
Ontwerp en bouw van een 300 W MOSFET push-pull vermogenversterker voor 144 MHz (deel 3)

Conception et construction d'un amplificateur push-pull de 300 W à MOSFET pour 144 MHz (3ième partie)

Door/par Gaëtan Horlin, ON4KHG

Vertaling/traduction: ON4LP

5.2. De bewakingsschakeling

De schakeling op deze kaart bewaakt en beveiligt de versterker en is opgesteld op een geperforeerde plaat met gaten in een matrix van 2,54 mm. Zodra S1 (voorpaneel) op 'ON' staat en S2 (voorpaneel) op 'Operate', is de versterker gereed voor gebruik. Wanneer de PTT-input (voorpaneel) aan massa wordt gelegd, gaat de versterker naar TX-mode. Dit wordt op het voorpaneel aangeduid door de rode LED D5A. De versterker schakelt vertraagd om te beletten dat de coaxrelais zouden schakelen tijdens het zenden. RV2 samen met C7 veroorzaken immers een tijdsvertraging zodat de instelspanning van de transistoren pas aangelegd wordt nadat de

5.2. Carte de Contrôle

Cette carte supervise l'amplificateur. Elle a été montée sur une carte perforée au pas de 2,54 mm (1 e). Dès que S1 (face avant) est mis sur "ON" et S2 (face avant) sur "Operate", l'amplificateur est prêt à fonctionner. Lorsque l'entrée PTT (face avant) est mise à la masse, l'amplificateur passe en mode TX; c'est indiqué par l'illumination de la LED rouge D5A sur la face avant.

L'amplificateur est séquencé afin d'éviter une commutation "chaude" des relais coaxiaux. En effet, RV2 et C7 introduisent un délai tel que la polarisation soit appliquée APRES que les relais coaxiaux K1 & K2

coaxrelais K1 en K2 (HF-opstelling) naar TX zijn geschakeld (normaal open positie van de coaxrelais). De groene LED D6 op het voorpaneel licht op in RX.

De uitgangsspanning van de directionele koppelaar (LPF PCB) krijgt zijn vormgeving in de operationele versterker IC2A en IC2D om de thyristor TH1 te triggeren. Dit is het hart van de VSWR-beveiliging. RV3 stelt de beveiligingsgrens in. Eens in beveiliging, wordt de instelspanning (bias) van de transistoren afgeschakeld en de coaxrelais naar de normaal gesloten (NC) positie (RX mode) gebracht. De versterker blijft op veilig tot de 'Reset' knop op het voorpaneel wordt ingedrukt (nadat de oorzaak van de fout in de antenneleiding is hersteld).

IC2B versterkt de spanning afgeleid uit het rechtstreeks vermogen via de directionele koppelaar. Deze spanning is evenredig met het uitgangsvermogen en zou kunnen gebruikt worden voor een paneelmeter. Om vanop afstand de goede werking van de versterker in het oog te houden werd in de plaats een 'Monitor'-uitgang op het voorpaneel geplaatst. De normale werking wordt in de shack gecontroleerd door middel van een LED waarvan de oplichting evenredig is met het uitgangsvermogen. De shack bevindt zich op 50 m afstand van de versterker. Er kan natuurlijk een voltmeter worden gebruikt in de plaats van de LED. RV4 stelt de maximumspanning in op de 'Monitor'-uitgang.

Indien de versterker in beveiliging gaat door een slechte VSWR, schakelt het relais K1 zodat de monitorspanning naar hoog gaat tot de 'Reset'-knop wordt ingedrukt. Dit zou kunnen dienen om een alarm te activeren, maar in dit geval licht de monitor-LED maximaal op.

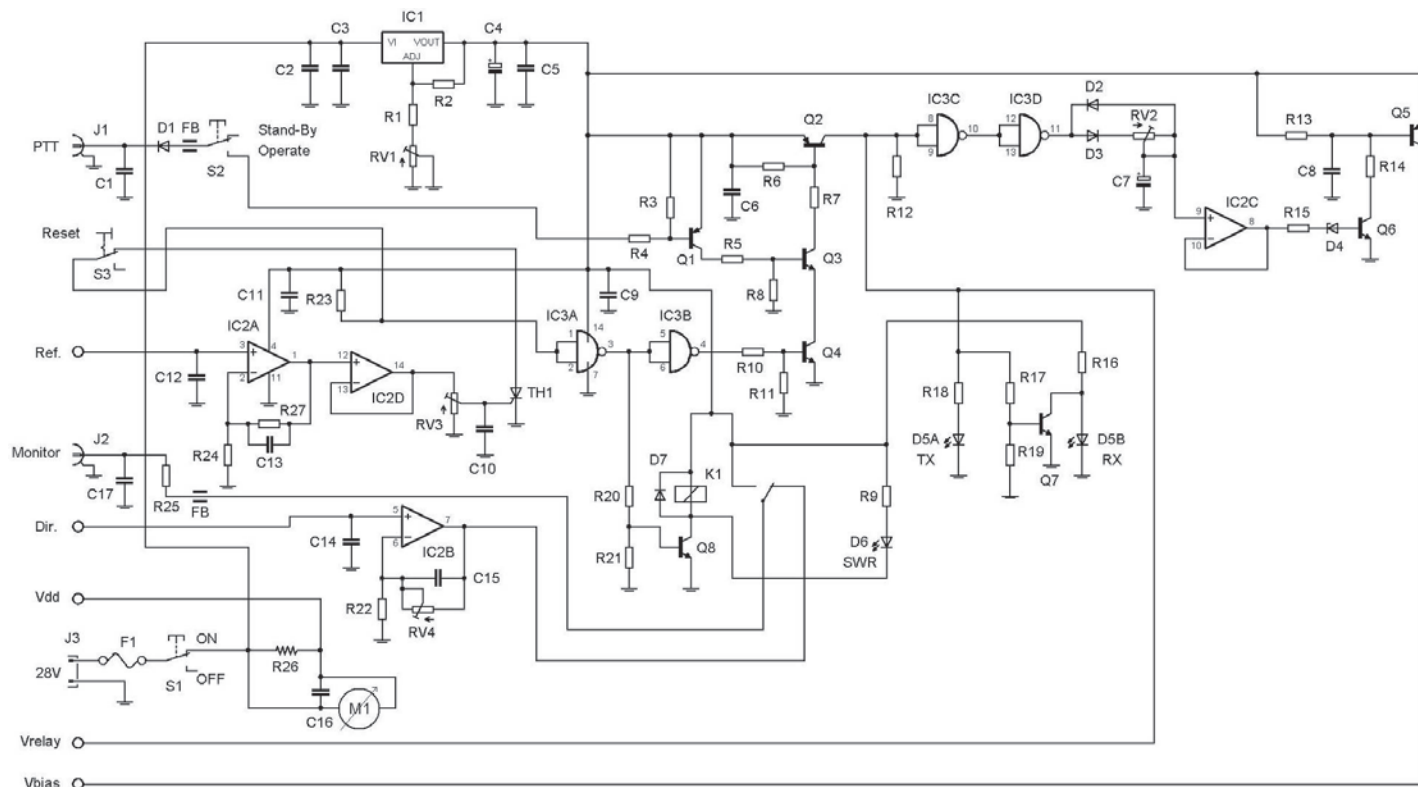
De VSWR-beveiliging is onontbeerlijk. De transistor kan weerstaan aan een VSWR 5:1, maar bij kortgesloten of open lijn wordt de VSWR oneindig...

R26 is een shuntweerstand (75 mV bij 30 A) die de drainstroom van de transistor(en) aanduidt op de meter M1 (voorpaneel).

Het schema van de bewakingsschakeling werd getekend met de EAGLE Light Edition [7].

5.2.1 Schema van de bewakingsskaart

Fig. 27 Bewakingsschakeling / Fig. 27 Schéma de la carte de contrôle



(carte RF) aient commuté en TX (position "Normally Open"). En RX, la LED verte D5B sur la face avant est illuminée.

Les Amplificateurs Opérationnels IC2A et IC2D mettent en forme la tension issue du coupleur directionnel (PCB LPF) et relative à la puissance réfléchi, afin de commander le thyristor TH1, cœur du circuit de protection VSWR. RV3 détermine le seuil VSWR à partir duquel l'amplificateur passe en protection. En mode protection, la polarisation n'est plus appliquée au transistor et les relais coaxiaux repassent en position "Normally Closed" (mode RX). L'amplificateur reste en mode protection jusqu'à ce que le bouton poussoir "Reset" (face avant) soit pressé (après que le défaut dans la ligne d'antenne ait été identifié et réparé).

IC2B amplifie la tension proportionnelle à la puissance directe et prélevée par le coupleur directionnel. Cette tension, image de la puissance de sortie, pourrait être affichée sur le Vu-mètre de la face avant mais, à la place, j'ai opté pour une sortie "Monitor" sur la face avant. Ainsi, le fonctionnement correct de l'amplificateur peut être supervisé à distance (soit dans le shack, distant de 50 m de l'endroit où est installé l'amplificateur) au moyen d'une diode LED (non montrée sur les schémas) dont l'intensité lumineuse varie en fonction de la puissance RF de sortie. Au lieu d'une LED, un (Volt)-mètre peut évidemment être employé également. RV4 détermine la tension maximum sur la sortie "Monitor".

Si en raison d'un mauvais VSWR l'amplificateur passe en protection, le relais K1 commute, de manière à ce que la tension monitor passe à l'état haut jusqu'à ce que le bouton "Reset" soit pressé. Cette fonctionnalité peut être utilisée pour activer une alarme. En l'occurrence, les LED's de face avant (D6) et de supervision à distance s'illuminent à plein éclat, indiquant que l'amplificateur est passé en protection.

La protection VSWR est obligatoire, le transistor peut supporter un VSWR de 5:1 mais un court-circuit ou une coupure dans la ligne d'antenne engendrent un VSWR infini...

R26 est une résistance shunt (chute de tension de 75 mV sous 30 A) qui, conjuguée au Vu-mètre M1 indique (sur la face avant) le courant de Drain total consommé par le transistor.

Ici, le schéma a été dessiné à l'aide de EAGLE Light Edition [7].

5.2.1 Schéma de la carte de contrôle

5.2.2 Onderdelenlijst van de bewakingskaart

Vermits het hier 'laagfrequent' schakeling betreft, is de keuze van het type onderdeel (through-hole of SMD) niet kritisch en wordt dan ook niet vermeld in de tabel.

5.2.2 Liste des composants

Comme il s'agit ici d'une carte basse fréquence, le type de boîtier des composants (à piquer ou SMD) n'est pas critique. Il n'est donc pas mentionné dans le tableau qui suit.

Onderdeel <i>Identification</i>	Waarde <i>Valeur</i>	Type <i>Type</i>	Fabrikant <i>Fabriquant</i>	Opmerkingen <i>Remarques</i>
R1	1,6 kΩ	¼ W	Divers	
R2	237 Ω	¼ W	Divers	1% tolerantie / <i>Tolérance 1 %</i>
R3, R4	3,3 kΩ	¼ W	Divers	
R5, R15, R17, R20, R21	2,2 kΩ	¼ W	Divers	
R6, R8, R11, R19	10 kΩ	¼ W	Divers	
R7, R9, R14, R18	1 kΩ	¼ W	Divers	
R10, R13	4,7 kΩ	¼ W	Divers	
R12	47 kΩ	¼ W	Divers	
R16, R23, R25	820 Ω	¼ W	Divers	
R22	220 kΩ	¼ W	Divers	
R24	100 kΩ	¼ W	Divers	
R26	2,5 mΩ	Shuntweerstand, 75 mV spanningsval bij 30 A <i>Résistance shunt, chute de 75 mV sous 30 A</i>		
R27	1 MΩ	¼ W	Divers	
RV1	2,2 kΩ	½ W	Divers	
RV2	50 kΩ	½ W	Divers	
RV3	10 kΩ	½ W	Divers	
RV4	1 MΩ	½ W	Divers	
C1, C2, C6, C8, C9, C10, C11, C12, C13, C14, C15, C16, C17	1 n	X7R	Divers	
C3, C5	100 n	X7R	Divers	
C4	15 μ	Elektrolyt 50 V	Divers	
C7	1 μ	Tantaal 16V / <i>Tantale 16V</i>	Divers	
D1, D2, D3	1N4148		Divers	
D4	9,1 V	Zenerdiode BZX79C <i>Diode Zener BZX79C</i>	Philips	
D5	LED duokleur <i>LED double couleur</i>	Rood/groen <i>Rouge/Vert</i>	Divers	Op het voorpaneel <i>Sur la face avant</i>
D6	LED	Rood / <i>Rouge</i>	Divers	Op het voorpaneel / <i>Sur la face avant</i>
TH	2N5064	Thyristor	Divers	
Q1	2N2907	PNP	Divers	
Q2	BD676	Darlington PNP	Divers	
Q3, Q4, Q6, Q7, Q8	BC109	NPN	Divers	
Q5	2N2904	PNP	Divers	
IC1	LM317T	Spanningsregulator <i>Régulateur de tension</i>	Divers	
IC2	LM324	AOP	Divers	
IC3	HEF4011BD	NAND-poorten / <i>Portes NAND</i>	Divers	
K1	DO12-M	Relais 12V	Fujitsu	Eender welk klein relais <i>N'importe quel petit relais est OK</i>
S1	Schakelaar <i>Commutateur</i>	SPDT	Divers	Op het voorpaneel; bestand tegen 10 A <i>Doit tenir 10 A, sur la face avant</i>
S2	Draaischakelaar <i>Commutateur rotatif</i>	Minstens 2 posities <i>Au moins 2 positions</i>	Divers	Op het voorpaneel <i>Sur la face avant</i>
S3	Duwschakelaar <i>Bouton poussoir</i>	Norm. Closed	Divers	Op het voorpaneel <i>Sur la face avant</i>
M1		VU-meter drainstroom <i>Vu-mètre de courant de Drain</i>	Divers	Te koop samen met shuntweerstand R26; 6,8 mA volledige uitslag, 11 Ω inwendige weerstand. <i>Vendu avec la résistance shunt (R26) – 6,8 mA pour déviation totale, résistance interne 11 Ω</i>
F1	25A	Zekering voertuig <i>Fusible voiture</i>	Divers	
J1, J2	RCA Jack	Connector / <i>Connecteur</i>	Divers	Op het voorpaneel / <i>Sur la face avant</i>
J3		Vermogconnector <i>Connecteur de puissance</i>	Divers	Op het voorpaneel / <i>Sur la face avant</i>
FB	ferrietkraal <i>Perle ferrite</i>		Divers	
PCB: geperforeerde kaart / <i>PCB: carte perforée</i>				

6. In bedrijf stellen

Dit hoofdstuk beschrijft de nodige stappen om de versterker in dienst te nemen.

1. Plaats de looper van RV1 op de beveiligingskaart zo, dat de kant verbonden met R1 aan massa ligt
2. Plaats de lopers van RV1 en RV2 op de HF-opstelling naar de 'koude' kant (de kant verbonden met R4 & R10). Leg R4 & R10 aan massa (de MRF141G is gesperd).
3. Plaats de looper van RV3 op de beveiligingskaart naar de kant van de massa.
4. Verschuif de looper van RV1 op de beveiligingskaart langzaam om 13 V te krijgen op de uitgang van de LM317 (IC1). Beschadig IC3 niet door de 15 V te overschrijden.
5. Leg – zonder HF – de PTT-input op het voorpaneel (J1 van de beveiligingskaart) afwisselend aan massa terwijl RV2 van de beveiligingskaart ingesteld wordt tot de instelspanning (collector van Q5) verschijnt **NADAT** de coaxrelais zijn omgeschakeld.
6. Ontkoppel CX3 van de uitgangssprint van de HF-kaart en sluit af op een 50 Ω belasting (min. 10 W). Schakel K2 mechanisch in en voer 8 W HF toe op J2 (voorpaneel) van de HF-opstelling. Stel nu RV3 van de beveiliging zo in, dat de LED op het voorpaneel oplicht. Dit legt de drempel van de VSWR-beveiliging vast. Bij volledige output (300W) stemt een teruggekaatst vermogen van 8 W overeen met een VSWR van 1,4:1. Verwijder de 50 Ω belasting en verbind CX3 op de uitgangssprint van de HF-schakeling.
7. Verbind J2 (voorpaneel) van de HF-opstelling met een hoogvermogen 50 Ω belasting (> 300 W). Verbind de transceiver met J1 (voorpaneel) van de HF-opstelling via een VSWR/wattmeter. Verbind de PTT van de transceiver met J1 (voorpaneel) van de beveiliging. Stel de transceiver in op 3 W en schakel hem op zenden. Regel – met een geïsoleerde schroevendraaier – C31 van de HF-schakeling voor een zo goed mogelijke VSWR aan de ingang en een normaal uitgangsvermogen. Er moet 100 W uitgangsvermogen worden bereikt. Verhoog langzaam het vermogen van de transceiver en regel C31 bij voor een zo goed mogelijke VSWR aan de ingang. Het hoogste terugkaatsverlies bedraagt 18 dB bij half stuurvermogen. Bij lage en volledige uitsturing wijkt de VSWR-naald helemaal niet uit (VSWR 1:1).

Bij 13 W stuurvermogen moet het uitgangsvermogen rond de 300 W liggen bij een rendement van 50 %. Het is normaal dat het rendement lager ligt bij minder uitgangsvermogen. Bij een eerste afregeling zal een perfecte aanpassing niet onmiddellijk worden bereikt. Oorzaak is de spreiding op de karakteristieken van de gebruikte onderdelen vergeleken met die in mijn geval gebruikt. Een extra bijstelling van de condensatoren in het aanpassingsnetwerk is dan vereist. Dit wordt gedaan door tijdelijk instelbare condensatoren te plaatsen, parallel met of in de plaats van de aanwezige C's. Condensatoren van hetzelfde type als C31 zijn hiervoor geschikt.

Het afstemmen moet iteratief gebeuren. Begin met laag vermogen en regel het aanpassingsnetwerk af van transistor naar output, heen en terug. Regel nadien het ingangnetwerk op dezelfde manier af. Stem dan opnieuw het uitgangnetwerk af. Doe dit voor verschillende stuurvermogens, tot het maximum.

8. Stel RV4 van de beveiliging in op de gewenste monitorspanning (evenredig met het uitgangsvermogen) op J2 (voorpaneel) van de beveiliging.

7. Resultaten

De beoordeling van de prestaties van de versterker was beperkt door het gebrek aan meetinstrumenten. Niettemin werd het uitgangsvermogen gemeten zoals weergegeven in **figuur 28**. De gemiddelde versterking is **15 dB** en **1 dB compressie** werd bereikt bij **280 W**.

Alhoewel de intermodulatieproducten en harmonischen niet werden gemeten, geeft de grafiek in **figuur 29** - overgenomen uit een Motorola application note [8] - een zicht op de onderdrukking van de harmonischen van een **breedbandversterker** met MRF141G. Men

6. Réglages et mise en œuvre

Ce chapitre décrit, par étapes, les réglages nécessaires à la mise en œuvre de l'amplificateur.

1. Ajuster RV1 sur la carte de Contrôle de manière à ce que son point chaud (celui lié à R1) soit mis à la masse.
2. Ajuster RV1 & RV2 de la carte RF tel que leurs curseurs soient positionnés aux extrémités froides (celles liées à R4 & R10). Court-circuiter R4 & R10 de la carte RF à la masse (le MRF141G est ainsi bloqué).
3. Mettre le curseur de RV3 de la carte de Contrôle au point froid (masse).
4. Ajuster lentement RV1 (carte de Contrôle) pour obtenir 13 V à la sortie du LM317 (IC1). Attention à ne pas dépasser 15 V pour la sécurité de IC3.
5. Sans excitation RF, mettre/enlever successivement l'entrée PTT de la face avant (J1 de la carte de Contrôle) à/de la masse tout en ajustant RV2 de la carte de Contrôle de manière à ce que Vbias (collecteur de Q5 sur la carte de Contrôle) apparaisse **APRES** que les relais coaxiaux aient commuté.
6. Déconnecter CX3 du PCB de sortie de la carte RF et le terminer par une charge de 50 Ω (min 10W). Commuter manuellement (mécaniquement) K2 (en position Normally Open) de la carte RF et injecter une puissance RF de 8W sur J2 (face avant) de la carte RF. Ensuite, ajuster RV3 de la carte de Contrôle jusqu'à ce que la LED (D6) "SWR" de face avant s'illumine. Cela détermine le seuil de protection VSWR. A pleine puissance (300W), une puissance réfléchie de 8W correspond à un VSWR de 1,4:1. Enlever la charge de 50 Ω et reconnecter CX3 sur le PCB de sortie de la carte RF.
7. Charger J2 (face avant) de la carte RF avec une charge haute puissance (> 300 W) de 50 Ω au travers d'un Watt-mètre. Connecter un transceiver à J1 (face avant) de la carte RF au travers d'un VSWR/Watt-mètre. Raccorder la sortie PTT du transceiver à J1 (face avant) de la carte de Contrôle. Régler le transceiver sur une puissance de 3W et le faire passer en émission. Ajuster C31 de la carte RF à l'aide d'un tournevis isolé afin d'obtenir le meilleur VSWR d'entrée possible tout en vérifiant la puissance de sortie. Environ 100 W de puissance de sortie doivent être obtenus. Augmenter lentement la puissance du transceiver tout en réajustant C31 afin de maintenir un bon VSWR d'entrée. Le moins bon Return Loss (VSWR) vaut 18 dB à mi-puissance d'excitation; à basse et haute puissance d'excitation, l'aiguille du VSWR-mètre ne dévie pas du tout.

Avec 13 W de puissance d'excitation, la puissance de sortie doit se situer aux alentours de 300 W, avec un rendement de 50 %. En-dessous de 300 W, il est normal que ce rendement puisse être inférieur. En raison de la dispersion des caractéristiques des composants (comparé à ceux que j'ai utilisés), l'adaptation parfaite ne sera probablement pas obtenue au premier essai. Un ajustement supplémentaire des condensateurs constitutifs des circuits d'adaptation sera alors requise. Pour ce faire, il faudra souder temporairement des condensateurs variables en lieu et place ou en parallèle de ceux déjà en place. Des condensateurs du même type que C31 rempliront cette tâche.

L'ajustement est un processus itératif. Il faut commencer à bas niveaux d'excitation et ajuster d'abord le circuit d'adaptation de sortie en partant du transistor vers la sortie, puis revenir vers le transistor et ce plusieurs fois de suite. De la même manière, on ajustera ensuite le circuit d'entrée. Finalement, le circuit de sortie sera à nouveau ajusté et ainsi de suite à différents niveaux d'excitation jusqu'à ce que la puissance de sortie maximale et le meilleur rendement soient atteints.

8. Ajuster RV4 de la carte de Contrôle afin d'obtenir la tension de supervision voulue (proportionnelle à la puissance de sortie) sur J2 (face avant) de la carte de Contrôle.

7. Performances

En raison du manque d'équipements de mesure, l'estimation des performances fût quelque peu limitée. Néanmoins, la puissance de sortie a au moins été mesurée, comme montré dans la **figure 28**. Le gain moyen est de **15 dB** et le **point de compression à 1 dB** est situé aux environs d'une puissance de sortie de **280W**.

Bien que, le niveau des produits d'intermodulation et la réjection harmonique n'aient pas été mesurés, la **Fig. 29**, extraite d'une note d'application de Motorola [8], renseigne sur la réjection harmonique d'un amplificateur

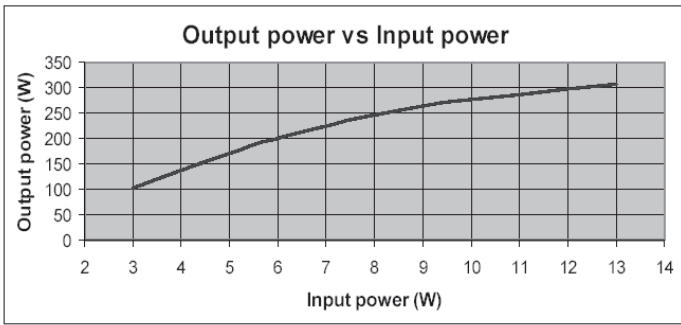


Fig. 28 *Uitgangs- versus ingangsvermogen.*
 Fig. 28 *Puissance de sortie vs puissance d'entrée.*

ziet duidelijk dat voor lage frequenties de onderdrukking van de even harmonischen goed is (zonder LPF) terwijl de oneven harmonischen tamelijk sterk aanwezig zijn. Op 144 MHz is in het slechtste geval het niveau van de derde harmonische -45 dBc.

Indien we veronderstellen dat de hier beschreven versterker zich op dezelfde wijze gedraagt als de breedband en gegeven de verzwakking door het LPF op de uitgang, kan theoretisch een minimum harmonische onderdrukking van 77 dBc worden verwacht (voor alle harmonischen). In de praktijk kan dit nog beter zijn gezien het smalbandige ontwerp van de beschreven versterker door het gebruik van LPF-netwerken voor de aanpassing.

Subjectief bekeken werd me nooit overdreven splatter gerapporteerd, zelfs door nabije stations. De stroomafname voor volledig uitgangsvermogen van 300 W ligt rond de 20 A bij 28 V wat een rendement betekent van 53% .

8. Afbeeldingen

De in dit hoofdstuk opgenomen foto's tonen details van de opbouw van de versterker.

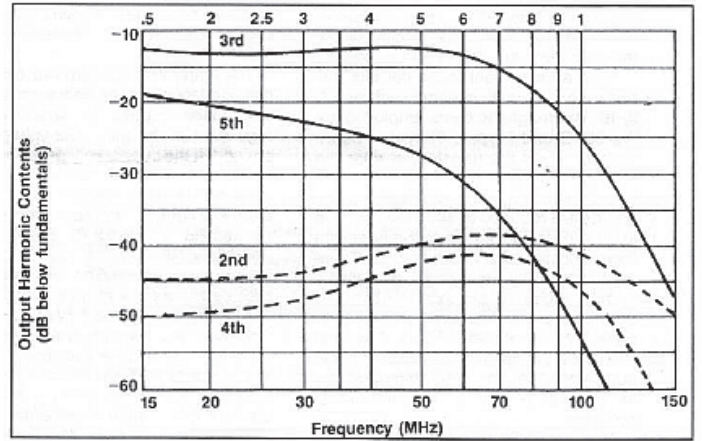
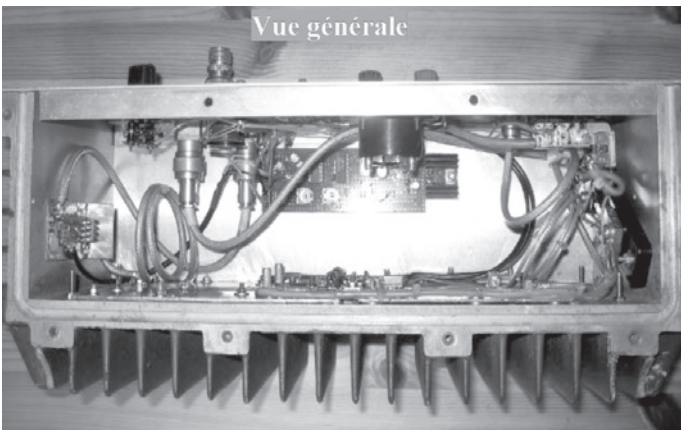


Fig. 29 *Harmonischen bij een breedbandversterker MRF141G.*
 Fig. 29 *Contenu harmonique d'un MRF141G large bande.*

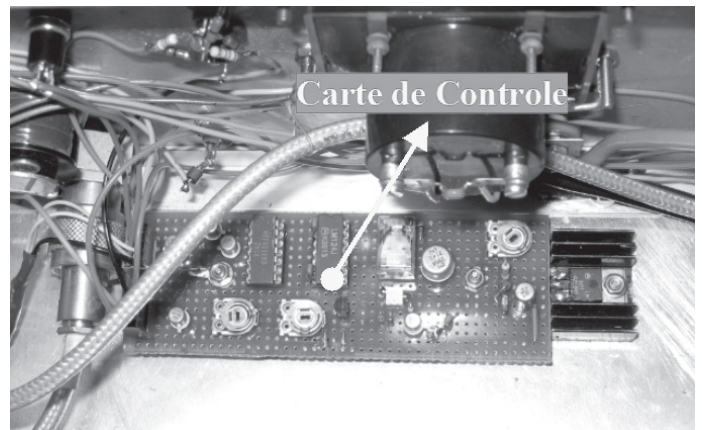
large bande utilisant un MRF141G. On voit clairement qu'aux basses fréquences les harmoniques paires sont déjà largement rejetées (sans filtre Passe-Bas) par l'amplificateur même; le niveau des harmoniques impaires, lui, reste assez élevé. Toutefois, à 144 MHz, le plus mauvais niveau harmonique se monte à -45 dBc (troisième harmonique).

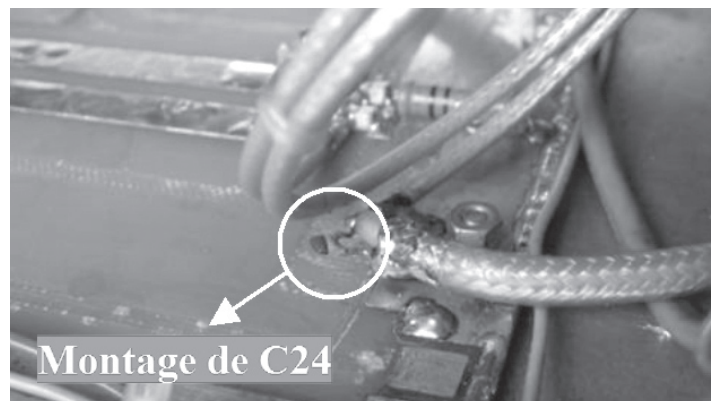
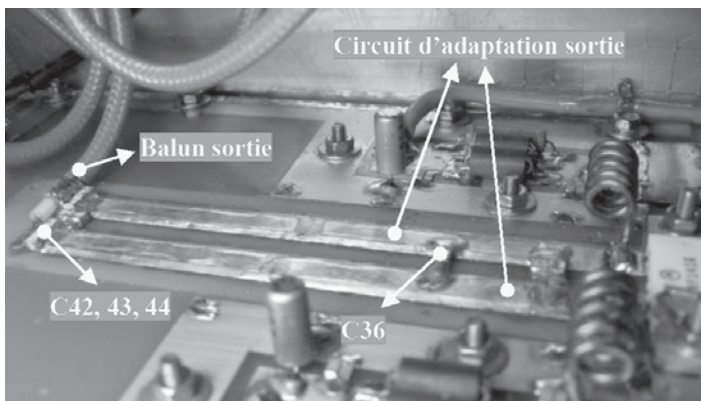
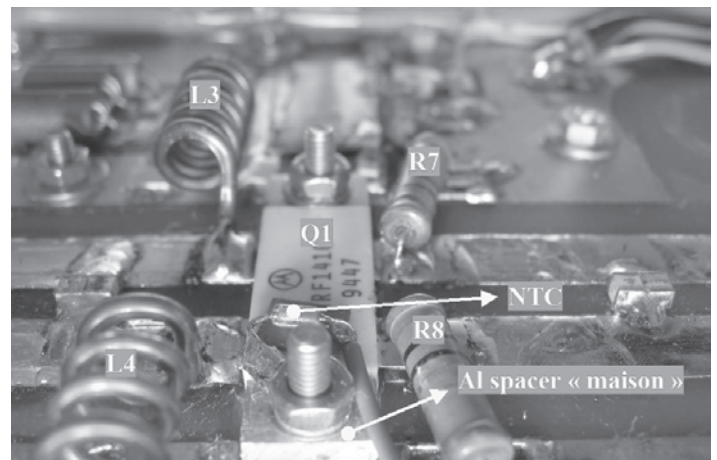
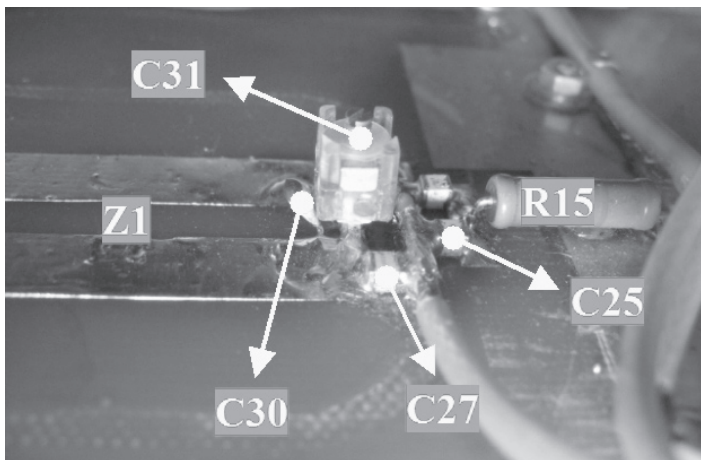
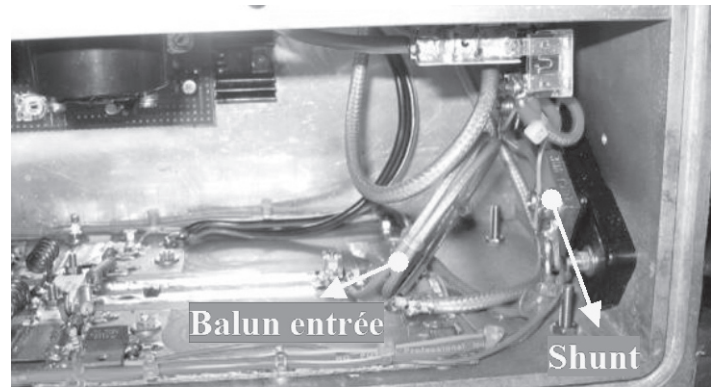
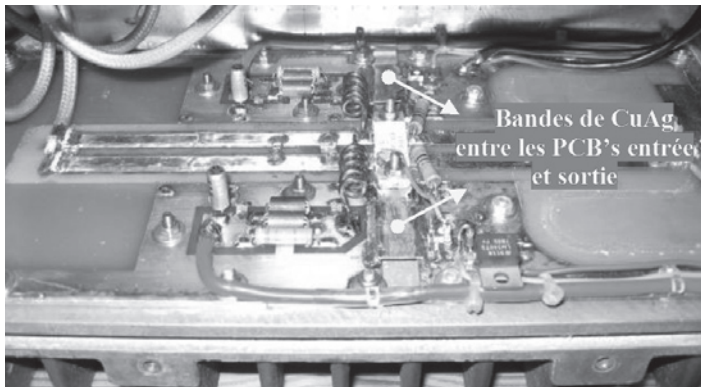
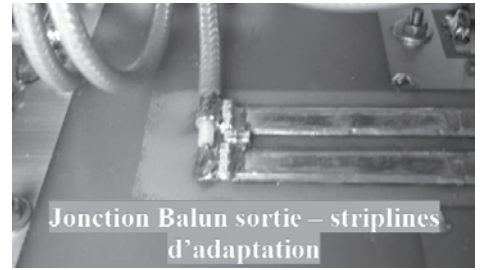
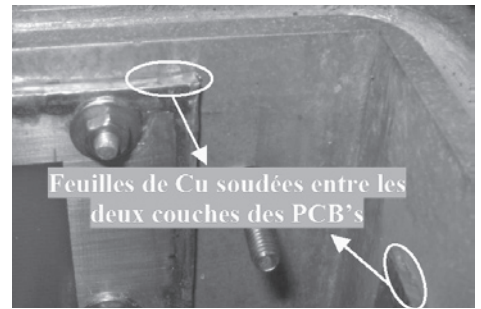
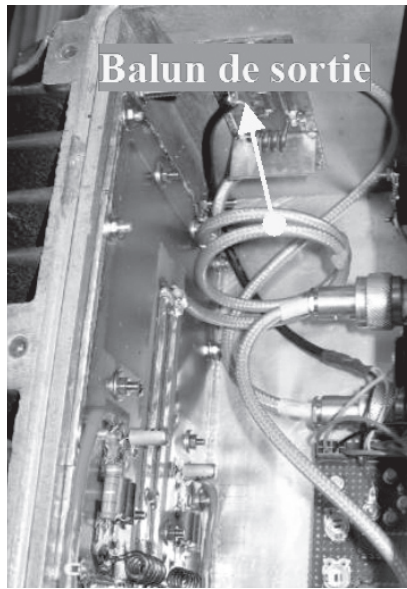
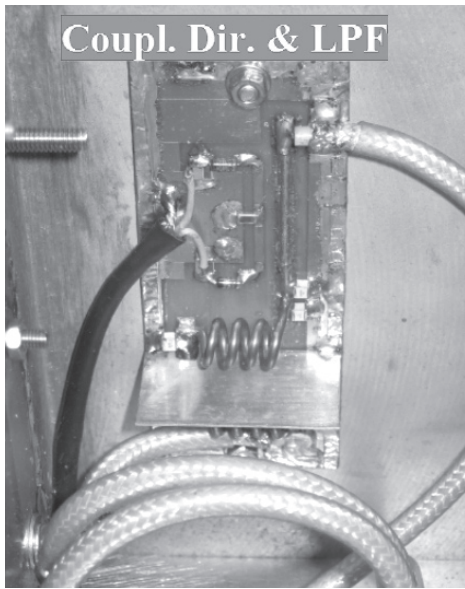
En supposant que l'amplificateur décrit ici se comporte de la même manière que l'amplificateur large bande (ce qui est improbable, grâce à la conception bande étroite utilisée ici et dont les circuits d'adaptation sont constitués de sections de filtres Passe-Bas) et étant donné la réjection additionnelle apportée par le filtre Passe-Bas de sortie, une **réjection minimum** (théorique) de 77 dBc peut être espérée (pour tous les ordres). D'un point de vue très subjectif, un "splattering" excessif n'a jamais été rapporté, même par les stations proches.

La consommation en courant est d'environ 20 A sous 28 V pour la pleine puissance de sortie, ce qui correspond à un rendement de 53% .

8. Photos

Ce chapitre montre en images les détails de construction de l'amplificateur.





Bronvermeldingen / Références

[7]: Software "EAGLE Light Edition", <http://www.cadsoftusa.com/freeware.htm>
 [8]: "Wideband RF Power Amplifier", Motorola AR313, February 1988

"RF Device Data, volume 2", Motorola literature, Q4 1990
 "Introduction to Radio Frequency Design", by W.H. Hayward, 1982, ISBN 0134940210
 "RF Transmitting Transistor and Power Amplifier Fundamentals", Philips, March 1998
 "Three Balun Designs for Push-Pull Amplifiers", Motorola AN1034, 1993

"SD2932 RF MOSFET For 300W FM Amplifier", STMAN1229, July 2000
 "BLF368" data sheet, Philips, October 1998
 "Lineair voor 145 MHz met BLF368 Dual MOSFET", Electron magazine, June & July 2001
 "Push-Pull Circuits and Wideband Transformers", Semelab AN, <http://www.semelab.co.uk/rf/appnotes.shtml>