

Traceur de courbes pour tubes électroniques

TCT

Yves Monmagnon, Septembre 2006
y.monmagnon@wanadoo.fr

Présentation

Le but est de relever les courbes d'anode d'un tube à vide pour diverses tensions de polarisation de grille de commande (G1) et de grille écran (G2), si applicable, au moyen d'un outil à la fois simple, économique et précis.

Un PC muni d'une carte son est utilisé pour capturer les données et les afficher, son coût est considéré comme nul puisque, si vous lisez ceci, c'est que vous l'avez déjà.

Un boîtier de mesure doit être construit, son rôle est de fournir les tensions nécessaires au tube et de transmettre les résultats au PC.

Pour respecter les critères de simplicité et d'économie, le boîtier de mesure ne reçoit aucune information du PC.

Principe général

Pour relever une courbe d'anode, il faut mesurer le courant d'anode en fonction de la tension d'anode.

Ceci est suffisant pour une diode.

Dans le cas d'une triode, il faut répéter les mesures avec des tensions de polarisation G1 différentes, on obtient une famille de courbes d'anodes.

Enfin, pour une penthode ou une tétrode, il faut encore recommencer le processus avec des tensions d'écran (G2) différentes.

Méthode manuelle

La méthode manuelle consiste à fixer une tension de G1 (et de G2 le cas échéant), puis de faire varier la tension d'anode de 0v au maximum admissible par le tube en relevant à chaque fois le courant et en le reportant sur un graphique où la tension d'anode est en abscisse et le courant en ordonnée.

L'ensemble des points obtenus sont reliés et on obtient ainsi une courbe pour la tension de grille précédemment choisie .

On fixe alors une nouvelle tension de G1 et on recommence.

Puis, pour une penthode ou une tétrode, on reprend au début avec une autre tension de G2.

C'est ainsi que procèdent les heureux possesseurs du vénérable U61.

Automatisation

Plusieurs manipulations peuvent être automatisées.

Les traceurs de courbes automatiques de la première heure utilisaient un oscilloscope en mode X/Y, la tension d'anode provoquant la déviation horizontale et le courant d'anode la déviation verticale.

Ainsi, après étalonnage des échelles, la courbe d'anode d'une diode est aisément visualisée.

Il est important de remarquer qu'il suffit de disposer d'une tension d'anode variant continuellement, à n'importe quelle fréquence (compatible avec les performances de l'oscilloscope et du tube mesuré) et dont la forme n'a pas d'importance aussi longtemps qu'elle passe par toutes les valeurs intermédiaires.

En d'autres termes, il n'est pas utile de disposer d'une tension d'anode croissant (ou décroissant) régulièrement.

Moyennant un transformateur et une diode en série avec son anode côté transformateur, on obtient très simplement et très économiquement une tension variant de zéro à la tension crête et ce à la fréquence du secteur.

En pratique, pour un secteur à 50Hz, on a une tension nulle pendant 10mS, suivi d'une croissance pendant 5mS, moment où la tension crête est atteinte, puis une décroissance jusqu'à zéro pendant 5mS. Soit une période totale de 20mS.

Et pour une triode ?

Il suffirait que la tension de G1 change toutes les 20mS pour que soient visualisées toutes les courbes correspondantes aux diverses tensions de G1 ainsi modifiées.

Prenons un autre transformateur et une autre diode, mais cette fois avec sa cathode côté transformateur.

Sous réserve de choisir la bonne phase on obtient, pendant la demi période où la tension d'anode est à zéro, les mêmes variations de tensions que ci-dessus, mais dans le sens négatif, Ces « impulsions » sont utilisées pour charger partiellement un condensateur au travers d'une résistance et on obtient ainsi, aux bornes du condensateur, une tension en « marches d'escalier » qui est exactement ce qu'il faut appliquer à la G1.

Vous aurez déjà compris que le PC et sa carte son vont remplacer avantageusement l'oscilloscope X/Y en autorisant, en plus du simple affichage, des fonctions de stockage, d'impression et quelques outils élémentaires.

Par la suite, le PC, sa carte son et le logiciel approprié seront appelés « Le système d'analyse ».

Voilà décrit le principe de fonctionnement retenu, il ne reste plus qu'à régler quelques centaines de petits détails pour obtenir un véritable appareil de mesure précis et utilisable.

Le boîtier de mesure

Il doit donc fournir les tensions d'anode et de grilles telles que décrites ci dessus et prélever la tension et le courant d'anode instantané pour les transmettre au système d'analyse.

Il devra aussi autoriser, sinon intégrer, un moyen d'y connecter les divers modèles de tubes.

Générateur de tensions d'anode

La première décision à prendre est de fixer les limites.

Il existe des tubes fonctionnant sous des tensions d'anodes aussi basses que 10 volts et moins d'un milliampère, ainsi que des monstres de plusieurs centaines de kilogrammes (et de kilowatts dissipables) demandant plus de 20KV sous quelques ampères.

Pour respecter le critère économique, voyons plutôt ce qui est disponible au moindre coût et sacrifions les extrêmes

En prenant un transformateur d'alimentation inversé (le secondaire alimenté en basse tension, le primaire fournissant la haute tension) on dispose aisément de 115 et 230 Volts efficaces, soit pratiquement 160 et 320 Volts crête.

Si on en met deux en série, on obtient en plus 490 et 650 V crête. Les tubes fonctionnant dans cette gamme de tension (160 à 650 V) dissipent rarement plus de 100W, on peut donc partir sur un courant d'anode moyen de $100 / 650 = 150\text{mA}$.

Il faut remarquer que la méthode de mesure n'alimente l'anode qu'une alternance sur deux et que le courant maximum n'est nécessaire que pour les faibles tensions de G1 ou la tension d'anode ne demande pas à être très élevée, mais devrait plutôt être limitée.

De plus, la durée de la mesure n'excèdera jamais quelques secondes.

Fort de ces considérations, et sachant que tout transformateur peut supporter des surcharges instantanées considérables, j'ai arbitrairement décidé d'utiliser deux petits transfos de 10 VA qui traînaient sur une étagère.

La résistance mesurée de chaque demi primaire (devenu le secondaire) est de 220 Ohms, soit 880 pour les quatre en série donc une chute de tension de 88 Volts à 100mA.

Ceci n'a non seulement aucun effet sur la précision de l'appareil, puisque c'est la tension d'anode réelle qui sera mesurée, mais il faudra même ajouter des résistances de limitation de courant supplémentaires pour éviter de tenter de tracer des courbes irréalistes au delà des limites supportables par le tube à tester.

Générateur de tensions de grille 1

La méthode simplissime consistant à charger un condensateur à travers une résistance fonctionne et je l'ai utilisé longtemps pendant les phases préliminaires de la conception.

Elle présente l'anomalie majeure de générer des escaliers dont la hauteur diminue au fur et à mesure que le condensateur se charge.

Ceci est dû à deux causes qui se cumulent.

D'une part le courant de charge diminue au fur et à mesure que la tension aux bornes du condensateur se rapproche de celle de la source et d'autre part, la forme de l'impulsion de charge étant une demi sinusoïde, sa largeur, et donc le temps pendant lequel le courant circule, diminue également.

La précision et la régularité de la hauteur des marches détermine la précision des résultats, ce problème doit être réglé.

La première cause d'erreur disparaît en remplaçant la résistance par une source de courant, la deuxième en ne laissant passer le courant de charge que pendant une durée nettement inférieure à la demi période.

Limite de la tension de grille

Au départ, le condensateur du générateur d'escalier étant déchargé, la tension de grille est nulle, puis elle croît, dans le sens des valeurs négatives pour atteindre finalement la tension de crête fournie par le transformateur et ne bouge plus.

Il serait bon de décharger le condensateur lorsque la tension de G1 atteint une valeur suffisante pour le tube mesuré.

D'une part pour éviter qu'elle n'atteigne des valeurs dangereuses pour ce tube, et d'autre part pour relancer automatiquement un cycle de mesure.

Ceci est obtenu en raccordant un thyristor aux bornes du condensateur et en l'amorçant lorsque la tension atteint une valeur de consigne.

Comme il n'a plus de tension le thyristor se bloque et le cycle recommence.

J'ai utilisé le même transformateur que ci-dessus en le sous-alimentant de 30% ce qui permet d'obtenir jusqu'à plus de 200V de tension de polarisation négative et autorise la mesure de triodes à très faible résistance interne.

Générateur de tension de G2

Toujours grâce aux transformateurs inversés et sous-voltés, il est possible d'obtenir 110, 160, 220 et 320 Volts ce qui couvre les besoins de pratiquement tous les tubes dissipant moins de 100W anode.

Le fait d'utiliser un transformateur totalement indépendant permet de référencer cette tension à la tension d'anode et de simuler ainsi le mode Ultra Linéaire.

Mesure des tensions et des courants

Les deux entrées de la carte son devant avoir la même référence et l'une devant mesurer la tension d'anode, cette référence doit être la cathode.

En d'autres termes, la cathode du tube en cours de test est le point de référence (la masse) de tout le boîtier de mesure, puisque toutes les tensions appliquées au tube le sont par rapport à la cathode.

Ainsi, les tensions de G1 et G2 sont référencées à la cathode (sauf dans le mode Ultra Linéaire cité ci-dessus).

Une résistance est insérée entre cette cathode et le pied du transformateur alimentant les anodes, la tension à ses bornes est proportionnelle au courant bien évidemment.

Elle n'introduit aucune erreur sur la tension d'anode qui est toujours mesurée relativement à la cathode et elle n'est pas parcourue par le courant d'écran.

La même méthode est utilisée pour mesurer le courant d'écran. Néanmoins, parce qu'on ne peut mesurer que deux grandeurs simultanément, il faudra procéder à deux séries de mesures.

Se souvenir qu'il ne faut que quelques secondes pour capturer une série !

Les sécurités

Un tube peut présenter des courts-circuits internes, j'ai rajouté quelques indicateurs et sécurités pour signaler de telles anomalies à l'utilisateur.

Néanmoins, une mauvaise manipulation risque toujours d'endommager, soit le tube en test, soit l'équipement de mesure.

Une procédure à respecter lors du branchement d'un tube inconnu évitera des dégâts catastrophiques.

Encore quelques détails

Tout appareil de mesure doit être étalonné soigneusement si on veut qu'il fournisse des données exactes.

Une carte son de PC n'est pas un instrument de mesure et sa sensibilité est inconnue à priori, elle varie de façon totalement fantaisiste d'un constructeur à l'autre.

Le boîtier de mesure et le système d'analyse disposent de fonctions de calibration permettant un étalonnage ne nécessitant qu'un multimètre.

Le schéma complet

Le système d'analyse

ANNEXES

La pente, la résistance interne et le coefficient d'amplification.

Ces trois variables sont utilisées à toutes les sauces dans le calcul des circuits à tubes.

La pente (symbole **S**) est définie comme la variation de courant d'anode résultant de la variation de la tension de grille pour une tension d'anode constante.

Elle s'exprime en milliampères par volts (**mA/V**), les anglosaxons utilisent le terme de transconductance (**Gm**) exprimée en **μmho**, symbole d'une résistance négative.

1 **μmho** correspond à 1μA par volt. Donc, une pente de 1mA par volt correspond à une transconductance de 1000.

La résistance interne (symbole **R_i** ou **R_p**) est le quotient de la variation de tension d'anode par le courant d'anode à tension de grille constante.

En d'autres termes, **R_p = ΔU_a / ΔI_a**, où **ΔU_a** est la variation de tension d'anode et **ΔI_a** la variation de courant qui en résulte.

Le coefficient d'amplification (symbole **μ** ou **Mu**) est le produit des deux variables précédentes, soit **S x R_p**, où **R_p** est en Kohms.

Ainsi, un tube ayant une pente de 1,6 mA par volt (ou encore une transconductance de 1600) et une **R_i** de 62,5K aurait un coefficient d'amplification de 1,6 x 62,5 = 100.

Comme indiqué au début de ce chapitre, ces valeurs sont des variables et, comme telles, dépendent du point de fonctionnement réel du tube, c'est à dire de sa tension et de son courant d'anode.

Ces valeurs sont fournies par les constructeurs de tubes, l'exemple choisi est celui d'une ECC83 / 12AX7 pour un courant d'anode de 1,2 mA et une tension d'anode de 250 Volts.

Remarquez néanmoins que pour un courant de 0,5 mA et une tension de 100 Volts, la pente tombe à 1,25 mA/V alors que la R_i monte à 80K, le produit (μ) reste remarquablement constant.

Tous les tubes ne sont pas aussi bien conçus que la 12AX7 et il est souvent utile de connaître les véritables grandeurs si on l'utilise loin de ces points de fonctionnement ce qui est pratiquement toujours le cas des tubes de puissance ou les tensions et courants varient dans des proportions considérables lorsqu'on se déplace sur la droite de charge.

Mesure de la pente.

Sur une famille de caractéristiques d'anode, il suffit de tracer une verticale (tension d'anode constante) joignant deux séries de tension de grille espacées de 1 volt.

La longueur de cette verticale, donc la différence de courant pour un variation de tension grille de 1 volt, est la pente en mA par volt..

Si les séries de grille ne sont pas espacées de 1 volt, une simple règle de trois sera appliquée.

Mesure de la résistance interne.

C'est la tangente à une des séries à proximité du point de fonctionnement réel.

En pratique dans le contexte d'un amplificateur, le tube étant de préférence utilisé dans une zone linéaire, on peut assimiler la tangente à une corde qui est plus facile à tracer.

La pente de cette corde est la résistance interne recherchée.

Calcul du coefficient d'amplification.

Comme indiqué dans sa définition, il ne reste plus qu'à faire le produit de deux mesure précédentes pour l'obtenir.