

Zasilacze, filtry wygładzające tętnienia

W zasilaczach WN na potrzeby amatorskich wzmacniaczy mocy KF stosowane są dwa typy filtrów wygładzających tętnienia:

- tylko bateria kondensatorów jako pojemność wygładzająca tętnienia,
- z wejściem indukcyjnym i wyjściem pojemnościowym.

Filtr składający się z samej baterii kondensatorów na wyjściu zasilacza WN.

Ponieważ w tym filtrze nie ma indukcyjności lub pojemności mogącej wprowadzić filtr w rezonans to bardzo łatwo jest zbudować taki filtr. Jest on tani i prosty w budowie, bo składa się tylko z samej baterii kondensatorów. Ponadto filtr ten ma małe gabaryty i nie wymaga jakiegokolwiek strojenia. Tyle zalet filtru tego typu. Natomiast wadą tego filtra jest charakter jego pracy: kondensatory filtra będą doładowywane tylko przez tę część okresu napięcia sieci, podczas której chwilowe napięcie z prostownika będzie przekraczać napięcie, do którego już jest naładowana bateria kondensatorów filtra. Oznacza to, że transformator przez większą część okresu napięcia sieci nie jest w ogóle obciążany. Natomiast w tych momentach - gdy doładowywane są kondensatory filtra - jest on bardzo mocno obciążany.

Niech zależność tą zilustruje poniższy przykład. Stosowane w Europie napięcie zasilania z sieci państwowej ma częstotliwość 50Hz. Zatem czas trwania połowy okresu napięcia sieci wynosi dokładnie 10 milisekund. Filtr tego typu będzie doładowywany tylko przez około 1,25 milisekundy każdego półokresu dodatniego. Przez pozostałe 8,75 milisekundy każdego półokresu dodatniego transformator nie będzie oddawał żadnego prądu ładującego kondensatory filtra. Oznacza to, że wartość prądu ładowania kondensatorów filtra jest aż 8,333 razy większa od natężenia prądu stałego pobieranego z zasilacza wyposażonego w ten typ filtra wygładzającego tętnienia. Mając na uwadze straty cieplne $P=I^2 R$ (w uzwojeniach wtórnym i pierwotnym transformatora WN oraz w domowej instalacji elektrycznej) przewody powinny być dostosowane do przenoszenia tak dużych prądów. Transformatory WN starej konstrukcji mają wysokie rezystancje uzwojeń i nie są dostosowane do przepływu tak dużych prądów. Dlatego, dla transformatorów starej konstrukcji w zasilaczach WN, należy stosować filtry z wejściem indukcyjnym.

Filtr z wejściem indukcyjnym i wyjściem pojemnościowym

Występują filtry rezonansowe i nie-rezonansowe. Nie-rezonansowe filtry zachowują stałą wartość prądu pobieranego z prostownika podczas zmian prądu obciążenia (w takt modulacji SSB lub kluczkowania nośnej CW). Indukcyjność w filtrze wygładzającym tętnienia zachowuje się w następujący sposób: istotą działania indukcyjności jest przeciwdziałanie zachodzącym zmianom w przepływie prądu. Gdyby prąd płynący do obciążenia zaczął maleć to indukcyjność spowoduje chwilowy wzrost wielkości napięcia od strony obciążenia, co powinno zwiększyć wartość prądu oddawanego do obciążenia. Procesy przebiegają dokładnie w przeciwnym kierunku gdy wzrasta prąd płynący do obciążenia. Rola indukcyjności sprowadza się więc do stabilizacji napięcia na wyjściu zasilacza WN.

Gdybyśmy podłączyli na wyjście **nie-rezonansowego** zasilacza WN woltomierz to (na ogół) nie zauważylibyśmy żadnych zmian napięcia podczas kluczkowania lub w takt głośności sygnału SSB. Spowodowane to jest dużą bezwładnością ustroju miernika, przez co wskazywany rezultat jest zawsze uśredniony. Natomiast podłączenie na wyjście zasilacza WN oscyloskopu (poprzez odpowiednią sondę WN) pozwala obejrzeć rzeczywiste zachowanie zasilacza pod wpływem zmian prądu obciążenia podczas pracy emisjami CW oraz SSB. Dla ułatwienia obserwacji ustawmy na kluczu elektronowym nadawanie serii kropek z taką prędkością z jaką najczęściej pracujemy telegrafią. W momencie rozpoczynania każdej kropki zaobserwujemy ujemny skok napięcia. Natomiast po zakończeniu każdej kropki (na początku przerwy) pojawia się dodatni wyskok napięcia. Amplituda i czas trwania tych wyskoków zależy od wielkości pojemności na wyjściu filtra oraz od wielkości zmian prądu pobieranego przez wzmacniacz. Przy bardzo gwałtownej zmianie prądu obciążenia zasilacza, z nie-rezonansowym filtrem wygładzającym, możliwe są dodatnie i ujemne wyskoki napięcia sięgające 50% wartości nominalnej.

O ile istnienie wyskoków napięcia wskutek gwałtownych zmian prądu obciążenia nie powoduje uszczerbku podczas emisji CW to wyskoki napięcia na wyjściu zasilacza z nie-rezonansowym filtrem powodują istotne pogorszenie jakości sygnału podczas pracy emisji SSB (pogorszenie liniowości wzmacniania, zmniejszenie maksymalnej mocy wyjściowej).

Filtry rezonansowe zachowują stałą wartość napięcia niezależnie od zmian prądu obciążenia zarówno dla wolnych jak i szybkich zmian prądu obciążenia, pod warunkiem, że cały czas płynie pewien minimalny prąd obciążenia. Prądem tym może być prąd spoczynkowy lampy wzmacniacza mocy (jeszcze bezysterowania sygnałem w. cz.) albo prąd pobierany przez specjalny rezystor obciążający zasilacz WN (tzw. bleeder). Rezonans uzyskuje się poprzez dołączenie odpowiednio dobranej pojemności równolegle do indukcyjności filtra wygładzającego tętnienia. Rezonans tego obwodu dobiera się na częstotliwości nieco większej aniżeli podwójna częstotliwości napięcia sieci zasilającej. Wartość rezystancji bleedera oraz wartość pojemności podłączonej równolegle do indukcyjności dobierane są eksperymentalnie pod kątem najlepszej stabilności napięcia na wyjściu zasilacza WN podczas normalnej pracy wzmacniacza mocy. W USA można kupić gotowe układy rezonansowe przeznaczone do zasilaczy WN do amatorskich wzmacniaczy mocy.

Indukcyjności do rezonansowych filtrów wygładzających tętnienia produkowane są w dwóch wykonaniach:

- ze stałą wartością indukcyjności
- oraz jako indukcyjność zmienna w zależności od zmian prądu obciążenia. Ten drugi rodzaj jest bardzo trudny w zestrojeniu i dlatego zazwyczaj stosowane są stałe indukcyjności a rezonans dobiera się poprzez dobranie właściwej pojemności dołączanej równolegle indukcyjności.

Filtry rezonansowe oprócz wspomnianej stabilności napięcia na wyjściu zasilacza WN mają też pewne niedogodności:

- kondensator dołączany równolegle do indukcyjności filtra wygładzającego musi mieć dopuszczalne napięcie pracy niemal trzy razy większe od nominalnego napięcia na wyjściu zasilacza WN. Pojemność tych kondensatorów wynosi zazwyczaj 0,1 do 0,15 μF a napięcie pracy od 7 do 15 kV,
- aby uzyskać efekt stabilizacji napięcia wyjściowego zasilacza WN należy zapewnić stały przepływ pewnego prądu przez rezonansowy filtr wygładzający. Jest to albo prąd spoczynkowy lampy wzmacniacza mocy albo prąd pobierany przez bleeder. Prawidłową stabilizację napięcia na wyjściu zasilacza uzyskuje się już przy prądzie 10% wartości szczytowej. Oznacza to jednak w konsekwencji konieczność wytracenia w postaci ciepła 10% mocy dostarczanej przez zasilacz WN. Jeśli kondensator

rezonansowy miałby o 50% większe napięcie pracy to można zbudować układ ograniczający do 0,5% wartość prądu pobieranego przez bleeder podczas odbioru. Oczywiście podczas nadawania prąd spoczynkowy musi być nie mniejszy niż 10%.

- należy liczyć się z gabarytami indukcyjności (dławika): jest on duży i ciężki. Na dodatek sporo kosztuje,
- indukcyjność w filtrze rezonansowym zazwyczaj **hałasuje podczas nadawania**, co może być niekorzystne ("wchodzi na mikrofon" jeśli stosujemy kompresję dynamiki, może też przeszkadzać domownikom). Można wyciszyć pracę dławika stosując miksturę wyciszającą hałas (jak stosowane w samochodach).

Oprócz ww. wad filtr rezonansowy ma też niewątpliwe zalety:

- zapewnia doskonałą stabilizację napięcia na wyjściu zasilacza WN (w stopniu wymaganym przez wzmacniacz mocy),
- przyczynia się do znacznego ograniczenia wartości szczytowych prądu w uzwojeniach transformatora WN oraz pobieranego przez zasilacz z sieci. Owocuje to mniejszym nagrzewaniem i mniejszymi stratami cieplnymi,
- transformator WN ma prawie dwa razy większą wydolność prądową w stosunku do prostego filtra z użyciem tylko baterii kondensatorów.

Rezonansowe filtry wygładzające tętnienia w zasilaczach WN są stosowane we wzmacniaczach mocy produkowanych na potrzeby wojska oraz w zastosowaniach służb profesjonalnych. Duży wpływ na decyzję o zastosowaniu filtrów rezonansowych ma niskie napięcie sieci w USA oraz w Japonii (120 V). Użycie takiego filtra znacznie łagodzi udary prądu, jakie mogłyby występować przy prostym filtrze kondensatorowym. Mniejszą popularnością cieszą się filtry rezonansowe w krajach z napięciem sieci 230 V. Rezonansowe filtry wygładzające tętnienia zalecane są przy pracy emisjami RTTY, FM oraz AM.

Prostowniki

W powszechnym użyciu są:

- **prostownik pół-okresowy. Zaletą** jest możliwość łatwego zastosowania gdy jeden przewód sieci zasilającej jest uziemiony. **Wadami** są: konieczność zastosowania znacznie większych pojemności w filtrze, przepływ składowej stałej prądu przez uzwojenie wtórne transformatora WN, niska stabilność napięcia wyjściowego z zasilacza WN przy zmiennym obciążeniu zasilacza przez wzmacniacz mocy oraz konieczność zastosowania zabezpieczeń prostownika przed przepięciami w kierunku wstecznym,
- **prostownik pełno-okresowy z wyprowadzonym środkiem uzwojenia transformatora WN.** Ten układ prostownika był powszechnie stosowany kilkadziesiąt lat temu, gdy jedynymi elementami prostowniczymi były lampy elektronowe oraz gazotrony. Duo-diody prostownicze były wyposażone we wspólną katodę i włókno żarzenia co ułatwiało skonstruowanie pełno-okresowego prostownika w jednym balonie lampy prostowniczej. W starych prostownikach standardem było stosowanie transformatorów z wyprowadzonym środkiem uzwojenia wtórnego. **Zaletą** jest możliwość uzyskiwania napięć 0,5 oraz 0,25 wartości jakie uzyskuje przy zastosowaniu pełno-okresowego prostownika w układzie mostkowym. **Wadą** jest wykorzystywanie (naprzemiennie) w danym momencie czasu tylko jednej połówki uzwojenia wtórnego transformatora WN,
- **pełno-okresowy prostownik w układzie mostkowym. Zaletami** są pełne wykorzystanie transformatora WN oraz możliwość zastosowania rezonansowego filtra wygładzającego tętnienia. **Wadami** jest konieczność nawinięcia dwa razy więcej zwojów w uzwojeniu wtórnym dla uzyskania tego samego napięcia jakie możemy otrzymać z prostownika w układzie podwajacza napięcia. Oznaczałoby to większą liczbę warstw uzwojenia wtórnego, czyli większy przekrój okna na transformatorze, co może oznaczać w praktyce konieczność użycia przewodu o mniejszej niż optymalna średnicy.
- **prostownik w układzie pełno-okresowego podwajacza napięcia. Zaletą** jest pełne wykorzystanie transformatora WN. Aby uzyskać pożądane napięcie na wyjściu tego prostownika wymagane jest uzwojenie wtórne na połowę napięcia w stosunku do pełno-okresowego prostownika w układzie mostkowym. Oznacza to korzystniejszą proporcję wykorzystania okna transformatora: stosunek powierzchni zajmowanej przez przewód uzwojenia wtórnego do powierzchni zajmowanej przez przekładki izolacyjne pomiędzy warstwami uzwojenia wtórnego jest bardziej korzystny. Jeśli stosowany jest układ skokowej regulacji napięcia wyjściowego prostownika to stressy na jakie jest narażony przełącznik wybierający odczepy na uzwojeniu wtórnym są dwa razy mniejsze aniżeli przy takiej samej regulacji napięcia wyjściowego przy pełno-okresowym prostowniku w układzie mostkowym. Ponadto prostowniki w układzie podwajacza napięcia, z istoty swojego działania, zawierają **mało tętnień**. Spowodowane jest to jednoczesnym ładowaniem jednej połówki baterii kondensatorów filtra wygładzającego tętnienia podczas gdy z drugiej połówki czerpany jest prąd do obciążenia. Ponieważ "zębata" prądu ładowania jednej połówki baterii kondensatorów filtra wygładzającego ma taki sam charakter jak przeciwnie spolaryzowana "zębata" prądu rozładowania drugiej połówki baterii kondensatorów filtra wygładzającego a obie połówki baterii kondensatorów połączone są szeregowo to przeciwnie spolaryzowane przebiegi "zębate" ładowania i rozładowania baterii kondensatorów filtra wygładzającego znoszą się nawzajem i pozostaje czyste napięcie stałe na wyjściu zasilacza. **Wadami** są: konieczność użycia baterii kondensatorów w filtrze wygładzającym tętnienia o dwukrotnie większej pojemności w stosunku do prostownika pełno-okresowego w układzie mostkowym. Spowodowane jest to faktem ładowania z prostownika naprzemiennie tylko przez pół okresu każdej z poszczególnych połówek baterii kondensatorów filtra wygładzającego tętnienia. Oznacza to w praktyce, że ładunek zgromadzony w każdej połówce baterii kondensatorów musi wystarczyć na czas dwa razy dłuższy. Obecnie możemy łatwo spełnić to wymaganie stosując aluminiowe kondensatory elektrolityczne. Oferują one korzystny współczynnik pojemności w stosunku do swojej objętości. Ponadto są stosunkowo tanie. Jest jedno istotne ograniczenie: nie należy stosować rezonansowego filtra wygładzającego po pełno-okresowym prostowniku w układzie podwajacza napięcia.

Transformatory WN

Transformatory WN występują w dwóch wykonaniach. Pierwszy format powstał ze złożenia blach transformatorowych dwóch rodzajów: o kształcie liter **E** oraz **I**. Po złożeniu blach transformatorowych nawzajem do siebie tworzą one prostopadłościan z dwoma "oknami" dla pomieszczenia uzwojeń nawiniętych na karkasach. Ostatnio rdzenie transformatorów wykonywane są w formie **toroidów** nawiniętych blachą wykonaną z mikstury żelaza oraz silikonu z dodatkiem innych materiałów, których zadaniem jest zwiększenie przenikalności magnetycznej oraz zmniejszenie strat w rdzeniu transformatora. Stop ten otrzymał nazwę **Hipersil**. Opatentowany został przez amerykańską firmę *Westinghouse Corp.* Patent utracił ważność ponad piętnaście lat temu. (wg stanu na

1995 rok). *Hipersil* produkowany jest w różnych klasach: klasa 5 charakteryzuje się największą przenikalnością magnetyczną a klasa 22 najmniejszą przenikalnością magnetyczną.

Większa przenikalność magnetyczna oznacza w praktyce możliwość przyjęcia mniejszej liczby zwojów w każdym z uzwojeń transformatora. Oznacza to jednocześnie możliwość zastosowania przewodów o większych średnicach. Mniejsza rezystancja strat uzwojeń skutkuje większą sprawnością transformatora. Rdzenie wykonane z *Hipersilu* są praktycznie bez strat. Zatem straty w transformatorze koncentrują się tylko w jego uzwojeniach. Ponadto transformatory z rdzeniami wykonanymi z *Hipersilu* są bardzo odporne na duże udary prądu a więc nadają się niemal idealnie do zasilaczy z filtrem składającym się tylko z samej baterii kondensatorów na wyjściu zasilacza WN.

Byłoby rzeczą niezwykle trudną i czasochłonną (SP7HT: zdarzyło mi się nawinąć tą „metodą” uzwojenie 1319 V AC, po odwinięciu 2 uzwojeń wtórnych 12,6 V AC, dla podwajacza napięcia dla „domowego” PA na rdzeniu toroidalnym dla mocy 600 VA stabilnego obciążenia) przewlekanie taśmy z *Hipersilu* przez karkas z uzwojeniami transformatora WN. Dlatego, wynaleziono ułatwienie konstrukcyjne: najpierw taśma nawijana jest ściśle na formie o odpowiednich rozmiarach w stosunku do mocy transformatora. Po nawinięciu taśma jest spawana punktowo, zdejmowana z foremki i wygrzewana w temperaturze 700° C aby usunąć wszelkie naprężenie wewnętrzne jakie powstały w procesie nawijania taśmy. Po ostudzeniu rdzenia jest on pokrywany lakierem oraz suszony. W ostatniej kolejności rdzeń jest przecinany na pół precyzyjną piłą gwarantującą ściśle przyleganie nawzajem do siebie obu połówek. Aby poprawić przyleganie szlifuje się powierzchnie przecięcia rdzenia. Powierzchnie poszczególnych połówek rdzenia znakuje się tak aby składając zapewnić styk powierzchni dobrze kontaktujących się ze sobą. Tak przygotowany rdzeń nadaje się już do włożenia w karkasy uzwojeń transformatora. Aby obie połówki rdzenia kontaktowały dobrze ze sobą ściska się je ze sobą za pomocą taśmy stalowej podobnie jak ściska się przy pakowaniu skrzynie i paczki. Jeśli wyniknie konieczność naprawy transformatora w przyszłości, to wystarczy przeciąć taśmę opasującą rdzeń i wyjąć go z uzwojeń.

Hipersil utracił już swoją unikalną pozycję jako materiał do wykonywania rdzeni transformatorów. Produkowane **obecnie materiały amorficzne** znajdują coraz powszechniejsze zastosowanie przy produkcji rdzeni transformatorowych. Transformatory z rdzeniami amorficznymi są tak wydajne, że gdyby uzwojenie wtórne transformatora WN nie było obciążone i odłączono by od sieci uzwojenie pierwotne, to powstałe wskutek tego przepięcie byłoby tak wielkie, że mogłoby doprowadzić nawet do przebiegu WN w transformatorze. Aby temu zapobiec bocznikuje się jedno z uzwojeń transformatora odpowiednim układem zabezpieczającym przed skutkiem wystąpienia bardzo wysokich przepięć.

Obciążalność transformatorów

Obciążalność transformatorów podawana jest w „wolt-amperech”, VA. Maksymalna obciążalność jest w przybliżeniu równa mocy skutecznej w Watach, jeśli w każdym z uzwojeń transformatora przepływają nominalne prądy a jego uzwojenie pierwotne jest dołączone do sieci z nominalnym napięciem. Podczas występowania spadków napięcia sieci poniżej wartości nominalnej możemy pobierać mniejszą moc z transformatora.

Dla dwóch najpopularniejszych wśród krótkofalowców emisji SSB oraz CW transformator WN zasilacza wzmacniacza mocy może mieć obciążalność nieco mniejszą od wyliczonej. Wynika to z charakteru tych emisji. Zasada ta jest stosowana nawet we wzmacniaczach mocy produkowanych profesjonalnie na potrzeby krótkofalowców. Produkowane dla krótkofalowców amerykańskich wzmacniacze mocy 1500 Wat wyposażane są zasilacze z transformatorami tylko 600 VA (SP7HT: taką moc ma transformator w moim domowym PA na lampie GU-81M). Praktyka potwierdza, że transformator tej obciążalności zapewnia poprawną pracę wzmacniacza mocy podczas pracy emisją SSB. Możliwe jest nawet używanie wzmacniacza mocy do krótkich transmisji RTTY lub FM, pod warunkiem, że korzystać się będzie z odczepu o niższym napięciu.

Jeśli pomimo zastosowania odpowiedniej baterii kondensatorów w filtrze wygładzającym tętnienia napięcie spada o ponad 10% podczas szczytów modulacji to może to oznaczać konieczność wymiany transformatora WN na transformator o większej obciążalności.

Dopuszczalne obciążenia prądem uzwojeń transformatora

Zwiększanie prądu przepływającego przez przewód powoduje wykładniczy wzrost strat cieplnych w przewodniku wskutek wzrostu wraz z temperaturą rezystancji przewodnika. Zgodnie z równaniem: $P_{\text{strat}} = I^2 R$, podwojenie prądu pobieranego z uzwojenia wtórnego transformatora skutkuje 4-rotnym zwiększeniem strat cieplnych w tym uzwojeniu. Ciepło to jest szczególnie trudno odprowadzane z uzwojeń transformatorów typów stosowanych we wzmacniaczach mocy używanych przez krótkofalowców. Niekorzystnym okazuje się dodatni temperaturowy współczynnik rezystancji właściwej miedzi. Oznacza to narastanie strat w miarę nagrzewania się uzwojeń transformatora. Może to doprowadzić do przegrzania uzwojeń, pogorszenia się izolacji lub nawet do wystąpienia przebiegu izolacji przewodów uzwojeń oraz ostatecznie do zwarcia między-zwojowych a w końcu do uszkodzenia transformatora.

Obciążalność uzwojenia wtórnego transformatora $1A_{sk}$ oznacza obciążenie rezystancją powodującą przepływ prądu 1A. Uzwojenie wtórne transformatora WN dołączone jest do prostownika a następnie do filtra wygładzającego tętnienia. Nie można powiedzieć by była to „czysta rezystancja”. Wprost przeciwnie rodzaj użytego prostownika oraz rodzaj filtra wygładzającego tętnienia **determinują** warunki obciążenia uzwojenia WN.

Przykładowo zastosowanie pełno-okresowego prostownika w układzie mostkowym oraz rezonansowego filtra wygładzającego tętnienia podbija napięcie wyjściowe zasilacza co najmniej **1,2** razy oraz pozwala na czerpanie prądu **0,85** wartości skutecznej dopuszczalnej dla tego uzwojenia.

Zastosowanie pełno-okresowego prostownika w układzie mostkowym oraz filtra wygładzającego tętnienia składającego tylko z samej baterii kondensatorów zapewnia wzrost napięcia wyjściowego **1,3** razy. Ponieważ na tym świecie „nie ma nic za darmo” skutkuje to zmniejszeniem wydolności prądowej takiego zasilacza.

Nie ma jakiegś uniwersalnej formuły pozwalającej przeliczyć obciążenia prądem uzwojenia wtórnego transformatora WN na obciążalność zasilacza WN prądem stałym na jego wyjściu. Przyczyną jest oddziaływanie wielu czynników jednocześnie. Oto sprawdzony sposób praktycznej oceny wydolności prądowej transformatora WN. Jeśli po godzinie intensywnej pracy w zawodach krótkofalarskich lub prób dowożenia się do ekspedycji DX-owej stwierdzimy, że dotknięcie palcem do transformatora (pamiętać o BHP → w tym czasie w zasilaczu nie powinny występować WN) daje odczucie gorąca to jest to sygnał, że zastosowany transformator ma zbyt niską obciążalność prądem uzwojenia wtórnego i powinien być zastąpiony transformatorem o większej mocy. Można doraźnie ulżyć transformatorowi zmniejszając prąd pobierany z zasilacza. I tak zmniejszenie prądu o 30% spowoduje spadek prądu pobieranego z uzwojenia aż o 50%.

Krótkofalowcy wypracowali swoje własne sposoby szacowania obciążalności uzwojeń transformatorów WN do swoich zasilaczy mocy. Obciążalność uzwojeń zależy:

- od układu zastosowanego prostownika
- oraz od układu filtra wygładzającego tętnienia.

Oszacowanie opiera się na znajomości wartości napięcia uzwojenia wtórnego oraz jego rezystancji dla prądu stałego. Potrzebny jest tylko zwykły omomierz oraz zwieracz z "krokodylkami". Zwieracz używany jest do zwierania uzwojenia pierwotnego transformatora w momencie gdy odłączamy omomierz od uzwojenia wtórnego (w przeciwnym przypadku pojawi się wysoki napięcie wywołany zmianą stanu przewodzenia indukcyjności o dużej wartości jaką stanowi wtórne uzwojenie WN transformatora i zachodzi potencjalna możliwość uszkodzenia miernika poprzez „przebiecie”).

Dla pełno-okresowego prostownika w układzie mostkowym, z prostym filtrem wygładzającym tętnienia, składającym się tylko z baterii kondensatorów, stosuje się następujące oszacowanie. Należy przemnożyć zmierzoną rezystancję uzwojenia wtórnego przez **70** aby określić reprezentatywną oporność obciążenia zasilacza przez wzmacniacz mocy. Aby oszacować wielkość napięcia na wyjściu zasilacza podczas obciążania go wzmacniaczem mocy należy przemnożyć napięcie skuteczne uzwojenia wtórnego przez współczynnik **1,3**. Aby sprawdzić czy zasilacz z użyciem tego transformatora będzie przydatny podczas pracy emisją SSB należy podzielić wyliczone powyżej napięcie na wyjściu zasilacza przez najniższą oporność obciążenia (można posłużyć się charakterystykami lampy wzmacniacza).

Dla ilustracji rozpatrzmy konkretny przykład liczbowy: uzwojenie wtórne transformatora dostarczające napięcia $2000V_{sk}$ ma rezystancję zmierzoną omomierzem = 60Ω . Zdecydowaliśmy się na użycie pełno-okresowego prostownika w układzie mostkowym z prostym filtrem wygładzającym tętnienia składającym się tylko z baterii kondensatorów. Bezpieczną rezystancją obciążenia zasilacza (wzmacniacz sygnału SSB) będzie więc: $70 \times 60 = 4200\Omega$. Filtr wygładzający tętnienia podbije napięcie do wartości: $1,3 \times 2000V_{sk} = 2600V_{DC}$. Zatem obciążenie zasilacza rezystancją 4200Ω spowoduje przepływ prądu: $2600V_{DC} : 4200\Omega = 0,62A$.

Możemy też oszacować minimalną wartość pojemności na wyjściu filtra wygładzającego tętnienia. W tym przypadku stosuje się przybliżoną formułę:

$$50000 : R (\Omega) = C (\mu F).$$

W rozpatrywanym przykładzie liczbowym otrzymamy: $50000 : 4200 = 12\mu F$.

Dla pełno-okresowego prostownika w układzie podwajacza napięcia, z prostym filtrem wygładzającym tętnienia składającym się tylko z baterii kondensatorów, minimalna dopuszczalna chwilowa wartość rezystancji obciążającej zasilacza wynosi **300**-krotną wielokrotność rezystancji uzwojenia wtórnego transformatora WN. Wielkość napięcia na wyjściu zasilacza, przy obciążeniu prądem nominalnym, będzie równa **2,5**-krotnej wartości napięcia skutecznego uzwojenia wtórnego transformatora WN.

Zilustrujemy to na kolejnym przykładzie liczbowym: transformator WN z uzwojeniem wtórnym na napięcie $1000V_{sk}$ ma rezystancję uzwojenia = 10Ω . Zatem: minimalna rezystancja obciążenia: $300 \times 10 = 3000\Omega$. Napięcie na wyjściu zasilacza wynosić będzie: $2,5 \times 1000 = 2500V$. Wobec tego, chwilowy prąd pobierany przez obciążenie: $2500 : 3000 = 0,83A$.

Minimalna pojemność każdej połówki filtru podwajacza napięcia powinna wynosić **200000** dzielone przez minimalną rezystancję obciążenia. W rozpatrywanym przykładzie liczbowym byłaby to pojemność: $200000 : 3000 = 67\mu F$.

Oprócz rezystancji uzwojenia wtórnego powinniśmy, podczas wyboru transformatora WN do zasilacza, brać pod uwagę także:

- rodzaj rdzenia. Rdzeń z *Hipersilu* gwarantuje niskie straty transformatora WN w rdzeniu i dzięki temu zwiększa się wydolność prądowa transformatora,
- rezystancja uzwojenia pierwotnego transformatora WN (powinna być możliwie najmniejsza),
- rezystancja domowej instalacji elektrycznej: przewody i zabezpieczenia powinny być dostosowane do przenoszenia prądów z uwzględnieniem poboru prądu także przez zasilacz wzmacniacza mocy podczas nadawania. Zbyt duża rezystancja domowej instalacji elektrycznej na drodze do zasilacza WN może powodować spadek napięcia podawanego w czasie nadawania na uzwojenie pierwotne transformatora WN. W celu zmniejszenia spadku napięcia można zmodernizować domową instalację elektryczną:
 - poprzez wymianę przewodów na przewody o większej średnicy,
 - prowadząc oddzielne zasilanie z domowej skrzynki rozdzielczej do zasilacza WN,
 - można umieścić zasilacz tuż przy domowej skrzynce rozdzielczej doprowadzając samo WN do wzmacniacza mocy.

Regulacja napięcia wyjściowego zasilaczy WN

Możliwość regulacji napięcia wyjściowego zasilaczy WN amatorskich wzmacniaczy mocy jest szczególnie przydatna podczas pracy emisjami RTTY oraz FM. Pozwala ona na ustawianie mocy wyjściowej zgodnie z aktualnymi potrzebami i zabezpiecza zasilacz (skonstruowany głównie na potrzeby emisji SSB oraz CW) od przeciążenia podczas wzmacniania sygnałów RTTY (lub FM). Najbardziej pożądanym byłby taki sposób regulacji, aby uzyskiwało się jednocześnie proporcjonalne zmiany napięcia anodowego i prądu anodowego (w tym samym kierunku). Oznaczałoby to stałość rezystancji obciążenia wzmacniacza mocy i umożliwiałoby pracę II-Filtru o tym samym Q i w tych samych położeniach L, $C_{anodowy}$ oraz $C_{obciążenia}$ jak dla maksymalnej mocy wyjściowej.

Przełączanie odczepów transformatora po stronie pierwotnej raczej nie wchodzi w rachubę, bo oznaczałoby konieczność dowieńnięcia dodatkowych zwojów w uzwojeniu pierwotnym. Aby zmieścić większą liczbę zwojów uzwojenia pierwotnego należałoby zmniejszyć średnicę przewodu w uzwojeniu pierwotnym a to oznacza automatyczne zwiększenie rezystancji uzwojenia pierwotnego. Dlatego stosuje się skokowe przełączanie odczepów uzwojenia wtórnego transformatora WN. Wystarczy do tego celu przełącznik ceramiczny dobrze odizolowany od masy. Przełączanie odczepów uzwojenia wtórnego powinno odbywać się **bez prądu obciążenia** ("na zimno"). Jeśli posiadany transformator nie ma odczepów i stosowany jest układ prostownika pełno-okresowego z podwajaniem napięcia to zmniejszenie napięcia WN o połowę możliwe jest po przełączeniu z układu prostownika pełno-okresowego z podwajaniem napięcia na prostownik pełno-okresowy w układzie mostkowym. Przełączanie pomiędzy prostownikiem pełno-okresowym z podwajaniem napięcia a prostownikiem pełno-okresowym w układzie mostkowym można zrealizować na **wysokonapięciowych** przełącznikach ceramicznych lub na przekątnikach próżniowych (stosowny schemat na rysunku 3).

Jeśli posiadany zasilacz daje napięcie np. 4000V DC przy pracy prostownika pełno-okresowego z podwajaniem napięcia podczas pracy emisjami SSB oraz CW to po przełączeniu na prostownik pełno-okresowy w układzie mostkowym będzie miał napięcie około 2000V DC do pracy emisjami RTTY lub FM. Przy tym niższym napięciu zasilacz będzie miał dwukrotnie większą wydajność prądową, co jest akurat przydatne podczas pracy emisjami RTTY oraz FM. Wzmacniacz stroi się przy tym samym strojeniu Π-Filtra jak dla CW / SSB przy dwukrotnie wyższym napięciu anodowym.

Przełączanie z układu prostownika pełno-okresowego z podwajaniem napięcia na prostownik pełno-okresowy w układzie mostkowym powinno odbywać się w "stanie zimnym" (tzn. należy wyłączyć zasilacz. Następnie dokonać przełączenia i ponownie załączyć zasilacz).

Regulacja napięcia wyjściowego zasilacza WN z wykorzystaniem autotransformatorów Variac

Na schemacie wygląda to prosto i zachęcająco. Niestety, schemat nie oddaje wszystkich rzeczywistych uwarunkowań takiego sposobu regulacji napięcia wyjściowego zasilacza WN.

Dla ustawień autotransformatora zbliżonych do 100% napięcia sieci nie wnosi on znaczącej dodatkowej rezystancji w obwodzie pierwotnym transformatora WN. Gdyby autotransformator miał obciążenie czysto rezystywne to i dla niższych ustawień napięcia wyjściowego z autotransformatora jego dodatkowa rezystancja nie powodowałaby komplikacji. Pamiętajmy jednak z poprzednich rozdziałów, że szczególny charakter pracy zasilacza WN z filtrem wygładzającym tętnienia składającym się tylko z baterii kondensatorów (krótkie i potężne prądy ładowania trwające tylko po 12,5% każdego pół-okresu dodatniego) nie toleruje dużej wartości rezystancji po stronie pierwotnej zasilacza. Dlatego, tylko zasilacze wyposażone rezonansowe filtry wygładzające tętnienia akceptują regulację napięcia wyjściowego WN metodą regulacji autotransformatorem napięcia podawanego na uzwojenie pierwotne transformatora WN.

Autotransformatora można używać do ręcznego startu zasilacza WN zwiększając napięcie wyjściowe autotransformatora od zera do wartości nominalnej... pod warunkiem, że po każdym wyłączeniu zasilacza WN będziemy pamiętać o ustawieniu autotransformatora na zerowe napięcie na wyjściu. W tej roli znacznie lepiej od zawodnej pamięci ludzkiej sprawują się automatyczne układy startowe na przekaźnikach i rezystorach włączonych szeregowo z pierwotnym uzwojeniem transformatora WN. Jest to układ zdecydowanie pewniejszy, tańszy, lżejszy oraz (co szczególnie ważne w i tak ciężkim zasilaczu WN) mniejszy gabarytowo.

Autotransformatory nadają się do łagodnego załączania napięcia żarzenia lamp stopnia końcowego.... pod warunkiem, że po każdym wyłączeniu zasilacza WN będziemy pamiętać o ustawieniu autotransformatora na zerowe napięcie na wyjściu. W zastosowaniach profesjonalnych nastawianie autotransformatora odbywa się za pomocą silnika sterowanego przez układ łagodnego załączania napięcia żarzenia lamp mocy.

Isolacja uzwojeń w transformatorze WN

Poszczególne warstwy uzwojeń oraz poszczególne uzwojenia izoluje się za pomocą przekładkowego papieru transformatorowego. Jest on specjalnie spreparowany tak aby nie był higroskopijny (wilgoć absorbowana z otaczającego powietrza przez zwykły papier mogłaby z czasem spowodować przebicie izolacji). Uzwojenia transformatora WN impregnuje się żywicami syntetycznymi albo smołami otrzymywanymi z oleju skalistego. Proces impregnacji przyczynia się do wyparcia powietrza z uzwojeń transformatora. Powietrze źle przewodzi ciepło i wyparcie go przez impregnat poprawia warunki chłodzenia uzwojeń transformatora, zmniejszając ich temperaturę (co przyczynia się do zmniejszenia strat cieplnych w tych uzwojeniach ze względu na dodatni temperaturowy współczynnik rezystancji właściwej miedzi). Impregnacja transformatorów tylko w nieznacznym stopniu zwiększa ich cenę ale wynagradzana jest wydłużeniem czasu bezawaryjnej eksploatacji transformatora WN. Część producentów transformatorów traktuje impregnację transformatorów jako płatną odrębną opcję.

Impregnacja transformatorów WN

Komercyjni producenci transformatorów WN wykonują ten proces w komorze próżniowej aby można było wypompować wszystkie bąbelki powietrza z uzwojeń. Stanowisko do impregnacji jest dość kosztowne. Można - dzięki cierpliwości i dokładności postępowania - zastąpić drogą komorę próżniową "domowymi" sposobami i usunąć bąbelki powietrza z uzwojeń transformatora WN. Najpierw transformator wygrzewa się w piecyku w temperaturze około 80°C. Zalecany czas wygrzewania powinien wynosić około pięciu godzin na każdy kilogram wagi. Po wygrzaniu transformatora należy (uważając aby nie poparzyć rąk) położyć go na stole przykrytym grubą warstwą gazet. Transformator należy ustawić tak, aby wszystkie wyprowadzenia uzwojeń skierowane były do dołu. Wyprowadzenia uzwojeń należy owinąć w celu uszczelnienia taśmą nawijaną tak aby po odwróceniu transformatora częścią dolną do góry płynna żywica syntetyczna nie mogła spływać.

Poliestrowe żywice syntetyczne, używane do laminowania, łatwo wnikają we wszelkie szczeliny w uzwojeniach transformatora, wypierając z nich resztki powietrza. Żywice te nadają się do impregnacji transformatorów WN.

Do impregnacji potrzebny będzie czysty metalowy garnek o rozmiarach takich aby pomieścił się w nim impregnowany transformator. Odmierzamy tyle pierwszego składnika żywicy syntetycznej aby zanurzyło się w nim dolne 5% uzwojeń transformatora. Następnie należy dodać zalecaną przez producenta ilość katalizatora (utwardzacza) i dokładnie wymieszać miksturę. Ilość katalizatora zależy od aktualnej temperatury i od wilgotności. Powinniśmy otrzymać miksturę o konsystencji żelu. Miksturę impregnującą zalewamy powoli z góry uzwojeń stale w tym samym miejscu (umożliwi to wypchnięcie resztek powietrza z uzwojeń). Miejsca od spodu uzwojeń transformatora, z których wyciekać będzie mikstura należy uszczelniać masą silikonową. Żywica po stwardnieniu zapewni szczelną hermetyzację uzwojeń transformatora przed przedostawaniem się wilgotnego powietrza do wnętrza uzwojeń. Stwardniała warstwa żywicy powinna wystawać o około 5mm ponad hermetyzowane uzwojenie. Następnie wlać do garnka ilość żywicy wystarczającą do zaimpregnowania drugiej strony transformatora. Ilość dodawanego katalizatora zależna jest od wielkości (przenoszonej mocy) transformatora. Dla transformatorów WN rzędu kilku kVA zaleca się 5 kropli katalizatora na 100 gramów żywicy. Natomiast dla transformatorów mniejszych mocy należy dodawać nieco więcej katalizatora. Żywica nie powinna stwardnieć zanim bąbelki powietrza nie zostaną wypchnięte z uzwojeń. Dlatego nie można przedawkować katalizatora.

Z jednej strony wysoka temperatura w jakiej znajdują się uzwojenia transformatora po wygrzewaniu zwiększa zdolność wnikania żywicy we wszelkie szczeliny w uzwojeniach i wypierania z nich resztek powietrza ale z drugiej strony proces twardnienia żywicy (która już przedostała się do wnętrza uzwojeń) przebiega szybciej w wyższych temperaturach.

Można, w trakcie zalewania żywicą, podgrzewać dodatkowo uzwojenia transformatora za pomocą autotransformatora. Robimy to w sposób następujący:

- wyjście autotransformatora (podłączonego od strony pierwotnej do sieci) podłączamy do uzwojenia wysokonapięciowego transformatora WN,

- do uzwojenia pierwotnego transformatora WN podłączamy amperomierz (jako jego obciążenie) prądu zmiennego,
- zwiększamy napięcie wyjściowe z autotransformatora aż do osiągnięcia prądu znamionowego w uzwojeniu pierwotnym transformatora WN.

Przy przepływie prądu uzwojenia będą podgrzewane. Gdy zauważymy twardnienie żywicy powinniśmy odłączyć autotransformator od uzwojenia wysokonapięciowego i skierować na uzwojenia strumień powietrza z wentylatora. Proces twardnienia żywicy jest reakcją egzotermiczną i podczas niego wydzielą się dodatkowe ciepło. Z tego względu potrzebne jest skuteczne schładzanie aby nie doszło do przegrzania uzwojeń transformatora WN (bo w wyższej temperaturze dochodzi do kruszenia się emalii na przewodach uzwojeń i pogorszenia izolacji przewodów).

Prostowniki

Najczęstszą przyczyną uszkodzeń prostowników jest przekroczenie dopuszczalnego prądu w kierunku wstecznym elementu prostowniczego. Można tego uniknąć jeżeli (w układach prostowników pełno-okresowych z podwajaniem napięcia oraz w prostownikach pełno-okresowych w układzie mostkowym) dopuszczalne szczytowe napięcie w kierunku wstecznym dla elementów prostowniczych będzie przewyższać o 50% napięcie stałe na wyjściu zasilacza. Jeśli zasilacz pracować będzie w ekstremalnych warunkach temperatury (np. wyczynowa praca w zawodach KF, jako wyposażenie ekspedycji DX-owej) to bezpieczniej jest zwiększyć powyższy zapas aż o 100%.

Współczesne elementy prostownicze wykonywane są w zupełnie innej technologii aniżeli jeszcze 30 lat temu. Dawniejsze konstrukcje używały elementów prostowniczych o sporym rozrzucie dopuszczalnych napięć wstecznych. Starano się temu przeciwdziałać bocznikując poszczególne diody prostownicze rezystorami i kondensatorami. Było to proste przeniesienie praktyki wyrównywania napięć na kondensatorach elektrolitycznych filtra wygładzającego tętnienia. Z tym, że w każdym obwodzie szeregowym prąd przepływający przez elementy jest taki sam. Dotyczy to także dopuszczalnego prądu wstecznego: jest taki sam, niezależnie od dołączenia (lub nie) bocznikujących rezystorów. Dlatego amerykańscy producenci zasilaczy WN dawno temu odeszli od praktyki bocznikowania rezystorami i kondensatorami szeregowo połączonych poszczególnych diod prostowniczych w danej gałęzi mostka prostowniczego. Wydania *Radio Amateur Handbook* z lat 1995, 1996 oraz 1997 przestrzegają krótkofalowców przed bocznikowaniem diod prostowniczych, **wskazując jednocześnie, że to właśnie bocznikowanie diod prostowniczych może być przyczyną awarii prostownika!**

Diody prostownicze (połączone szeregowo w gałęziach mostka prostowniczego) powinny być tego samego typu (najlepiej tego samego producenta i z tej samej serii produkcyjnej). Przypadkowa mieszanina typów i producentów diod stwarza niebezpieczeństwo awarii prostownika wskutek przekroczenia dopuszczalnego prądu wstecznego w którejś (najsłabszej) diodzie. Po awarii diody najsłabszej proces przebiega lawinowo: uszkodzeniu ulegają inne diody w tej gałęzi mostka prostowniczego.

Diody prostownicze przewodzą przez pół okresu przyłożonego napięcia, podlegającego prostowaniu. Nie powinny zaś przewodzić podczas drugiej połówki okresu gdy napięcie przyłożone jest w kierunku wstecznym. Z tym, że w praktyce upływa pewien czas związany z przejściem złącza półprzewodnikowej diody prostowniczey ze stanu przewodzenia do stanu zatkania diody. Dla niskich częstotliwości napięcia sieci 50Hz nie stanowi to problemu. Problemy pojawiają się dopiero w prostownikach, w których prostowane napięcie zmienne ma częstotliwość znacznie wyższą od 50Hz (np. przetwornice, prostowanie przebiegów niemal prostokątnych itp.). W takich przypadkach bocznikujemy poszczególne diody prostownicze kondensatorami. Można też stosować zamiast zwykłych diod prostowniczych szybkie diody epitaksjalne mocy (1000V dopuszczalnego napięcia wstecznego, prąd przewodzenia 1A, czas przejścia 70 nanosekund).

Stosy prostownicze

Diody prostownicze na napięcia wsteczne powyżej 1 kV wykonywane są przeważnie jako szeregowo połączenie diod prostowniczych na niższe napięcia. Całość zalana jest w obudowie z żywicy epoksydowej. Tak wykonany stos prostowniczy ma rozmiary pojedynczej diody prostowniczey i jest łatwy w montażu. Wadą takiej technologii jest niski współczynnik przewodności cieplnej żywicy epoksydowej, co powoduje słabe odprowadzanie ciepła jakie wydzielą się na poszczególnych diodach stosu. Pojedyncze diody prostownicze, montowane na płytce i łączone szeregowo dla uzyskania niezbędnego napięcia wstecznego i w takiej technologii montażu mają lepszy dostęp do chłodzenia powietrzem aniżeli ww. konstrukcja stosów prostowniczych. Zatem życiowa zasada: "nie ma nic za darmo" potwierdza się i w tym przypadku.

Kondensatory w filtrze wygładzającym tętnienia

Kondensatory w filtrze wygładzającym tętnienia mają zazwyczaj podaną dopuszczalną wartość prądu tętnień. Powinna ona być co najmniej równa maksymalnemu prądowi pobieranemu z zasilacza. Kondensatory przeznaczone do pracy w filtrze wygładzającym tętnienia powinny mieć dużą dopuszczalną wartość prądu tętnień. Przekłada się to na niską rezystancję wewnętrzną zasilacza WN.

Kondensatory olejowe stosowane są zarówno do filtrów wygładzających tętnienia w zasilaczach jak i w zapłonnikach lamp błyskowych i w świetlówek. Kondensatory przeznaczone do zapłonek lamp błyskowych budowane są z myślą o uzyskaniu jak najkorzystniejszego współczynnika pojemności w stosunku do gabarytów kondensatora. Uzyskuje się to poprzez stosowanie bardzo cienkiej folii metalowej jako okładziny kondensatora. Cienka folia zwiększa rezystancję okładziny i przyczynia się do wydzielania większej ilości ciepła podczas wyzwalania zgromadzonego w kondensatorze ładunku. Sprzyjającą okolicznością są duże przerwy pomiędzy poszczególnymi ekspozycjami lampy błyskowej, umożliwiającą schłodzenie kondensatora.

Jeśli kondensatory w takim wykonaniu stosowane są w filtrach zasilaczy wzmacniaczy mocy, to należałoby zapewnić im skuteczne chłodzenie. Niektórzy producenci olejowych kondensatorów do lamp błyskowych dopuszczają pracę tych kondensatorów w filtrach wygładzających tętnienia pod warunkiem pracy przy napięciach ~60% w stosunku do nominału na obudowie. Z tym, że po uruchomieniu zasilacza z filtrem zbudowanym z kondensatorów do lamp błyskowych, powinniśmy sprawdzać (z zachowaniem wszelkich środków BHP) w początkowym okresie eksploatacji zasilacza temperaturę kondensatorów (np. po godzinie intensywnej pracy w zawodach lub wołania ekspedycji DX-owej). Kondensatory nie powinny być gorące. Zbytne nagrzewanie się kondensatorów może doprowadzić do wycieków oleju i przedwczesnego uszkodzenia kondensatorów.

Kondensatory olejowe produkowane w USA mają podaną na obudowie informację dotyczącą ich zastosowań (jako kondensator w lampie błyskowej albo kondensator filtra wygładzającego tętnienia). Kondensatory przeznaczone wyłącznie do lamp błyskowych mają podane maksymalne napięcie dopuszczalne. Natomiast kondensatory nadające się do filtrów wygładzających

tętnienia w zasilaczach mają podane dopuszczalne napięcie pracy DC. Niektórzy producenci zamiast napięć DC podają napięcia AC. Aby przeliczyć na DC należy przemnożyć przez 3.

Kondensatory olejowe można spotkać na wyprzedazach. Z tym, zdarzały się próby oszukiwania nabywców: z oznaczenia 3,5 kV zdrapywano 3 i przecinek sugerując, że jest to kondensator na wyższe napięcie. Zazwyczaj kondensator olejowy 3,5 kV może pracować w zasilaczu 2 kV (zgodnie z podaną powyżej zależnością: $0,6 \times 3,5 \text{ kV} = 2,1 \text{ kV}$). Dla kondensatorów wątpliwego pochodzenia możemy sami określić ich przydatność do planowanego zasilacza. Postępujemy następująco: podłączamy badany kondensator olejowy poprzez amperomierz do źródła prądu AC. Zwiększamy natężenie prądu przepływającego przez kondensator (np. z użyciem autotransformatora) aż do osiągnięcia maksymalnego prądu jaki mamy zamiar pobierać z naszego zasilacza. Jeśli po godzinie pracy kondensator będzie nadal chłodny to oznacza to, że nadaje się do naszego zasilacza.

Przed jednym należy przestrzec: produkowane są również aluminiowe kondensatory elektrolityczne do obwodów lamp błyskowych. Te nie nadają się do zastosowań w filtrach wygładzających tętnienia.

Drugą grupą kondensatorów stosowanych w filtrach wygładzających tętnienia są **aluminiowe kondensatory elektrolityczne**. Kondensatory elektrolityczne nie tolerują odwrotnej polaryzacji oraz przegrzania. Należy także przestrzegać wartości podanych napięć pracy (zazwyczaj napięcie pracy oraz maksymalne dopuszczalne napięcie mają dosyć zbliżone wartości). Kondensatory elektrolityczne są zdecydowanie mniejsze gabarytowo od olejowych a mimo to mogą zmagazynować o wiele więcej ładunku elektrycznego w stosunku do kondensatorów olejowych. Ponadto współczynnik cena za mikrofarad pojemności jest także zdecydowanie korzystniejszy dla aluminiowych kondensatorów elektrolitycznych.

Napięcia pracy powszechnie dostępnych aluminiowych kondensatorów elektrolitycznych nadających się zastosowania w filtrach wygładzających tętnienia wynoszą tylko kilkaset Volt. Niezbędne jest zatem szeregowo łączenie kondensatorów. Przy takim łączeniu należy zadbać o to aby napięcia na poszczególnych kondensatorach rozkładały się równomiernie i aby na żadnym z nich nie wystąpiło napięcie wyższe od dopuszczalnego. Uzyskuje się to poprzez bocznikowanie kondensatorów rezystorami. Wszystkie rezystory powinny mieć tę samą wartość oraz powinny być w wykonaniu zapewniającym stabilność rezystancji podczas starzenia się.

Wyrównują one napięcia na poszczególnych kondensatorach połączonych szeregowo tym skuteczniej im mniejsza jest wartość rezystancji. Należy jednak mieć na uwadze ciepło wydzielające się na rezystorach. Zatem potrzebny jest kompromis.

Nie należy w tym miejscu stosować rezystorów węglowych ponieważ zmieniają one swoją rezystancję w miarę upływu czasu. Zastosowane rezystory węglowe mogą zmieniać rezystancję w różnym tempie, co doprowadzi po pewnym czasie do znacznych różnic napięć na poszczególnych kondensatorach połączonych szeregowo. Po przekroczeniu dopuszczalnego napięcia (choćby na jednym kondensatorze elektrolitycznym) ulegnie on przebicciu w pierwszej kolejności i będzie stanowił zwarcie. Wtedy napięcia przypadające na pozostałe kondensatory będą przekraczać wartość dopuszczalną i pozostałe kondensatory elektrolityczne także ulegną uszkodzeniu.

Zawodne są również rezystory o dużej rezystancji nawinięte drutem oporowym. Duża wartość potrzebnej rezystancji zmusza do użycia bardzo cienkiego drutu oporowego, co z kolei nie gwarantuje mechanicznej trwałości rezystora.

Najlepiej do tego celu nadają się rezystory metalizowane. Mają one dosyć dużą zgodność rezystancji z fabrycznym opisem oraz odznaczają się trwałością rezystancji w czasie eksploatacji. Dostępne są rezystory 2 Wat. **SP7HT: stosuję, dla wyrównywania napięć na aluminiowych kondensatorach elektrolitycznych w filtrze wygładzającym tętnienia, po trzy rezystory 100000 Ω / 2 Waty, połączone równolegle. Takie wartości spełniają regułę z amerykańskiego Handbooka: około 100 Ohm na każdy Volt dopuszczalnego napięcia pracy kondensatorów elektrolitycznych 470 uF / 450 Volt.** Dobierając rezystor bocznikujący do konkretnego kondensatora możemy posługiwać się zależnością: $U^2/R=P$ (gdzie: U to napięcie pracy kondensatora elektrolitycznego wyrażone w Voltach, R to rezystancja w Ω oraz P to moc rezystora w Watach).

Pamiętając o tym, że kondensatory elektrolityczne ulegają uszkodzeniu po podaniu na okładziny napięcia o niewłaściwej polaryzacji możemy je zabezpieczać za pomocą diod prostowniczych na napięcie około 600 V. Wystąpienie napięć o przeciwnej polaryzacji na kondensatorach filtra wygładzającego tętnienia możliwe jest po awarii prostownika zasilacza. Diodę zabezpieczającą podłączamy następująco: katoda diody zabezpieczającej dołączona jest do dodatniej końcówki kondensatora elektrolitycznego a anoda diody zabezpieczającej na obudowę kondensatora elektrolitycznego. Zabezpieczenie diodami nie jest przesadą zważywszy, że cena kondensatora elektrolitycznego jest **kilkaset razy wyższa** od ceny diody zabezpieczającej.

Wstępna polaryzacja siatki sterującej wzmacniacza mocy

Wstępną polaryzację siatki sterującej wzmacniacza mocy uzyskuje się zazwyczaj z wykorzystaniem odpowiednio dobranej diody Zenera. Niestety nie jest to rozwiązanie uniwersalne. Poszczególne egzemplarze lamp nadawczych mogą różnić się nieco pomiędzy sobą i dioda Zenera dobrana dla pierwszej lampy może okazać się nieoptymalną dla innego egzemplarza lampy tego samego typu. Radzimy sobie zazwyczaj dołączając spolaryzowane w kierunku przewodzenia diody krzemowe. Spadek napięcia na pojedynczej diodzie krzemowej w kierunku przewodzenia wynosi 0,7 Volt. Podłączając wyprowadzenia z diod Zenera i spolaryzowanych w kierunku przewodzenia diod krzemowych na przełącznik wielopozycyjny możemy dobrać napięcie wstępnej polaryzacji siatki sterującej wzmacniacza mocy ze skokiem co 0,7 Volta.

Zmiana wstępnej polaryzacji siatki sterującej wzmacniacza mocy przy przejściach Odbiór / Nadawanie realizowana była wcześniej z wykorzystaniem styków przełącznika Odbiór / Nadawanie lub dodatkowego przełącznika (np. kontaktronu) pracującego równolegle z głównym przełącznikiem Odbiór / Nadawanie. Obecnie stosuje się przełączniki elektroniczne, które mogą wykonać przełączenia znacznie szybciej od przełączników elektromechanicznych. Jest to szczególnie ważne podczas pracy ze wzmacniaczem mocy emisjami cyfrowymi.

Stosowane są dwa sposoby aktywacji układu zmiany wstępnej polaryzacji siatki sterującej wzmacniacza mocy:

- aktywacja sygnałem w. cz.
- oraz aktywacja prądem przepływającym przez indukcyjność.

Jakkolwiek wydaje się to dziwnym, to aktywacja z wykorzystaniem wzmacnianego sygnału w. cz. przysparza sporo kłopotów podczas pracy emisją SSB. Taki układ jest wrażliwy i szybko działa. W związku z tym następują częste przejścia pomiędzy stanem nadawania a stanem zatkania wzmacniacza (np. w przerwach pomiędzy słowami) i to wbrew intencji operatora. Powoduje to nieprzyjemne brzmienie głosu podczas nadawania (w momentach niepożądanych przełączeń) z polaryzacją nie gwarantującą liniowości wzmacniania oraz jest przyczyną powstawania splatteru wokół częstotliwości używanej podczas nadawania. Natomiast aktywacja układu zmiany wstępnej polaryzacji siatki sterującej wzmacniacza mocy z wykorzystaniem spadku napięcia na

indukcyjności gwarantuje nie występowanie wstępnej polaryzacji siatki sterującej podczas nadawania mogącej spowodować nieliniową pracę wzmacniacza mocy. W układzie praktycznym wykorzystuje się transoptor sterowany diodą LED zasilaną z kolei spadkiem napięcia w. cz. na indukcyjności. Dopiero wyjście transoptora steruje układem zmiany wstępnej polaryzacji siatki sterującej wzmacniacza mocy. Stosowną ilustracją jest schemat na rysunku 4.

Wstępna polaryzacja siatki sterującej wzmacniacza mocy pracującego w klasie AB₁

Wstępna polaryzacja siatki sterującej wzmacniacza mocy pracującego w klasie AB₁ jest łatwa w realizacji, ponieważ w tej klasie pracy wzmacniacza mocy prąd siatki sterującej nie płynie. Możemy powiedzieć, że polaryzacja siatki sterującej jest statyczna. Łatwo zbudować proste układy zasilaczy napięcia ujemnego z wymaganym zakresem regulacji napięcia wyjściowego polaryzującego siatkę sterującą wzmacniacza mocy pracującego w klasie AB₁. Napięcie zaporowe podczas odbioru powinno być o ~50% większe aniżeli podczas nadawania. Omawiany powyżej układ z diodą LED i transoptorem może być użyty do przełączania polaryzacji siatki sterującej wzmacniacza mocy podczas Nadawania i Odbioru.

Szybkie przełączanie Odbiór / Nadawanie sterowane sygnałem w. cz.

Zwykły przekaźnik elektromechaniczny zadziała po około 25 milisekundach od podania napięcia na jego uzwojenie. Takie przekaźniki nadają się do wzmacniaczy mocy sterowanych transceiverami, w których przełączanie Odbiór / Nadawanie realizowane jest również za pomocą przekaźników elektromechanicznych. Transceivery produkowane współcześnie dostosowane są do szybkiego przełączania Odbiór / Nadawanie niezbędnego przy pracy emisją AMTOR, telegrafią QSK oraz VOX SSB. Zastosowane w nich przełączanie Odbiór / Nadawanie oraz Nadawanie / Odbiór realizowane jest w ciągu 5 tylko milisekund. W transceiverach stosowane są na ogół szybkie podwójne przekaźniki. Podobne przekaźniki można zastosować na wejściu wzmacniacza mocy. Amerykańskie firmy *Jennings* oraz *Kilovac* produkują próżniowe podwójne przekaźniki zdolne do przełączania prądu 7A na częstotliwościach do 32 MHz (odpowiada to mocy w. cz. 2450 Wat na 50Ω). Firma *Jennings* produkuje przekaźnik RJ-1A a firma *Kilovac* produkuje przekaźnik HC-1. Jeśli do tych przekaźników dodamy układy przyspieszające start przekaźnika, to przełączenia będą realizowane w czasie tylko 2 milisekund! Pojedyncze szybkie przekaźniki są szybsze od przekaźników podwójnych. Dlatego zastosowanie oddzielnych pojedynczych przekaźników na wejściu i na wyjściu wzmacniacza zapewnia szybsze przełączanie aniżeli wspólny przekaźnik podwójny.

Przełączanie wzmacniaczy mocy za pomocą diod PIN

Szybkie przełączanie pomiędzy Odbiorem i Nadawaniem można realizować także z wykorzystaniem diod PIN. Są one podobne do wspomnianych poprzednio diod 1000PIV. Oba typy posiadają szeroki zakres samoistnej przewodności. Diody PIN wykorzystywane są w technice radarowej do przełączania Nadawanie / Odbiór. Dioda PIN jest zamknięta gdy spolaryzujemy ją w kierunku przeciwnym przewodzenia. Spowoduje to powiększenie bariery. Dioda PIN jest otwarta gdy spolaryzujemy ją w kierunku przewodzenia, co umożliwi ruch nośników przez barierę. Diody PIN mogą być bardzo szybkimi przełącznikami. Ich czas życia wydaje się nieograniczony, pod warunkiem, że nie przekroczy się dopuszczalnego napięcia w kierunku wstecznym.

Typowe napięcia przebicia diody PIN w kierunku wstecznym wynosi około 1000 Volt. Dla mocy dozwolonych dla krótkofalowców w Polsce (500 Wat dla najwyższej kategorii zezwoleń) gwarantuje to poprawną pracę diody jako przełącznika $\{bo (500 \text{ Wat} \times 50 \Omega)^{-0.5} = 158 \text{ V}_{sk}, \text{ czyli } 446 \text{ V}_{międzyszczytowe}\}$. Istnieje tu pewne niebezpieczeństwo w przypadku dużego niedopasowania w linii zasilającej antenę. Pod tym względem znacznie pewniejsze są szybkie przekaźniki próżniowe: im nie grozi uszkodzenie przy wystąpieniu dużych napięć wywołanych falą stojącą. Natomiast elementy półprzewodnikowe są bardzo wrażliwe na przepięcia i ulegają natychmiastowemu zniszczeniu.

Podczas nadawania z komputera superszybkiej telegrafii CW w tempie np. 100 grup na minutę lepsze są przełączniki na diodach PIN. Dla „wolniejszych” transmisji: telegrafia CW w tempie 30 grup na minutę, emisji AMTOR oraz przy szybkim ustawieniu VOX-SSB zdecydowanie lepsze są szybkie przekaźniki próżniowe.

Należy zdawać sobie sprawę z ograniczeń jakim podlegają półprzewodniki. Tylko niektóre wartości dopuszczalne można przyjmować jako realne. Podawane są one zazwyczaj dla temperatury otoczenia 25°C oraz skutecznego chłodzenia półprzewodnika. Dla warunków rzeczywistych, wewnątrz wzmacniacza mocy, należy stosować współczynnik x0,3. Odnosi się to zwłaszcza do pracy półprzewodników w wyższych temperaturach a takie przecież panują we wzmacniaczu mocy podczas intensywnego nadawania. Jak daleko rzeczywistość odbiega od podawanych w katalogach parametrów (w odniesieniu do zastosowań w amatorskich wzmacniaczach mocy) niech świadczy poniższy przykład: tranzystor mocy „1500 Volt, 8 A, 150 Wat” może bezpiecznie wytracać moc tylko ~15 Wat i to tylko przy umiarkowanych napięciach pomiędzy kolektorem a emiterem. Tranzystory mocy FET są bardziej odporne na przeciążenia aniżeli tranzystory bipolarne.

Powyższe uwagi dotyczą także potencjalnej możliwości przegrzania diod prostowniczych w prostownikach zasilaczy wzmacniaczy mocy. Dlatego należy zadbać o montaż zapewniający dobry dopływ powietrza chłodzącego do poszczególnych diod. SP7HT: pod transformatorem WN DC oraz mostkami z diodami prostowniczymi 1N5408 są wentylatory wyciągające powietrze ze skrzynek Zasilaczy.

Pomiar napięcia przebicia diod półprzewodnikowych

Napięcia przebicia diod półprzewodnikowych możemy zmierzyć przykładając do diody napięcie w kierunku zaporowym i mierząc jednocześnie prąd w kierunku zaporowym. Zwiększamy napięcie aż do uzyskania prądu rzędu 1 do 2 μA. Przekroczenie tej wartości prądu w kierunku wstecznym może doprowadzić do przebicia diody. Należy zdawać sobie sprawę, że przy wzroście temperatury złącza diody maleje dopuszczalne napięcie w kierunku wstecznym.

Mierniki napięcia przebicia

Są to urządzenia podobne w działaniu do mierników izolacji. W przybliżeniu miernik taki można określić jako wysokonapięciowy (ze zmiennym HV) omomierz, którego wskazania nie pozostają w liniowej zależności od rezystancji. Jest to bardzo przydatny przyrząd przy konserwacji i uruchamianiu wzmacniaczy mocy KF i zasilaczy WN. Mierniki napięcia przebicia są szczególnie użyteczne przy badaniach przekaźników próżniowych, kondensatorów próżniowych, kondensatorów blokujących WN, kondensatorów sprzęgających II-Filtra, powietrznych kondensatorów zmiennych II-Filtra, prostowników zasilacza WN oraz przy poszukiwaniu miejsc, w których występują przebicia izolacji. Można lapidarnie powiedzieć, że próby naprawy wzmacniacza mocy bez tego przyrządu to jakby wyruszenie na otwarte morze bez kompasu (teraz GPS). Dla amatorskich wzmacniaczy mocy można zakładać, że większość użytych komponentów (w tym kondensatory i przekaźniki próżniowe) ma szczytowe napięcia 15 kV DC / 9kV w. cz. Zatem tester napięcia przebicia o zakresie 0 do 15 kV powinien być przydatnym narzędziem.

Oczywiście, można wykorzystywać profesjonalne testery napięcia przebicia ale dla radioamatorów byłyby one zbyt drogie. Możemy skonstruować miernik napięcia przebicia samodzielnie z dostępnych "skarbów". Potrzebne są: transformator WN o niskim poborze prądu z uzwojenia wtórnego, autotransformator 0-240 VAC o obciążalności powyżej 1A, świetlówka 220VAC, kilka diod WN, rezystory, dwa kondensatory na wysokie napięcie do filtra wygładzającego tętnienia oraz czuły mikroamperomierz.

Nisko-prądowy transformator WN podłącza się do wyjścia autotransformatora poprzez świetlówkę. Zadaniem świetlówki jest ograniczanie uderzenia prądu w momencie wystąpienia przebicia WN. Moc świetlówki powinna być proporcjonalna do mocy nisko-prądowego transformatora WN. Prąd przepływający przez świetlówkę powinien być w przybliżeniu równy obciążeniu bezpiecznika w uzwojeniu pierwotnym nisko-prądowego transformatora WN. Prąd doprowadzany do badanego komponentu ograniczamy za pomocą rezystorów o łącznej rezystancji wielu Megaohmów. Mikroamperomierz powinien być zabezpieczony diodą 1A podłączoną równolegle do zacisków mikroamperomierza. W załączeniu podano na rysunku nr 6 stosowny schemat testera.

Ograniczanie uderzenia prądu podczas załączania zasilacza

Większość zasilaczy WN wyposażona jest w układ ograniczania uderzenia prądu podczas załączania zasilacza WN DC. Przed załączeniem zasilacza kondensatory filtra wygładzającego tętnienia są rozładowane. Po załączeniu zasilacza do sieci popłynie do nich bardzo duży prąd, czasami tak duży, że zadziałają zabezpieczenia w zasilaczu albo w domowej instalacji elektrycznej. Może też dojść do uszkodzenia diod w prostowniku WN. Dlatego stosuje w obwodzie uzwojenia pierwotnego dodatkowy rezystor ~25 Ω o mocy ~10 Wat. Pozwala to na stosunkowo łagodne naładowanie się kondensatorów filtra. Po naładowaniu się kondensatorów filtra wygładzającego dodatkowy rezystor w uzwojeniu pierwotnym transformatora WN jest zwierany. Stosowane są w tym miejscu przekaźniki sterowane próbką napięcia WN z wyjścia filtra wygładzającego tętnienia (po osiągnięciu 70% napięcia wyjściowego dodatkowy rezystor w uzwojeniu pierwotnym jest zwierany). Przykładowy schemat podany jest na rysunku 1. **SP7HT: stosuję własne rozwiązanie.** Na wyjściu + kondensatorowego filtra wygładzającego tętnienia wstawiam posobnik z 18 szeregowo połączonych rezystorów 32000 Ohm / 2 Wat podających próbkę „**aktualnego**” napięcia WN DC na uzwojenie przekaźnika RES54 (pisane cyrylicą) o rezystancji uzwojenia = 4300 Ohm. Drugi koniec uzwojenia na „masę”. W momentach załączania WN DC napięcie i natężenie prądu w uzwojeniu tego przekaźnika narastają aż do osiągnięcia wartości umożliwiającej jego zadziałanie. Wówczas jego zwarte zestyki podają napięcie zasilające 12 Volt na uzwojenie innego przekaźnika (R-15) zwierającego rezystor „rozruchowy” w uzwojeniu pierwotnym transformatora (4 rezystory 100 Ohm w porcelanowych obudowach połączone równolegle) do którego połączona (równolegle) jest żarówka 230 Volt / 15 Wat o rezystancji (w stanie nie świecenia) około 350 Ohm. W momentach załączania WN DC błysk tej żarówki (widoczny przez plastikową szybę na płycie frontowej zasilacza) poświadcza prawidłowość zadziałania układu łagodnego załączania WN DC zasilającego Anodę lampy w PA. Napięcie z uzwojenia przekaźnika RES54, poprzez szeregowy rezystor zasila **czerwoną diodę LED** na płycie frontowej zasilacza, której świecenie potwierdza obecność WN DC na wyjściu zasilacza. Przekaźnik RES54 ma wyjątkowo dużą rezystancję uzwojenia i doskonale spisuje się w takich zastosowaniach (w obu moich zestawach Zasilacz WN DC + PA). Można stwierdzić, że takie rozwiązanie pełni funkcję „sensora” potwierdzającego obecność nominalnego napięcia WN DC na Wyjściu Zasilacza. W sklepach z komponentami RTV są przekaźniki w plastikowej obudowie **finder 24 V DC** o rezystancji uzwojenia 2200 Ohm. Rezystancja uzwojenia przekaźnika decyduje o natężeniu prądu płynącego z „plusa” WN DC, poprzez szeregowy posobnik rezystorów, do „gorącego” końca uzwojenia przekaźnika. Byłby to prąd o natężeniu około 11 mA. Przy załączonym WNDC, jeszcze przed podaniem wystawienia w. cz. na Wejściu PA, napięcie jest nieco wyższe, aniżeli podczas Nadawania. Przyjmijmy, że będzie to 3300 V DC. Przy prądzie 0,011 A potrzebna rezystancja szeregowego posobnika z „plusa” WN DC na „gorący” koniec uzwojenia: $3300 : 0,011 = 300000 \text{ Ohm}$. Łączna moc wydzielana na rezystorach posobnika to 36,3 Wata. Przyjmijmy asekuracyjny „współczynnik strachu” i zaokrąglimy to do 40 Wat. Z tego samego powodu zastosujemy rezystory o dopuszczalnej mocy strat = 2 Waty (a układ liczymy jakby to były rezystory 1 Watowe). Gdyby to były metalizowane rezystory 8,2 k-Ohm / 2 Waty, to wymagana liczba w szeregowym posobniku: $(300000 + 2200) : 8200 = 36,85$ sztuk. Zaokrąglimy to do 37 sztuk. Posobniki montuję na prefabrykowanych perforowanych płytkach z otworami do montażu eksperymentalnego. Czasami istnieje potrzeba usunięcia oryginalnego druku na płytce i skorzystania tylko z samych otworów. **UWAGA: układy WN DC są niebezpieczne dla zdrowia i życia. Montować, testować, konserwować zgodnie z zasadami BHP.**