

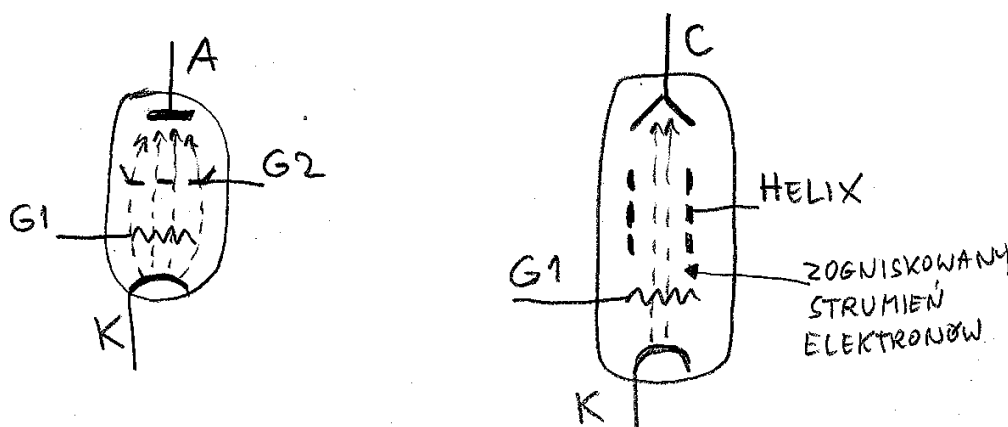
Testowanie Lamp z Fala Bieżącą – LFB - Traveling Wave Tube TWT

Paul Paweł Chomiński WA6PY

Struktura TWT

Na początek wyjaśnijmy jak działa TWT poprzez analogie i różnice pomiędzy klasyczną lampą radiową, a TWT.

Przepływ elektronów i działanie TWT może być wyjaśnione poprzez porównanie z **tetrodą**.



Rys.1. Porównanie TWT z tetrodą pod względem przepływu elektronów.

W **tetrodzie** strumień elektronów emitowany przez *katodę* płynie w kierunku dodatnio spolaryzowanych elektrod **G2** (*siatki drugiej*) i *anody*. Prąd jest regulowany za pomocą potencjału **G1** (*siatki pierwszej*) w stosunku do katody. Regulacja prądu jest wykorzystana do uzyskania wzmocnienia sygnału sterującego w lampie.

Mała część strumienia elektronów czyli prądu *katody* jest wychwytywana przez **G2**.

W TWT strumień elektronów emitowany przez *katodę* płynie w kierunku **C** (*kolektora*), który ma za zadanie podobnie jak *anoda* w *tetrodzie* zebrać elektrony. *Helix* jest spolaryzowany dodatnio i ma za zadanie przyspieszanie prędkości elektronów. Strumień elektronów musi być zogniskowany tak, aby elektrony nie były wychwytywane przez *helix* tylko docierały do **C**. Podobnie jak w *tetrodzie* **G1** służy do regulacji prądu strumienia elektronów. Wartość prądu jest ustawiona na stałe. Wzmocnienie sygnału uzyskuje się na skutek modulacji prędkości strumienia elektronów w obrębie struktury *helixa* za pomocą pola elektromagnetycznego wytwarzanego przez *helix*.

W TWT w obszarze pomiędzy *katodą*, **G1** i *helixem* następuje ogniskowanie strumienia elektronów tak, aby przelatując przez stosunkowo długą strukturę *helixa* nie był przechwytywany przez *helix*. Dodatkowo naokoło *helixa* znajdują się koncentrycznie ułożone magnesy ogniskujące i przyspieszające strumień elektronów.

W tetrodach *katoda* z reguły znajduje się na masie, natomiast *anoda* i **G2** są spolaryzowane wysokim dodatnim napięciem.

W przypadku TWT i innych podobnych lamp mikrofalowych jak *klistrony* czy *magnetrony*, elektroda związana z przepływem energii w.cz. jest uziemiona. *Katoda* musi być zatem zasilana ujemnym wysokim napięciem. W przypadku TWT mniejszej mocy jest to 3 do 5kV, a w przypadku TWT większej mocy oraz dla wyższych częstotliwości może dochodzić do 25 kV.

Najwyższy potencjał istnieje pomiędzy *katodą* a *helixem*. *Kolektor* ma najczęściej połowę tego potencjału. Konstruktorzy TWT starają się pracować z jak najniższym napięciem **C** względem *katody*, dlatego, że cała moc strumienia elektronów jest wytracana na ciepło w **C(kolektorze)**.

W lampach większej mocy stosuje się dwa lub nawet trzy *kolektory* ze stopniowaniem napięć tak, aby stopniowo wyhamowywać prędkość strumienia elektronów w obrębie struktury kolektorów i zbierać największy prąd w kolektorze o najniższym potencjale. W ten sposób uzyskuje się najmniejszą moc wytracaną na ciepło i największą sprawność energetyczną TWT. Pojedynczy *kolektor* spowodowałby wzrost prądu *helixa* na skutek wytrącania elektronów z *kolektora* do *helixa*, który jest o wyższym dodatnim potencjale. Dodatkowy *kolektor* po drodze przechwytyuje te elektrony. Można to w pewnym sensie porównać do tłumienia efektu “dynatronowego” w **tetrodach** za pomocą *siatki trzeciej* w **pentodzie**.

Testowanie nieznanej TWT

Marko Cebokli – S57UUU [3] proponuje testowanie lampy za pomocą zasilacza impulsowego. Zaletą tej metody jest mała moc wytracana w lampie. Wymagane jest zbudowanie specjalnego zasilacza wytwarzającego impulsy.

Tester można rozbudować stosując oddzielny zasilacz do *kolektorów* o niższym napięciu. Wtedy moc wytracana w opornikach redukcyjnych *kolektorów* będzie mniejsza.

Hand-drawn schematic diagram of a vacuum tube radio receiver circuit, specifically a Helix Protection 900. The circuit includes a power supply section with a 12-12 transformer, a Helix Protection 900 unit, a 900 Helix Board, a BLUE BOX, and a power regulator section with a 200 Regulator and a 300 Modulator. The circuit is powered by a 12-12 transformer and a 12-12 transformer. The output is connected to a speaker. The circuit is labeled with various components and their ratings, including a 1K resistor, a 69.8Ω resistor, a 2600V Helix, a 2000V Vc1, a 400V Vc2, a 130mA Imax, and a 5000V OV. The circuit is also labeled with 'DSUB-25 PM8', 'pin 1', 'pin 8', 'pin 9', 'pin 10', 'pin 11', 'pin 12', 'pin 13', 'pin 14', 'pin 15', 'pin 16', 'pin 17', 'pin 18', 'pin 19', 'pin 20', 'pin 21', 'pin 22', 'pin 23', 'pin 24', 'pin 25'.

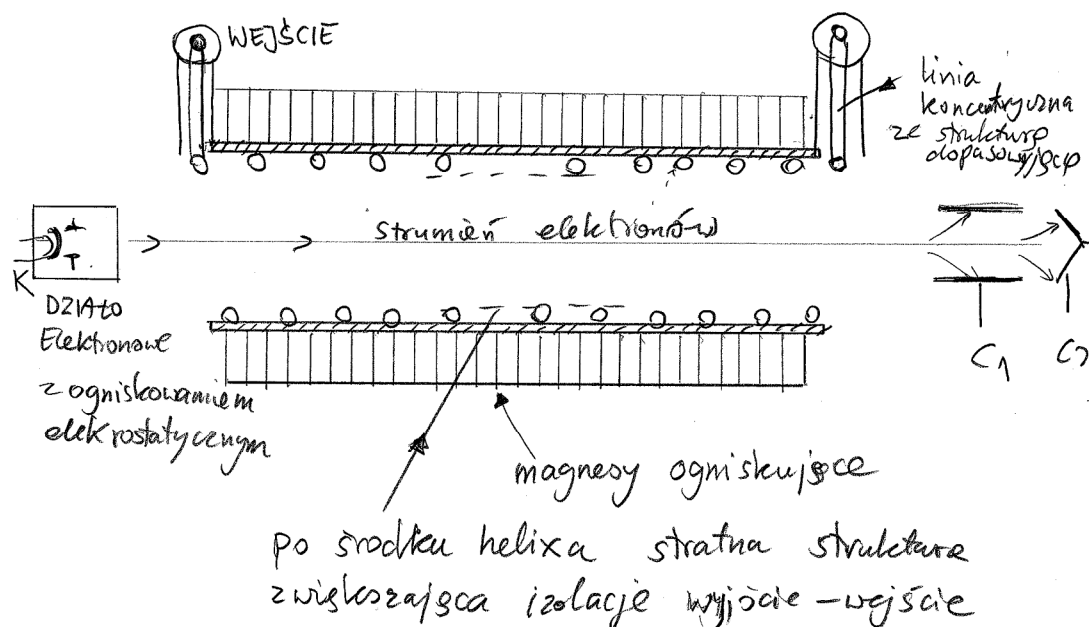
Rys.3. Przykład zasilania TWT Siemens RW1127 z zasilacza RWN322

Praktyczne eksperymenty - Co zrobiłem z nieznaną mi lampą?

Ja miałem w ręku lampę, która miała 5 drutów z jednej strony. Przyjąłem, że są one od strony wejścia SMA *helixa*. Dwie z nich powinny być połączone razem. **Rzadko żarzenie jest oddzielone od katody**. Trochę trudno określić, który drut to katoda + żarzenie, a który samo żarzenie. Na początek nie ma to znaczenia. Później można to rozpoznać po zwiększaniu się napięcia żarzenia na skutek przyrostu prądu strumienia elektronów. **Najpierw podłączyłem 5V żarzenia i mierząc woltomierzem sprawdziłem na którym drucie powstaje największe ujemne napięcie**. Ta elektroda jest siatką sterującą prądem lampy G1(G2). Trzeba pamiętać, że oprócz ogniskowania magnesami, TWT ma soczewki elektrostatyczne ogniskujące polem elektrycznym i w tym bierze udział G1(G2), a czasami napięcie z kolektora. W niektórych lampach są dwie siatki, G1 i G2. Niektóre firmy np: Thompson nazywa G1 Anodą. Dla żarzenia 5V nie było w zasadzie ujemnego napięcia, dlatego podniosłem napięcie do 6V. Teraz potrzebny jest regulowany zasilacz wysokiego napięcia o prądzie do 100mA lub nawet mniej. Najlepiej włączyć jakieś oporniki obciążające C1 i C2 w celu ograniczenia prądu i zmniejszenia mocy wydzielanej w wewnętrznych kolektorach. *Helix* trzeba obciążyć z obu stron na 50 Ohm, niektóre lampy mogą się wzbudzić. Na początek potencjometr G1(G2) ustawić tak, aby G1(G2) względem katody było małe np; 5% całego napięcia. **Nie należy zwierać potencjometru do katody**, bo ujemny prąd G1(G2) generowany przez strumień elektronów może spalić tą część potencjometru ! **Pewniej jest włączyć opornik np; 100 K** pomiędzy G1(G2) a ślizgacz potencjometru. Teraz "wariakiem" zwiększyć napięcie *helixa* np; do 2kV, obserwując, żeby I_{helix} nie przekroczył **0,5mA**. Jeżeli dalej przy $U_h = 2kV$ nie ma prądu *helixa* ani prądów C1 i C2, to należy zwiększać dodatnie napięcie UG1(UG2), aż do uzyskania prądów w lampie. Zależnie od konstrukcji lampy UG1(UG2) może być w zakresie 300 V do 90% U_{helixa} . Kolejno zwiększamy U_{helixa} i regulujemy UG1(UG2), może być konieczność dobierania różnych oporników RC1 i RC2, aby nie przegrzewać lampy oraz dobierać ogniskowanie i prędkość strumienia elektronów. Dobrze zogniskowany strumień objawia się małym I_{helixa} . Zbyt małe UC1 lub UC2 spowoduje wzrost I_{helix} dlatego, że część elektronów będzie zawracać z kolektora do *helixa*. Gdy uda się nam dobrać warunki pracy strumienia elektronów takie aby np. I_{helix} był poniżej 0.5mA (nie znamy lampy i nie wiemy ile wytrzyma) i prąd katody czyli $IC1 + IC2 = 20 - 30mA$, to możemy zacząć sprawdzać na jakiej częstotliwości lampa ma wzmocnienie. Trzeba pamiętać, że zwiększając napięcie *helixa*, obniżamy częstotliwość pracy lampy i odwrotnie, zmniejszając U_{helixa} zwiększamy częstotliwość. Wyduszenie maximum mocy to kolejna seria eksperymentów ze zwiększaniem napięć i prądu katody, **dbając o to aby nie przeciążyć helixa !!** Lampa, z którą eksperymentowałem była zoptymalizowana na 8,4 GHz, udawało mi się ją przeciągnąć napięciami + 1 GHz, na drugiej harmonicznej ok. 17 GHz miała też dość duże wzmocnienie ok 30dB, ale nie oddawała zbyt dużo mocy. O ile pamiętam na 8,4 GHz dostawałem ok 10W, a na 17 GHz ok 1W. Być może mógłbym zrobić podobną operację jak koledzy robią z RW1127 dla 24 GHz, ale zakres częstotliwości był za bardzo z boku od 10.4 GHz, żeby tracić na to czas. Być może ta lampa mogłaby pracować na 3-ciej harmonicznej, ale tego nie sprawdzałem. TWT zawsze wymaga zabezpieczeń przed przeciążeniem zwłaszcza I_{helix} . Napięcie *helixa* musi być dość dokładnie stabilizowane, pozostałe niekoniecznie. Od napięć zależy prędkość elektronów, która musi być zsynchronizowana ze skokiem *helixa* i częstotliwością pracy. Była seria TWT pracujących jako wzmacniacz wejściowy w radarach morskich montowanych na statkach na pasmo X od 7 do 10 GHz lub 8,2 do 12,4 GHz. Mam nadzieję, że moje wyjaśnienia coś pomogą.

jest bardzo delikatna i prąd musi być bardzo mały, w większości lamp małej mocy do 50W prąd *helixa* ograniczony jest do kilku mA. Dla napięcia $U_h = 5\text{kV}$ i prądu $I_h = 2\text{mA}$, wytracamy w delikatnej strukturze *helixa* 10W!

Bez sygnału w.cz. prąd *helixa* jest niewielki, ale przy sterowaniu większą mocą wyjściową energia odbierana przez *helix* spowalnia strumień elektronów co powoduje rozogniskowanie i wzrost prądu *helixa*. W prosty sposób można to wytłumaczyć prawem zachowania energii.



Rys.5 Schematyczna struktura *helixa*. Helix jest linią transmisyjną dopasowaną impedancyjnie. Z reguły Z_0 *helixa* jest większa od 50 Ohm i dlatego podłączenia po portów koncentrycznych zawierają element dopasowujący.

Lampy mniejszej mocy, szczególnie starego typu posiadają tylko jeden kolektor zbierający elektrony. Napięcia na kolektorze jednym lub kilku jest niższe od napięcia na *helixie*. Strumień elektronów po opuszczeniu struktury *helixa* nie musi już być zogniskowany. Zmniejszając napięcie C1 i C2 względem *katody*, zmniejszamy moc wydzielaną na ciepło w lampie. Dzięki temu również powiększa się sprawność energetyczna lampy.

Lampy ze strukturą typu *helix* mogą być konstruowane jako szerokopasmowe. Generalnie największe wzmocnienie uzyskuje się dla skoku *helixa* = 4 zwoje na długość fali.

Ważne jest dobre dopasowanie wejścia i wyjścia TWT. Szczególnie dopasowanie wyjścia może mieć istotny wpływ na stabilność wzmacniacza. Fala odbita powoduje modulację strumienia elektronów w takim stopniu, że mogą zostać spełnione warunki konieczne do powstania oscylacji.

Fala odbita od wyjścia powoduje zafalowanie (*ripple*) charakterystyki częstotliwościowej TWT. Zależnie od częstotliwości, czyli długości fali zmienia się faza sygnału odbitego i następuje dodawanie lub odejmowanie się sygnału odbitego do sterującego.

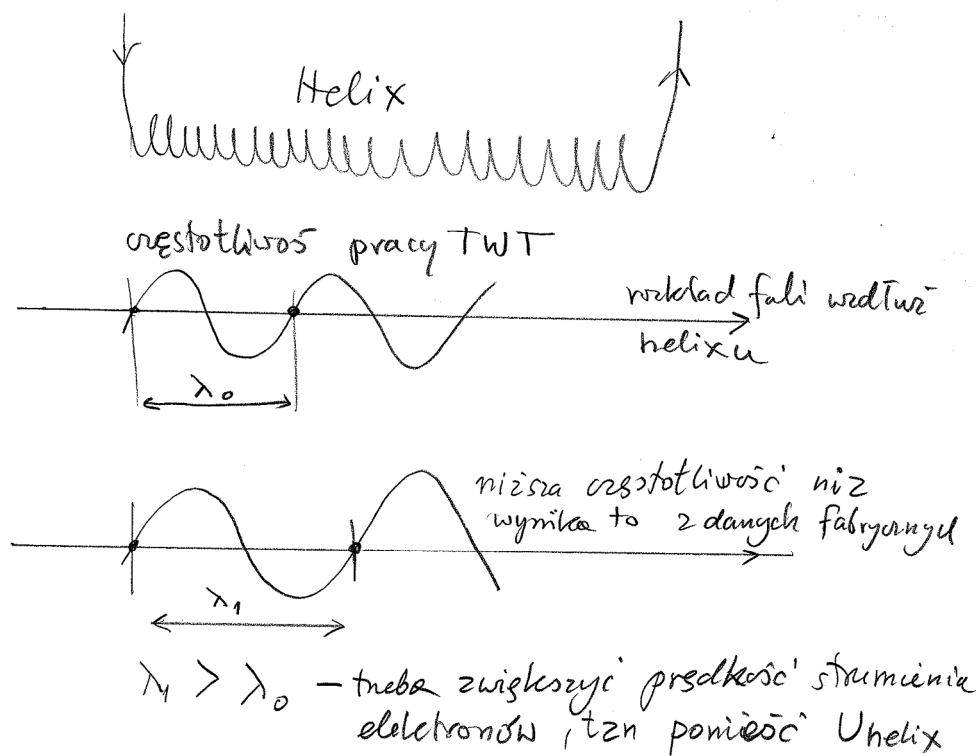
Z reguły struktura *helixa* jest bardzo delikatna i powoduje ograniczenie mocy lampy ze względu na ograniczenie prądu DC przez *helix*. *Helix* jest najczęściej wykonany z wolframu (*tungstein*) mocowanego do ścianek rury linii helikalnej za pomocą wsporników dielektrycznych dobrze odprowadzających ciepło. Jednym z materiałów jest **Be₂O**, a innym najlepiej odprowadzającym ciepło stosowanym materiałem jest **diamant**.

Jednym z parametrów pracy lampy, którego nie należy przekroczyć jest maksymalny prąd *helixa* I_h .

Lampy ze strukturą typu “*folded waveguide*” mają ograniczone pasmo ze względu na częstotliwości przenoszenia falowodu, ale w zamian można uzyskać większą moc. TWT bardzo dużej mocy mają strukturę spowalniającą fale zbudowaną ze sprzężonych rezonatorów.

Napięcia ogniskujące i przyspieszające strumień elektronów muszą być dokładnie stabilizowane. Współczesne zasilacze do TWT są zbudowane w oparciu o techniki “Switching Power Supply” z bardzo dokładną stabilizacją napięć oraz zabezpieczeniami przed przeciążeniem. Lampy na pasmo K i wyżej wymagają często napięć powyżej 12 kV dochodzących do 24kV. Strumień elektronów może być przyspieszony do 0,25 prędkości światła i w takiej TWT zaczynają zachodzić “*zjawiska relatywistyczne*”.

Lampy zaprojektowane na dany zakres częstotliwości można w pewnym zakresie “*przestroić*” nieco w dół lub w górę. Jeżeli chcemy użyć TWT zaprojektowaną na wyższą częstotliwość do pracy na niższych częstotliwościach, należy podnieść napięcie *helixa*. Jest to na pierwszy rzut oka przeciwne intuicji, jednak chodzi o to, że długość fali w *helixie* dla niższych częstotliwości będzie większa i w związku z tym należy przyspieszyć strumień elektronów, aby pokonał dłuższą drogę w tym samym czasie.



Rys.6. Długość fali i prędkość strumienia elektronów

TWT mogą pracować na częstotliwościach harmonicznym, natomiast nie będą pracować na podharmonicznych. Np RW 85 zaprojektowana na pasmo 6,4-7,1 GHz nie będzie pracować w paśmie 3,4 GHz, będzie natomiast bardzo sprawnym podwajaczem częstotliwości i przy sterowaniu na 3,4 GHz uzyskamy pełną moc na 6,8 GHz.

Popularne TWT stosowane dla pasm amatorskich.

5,76 GHz

Siemens RW85, 6.425-7.125 GHz i Pout 22W. $U_{helix} = 3250 \pm 0.5\%$ pojedynczy C
RW289 5.9 -7.125 GHz $U_h = 4000V$ Pout 10W C1, C2

10,4 GHz - wszystkie TWT poniżej mają C1 i C2

Siemens RW 1125 10.7-11.7 GHz U_h 3150-3250V Pout=22W

RW 1125G 10.7-13.25 GHz U_h 3200V Pout=20W

RW 1127, 11.7-13.25 GHz U_h 5000V Pout=5W

RW 1136, 10.7-11.7 GHz $U_h = 3250V$ $P_{out}=8W$
RW 2135 10.7-11.7 GHz $U_h = 5100V$ $P_{out}=10W$

Thomson TH 3631, 3631C, 3631W 10.7-11.7 GHz $U_h = 3750V$ $P_{out}=20W$

Lampa **RW85** należy do starego typu z pojedynczym **kolektorem**. Z tego względu ma ograniczenie mocy wydzielanej wewnątrz lampy. Lampa była zaprojektowana na pasmo 6.425-7.125 GHz i P_{out} 22W. $U_{helix} = 3250 \pm 0.5\%$

W pasmie 5,76 GHz dla katalogowych wartości napięć i prądów maksymalna moc wynosi 15 W. Zwiększając napięcie U_h do 3,585 kV można uzyskać 26W out. Jednocześnie stosuje się poprawę ogniskowania za pomocą zewnętrznych magnesów, aby nie przekroczyć I_h max.

RW298 jest lepsza do pracy w pasmie 5,76 GHz, należy tylko nieco podnieść napięcie *helixa*, aby przestroić lampę na niższą częstotliwość i zezwolić na przeciążenie C1. Wtedy możemy uzyskać 30-40W out

Standardowy zasilacz Siemens'a RWN322 posiada wszystkie zabezpieczenia.

Lampy z serii **RW1127, 1136, 2135** mają podane katalogowo stosunkowo niską moc wyjściową – 5W do 10W

Wynika to z wymaganej dużej liniowości wzmacniacza do potrzeb cyfrowej modulacji QAM wymagającej bardzo dobrej liniowości i duży stosunek mocy szczytowej do średniej. W warunkach amatorskich dla pracy CW wymagania na liniowość są bardzo małe, moc jest jedynie ograniczona nasyceniem lampy. Podobnie jest też dla pracy FM. Dla SSB wystarczającym kryterium będzie IMD3 < -25dBc, na mikrofalach raczej rzadko będziemy powodować "splatter" przeszkadzający innym.

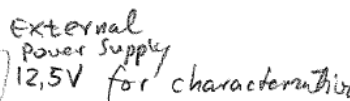
Rodzina tych lamp posiada dwa *kolektory* C1 i C2. W nowocześniejszych zasilaczach prądy kolektorów są monitorowane i w przypadku przeciążenia zasilacz odcina zasilanie WN do lampy. *Kolektory* są wykonane jako cienkie cylindry wolframowe bez dużych możliwości odprowadzenia mocy – podobnie jak anody w małych lampach radiowych.

Okazuje się, że dla tej rodziny lamp główne ograniczenie mocy wyjściowej wynika ze wzrostu prądu C1, a nie I_h . Niektórzy amatorzy zalecają całkowite odłączenie zabezpieczenia przed przeciążeniem C1. Jest to trochę ryzykowne.

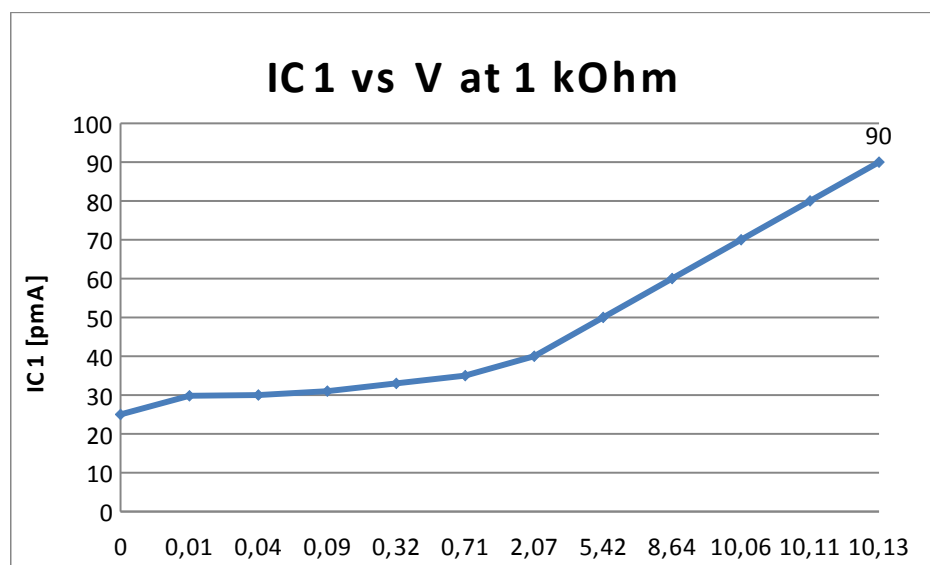
Ja w dalszym ciągu stosuję ograniczenie, ale dopuszczam dużo wyższy poziom prądu. Rekomendował bym przynajmniej monitorowanie tego prądu.

Na częstotliwości 10,4 GHz można uzyskać 30-40W, a rekordziści nawet do 80W, ale żywot lamp tej serii przeciążonej ponad 40W out jest raczej krótki.

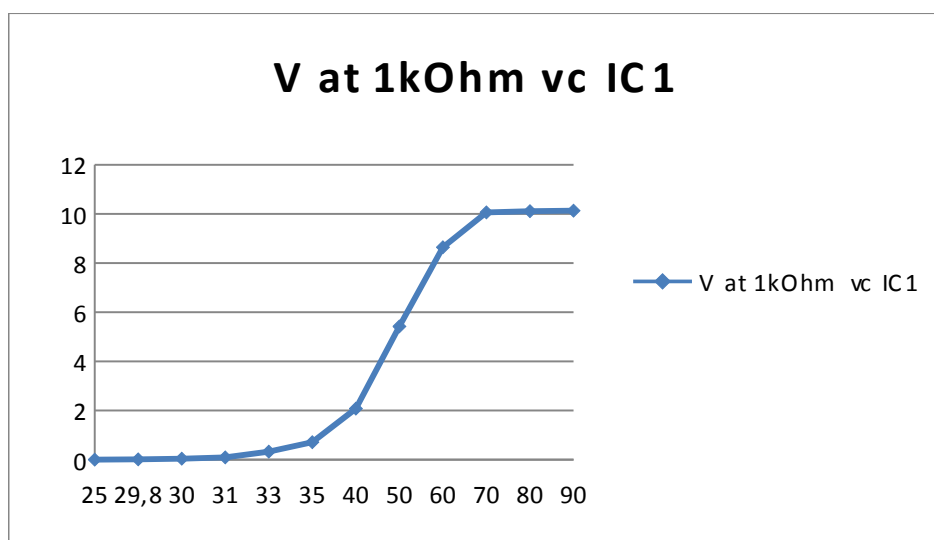
3/31/2013



Rys.7. Wykorzystanie zabezpieczenia przed IC1_max w zasilaczu RWN322 do monitorowania (pomiaru) prądu kolektora IC1



Rys 8. Kalibrowanie opto-izolatora do pomiaru prądu *kolektora* - IC1



Rys 9. Wartość prądu *kolektora* na podstawie pomiaru napięcia opto-izolatora

Podsumowanie

Zasilanie TWT do celów amatorskich nie jest tak bardzo skomplikowane jak by to się wydawało na pierwszy rzut oka. Konieczne jest zabezpieczenie przed zbyt dużym prądem *Helixa* i stabilizowanie napięcia *Helixa*. Pozostałe napięcia nie muszą być stabilizowane.

Literatura:

1. Jan Hennel, "Lampy Mikrofalowe", WNT Warszawa 1976

2. A.S. Glimour "Klystrons, Traveling Wave Tubes, Magnetrons, Cross-Field Amplifiers", Gyrotrons, Artech House Microwave Library

3. Marko Cebokli – S57UUU "A Simpleter TWT Tester" 10th International Amateur Radio Moon-Bounce Conference, Prague, Czech Republic August 2002 p-p 63-68

4. Gerald Williamson K5GW & Al Ward W5LUA "Homebrew TWT Power Supplies" EME Conference Dallas Texas August 2010,

