

Jak zapewnić bezawaryjną pracę wzmacniaczy tranzystorowych SSPA

(ang. Solid State Power Amplifier)

Vladimír Petržílka, OK1VPZ

www.ok2kkw.com

oraz

Michał Laszczynski SP2IQW

Dla czego SSPA?

- Półprzewodnikowe wzmacniacze mocy są obecnie jedynym bardzo efektywnym rozwiązaniem dla uzyskania dziesiątek i setek watów mocy w pasmach amatorskich powyżej 1GHz.
- Stopniowo zaczynają przenikać i do PA QRO 432, 144MHz i nawet PA na niższych pasmach, ponieważ są mniejsze a w połączeniu z zasilaczami impulsowymi są lżejsze i bardziej energooszczędne. Są one nawet przy tym bezawaryjne...
- Czy są one naprawdę bezawaryjne? Wiele amatorskich użytkowników radiowych do tych por niepodziela ten pogląd!
- To właśnie niezawodność urządzenia jest kluczem do sukcesu w zawodach ...
- Spójrzmy na to, co może być problem i jak go rozwiązać

Co jest kluczowym czynnikiem niezawodności SSPA

- Tranzystory mocy RF przeszły ogromny rozwój w ciągu ostatnich 30 lat. Dlatego tutaj się spotykamy aby omówić techniczne rozwiązania związane z nowymi tranzystorami w.cz. dużej mocy.
 - Dzisiejsze tranzystory mocy w.cz. są wykonywane w krzemie w technologii FET D-MOS lub LD-MOS, o napięciu zasilania 28 do 48V DC. Najnowsze rozwiązania korzystają też z azotku galu GaN.
 - Aby osiągnąć niezawodną pracę należy bezwzględnie przestrzegać podanego przez producenta obszaru bezpiecznej pracy dla danego typu tranzystora.
 - Jest to największym problem dla projektów amatorskich!
-
- *Amatorski model "kalibrowanego śrubokrętu" i zwiększenie wydajności do podobnego punktu, w którym anoda lampy jest czerwona, w półprzewodnikowych PA nie ma zastosowania gdyż prowadzi do ich zniszczenia!*

Temperatura złącza półprzewodnikowego

- Choć prawidłowe chłodzenie SSPA wydaje się oczywiste, to przegrzanie tranzystorów mocy RF jest w projektach amatorskich jedną z najczęstszych przyczyn ich uszkodzeń!
- Katalog danych tranzystora podaje maksymalną dopuszczalną temperaturę złącza półprzewodnikowego (zwykle około 200° C), jak również opór termiczny między strukturą a obudową tranzystora (styk do radiatora). I o tym projektanci amatorskich konstrukcji często zapominają!
- Gdy struktura ma temperaturę np. 155 °C, to różnica temperatur (gradient) pomiędzy chipem a chłodzeniem tranzystora jest tak duża, że tranzystor od strony radiatora może mieć w tym momencie temperaturę tylko w 58 °C!
- Gdy dodamy do oporu cieplnego wewnątrz tranzystora, rezystancję cieplną tranzystor - radiator, opór cieplny materiału radiatora i rezystancję termiczną radiator - otoczenie, to możemy dojść do wniosku, że dla prawidłowego chłodzenia tranzystora musiałby być SSPA chłodzony powietrzem o maksymalnej temperaturze zaledwie 10 ° C, na przykład,
- Innymi słowy, duża liczba SSPA pracuje przegrzana!

Temperatura złącza półprzewodnikowego

- Jeśli np. tranzystor ma podaną katalogową moc strat 200W dla temperatury obudowy 25°C i podaną maksymalną temperaturę złącza 200°C, oznacza to że dopuszczalna moc strat maleje liniowo wraz ze wzrostem temperatury aż do zera dla maksymalnej temperatury złącza. Dzieje się to na skutek wewnętrznej rezystancji termicznej ($dT = R_{th} \times P$).
- Inaczej mówiąc, 200-watowy tranzystor przy temperaturze obudowy 155°C nie jest w stanie stracić więcej niż 20W. Jeśli moc strat będzie większa niż te przykładowe 20W to go po prostu zniszczymy !
- Dlatego też, przy konstrukcji SSPA, bardzo ważne jest zapoznanie się z podanymi przez producenta danymi.
- Warto zastosować nawet nadmiarowy układ chłodzenia z zastosowaniem różnych układów zabezpieczeń w szczególności zapobiegającemu przegrzaniu tranzystora włącznie z zablokowaniem wysterowania i odłączeniem zasilania przy przekroczeniu temperatury "alarmowej".

Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Value	Unit
Drain-Source Voltage	V_{DSS}	65	V
Gate-Source Voltage	V_{GS}	-0.5 to +12	V
Junction Temperature	T_J	200	°C
Total Device Dissipation	P_D	417	W
Above 25°C derate by		2.38	W/°C
Storage Temperature Range	T_{STG}	-40 to +150	°C
Thermal Resistance ($T_{CASE} = 70^\circ\text{C}$)	$R_{\theta JC}$	0.42	°C/W

Table 4. Electromigration MTTF and FIT Rate Results

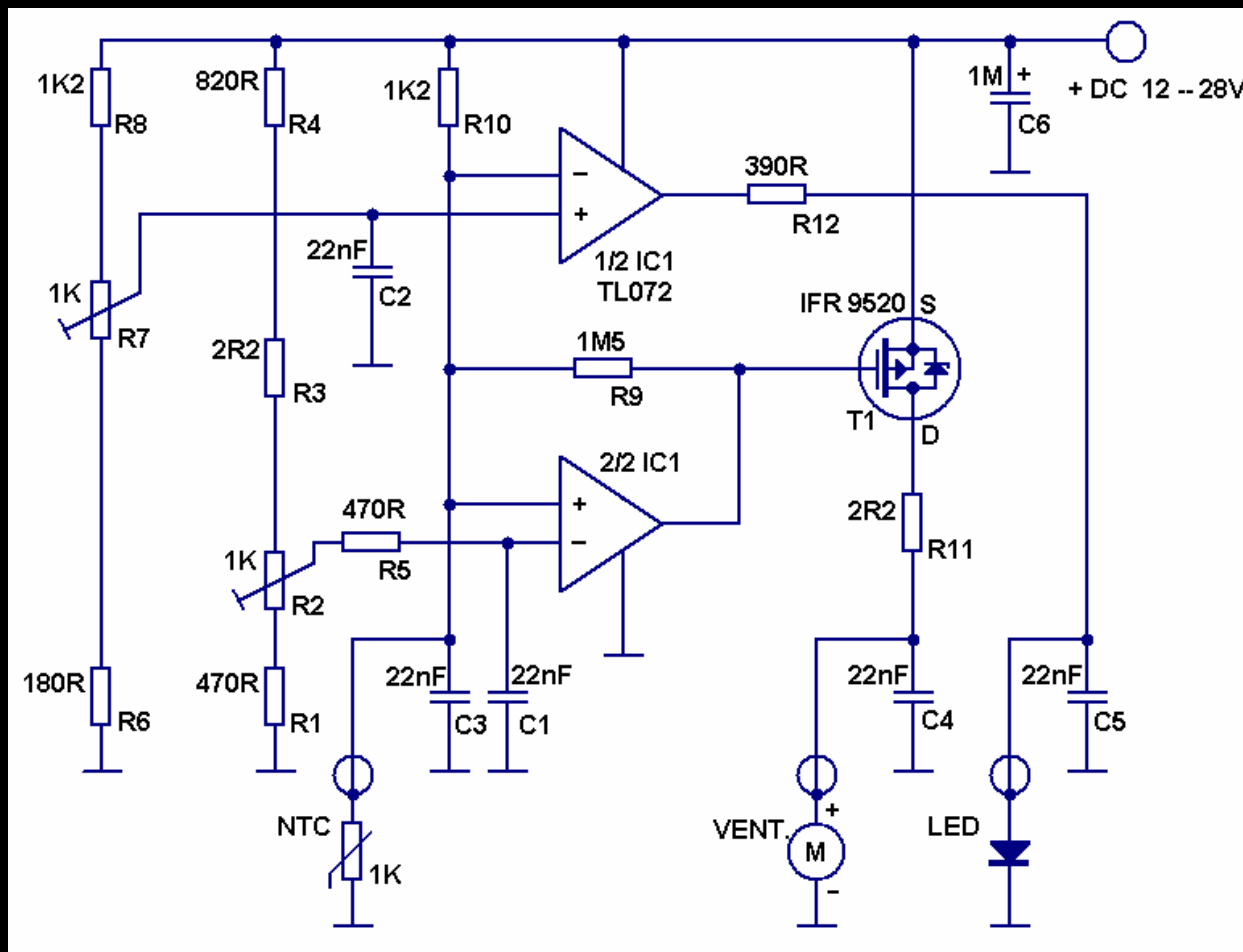
Device Electromigration MTTF	117 Years	At Case Temp.	77 °C
When BTS target life is	10 Years	the FIT Rate* is	2,4E+01

* The FIT rate is determined by calculating the cumulative fraction fail over the expected life, based on a lognormal distribution.

This failure rate is extrapolated to calculate a new MTTF. The FIT rate is then calculated according to the standard formula -- $FIT = 1E9/MTTF$.

This approach will result in a more accurate and meaningful estimate of the FIT rate over the BTS life.

Obwód kontroli wentylatorów oraz wykrycia maksymalnej dopuszczalnej temperatury



www.ok2kkw.com/00003016/komparator/ovladac_vent.htm

www.ok2kkw.com/00003016/komparator/komparator_pro_pa.htm

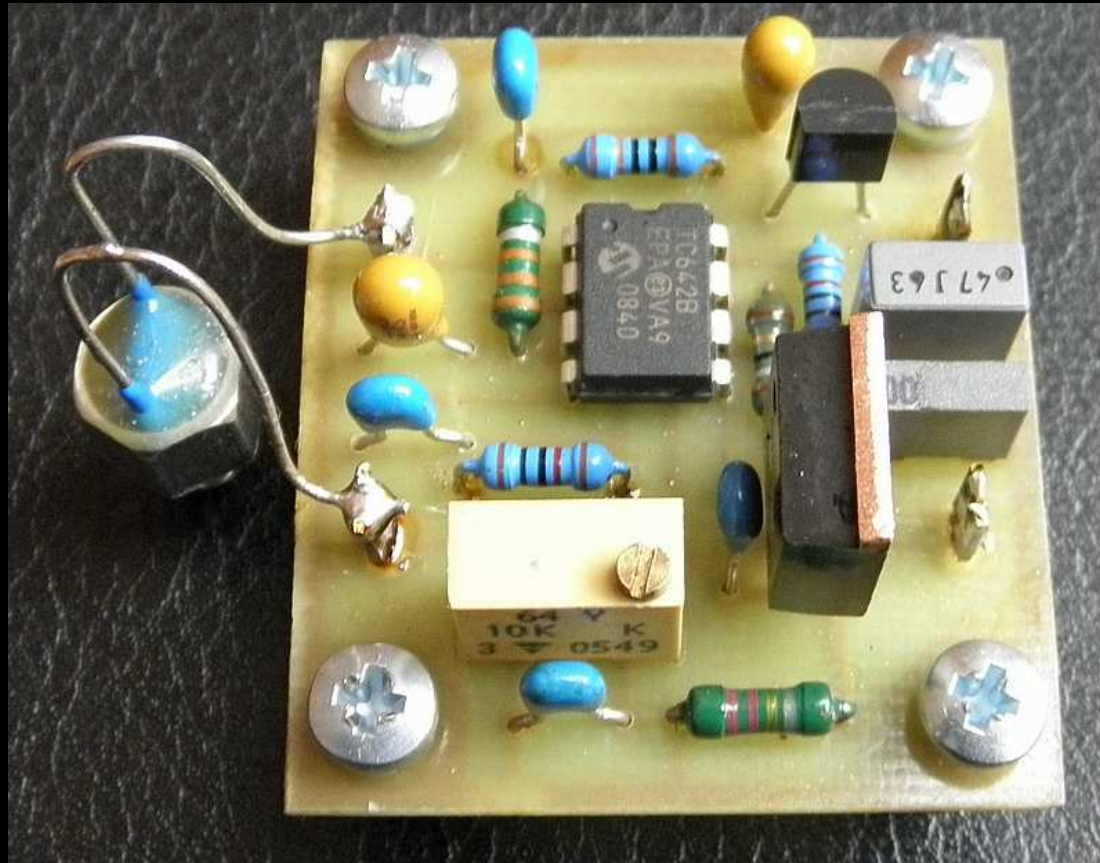
Układy monitorowania temperatury SSPA



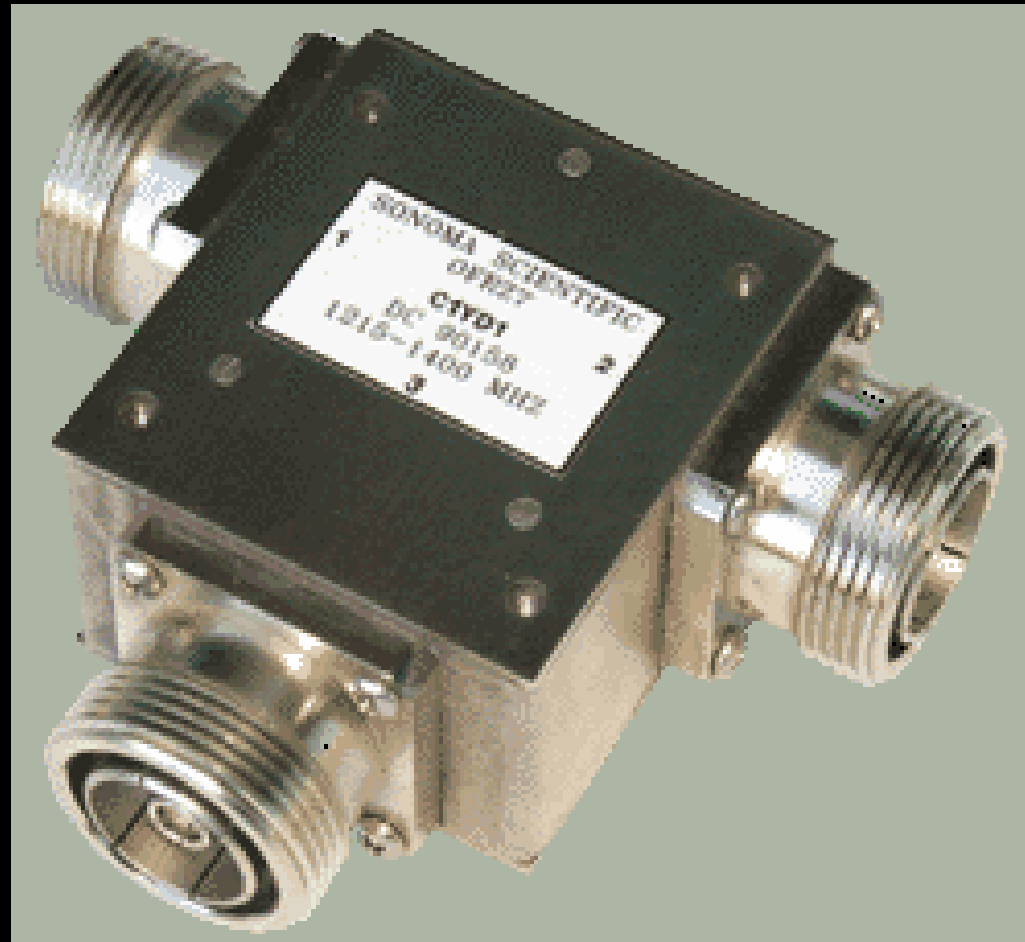
www.ok2kkw.com/00003016/pa70cm/pa_70cm.htm

Obwód do bezstopniowej regulacji prędkości obrotowej wentylatorów

- Zmianę prędkości wentylatorów można zrealizować takim układem sterowania. Dzięki regulacji impulsowej (PWM) nie grzeje się i może być użyty do większych wentylatorów 12-24V.



Ochrona przed niedopasowaniem wyjścia SSPA



RF Circulator

<http://www.valvo.com/>

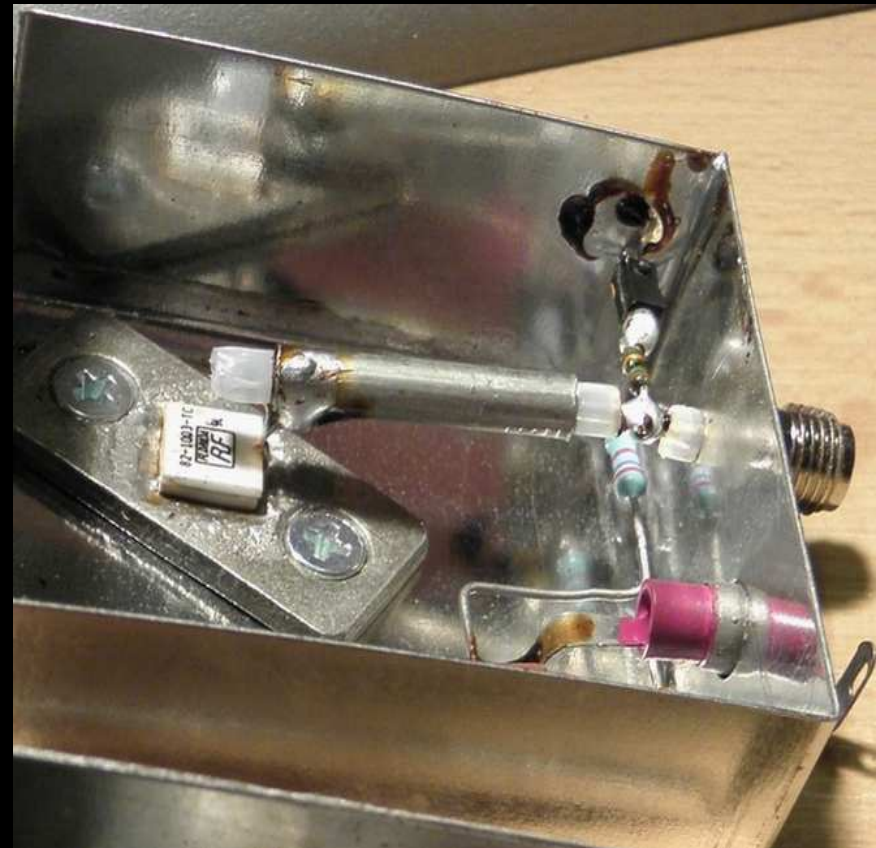
Ochrona przed niedopasowaniem wyjścia SSPA

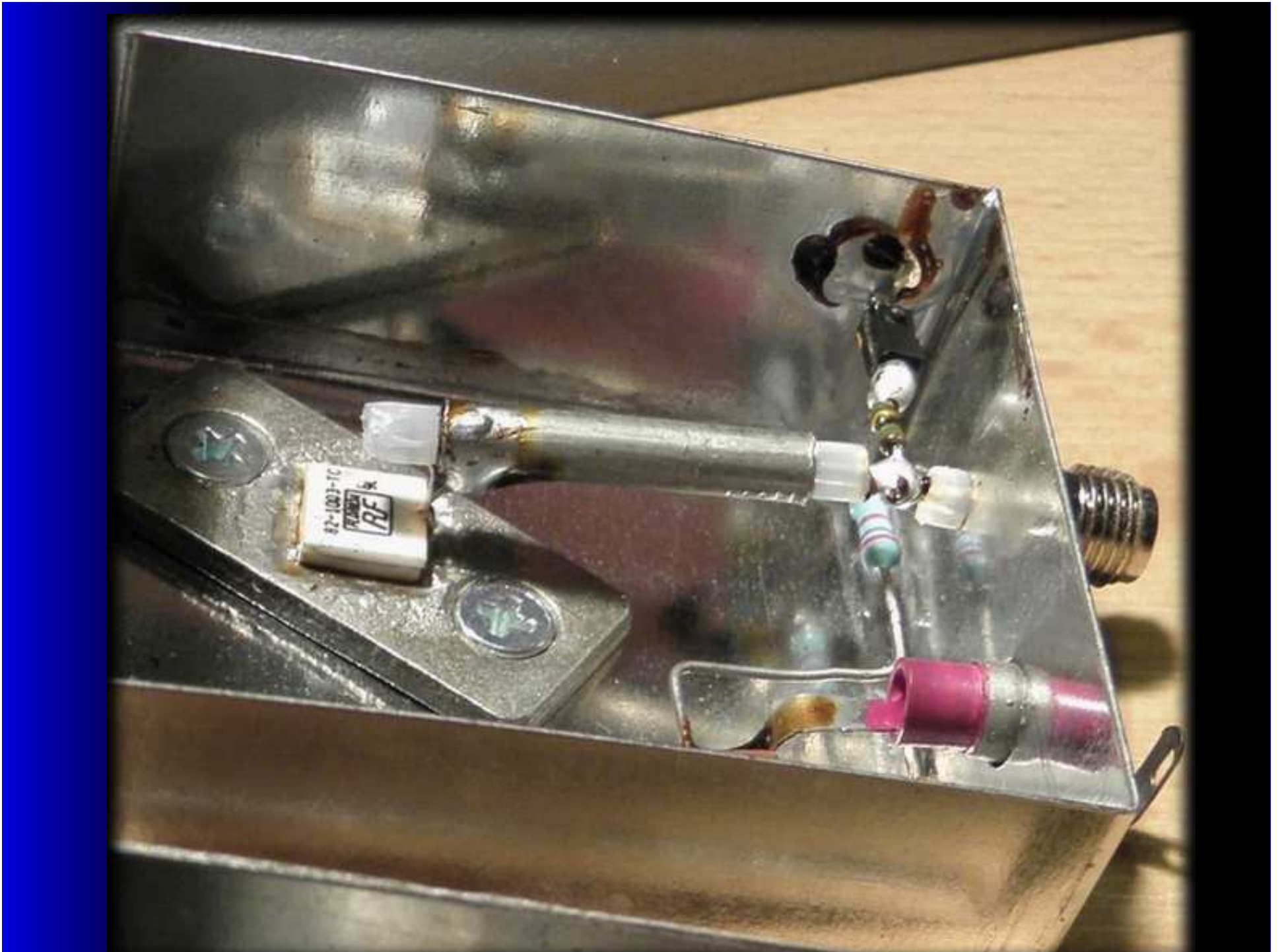
- Moc RF odbita na skutek niedostosowania obciążenia trafia z powrotem do tranzystora i dodatkowo ogrzewa jego złącze (ryzyko przegrzania), napięcia mogą też się zsumować i spowodować przebicie napięciowe czy też przekroczenie maksymalnego dopuszczalnego prądu. Kombinacja tych czynników zazwyczaj prowadzi do zniszczenia tranzystora, jeśli działa się na granicy jego parametrów.

Dlatego wymagane jest ograniczenie niedopasowania wyjścia SSPA !

- Możliwe sposoby ochrony przed niedopasowaniem:
 - SSPA musi pracować w bezpiecznym obszarze dopuszczalnej mocy
 - W przypadku SSPA większej mocy stosowanie na wyjściu PA cyrkulatora
 - Jeśli nie jest dostępny cyrkulator, należy przynajmniej zastosować szybką ochronę przed zbyt wysokim SWR.

- W przypadku zastosowania cyrkulatora, na jego trzecim porcie pojawia się moc wynikająca z niedopasowania i może to być od kilku watów do maksymalnej mocy wzmacniacza (przy bardzo dużym niedopasowaniu np. $SWR > 50$). Dlatego w sztucznym obciążeniu na tym 3-im porcie należy zastosować detektor RF, którego działanie spowoduje włączenie zabezpieczeń. W ten sposób wyjście SSPA "nie zauważy" niedopasowania. Nawet niezbyt duże sztuczne obciążenie jest w stanie przyjąć chwilowa sporą moc (zanim zadziałają obwody zabezpieczenia).





SWR ochrona z użyciem sprzęgacza kierunkowego

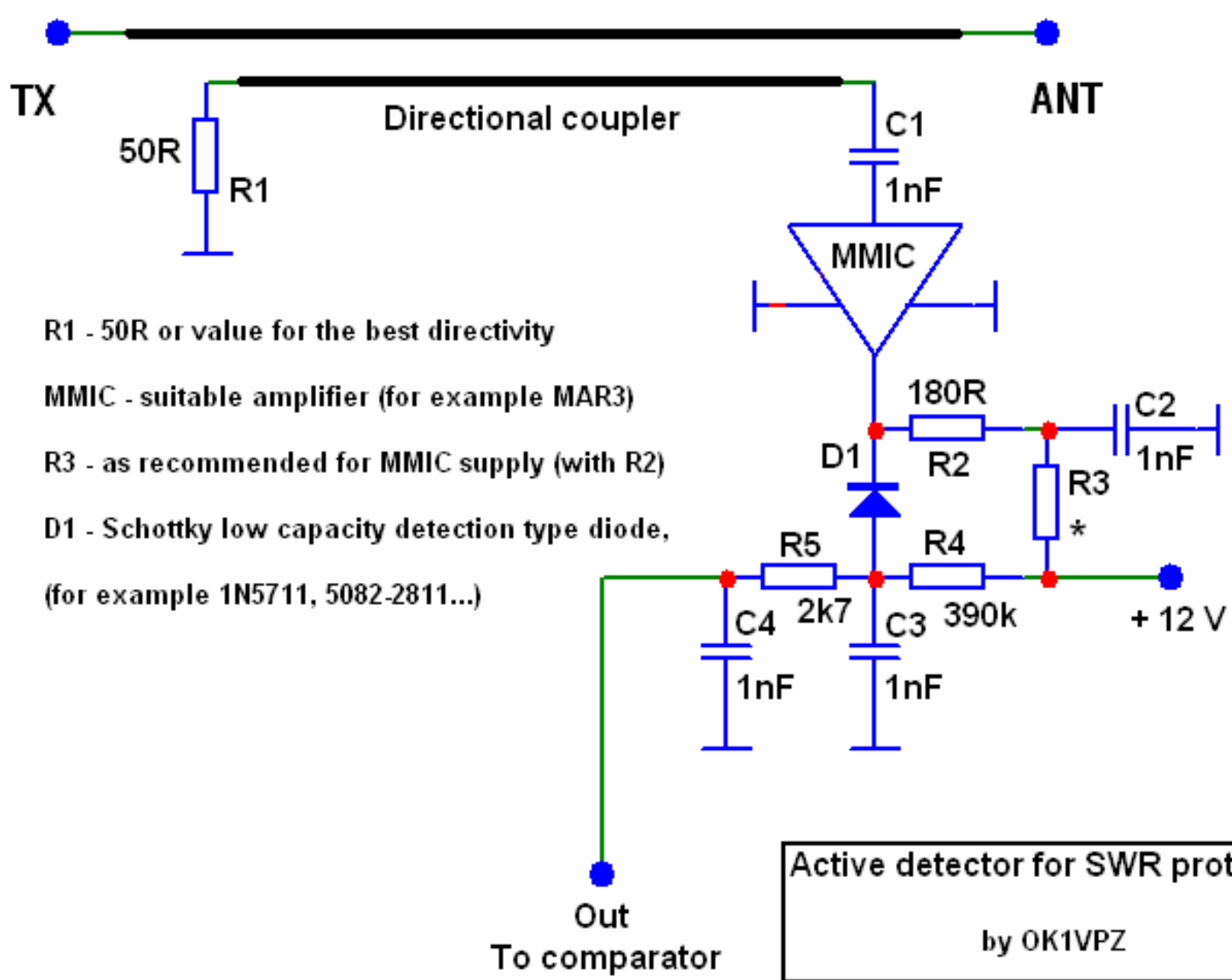


Odpowiedni sprzęgacz kierunkowy możemy kupić lub nawet zbudować w warunkach amatorskich. Co ważne, w celu ochrony SWR jest wymagana jego kierunkowość co najmniej 20dB!

Częstym problemem jest to, że napięcia na portach sprzęgacza są zbyt małe dla zadziałania układu zabezpieczeń, stąd stosuje się aktywne detektory RF lub wzmacnia się małe napięcie stałe z detektorów diodowych.

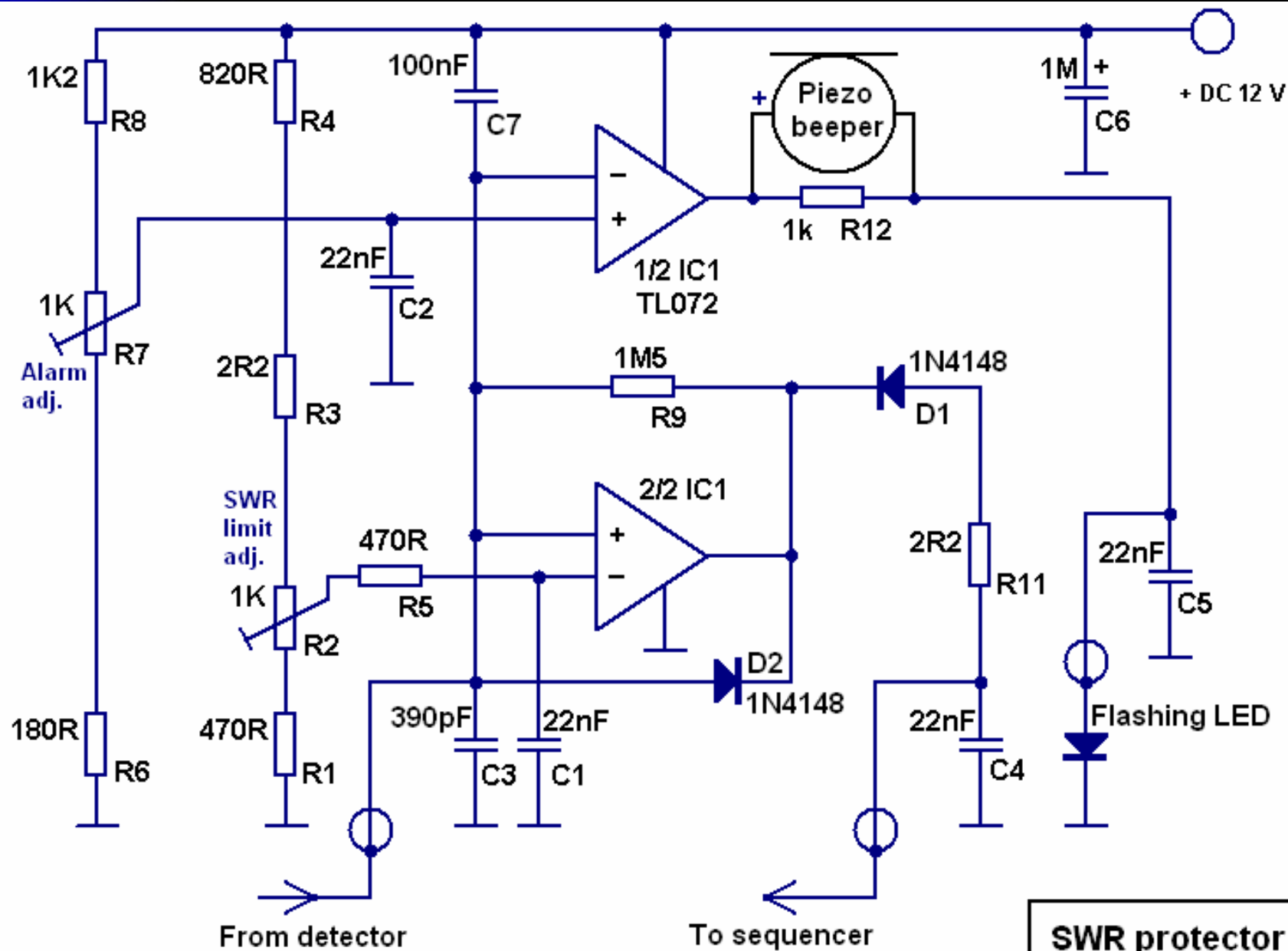
www.ok2kkw.com/00003016/komparator/reflektometrcka_ochrana.htm

www.ok2kkw.com/00003016/semirigidy/smerova_vazba.htm



- R1 - 50R or value for the best directivity
- MMIC - suitable amplifier (for example MAR3)
- R3 - as recommended for MMIC supply (with R2)
- D1 - Schottky low capacity detection type diode,
(for example 1N5711, 5082-2811...)

Active detector for SWR protection
by OK1VPZ



SWR protector unit
by OK1VPZ

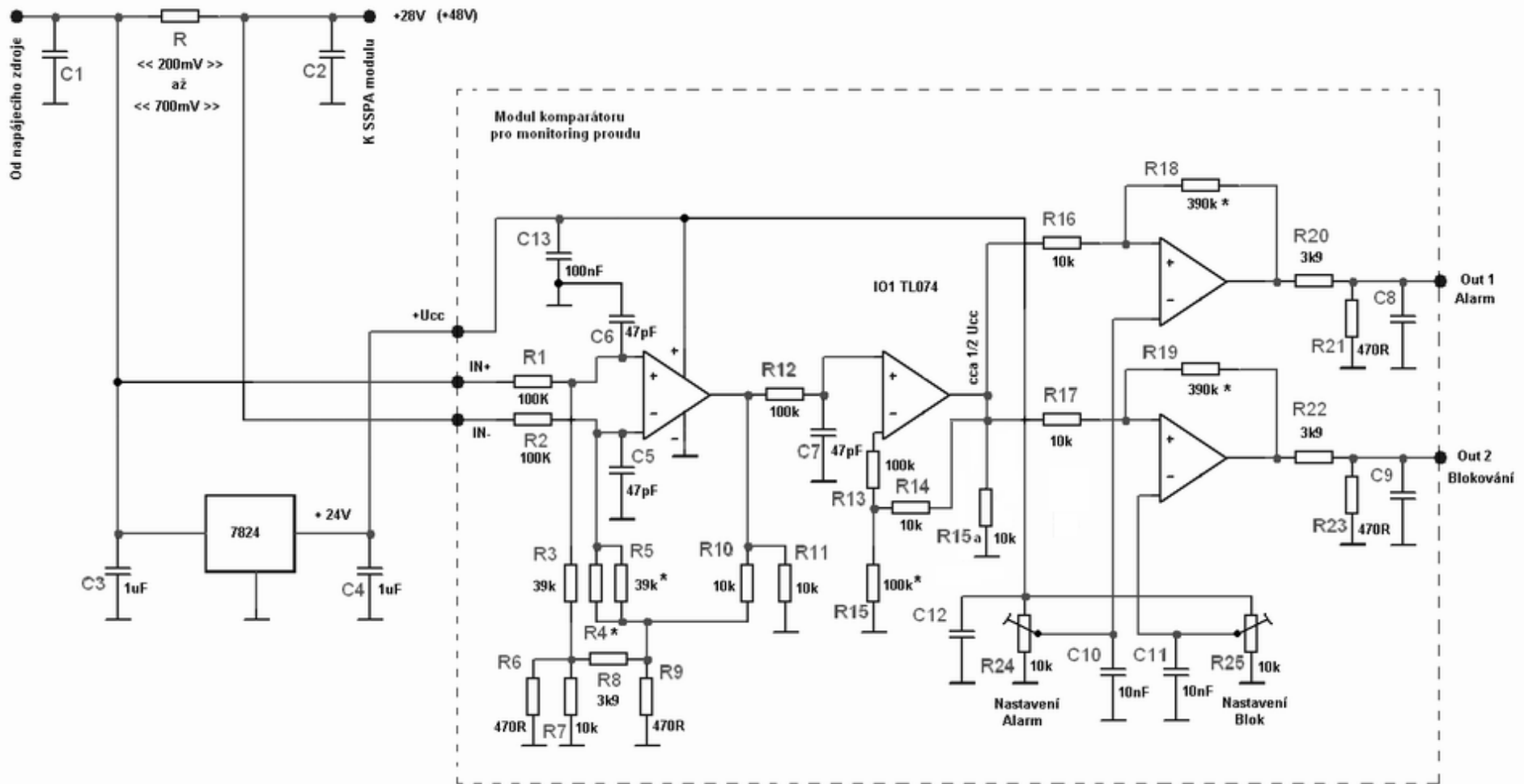
Ochrona przed nadmiernym prądem SSPA



SSPA często składa się z kilku modułów, których moc na wyjściu jest sumowana. W przypadku przesterowania lub niesymetrycznej pracy modułów czy też zbyt wysokiego SWR na wyjściu (np. na skutek uszkodzenia jednego z modułów), rośnie pobór prądu.

Aby uniknąć uszkodzenia tego modułu RF przez przeciążenie/przegrzanie tranzystora, wskazane jest aby monitorować prąd każdego modułu RF i w przypadku jego przekroczenia, włączyć układy zabezpieczeń i zasygnalizować ten stan. Prąd mierzy się w gałęzi zasilania poprzez pomiar spadku napięcia na rezystorze o oporności rzędu kilkudziesięciu miliomów.

www.ok2kkw.com/00003016/komparator/komparator_ipb.htm



Układ ten po przekroczeniu krytycznego prądu, spowoduje alarm i zablokuje PA zapobiegając jego uszkodzeniu. Wyjście doprowadzone jest do sekwensera i obwodu kontrolującego PA, ktorí w przypadku przekroczenia jakiegoś z limitów pracy, spowoduje zablokowanie PA na co najmniej 20s i da to do operatora znač.

Podsumowując – wzmacniacz SSPA powinien być wyposażony w następujące układy kontrolujące zapobiegające przekroczeniu:

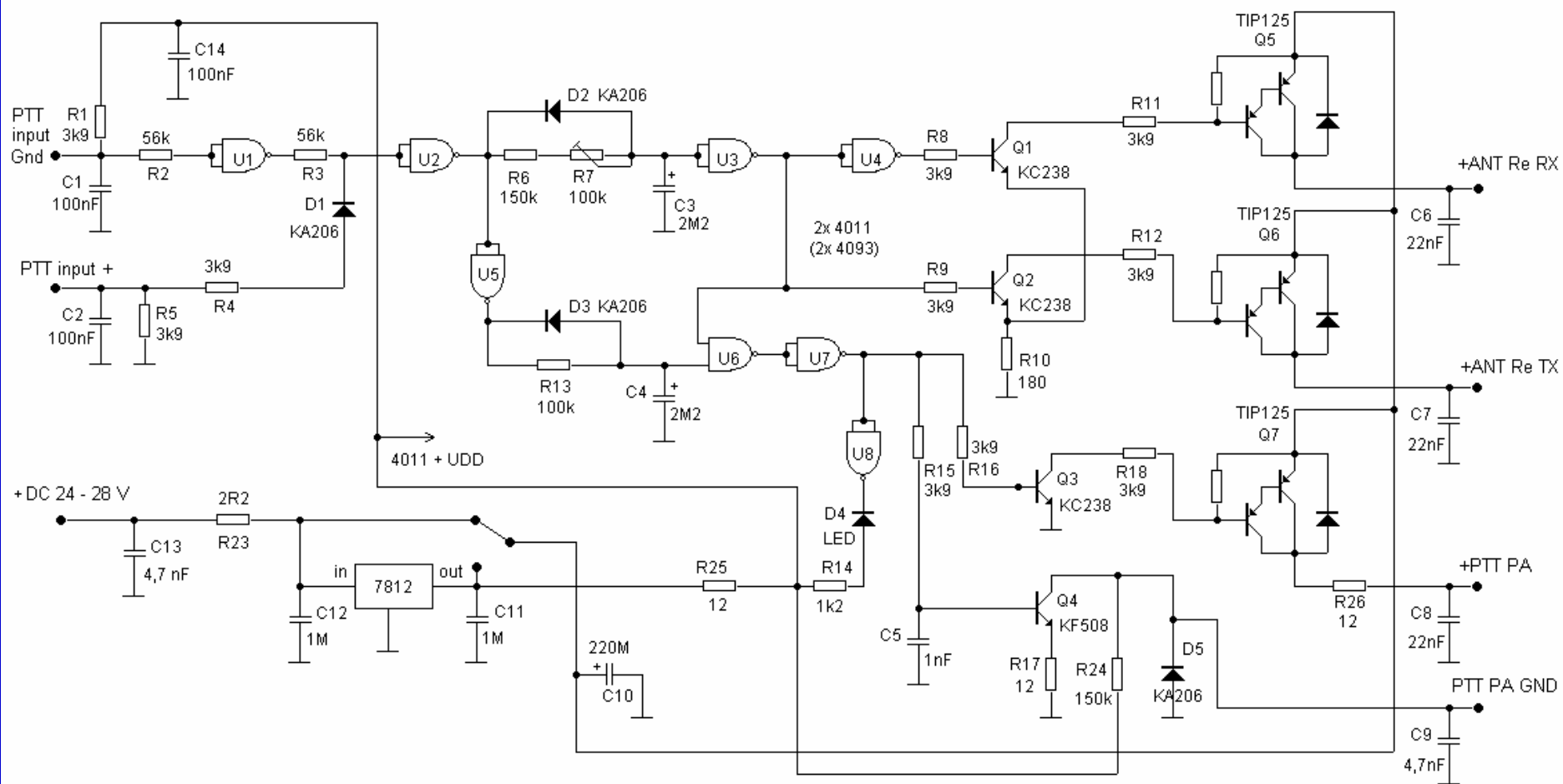
- maksymalnej dopuszczalnej temperatury
(**zabezpieczenie termiczne**)
- maksymalnej dopuszczalnej wartości mocy, wracającej do PA z powodu niedopasowania na wyjściu (**SWR Protection**)
- maksymalnego prądu zasilania każdego modułu
(**zabezpieczenie nadprądowe**),
- BEZWGLĘDNE ograniczenie maksymalnego wysterowania wejścia SSPA

Przy tych zabezpieczeniach prawdopodobieństwo uszkodzenia SSPA jest znacznie ograniczone. Dla osiągnięcia tego musimy skonstruować układ, zapewniający kontrolę nad całym PA.

A właściwe jest to **sekwencer**!

Sekwencer SSPA

- W każdym SSPA powinien być zainstalowany sekwenser, który uniemożliwia wadliwe przełączenie w układzie i zapewnia czas na ustabilizowanie się styków przekaźników. Jeśli taki sekwenser zbudowany jest na mikroprocesorze to powinien być umieszczony w pudełku ekranowanym, aby pole w.cz. nie powodowało jego fałszywej pracy.
- Sekwencer musi być w stanie obsługiwać przełączanie PA do nadawania (PTT PA TX), przekaźnik antenowy (wbudowany w PA oraz przy antenie zewnętrznej), przełączanie anteny przekaźniki aktywowane zarówno RX i TX, powinien współpracować z wejściem PTT o różnej polaryzacji).
- Szczególną jego rolą jest współpraca z układami SSPA !
- Kiedy, w stanie awaryjnym, wymagane jest blokowanie PA, powinien zachować stan przełączania anten ale zablokować nadawanie TX PTT w PA.
- www.ok2kkw.com/00003016/sequencer/sequencer.htm



SCHEMA ČASOVÉHO ŘADIČE / ZPOŽDOVAČE RX/TX PRO INSTALACI DO PA



I w końcu to co najważniejsze!

- SSPA zawsze powinien być zbudowany w modelu PA „z dwiema rurami wydechowymi”, czyli wskazane są rozdzielne porty dla RX i TX. Aby uniknąć wielu problemów w praktyce!
- Opcja "objazdowego" PA ze wspólnymi portami TX RX zawsze prędzej czy później doprowadzić może do uszkodzenia lub zniszczenia co najmniej LNA.
- Więcej na ten temat można znaleźć tutaj:
- www.ok2kkw.com/00003016/sequencer/schema_rele_pa_lna_3.gif
- www.ok2kkw.com/00003016/sequencer/trx_pa_lna.htm
- www.ok2kkw.com/00003016/sequencer/jednovyfuk.htm

Dziękuję bardzo za uwagę !

W przypadku zainteresowania konstrukcją proszę o wizytę na stronach OK2KKW.
Tam można znaleźć szczegółowy opis zabezpieczeń SSPA, oraz wiele więcej
artykułów o tematyce UKF.

W przypadku indywidualnych pytań proszę o e-mail na nasze adresy:

ok1vpz@seznam.cz lub do Macieja ok1teh@seznam.cz

Do usłyszenia na paśmie pod znakiem OK2A lub OK1TEH.

**PS: dziękuję bardzo za pomoc w tłumaczeniu,
które dla was zrobił Michał SP2IQW**

73 de OK1VPZ

- 27.7.2013: Přizpůsobovací obvod pro 70cm antény DK7ZB
- 26.12.2012: Jak bezpečně provozovat "jednovýfukový" VKV transceiver.
- 28.11.2012: Nebojte se konstrukce cívek pro VKV zařízení. Více.
- 11.11.2012: Konstrukce 23cm budiče [zde](#).
- 6.11.2012: Obvod pro plynulé řízení otáček chladicího ventilátoru [tady](#).
- 7.8.2012: Odbočovač výkonu a nastavitelný attenuátor pro budič 23cm PA [zde](#).
- 15.7.2012: Jak zabránit vypálení kontaktů relé při spínání stejnosměrného proudu [zde](#).
- 12.2.2012: Hybridní dělič / sdružovač pro malé 23cm PA [tady](#).
- 2.12.2011: Spínaný zdroj 13,8V / 10A pro budiče PA [zde](#).
- 17.6.2011: Malý 1W attenuátor až do pásma 23cm [tady](#).
- 10.4.2011: Pásmový (interdigitální) filtr pro 23cm [zde](#).
- 15.1.2011: Jednotka pro monitoring a ochranu polovodičového PA proti překročení povolené hodnoty napájecího proudu.
- 15.11.2010: Schematické zapojení sestavy TRX - PA - LNA - ANT, zaměřené na ochranu LNA před poškozením.
- 31.7.2010: Jednoduché detektory pro měření VF v tranzistorovém PA
- 17.7.2010: Mechanická konstrukce polovodičového PA 800W pro 70cm

Uzupełnienie od Michała SP2IQW

Dlaczego SSPA ?

Do niedawna cena tranzystorów mocy była tak wysoka, że wykluczała ich amatorskie zastosowanie, zwłaszcza w „minionej epoce” przy nieracjonalnych kursach dewiz. Dziś koszt 1W mocy wyjściowej w paśmie UHF z dawnych 2-3\$ spadł do 0,25\$/1W przy tranzystorze 1,25kW. Dostępne są kity do samodzielnego montażu takich PA jak również układów zabezpieczających co powoduje, że trafiają one „pod strzechy”.

Dodatkowo atrakcyjność SSPA podnosi niskie napięcie zasilania 28V czy 48V z dostępnością takich relatywnie tanich zasilaczy z wtórnego rynku telekomunikacyjnego.

Inne aspekty bezpieczeństwa SSPA

"przegazowanie wejścia"

Bardzo częstą przyczyną uszkodzeń SSPA w warunkach amatorskich jest podanie zbyt dużego poziomu w.cz. na wejście wzmacniacza.

Tranzystorom o $P_{ot}=1\text{kW}$ wystarczy kilka watów dla pełnego wystawienia (mają wzmocnienie nawet 26dB czyli 400 razy) a podanie na ich wejście np. 10W będzie skutkowało ich uszkodzeniem. A są to tranzystory kosztujące nawet ponad 200 USD.

W wielu transceiverach, nawet przy ustawionym niskim poziomie mocy wyjściowej, może w momencie załączania mocy w.cz., pojawić się zamiast 5W kilkadziesiąt W co natychmiast może skutkować zniszczeniem naszego SSPA.

Inne aspekty bezpieczeństwa SSPA

"przegazowanie wejścia - zabezpieczenie"

Aby niedopuszczyć do zniszczenia SSPA od wejścia stosuje się:

Pasywne tłumiki, które redukują maksymalny poziom mocy, jaki może pojawić się na wejściu SSPA, nawet kiedy TRX da nam 100W.

Kontrolę poziomu wejściowego i jego ograniczenie poprzez układ ALC czy też przełączenie na sztuczne obciążenie diodą PIN (*rozwiązanie F1TE*).

Kontrolę poziomu wejściowego z "trzymaniem" ALC na minimum i zezwolenie na kontrolowane i spowolnione narastanie ALC pod kontrolą sekwensera. Eliminuje to też piki mocy wynikające z niewłaściwie działającej automatyki w TRX-ie.

(W6PQL, implementacja SP2IQW).

Inne aspekty bezpieczeństwa SSPA

chłodzenie

W przypadku wzmacniaczy QRO, z racji bardzo dużych gęstości mocy i małej powierzchni styku tranzystora nie da się odprowadzić mocy traconej w tranzystorze poprzez jego bezpośrednie przykręcenie do radiatora aluminiowego. Dlatego stosuje się pośredni element istotnie lepiej rozprowadzający ciepło w postaci płyty miedzianej oraz specjalnych sposobów łączenia tego wszystkiego razem dla zoptymalizowania odprowadzania ciepła.

Należy pamiętać o bardzo istotnym aspekcie jakim jest gładkość powierzchni tranzystora i radiatora bezpośredni z nim związanego. Minimalna nierównomierność drastycznie pogarsza przewodnictwo cieplne w czym najlepsza pasta termiczna nie pomoże !

Inne aspekty bezpieczeństwa SSPA

chłodzenie c.d.

Największe (mocowo) tranzystory można bezpośrednio (z zachowaniem uwagi do gładkości obu powierzchni) montować na pastę lutowniczą stosowaną przy montażu elementów SMD ale uwaga – nie może być to bezołowiowa (ze względu na istotnie większą temperaturę przetapiania)

Stosuje się też bardzo cienkie przekładki z bardzo plastycznych i dobrze przewodzących ciepło stopów indu z galem.

Przećwiczony został też montaż z zastosowaniem takiego stopu, który jest płynny w temperaturze pokojowej (specjaliści od podkręcania PC stosują go pod nazwą LiquidPro). To rozwiązanie jest w trakcie konsultowania z f-ą Freescale.

Inne aspekty bezpieczeństwa SSPA

komensacja temperaturowa

Charakterystyki tranzystorów LD-MOS, podobnie jak wszystkich półprzewodników, zmieniają się w funkcji temperatury i bez uwzględnienia tego czynnika nie można zapewnić bezpiecznej pracy wzmacniacza SSPA.

Najważniejszym czynnikiem jest stabilizacja spoczynkowego prądu drenu I_{DQ} . Dla liniowej pracy wymagany jest często rzędu 250mA do 2A a to przy 48V oznacza już moc start do 100W i w konsekwencji samonagrzewanie się. Przy stałym napięciu polaryzacji bramki prąd ten rośnie ze wzrostem temperatury. Dlatego niezbędne jest wprowadzenie do układu polaryzacji kompensacji i temperaturowej, w zależności od typu jest o ok. - 2mV/°C. Ważnym jest pomiar temperatury jak najbliżej jego złącza!

Realizacja kontrolera SSPA wg SP2IQW

Autor tego tekstu opracował i wykorzystuje kontroler wzmacniacza SSPA (ex. telewizyjny moduł Harrisa 400W). Moduł ten był już wyposażony w układ polaryzacji z kompensacją temperaturową.

W przygotowaniu jest rozszerzony kontroler łączący praktycznie wszystkie funkcje sekwensera, pomiaru temperatury, kompensacji termicznej, kontroli chłodzenia, pomiar refleksyjny mocy wejściowej, wyjściowej (z kontrolą SWR), sterowanie ALC (z jego opóźnionym startem), nadzoru napięcia i prądu (odcinanie prądu spoczynkowego w spoczynku) i wiele innych układów zabezpieczających.