Piotr Górecki



Rys. 13

Rys. 12

