

Etude et construction d'un appareil destiné au test, reconditionnement (régénération) et à l'appareusement ("matched pair of tubes") des tubes électroniques de puissance (GU74B-4CX800A) Studie en constructie van een toestel bestemd voor het testen, regenereren en matchen van hoogvermogenbuizen (GU74B-4XC800A) Par/door ON4LAJ - Vertaald door: ON5EX, ON4LP

3ième partie / Deel 3

L'appareusement des tubes ("matched pair of tubes")

La nécessité de réaliser l'appareusement des tubes

Lors de la mise en fabrication d'un type de tube donné (par exemple le GU74B), **les tolérances admises au niveau des procédés de fabrication et de la pureté des matériaux**, font que les tubes fabriqués ne sont pas identiques à 100%. En effet, placés dans les mêmes conditions de fonctionnement, les tubes présenteront des différences. Par exemple, pour les mêmes Va, Vg2 et Vg1, les tubes présenteront des Ia qui seront différents.

Si un montage électronique doit présenter une bonne linéarité (par exemple un amplificateur HF de puissance), il est conseillé d'utiliser un seul élément (un seul tube électronique, un seul transistor) et d'exploiter la partie linéaire de sa courbe caractéristique.

Dans certains cas, il n'est pas possible d'utiliser un seul élément. Par exemple, dans le cas d'un amplificateur HF de grande puissance, il est généralement nécessaire (au point de vue économique) de mettre en œuvre plusieurs tubes (ou transistors) montés en parallèle, en push-pull,

Het paren van buizen ("matched pair of tubes")

De noodzaak om gelijke buizen te zoeken.

Toegestane toleranties op het vlak van fabricatiemethodes en materiaalzuiverheid maken dat exemplaren van een bepaalde buis (bijvoorbeeld de GU74B) niet 100 % identiek zijn. In exact dezelfde bedrijfsomstandigheden vertonen de buizen afwijkingen, zoals een verschillende Ia bij gelijke Va, Vg2 en Vg1.

Als een elektronische opstelling een goede lineariteit moet bezitten (bijvoorbeeld een HF-vermogenversterker), dan is het aan te bevelen om één enkel versterkerelement te gebruiken (1 elektronenbuis, 1 transistor) en het lineaire gedeelte van zijn karakteristiek maximaal te benutten.

In bepaalde gevallen is het uitgesloten om één enkel versterkerelement te gebruiken. Zo zal men in het geval van een HF- hoogvermogenversterker, vanuit economisch standpunt, meerdere buizen (of transistoren) combineren in parallel, push-pull,... Om een aanvaardbare lineariteit

... Pour garantir à l'ensemble une linéarité acceptable, il est impératif d'utiliser des éléments apparentés c'est-à-dire qui présentent des courbes caractéristiques plus ou moins identiques. L'appareillage (des tubes et des transistors) peut être réalisé par le constructeur de l'élément, qui, dans ce cas, propose à la vente (généralement à un prix élevé) des ensembles apparentés ("matched pairs of tubes"). Dans le cas d'éléments déclassés (par exemple les NOS des surplus militaires), il est difficile – voire impossible – de trouver des éléments apparentés; l'utilisateur doit (à partir d'un lot d'éléments) tester, comparer et former lui-même les paires d'éléments.

Les principes à mettre en œuvre en vue de l'appareillage des tubes
 Pour comparer les tubes entre-eux, il serait fastidieux - compte tenu du grand nombre de paramètres à considérer (V_a , V_{g1} , V_{g2}) - de faire varier tous les paramètres.

Personnellement je préconise de comparer les tubes en les plaçant dans les conditions de fonctionnement nominales (en classe AB1); à savoir (pour un tube GU74B):

- Vf1 de 12,6 V (avec un chauffage du filament pendant au moins 150 secondes et avec une ventilation du tube)
- V_a de 2000 V à 2200 V
- V_{g2} de 300 V
- V_{g1} de -60 V à -30 V

Pour "apparenter" 2 tubes ("matched pair of tubes"), il est nécessaire de procéder tube par tube et:

- en faisant varier le V_{g1} , de noter le I_a présenté par le tube (l'affichage des valeurs de V_{g1} et de la se fera avec précision via des afficheurs digitaux)
- de tracer manuellement (ou via un logiciel informatique – un "tableur") la courbe $I_a f(V_{g1})$ qui montre l'évolution du courant d'anode I_a en fonction de la tension de la grille de commande V_{g1}
- de comparer les courbes pour former les "matched pairs of tubes" et ce en considérant que **2 tubes sont apparentés si les valeurs ne s'écartent pas de plus de 10%**

Lors du relevé de la courbe $I_a f(V_{g1})$, il est impératif de ne pas dépasser la P_a c-à-d. la puissance anodique maximale admise par le tube (600 W pour le GU74B). En effet, si la V_a est de 2000 V, il faudra s'assurer (lorsque l'on fera varier le V_{g1}) de ne pas dépasser un I_a de 300 mA car, sous 2000 V, la P_a maximale de 600 W sera atteinte si le I_a est de 300 mA ($P_a = V_a \times I_a \rightarrow I_a = 600/2000 = 0,3 \text{ A}$).

Si le relevé de la courbe $I_a f(V_{g1})$ se fait en utilisant une U_a de 1500 V, le I_a maximum à ne pas dépasser (lorsque l'on fait varier le V_{g1}) sera de 400 mA ($I_a = 600/1500 = 0,4 \text{ A}$).

Ce la maximum à ne pas dépasser peut être facilement déterminé soit par le calcul ou soit à partir des courbes caractéristiques du tube (figure 7).

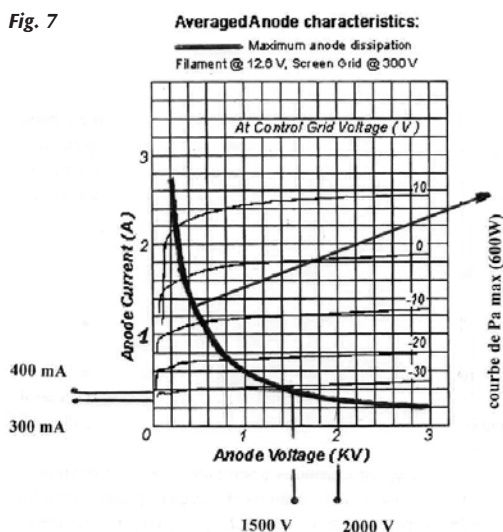
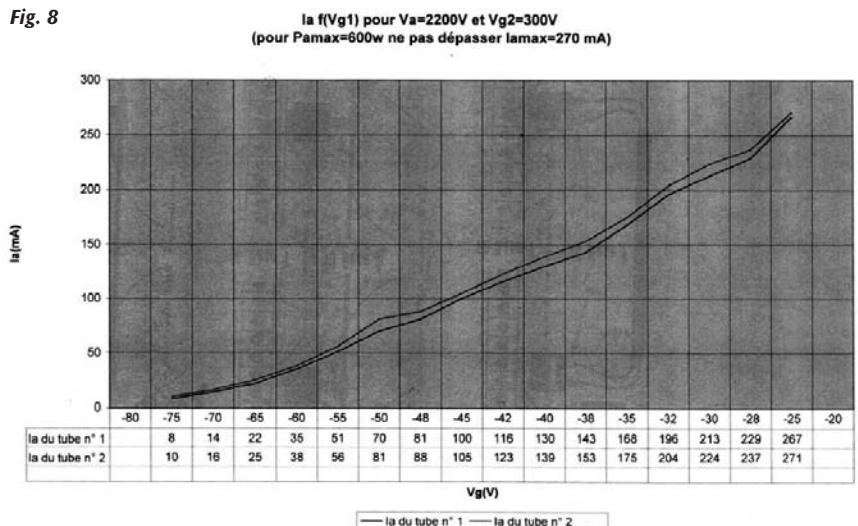


Fig. 8



te bekomen, moeten de karakteristieken van de elementen zo identiek mogelijk zijn.

De fabrikant kan 'matched pairs of tubes' aanbieden (meestal aan een hoge prijs), maar in het geval van gedeclasseerde elementen (bijvoorbeeld de NOS uit militaire surplus) is het bijzonder moeilijk, zelfs onmogelijk, om identieke elementen te vinden. De gebruiker moet zelf (uit een lot van elementen) een ideaal paar zien te vinden, door testen en vergelijken.

Voorschriften bij het paren van buizen

Gezien het grote aantal parameters (V_a , V_{g1} , V_{g2}), zou het zeer tijdrovend zijn alle parameters te doen variëren voor de vergelijking van de buizen.

Zelf geef ik er de voorkeur aan om de buizen onder nominale werksvoorwaarden (in klasse AB1) te vergelijken, namelijk (voor een GU74B):

- Vf1 12,6 V (verhit gedurende minstens 150 seconden, met buiskoeling)
- V_a 2000 à 2200 V
- V_{g2} 300 V
- V_{g1} -60 V tot -30 V

Voor het vinden van een 'gelijk' duo moet men buis per buis tewerk gaan:

- V_{g1} variëren en I_a meten (nauwkeurig via digitale weergave)
- het verloop van I_a in functie van V_{g1} manueel of via een rekenblad tekenen
- de I_a/V_{g1} grafieken onderling vergelijken; enkel bij een afwijking van maximum 10 % kan er sprake zijn van een gepaard duo (matched pair).

Tijdens het meten van de I_a/V_{g1} -karakteristiek is het belangrijk dat P_a , het maximum toelaatbare anodevermogen (600 W voor de GU74B), in geen geval wordt overschreden. Bij een anodespanning van 2000 V mag - tijdens het variëren van V_{g1} - I_a nooit boven 300 mA gaan, vermits in dit in geval het maximum toelaatbaar anodevermogen van 600 W is bereikt ($P_a = V_a \times I_a \rightarrow I_a = 600/2000 = 0,3 \text{ A}$).

Als het opnemen van de I_a/V_{g1} -karakteristiek wordt uitgevoerd bij een V_a van 1500 V, bedraagt de I_a maximum 400 mA ($I_a = 600/1500 = 0,4 \text{ A}$).

De maximum toelaatbare I_a kan makkelijk worden bepaald door berekening of uit de I_a/V_a -karakteristiek (figure 7).

Uit de curve m.b.t. maximum P_a kan men afleiden dat:

- bij 2000 V_a , 300 mA I_a niet mag worden overschreden (bij V_{g1} rond -35 V)
- bij 1500 V_a , 400 mA I_a niet mag worden overschreden (bij V_{g1} rond -30 V)

Na het opnemen van de I_a/V_{g1} -karakteristiek van een lot buizen en het opslaan van de gegevens in een rekenblad, is het interessant om

La courbe relative à la Pa maximale à ne pas dépasser nous permet de voir que pour:

- une Va de 2000 V, le la maximum à ne pas dépasser est de 300 mA (pour une Vg1 de l'ordre de -35 V)
- une Va de 1500 V, le la maximum à ne pas dépasser est de 400 mA (pour une Vg1 de l'ordre de -30 V)

Après avoir relevé les la f(Vg1) d'un lot de tubes, il est intéressant (après avoir encodé les données dans une feuille de calcul Excel) de tracer les courbes et de les comparer 2 par 2 afin de trouver les paires de tubes que l'on peut apparenter ("matched pair of tubes").

Exemple de 2 tubes que l'on pourrait apparenter: voir la **figure 8**.

Exemple de 2 tubes que l'on ne pourrait pas apparenter: voir la **figure 9**.

La mesure et l'affichage des tensions et des courants

Les tensions et les courants relatifs à ce projet sont des valeurs DC (continu) et ce y compris pour le chauffage du filament. Pour mesurer et afficher (parfois avec la plus grande précision possible) nous disposons d'appareils (voltmètre, ampèremètre, ...) analogiques et digitaux.

On remarquera qu'actuellement, il est possible de trouver des afficheurs digitaux "grand public" (LCD ou à LED) qui présentent une précision de 0.5%. De plus, ces afficheurs sont faciles à lire et ce contrairement aux appareils analogiques ou l'opérateur doit visualiser le positionnement d'une aiguille et interpréter (extrapoler) la mesure selon que l'aiguille est plus ou moins proche de telle ou telle graduation.

On remarquera que la mise en œuvre d'un appareil digital (par rapport à un appareil analogique) est plus onéreuse car il faut alimenter l'afficheur digital par une tension continue (correctement) filtrée et qui (parfois) doit être indépendante du circuit dans lequel la mesure se fait. Cependant on remarquera que l'afficheur digital permet:

- de positionner correctement le point décimal (en fonctions des grandeurs à afficher)
- de choisir et d'afficher l'unité (V, A, kV, mA, ...)

Dans ce projet, il sera mesuré et affiché:

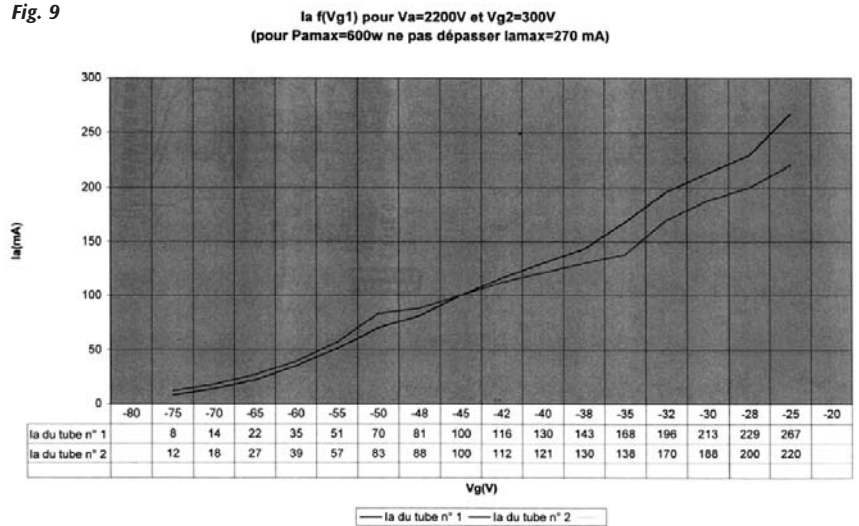
- pour le filament: Vfil et Ifil
- pour la grille de commande: Vg1 et Ig1
- pour la grille d'écran: Vg2 et Ig2
- pour l'anode: Va et Ia

Certaines de ces mesures se feront à partir d'un afficheur digital, d'autres se feront à partir d'un appareil analogique.

Citons quelques exemples:

- Pour "apparenter" 2 tubes ("matched pair of tubes"), il sera nécessaire de tracer (tube par tube) une courbe qui montre l'évolution du courant d'anode Ia en fonction de la tension de la grille de commande Vg1. Un affichage précis de ces valeurs mesurées (Ia et Vg1) se fera à partir d'afficheurs digitaux.
- La tension d'alimentation (en continu) du filament Vfil sera mesurée et affichée par un afficheur digital. En fonctionnement normal (donc après le reconditionnement du tube), le filament doit être alimenté en respectant scrupuleusement les prescriptions du constructeur. La tension de chauffage du filament sera ajustée manuellement sur 12,6 VDC.
- Le courant de grille de commande Ig1 sera mesuré et affiché par un appareil analogique car en fonctionnement normal, le courant de grille de commande doit être nul.
- Le courant de grille d'écran Ig2 (en fonctionnement normal) peut atteindre de 20 mA à 30 mA. De plus, dans certaines circonstances, le

Fig. 9



de la Vg1-karakteristiek 2 aan 2 te vergelijken om zo alle buizen die in aanmerking voor matching te vinden.

Voorbeeld van twee buizen die voor matching in aanmerking komen: zie **figuur 8**.

Voorbeeld van twee buizen die niet voor matching in aanmerking komen: zie **figuur 9**.

Meting en weergave van spanningen en stromen

De spanningen en stromen in het kader van dit project zijn DC-waarden, inclusief de gloeidraadverhitting. Om deze waarden te meten en weer te geven met de hoogst mogelijke nauwkeurigheid beschikken we over analoge en digitale toestellen (voltmeter, ampèremeter, ...).

Tegenwoordig vind je gemakkelijk digitale meters voor het brede publiek (met LCD- of LED-weergave) met een nauwkeurigheid van 0,5 %. De waarden zijn makkelijk af te lezen, in tegenstelling tot analoge toestellen waarbij je de positie van een naald moet gadeslaan en de meetwaarde moet 'schatten' naargelang die positie zich dichter of verder van deze of gene schaalwaarde bevindt.

Het inzetten van een digitaal toestel in plaats van een analoog toestel is duurder daar het toestel moet worden gevoed met een correct gefilterde gelijkspanning, (soms) gescheiden van de meetkring. Anderzijds maakt een digitale meter het mogelijk om:

- de decimale punt te plaatsen in functie van de grootheden
- de eenheid te kiezen en weer te geven (V, A, kV, mA, ...)

In ons project zijn de volgende metingen aan de orde:

- gloeidraad: Vfil en Ifil
- stuurrooster: Vg1 en Ig1
- schermrooster: Vg2 en Ig2
- anode: Va en Ia

Sommige metingen worden digitaal uitgevoerd, andere analoog.

Enkele voorbeelden:

- Om twee buizen te paren moet men - per buis - de karakteristiek opnemen van het verloop van de anodestroom Ia in functie van de stuurroosterspanning Vg1. Een nauwkeurige meting van de waarden van Ia en Vg1 gebeurt met digitale meters.
- De (DC) voedingsspanning Vfil van de gloeidraad wordt gemeten met een digitaal toestel. Bij normaal bedrijf (dus na het herconditioneren van de buis) moet men zorgvuldig de voorschriften van de fabrikant volgen voor de gloeidraadspanning en ze manueel instellen op 12,6 V DC.
- Bij normaal bedrijf moet de stuurroosterstroom Ig1 nul zijn. Om Ig1 te meten volstaat een analoge meter.

courant I_{g2} peut devenir négatif; en effet, plutôt que de capter une partie des électrons émis par la cathode, la grille écran peut être à l'origine d'une "émission secondaire" c'est-à-dire peut être parcourue par un courant négatif.

Pour mesurer et afficher ce I_{g2} (positif ou négatif) on utilisera de préférence un afficheur digital (qui affiche + pour les valeurs positives et - pour les valeurs négatives). On remarquera que pour remplir ce rôle, un ampèremètre analogique devrait être conçu avec un zéro central (appareil difficile à trouver).

- La tension de grille d'écran V_{g2} (de 300 VDC) ne devant pas être mesurée avec précision, on utilisera un voltmètre analogique.

- De schermroosterstroom I_{g2} kan (bij normaal bedrijf) oplopen tot 20 mA à 30 mA. Bovendien kan deze stroom I_{g2} negatief worden: in de plaats van een gedeelte van de door de kathode uitgestuurde elektronen op te vangen, kan het schermrooster de bron zijn van 'secundaire emissie', waardoor een negatieve stroom doorheen het schermrooster vloeit. Om I_{g2} (positief of negatief) te meten, verdient een digitale meter de voorkeur (met weergave van het teken + of -). Een analoge meter moet hiervoor voorzien zijn van een centrale nul, hetgeen niet courant is.
- De meting van de schermroosterspanning V_{g2} (rond 300 VDC) vereist geen grote nauwkeurigheid; hiervoor volstaat een analoge voltmeter.