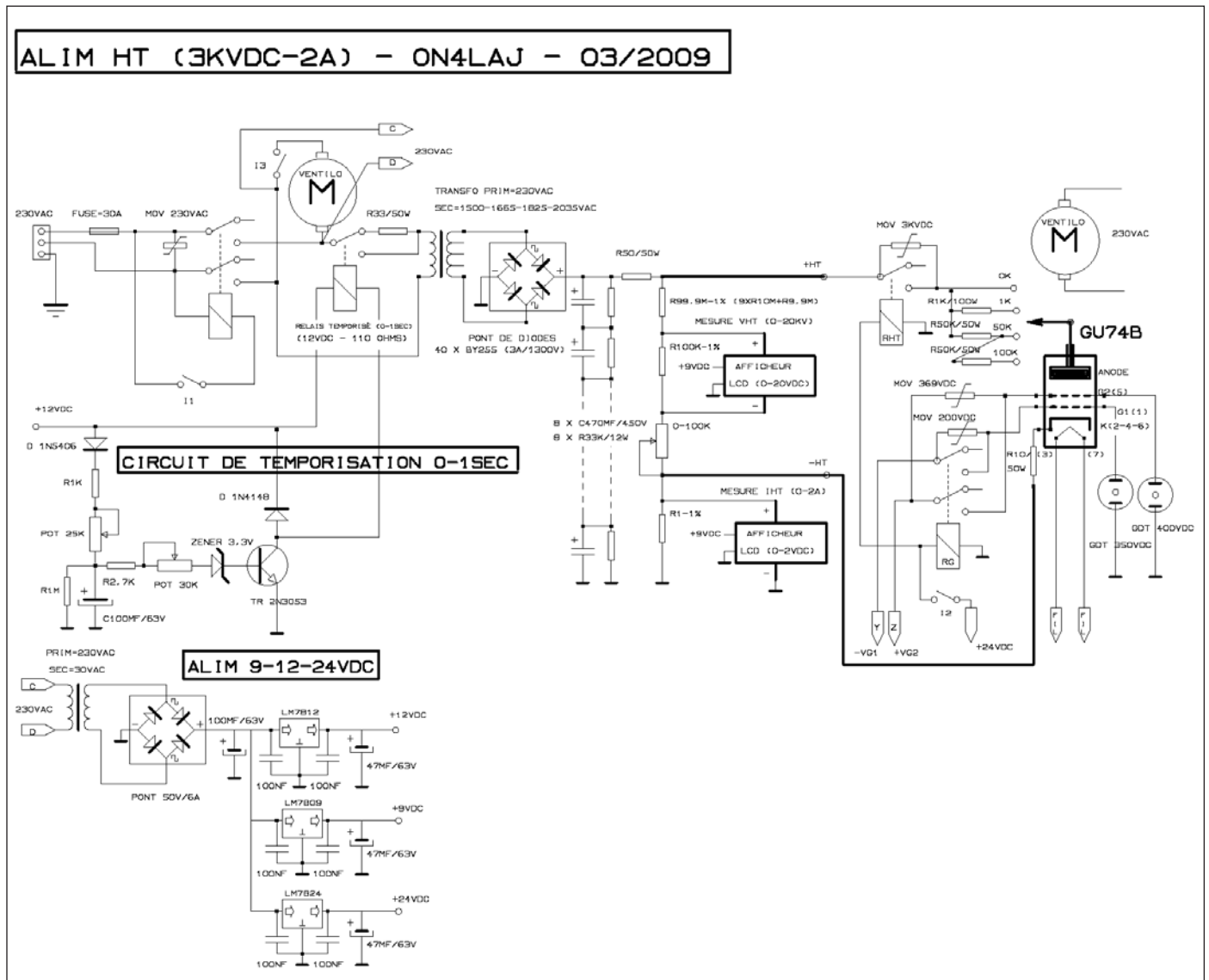


**La construction de l'appareil "régénérateur- testeur" de GU74B**

**Bouw van het regeneer- en testtoestel voor de GU74B**



L'appareil est composé de 3 modules indépendants (reliés par des cables):

- le module "alimentation HT"
- le module "alimentation filament, grille écran g2 et grille de commande g1"
- le module "GU74B" (le chassis qui porte un GU74B qui est refroidi en permanence par un ventilateur)

**Le module "alimentation HT"**

Le module "alimentation HT" permet de fournir une VHT de 3 kV (exactement 2869 VDC) et ce pour un IHT de 2 A permanent. Parmi les principaux composants de ce module, on distingue:

- le transformateur HT
- le pont de diodes
- les condensateurs de filtrage
- le circuit "soft-start" (composé d'une résistance de limitation du courant primaire et d'un circuit de temporisation)

Het toestel bestaat uit 3 onafhankelijke modules (via kabels met elkaar verbonden):

- de module 'hoogspanningsvoeding'
- de module 'gloeidraad-, g2 schermrooster- en g1 stuurroostervoeding'
- de module 'GU74B' (het chassis met GU74B en permanente luchtkoeling)

**De module 'hoogspanningsvoeding'**

De HS-voedingsmodule levert een hoogspanning VHS van 3 kV (om precies te zijn: 2869 VDC) bij een continue stroom IHT van 2 A. De belangrijkste onderdelen van deze module zijn, o.a.:

- de hoogspanningstrafo
- de diodebrug
- de filtercondensatoren
- de 'soft-start' schakeling (bestaande uit een begrenzingsweerstand voor de primaire stroom en een vertragingsschakeling)

- la résistance de limitation du courant de sortie en cas de "flashover"
- les afficheurs LCD destinés à l'affichage de la VHT et du IHT

On remarquera:

- que I1 est l'interrupteur général qui enclenche le contacteur chargé d'appliquer le 230 VAC au primaire du transformateur HT
- qu'un "varistor" (MOV de 230 VAC / 100 A) et qu'un fusible (de 30 A) protègent le primaire du transformateur HT. Pour le calcul du fusible, on considère que si le secondaire fournit 2869 VDC sous 2 A (ç-à-d. 5738 W), le primaire (sous 230 VAC) devra fournir un courant de 25 A (ç-à-d. 5738 W / 230 VAC = 25 A). En pratique, le fusible utilisé sera un fusible de 30 A.
- que l'interrupteur I3 permet d'enclencher un ventilateur destiné au refroidissement de tous les composants de l'alimentation HT.

#### Le transformateur HT

Le transformateur HT (de récupération) est un transformateur de 4 kVA avec un primaire de 230 VAC, un secondaire de 2 A permanent et diverses prises secondaires de 0-210-370-535-2035 VAC; ce qui correspond (après un redressement en double alternance et un filtrage par condensateur) à des tensions continues de 0-296-522-754-2869 VDC.

On remarquera que, si le secondaire est exploité dans l'autre sens, les tensions alternatives sont 0-1500-1665-1825-2035 VAC; ce qui correspond (après un redressement en double alternance et un filtrage par condensateur) à des tensions continues de 0-2115-2348-2573-2869 VDC.

On rappellera que le redressement (en double alternance avec un filtrage par condensateur) fournit une tension continue égale à  $\sqrt{2}$  fois la tension alternative (car le condensateur se charge à la valeur de crête de la tension alternative). Par exemple, une tension alternative de 2035 VAC donnera (après un redressement en double alternance et un filtrage par condensateur) une tension continue de  $2035 \times 1,41 = 2869$  VDC.

#### Le pont de diodes

Après avoir recherché (sur Internet) un redresseur HT (4 kV- 2 A), j'ai décidé (vu le coût élevé de ce composant) qu'il était plus raisonnable de construire le pont à partir d'un ensemble de diodes classiques (40 diodes BY255 de 3 A / 1300 V).

Pour chacune des 4 branches du pont, j'utilise 10 diodes (5 séries de 2 diodes en parallèle) ce qui permet de présenter un pont capable de supporter 6500 VDC (5 x 1300 VDC) par branche du pont et 6 A (2 diodes de 3 A en parallèle).

#### Le bloc de filtrage

Le condensateur de filtrage à utiliser doit présenter une capacité de quelques dizaines de microfarads et une isolation de 4 kV.

La formule classique (voir ARRL Handbook) est:

$$C(\mu F) = 10^6 / (2 \times \sqrt{3} \times Fr \times RI \times Tripple)$$

Le calcul de la valeur de cette capacité est fonction:

- de "Tripple" qui est le facteur de "ripple" admis
- de "Fr" qui est fonction du type de redressement (à une alternance, à double alternance, ...) et de la fréquence du secteur (50 Hz, 60 Hz)
- de "RI" qui est la résistance de la charge à alimenter

Si on considère:

- un redressement "double alternance" à la "fréquence secteur" de 50 Hz  $\rightarrow Fr = 2 \times 50 = 100$
- un taux de "ripple" de 3%  $\rightarrow Tripple = 0,03$
- l'alimentation d'une charge sous 2500 VDC et 1,5 A  $\rightarrow RI = 2500/1,5 = 1666 \Omega$ .

Dans ces conditions de fonctionnement, la capacité à utiliser sera de:

$$C(\mu F) = 10^6 / (2 \times 1,73 \times 100 \times 1666 \times 0,03) = 10^6 / 17314 = 57,75 \mu F$$

Pour mettre en œuvre une telle capacité, l'idéal serait d'utiliser un (gros) condensateur (généralement à l'huile) d'une capacité proche de 57  $\mu F$  et isolé à 4 kV.

- de begrenziingsweerstand voor de uitgangsstroom in het geval van vonkoverslag
- de LCD-uitlezing voor VHT en IHT

We zien dat:

- de algemene schakelaar I1 het relais bekrachtigt dat 230 VAC legt aan de primaire van de hoogspanningstrafo
- een 'varistor' (MOV, 230 VAC / 100 A) en een smeltveiligheid (30 A) de primaire van de trafo beveiligen. Berekening: als de secundaire 2 A levert bij 2869 VDC (m.a.w. 5738 W), dan moet de primaire 25 A leveren (5738 W / 230 VAC = 25 A). In de praktijk wordt een 30 A smeltveiligheid toegepast.
- via schakelaar I3 een ventilator wordt ingeschakeld, die alle elementen van de hoogspanningsvoeding koelt

#### De hoogspanningstransformator

De HS-trafo (recuperatie) is een trafo van 4 kVA met een primaire van 230 VAC en een secundaire van 2 A (continu) met diverse aftakingspunten 0-210-370-535-2035 VAC; hetgeen - na dubbele gelijkrichting en condensatorafvlakking - overeenstemt met gelijkspanningen van 0-296-522-754-2869 VDC.

Met de 2035 VAC aftakking als referentie bekomt men wisselspanningen van 0-1500-1665-1825-2035 VAC. Dit komt, na dubbele gelijkrichting en condensatorafvlakking, overeen met gelijkspanningen van 0-2115-2348-2573-2869 VDC.

Ter herinnering: dubbele gelijkrichting met een condensatorfilter levert een gelijkspanning die gelijk is aan  $\sqrt{2}$  x de wisselspanning (de condensator wordt immers opgeladen tot de topwaarde van de wisselspanning). Zo zal een wisselspanning van 2035 VAC (na dubbele gelijkrichting en condensatorfiltering) resulteren in een gelijkspanning van  $2035 \times 1,41 = 2869$  VDC.

#### De diodebrug

Na opzoekingen (via het internet) van een hoogspanningsgelijkrichter (4 kV- 2 A) en omwille van de aanzienlijke kost van dergelijk onderdeel, vond ik het verstandiger om de diodebrug met klassieke diodes samen te stellen (40 diodes BY255 van 3 A / 1300 V).

Voor elk van de vier takken worden 10 diodes gebruikt (5 x 2 diodes in parallel), waardoor een brug ontstaat die een inverse topspanning van 6500 VDC (5 x 1300 VDC) per tak en 6 A (2 diodes van 3 A in parallel) aankan.

#### Het filterblok

De afvlakcondensator moet een capaciteit hebben van enkele tientallen microfarad en een doorslagspanning van 4 kV.

De klassieke formule (zie het ARRL Handbook) luidt als volgt:

$$C(\mu F) = 10^6 / (2 \times \sqrt{3} \times Fr \times RI \times Tripple)$$

De berekende capaciteit is functie van:

- 'Tripple': het toegelaten rimpelniveau
- 'Fr': afhankelijk van het gelijkrichtingstype (enkele/dubbele gelijkrichting) en de frequentie van het elektriciteitsnet (50 Hz, 60 Hz)
- 'RI': de weerstand van de te voeden belasting

Laten we het volgende aannemen:

- dubbele gelijkrichting en 50 Hz netfrequentie  $\rightarrow Fr = 2 \times 50 = 100$
- een rimpelniveau van 3%  $\rightarrow Tripple = 0,03$
- voeding van een belasting onder 2500 VDC en 1,5 A  $\rightarrow RI = 2500/1,5 = 1666 \Omega$ .

Onder deze werkingsvoorwaarden is de te gebruiken capaciteit:

$$C(\mu F) = 10^6 / (2 \times 1,73 \times 100 \times 1666 \times 0,03) = 10^6 / 17314 = 57,75 \mu F$$

Ideaal hiervoor ware een (grote) (olie-) condensator met een capaciteit rond 57  $\mu F$  en een doorslagspanning van 4 kV.

N'ayant pas trouvé un tel condensateur, il a été nécessaire de construire un condensateur équivalent à partir de la mise en série de 8 condensateurs électrolytiques classiques de 470  $\mu\text{F}$  avec isolation de 450 VDC. Cette mise en série de 8 condensateurs donne une capacité de 58  $\mu\text{F}$  (c-à-d. 470  $\mu\text{F}$  / 8) avec une isolation de 3600 VDC (c-à-d. 8 x 450 VDC).

*Les résistances "shunt" (à placer en parallèle sur chacun des 8 condensateurs)*

Pourquoi utiliser des résistances "shunt"?

Rappelons nous que:

- les techniques de fabrication des condensateurs électrolytiques classiques sont à l'origine de condensateurs qui peuvent présenter de grandes tolérances (jusqu'à 20% en plus ou en moins) au niveau de la capacité.
- la tension, qui alimente plusieurs condensateurs placés en série, se répartit de façon inversement proportionnelle à la valeur de la capacité. En effet, le condensateur de plus faible capacité présente à ses bornes une tension plus élevée que celles présentées par chacun des autres condensateurs.

En utilisant 8 condensateurs en série (en principe de la même capacité, c-à-d. de 470  $\mu\text{F}$  / 450 VDC), nous devons admettre que certains d'entre eux (à cause des tolérances) doivent supporter une tension qui serait proche de la tension d'isolement (450 VDC). Pour éviter cela, il est nécessaire de répartir la VHT entre les 8 condensateurs utilisés et ce en plaçant (en parallèle) une résistance "shunt" sur chacun des condensateurs.

Calcul de la valeur d'une résistance "shunt".

Considérant que l'ARRL Handbook conseille d'utiliser 100  $\Omega$  par Volt, on en déduira que pour une VHT de 2500 VDC, la valeur totale de la résistance "shunt" sera de 2500 x 100 = 250 k $\Omega$ . La valeur de chacune des résistances "shunt" sera donc de 250 k $\Omega$  / 8 = 31.25 k $\Omega$  (en pratique 33k $\Omega$ ).

Calcul de la puissance à dissiper par chacune des résistances "shunt". Pour une VHT de 2500 VDC, la puissance à dissiper par une résistance "shunt" sera de 2,9 W (c-à-d.  $P=U^2/R = (2500/8)^2 / 33000 = 2,9$  W). En pratique, les 8 résistances "shunt" choisies sont des résistances de 33 k $\Omega$  / 12 W. Dans ces conditions, on remarquera que la tension aux bornes de chacune des résistances "shunt" (donc de chacun des condensateurs) est de 2500 / 8 = 312,5VDC alors que chaque condensateur utilisé présente une tension d'isolement de 450 VDC.

*Le circuit "soft-start"*

Le circuit "soft-start" est composé d'une résistance de limitation du courant primaire et d'un circuit de temporisation.

Lors de la mise sous tension de l'alimentation HT (à la fermeture de l'interrupteur I1), l'énorme courant primaire (car les condensateurs déchargés se présentent comme un court-circuit) doit être limité pour éviter des problèmes tels que:

- le déclenchement du fusible à chaque mise sous tension (ce qui imposerait d'utiliser un fusible surdimensionné)
- le "stress" du pont de diodes qui (pendant un court instant) présente sa sortie en court-circuit

Pour limiter le courant primaire à l'enclenchement, on utilise un dispositif "soft-start" qui consiste à placer une résistance en série dans le circuit primaire et à court-circuiter cette résistance après une fraction de seconde (via un circuit de temporisation). Personnellement j'utilise:

- une résistance de 33  $\Omega$  / 50 W dans le circuit primaire du transformateur
- un dispositif de temporisation réglable (de 0,04 à 1 seconde) chargé de court-circuiter la résistance

Calcul de la résistance de limitation de 33  $\Omega$  / 50W

Pendant une fraction de seconde (de l'ordre de quelques dizaines de millisecondes), lors de la mise sous tension de l'alimentation HT, le pont redresseur alimente le condensateur de filtrage, qui (initialement déchargé) se présente comme un court-circuit; ce qui (côté circuit pri-

Maar vermits deze ideale condensator niet te vinden was, moest ik een equivalent zien te ontwerpen door serieschakeling van 8 klassieke elektrolytische condensatoren van 470  $\mu\text{F}$  met een isolatiewaarde van 450 VDC. Hierdoor wordt de totale capaciteit 58  $\mu\text{F}$  (470  $\mu\text{F}$  / 8) en de totale doorslagspanning 3600 VDC (8 x 450 VDC).

*De shuntweerstand (parallel over elk van de 8 condensatoren te plaatsen)*

Waarom shuntweerstand gebruiken?

Herinneren we aan het volgende:

- een hoge tolerantie (tot 20 % plus of min) qua capaciteitswaarde is inherent aan de fabricatietechnieken voor klassieke elektrolytische condensatoren
- de spanning wordt in de serieschakeling omgekeerd evenredig met de capaciteitswaarde verdeeld. Een condensator met een kleinere capaciteit zal aan zijn klemmen een hogere spanning vertonen dan deze over de andere condensatoren.

Doordat we 8 condensatoren in serie gebruiken (in theorie met een identieke capaciteit, 470  $\mu\text{F}$  / 450 VDC), moeten we aannemen dat bepaalde condensatoren (door de toleranties) blootstaan aan een spanning die de doorslagspanning benadert (450 VDC). Om dit te vermijden, moet de hoogspanning over de 8 condensatoren gelijk verdeeld worden door een shuntweerstand over elke condensator te plaatsen.

Berekening van de shuntweerstand

In het ARRL Handbook wordt een shuntwaarde van 100  $\Omega$  per volt aanbevolen.

Voor een hoogspanning van 2500 VDC komt dit neer op een totale shuntwaarde van 2500 x 100 = 250 k $\Omega$ , of 250 k $\Omega$  / 8 = 31,25 k $\Omega$  (in de praktijk: 33 k $\Omega$ ) per shuntweerstand.

Berekening van de vermogendissipatie door elke shunt

Bij 2500 VDC bedraagt het te dissiperen vermogen van een shuntweerstand 2,9 W ( $P=U^2/R = (2500/8)^2 / 33000 = 2,9$  W). Praktisch gezien werd gekozen voor 8 x 33 k $\Omega$  / 12 W weerstanden. Onder deze voorwaarden is de spanning over elke weerstand – dus ook over elke condensator - 2500 / 8 = 312,5 VDC, terwijl de doorslagspanning van elke condensator 450 VDC is.

*De 'soft start' schakeling*

De 'soft start' schakeling bestaat uit een begrenzingsweerstand voor de primaire stroom en een vertragingsschakeling.

Bij het inschakelen van de hoogspanningsvoeding (sluiten van de schakelaar I1) moet de hoge primaire stroom (door de ontladen condensatoren) worden begrensd om problemen te vermijden, zoals:

- het telkens in werking treden van de zekering bij het inschakelen (hetgeen een overgedimensioneerde zekering zou vereisen)
- een overbelasting van de diodebrug die korstondig kortgesloten wordt (zolang de condensatoren niet opladen)

Om de primaire inschakelstroom te begrenzen wordt een 'soft start' systeem toegepast, bestaande uit een weerstand in serie met de primaire en een tijdschakelaar. De weerstand wordt na een fractie van een seconde kortgesloten via een tijdschakeling. Zelf gebruik ik:

- een weerstand van 33  $\Omega$  / 50 W in de primaire kring van de transformator
- een regelbare tijdschakeling (0,04 tot 1 seconde) die de weerstand kortsluit

Berekening van de begrenzingsweerstand van 33  $\Omega$  / 50W

Bij het inschakelen van de hoogspanning 'ziet' de bruggelijkrichter de afvlakcondensator (initieel in ontladen toestand) gedurende een fractie van een seconde (enkele tientallen milliseconden) als een kortsluiting. Dit veroorzaakt een hoge stroom in de primaire kring. Op dit ogenblik

maire) est à l'origine d'un courant primaire important. A cet instant, la tension fournie par le pont est de l'ordre de 2035 VDC (en théorie, il faut retirer autant de fois 0,7 V qu'il y a de diodes actives). On se rappellera que les choix réalisés (lors de la construction du pont redresseur) permettent d'exploiter un courant maximum de 6 ADC. Par sécurité, nous utiliserons dans les calculs un courant maximum de 5 ADC. Du côté du secondaire, la puissance (instantanée) à considérer est de 10175 W ( $P=U \times I = 2035 \times 5 = 10175$  W); celle-ci, reportée au primaire (si on considère un transformateur idéal dont le rendement est de 100%), correspond à un courant primaire de 44 A ( $P=U \times I \rightarrow I=P/U=10175/230=44$  A). On se rappellera que le courant primaire maximum (qui a été calculé pour un fonctionnement normal) a été fixé à 25 A (voir "calcul du fusible dans le circuit primaire"). Calculons la valeur ohmique de la résistance de limitation (à placer en série dans le circuit primaire du transformateur) pour limiter le courant primaire à 25 A:  $P=R \times I^2 \rightarrow R=P/I^2 = 10175/(25)^2=16,28 \Omega$ . Par sécurité, la résistance de limitation qui a été choisie, est une résistance de  $33 \Omega / 50W$ . La puissance à dissiper par cette résistance de limitation a été choisie arbitrairement à 50 W car cette résistance ne doit être active que pendant une fraction de seconde (elle doit être court-circuitée par le circuit de temporisation après un délai de l'ordre de 0,04 à 1 seconde – voir "le circuit de temporisation").

On remarquera que, dans le cas d'une anomalie du circuit de temporisation (si par exemple le relais ne s'enclenche pas et de ce fait ne court-circuite pas la résistance de limitation), la résistance de limitation servira de fusible car la puissance dissipée de 50 W sera atteinte pour un courant primaire de 1,2 A ( $P=R \times I^2 \rightarrow I^2=P/R=50/33=1,51$  A  $\rightarrow I=1,2$  A).

#### Le circuit de temporisation

Le circuit de temporisation (utilisé dans le dispositif "soft-start") permet de court-circuiter (après un délai de 0,04 à 1 seconde) la résistance de  $33 \Omega / 50W$  (qui est placée dans le circuit primaire de l'alimentation HT). En effet, lors de la mise sous tension de l'alimentation HT, le courant primaire du transformateur HT est d'abord limité par la présence de la résistance ( $33 \Omega / 50 W$ ) et ensuite, après un délai de 0,04 à 1 seconde (en fait le temps nécessaire pour que les condensateurs de l'alimentation HT commencent à se charger), la résistance est court-circuitée par le circuit de temporisation.

Le circuit de temporisation est construit selon le principe suivant:

- le condensateur C (de 100  $\mu F$ ) est chargé sous 12 VDC au travers d'une résistance (en fait une résistance fixe de 1 k $\Omega$  en série avec un potentiomètre de 0-25 k $\Omega$ )
- le transistor TR conduit lorsque  $U_c$  (la tension aux bornes de C) atteint et dépasse 4 V c-à-d. lorsque  $U_c$  atteint et dépasse la tension de la diode zener (3,3 V) plus le  $V_{BE}$  (0,7 V) du transistor
- le transistor TR active le relais qui court-circuite la résistance de  $33 \Omega / 50 W$

#### Calcul de la constante de temps (RC)

Calculons la constante de temps caractéristique de l'ensemble formé par le condensateur C (100  $\mu F$ ) et des résistances (une résistance fixe de 1 k $\Omega$  en série avec un potentiomètre de 0-25 k $\Omega$ ):

- si le potentiomètre est au minimum (0 k $\Omega$ ), la valeur de la résistance est de 1 k $\Omega \rightarrow RC=10^3 \times 100 \times 10^{-6} = 0,1$  seconde
- si le potentiomètre est au maximum (25 k $\Omega$ ), la valeur de la résistance est de 26 k $\Omega \rightarrow RC=26 \times 10^3 \times 100 \times 10^{-6} = 2,6$  secondes.

Calculons le délai de temporisation lorsque le potentiomètre est au minimum (le RC est égal à 0,1 seconde) et lorsque le potentiomètre est au maximum (le RC est égal à 2,6 secondes). Pour ce faire, nous devons utiliser la formule relative à la charge d'un condensateur en fonction du temps:

$$U_c = U \times (1 - e^{-t/RC})$$

A partir de cette formule, essayons de dégager "t".

$$U_c/U = 1 - e^{-t/RC} \rightarrow e^{-t/RC} = 1 - U_c/U = (U - U_c)/U \rightarrow e^{t/RC} = U/(U - U_c) \rightarrow t/RC = \ln(U/(U - U_c)) \rightarrow t = RC \times \ln(U/(U - U_c))$$

bedraagt de spanning van de bruggekrichter ongeveer 2035 VDC (in theorie te verminderen met 0,7 V per actieve diode).

De bruggekrichter is ontworpen (zie hiervoor) voor een maximum stroom van 6 ADC.

Veiligheidshalve houden we het voor de berekening bij een maximumstroom van 5 ADC. Aan de secondaire is het ogenblikkelijk vermogen dus 10175 W ( $P=U \times I = 2035 \times 5 = 10175$  W); herleid tot de primaire (en uitgaande van een ideale transformator met 100 % rendement), stemt dit overeen met een primaire stroom van 44 A ( $P=U \times I \rightarrow I=P/U=10175/230=44$  A).

De maximum primaire stroom (in normaal bedrijf) werd op 25 A vastgelegd (zie 'berekening van de zekering in de primaire kring').

Laten we dus de ohmse waarde van de begrenzsweerstand (in serie met de primaire kring van de trafo te plaatsen) berekenen om de primaire stroom te beperken tot 25 A:  $P=R \times I^2 \rightarrow R=P/I^2 = 10175/(25)^2=16,28 \Omega$ .

Veiligheidshalve werd een  $33 \Omega / 50W$  weerstand gekozen. Het 50 W dissipatievermogen werd willekeurig bepaald omdat de weerstand slechts een fractie van een seconde moet functioneren (de weerstand wordt via een tijdschakeling kortgesloten na 0,04 tot 1 seconde, zie verder onder 'de tijdschakeling'.

Merk op dat, in het geval van falen van de tijdschakeling (bijvoorbeeld open blijven van het relais waardoor de begrenzsweerstand niet wordt kortgesloten), de begrenzsweerstand als zekering zal dienen vermits het gedissipeerd vermogen 50 W zal bereiken bij een primaire stroom van 1,2 A ( $P=R \times I^2 \rightarrow I^2=P/R=50/33=1,51$  A  $\rightarrow I=1,2$  A).

#### De tijdschakeling

De tijdschakeling binnen het soft start systeem maakt het mogelijk om de  $33 \Omega / 50W$  weerstand in de primaire kring kort te sluiten (na 0,04 tot 1 seconde).

Bij het inschakelen van de voeding wordt eerst de primaire stroom begrensd door de weerstand ( $33 \Omega / 50 W$ ); na 0,04 tot 1 seconde (in feite de tijd die nodig is om het opladen van de condensatoren te starten) wordt de weerstand kortgesloten door de tijdschakeling.

Het ontwerp van tijdschakeling beantwoordt aan het volgende principe:

- de condensator C (100  $\mu F$ ) wordt bij 12 VDC via een weerstand geladen (in feite: een vaste 1 k $\Omega$  weerstand in serie met een potentiometer 0-25 k $\Omega$ )
- de transistor TR geleidt zodra  $U_c$  (de spanning aan de klemmen van C) 4 V bereikt en overschrijdt, d.i. de zenerdiodespanning (3,3 V) plus  $V_{BE}$  (0,7 V) van de transistor
- de transistor TR activeert het relais dat de  $33 \Omega / 50 W$  weerstand kortsluit

#### Berekening van de tijdconstante (RC)

Laten we de karakteristieke tijdconstante berekenen voor het geheel van de condensator C (100  $\mu F$ ) en de weerstanden (de vaste 1 k $\Omega$  weerstand in serie met de 0-25 k $\Omega$  potentiometer):

- met de potentiometer in minimumpositie (0 k $\Omega$ ), is de weerstandswaarde: 1 k $\Omega \rightarrow RC=10^3 \times 100 \times 10^{-6} = 0,1$  seconde
- met de potentiometer in de maximumpositie (25 k $\Omega$ ) is de weerstandswaarde: 26 k $\Omega \rightarrow RC=26 \times 10^3 \times 100 \times 10^{-6} = 2,6$  seconde.

Nu berekenen we de tijdvertraging met de potentiometer respectievelijk in minimumstand ( $RC = 0,1$  seconde) en maximumstand ( $RC = 2,6$  seconde).

Hiervoor gebruiken we de formule voor de lading van een condensator in functie van de tijd:

$$U_c = U \times (1 - e^{-t/RC})$$

Uit deze formule proberen we 't' op te lossen:

$$U_c/U = 1 - e^{-t/RC} \rightarrow e^{-t/RC} = 1 - U_c/U = (U - U_c)/U \rightarrow e^{t/RC} = U/(U - U_c) \rightarrow t/RC = \ln(U/(U - U_c)) \rightarrow t = RC \times \ln(U/(U - U_c))$$

Rappels mathématiques:  
si  $e^y = z \rightarrow y = \ln(z)$

$\ln$  est un logarithme népérien:  $\ln(z) = 2,3 \times \log_{10}(z)$   
 $e = 2,71828\dots$

Pour:

$U=12 \text{ VDC}$  et  $U_c=4 \text{ VDC} \rightarrow t=RC \times \ln((12/(12-4))) = RC \times \ln(1.5) = RC \times 0,4054$

- un RC de 0,1 seconde (le potentiomètre est sur 0 k $\Omega$ )  
 $\rightarrow t = 0,1 \times 0,4054 = 0,04$  seconde
- un RC de 2,6 secondes (le potentiomètre est sur 25 k $\Omega$ )  
 $\rightarrow t = 2,6 \times 0,4054 = 1,05$  seconde

En résumé, grâce au circuit de temporisation, la résistance de 33  $\Omega$  / 50 W est court-circuitée après une temporisation de 0,04 seconde si le potentiomètre est au minimum et de 1,05 seconde si le potentiomètre est au maximum.

On remarquera:

- que dans la pratique, les temps de temporisation peuvent être différents de ceux calculés car le condensateur électrolytique utilisé peut présenter une tolérance (en plus ou en moins) de l'ordre de 20%
- qu'une résistance de 1 M $\Omega$  a été placée en parallèle sur le condensateur C et ce dans le but de permettre au condensateur C de se décharger lorsque le circuit de temporisation est mis en "power off"

#### Le transistor de commutation

Le transistor qui commande le relais (12 VDC / 110  $\Omega$ ) est un transistor classique capable de supporter un  $I_c$  de l'ordre de 100 mA ( $I_c$  nécessaire = 12 V / 110  $\Omega$  = 100 mA). La résistance dans le circuit de base permet de doser le  $I_b$  (qui permet de choisir un collage franc du relais).

Calcul de cette résistance ( $R_b$ ) du circuit de base.

Dans le cas d'un transistor monté en "émetteur commun" nous avons la relation  $I_c = \beta \times I_b$  (avec un " $\beta$ " de l'ordre de 100). Pour que le  $I_c$  soit de 100 mA, il faut que le  $I_b$  soit de 1 mA. La relation  $U_c = V_{be} + (R_b \times I_b)$  nous permet de calculer le  $R_b$  nécessaire  $\rightarrow 4 \text{ V} = 0,7 \text{ V} + (R_b \times 1 \text{ mA})$   
 $\rightarrow R_b = (4 \text{ V} - 0,7 \text{ V}) / 1 \text{ mA} \rightarrow R_b = 3,3 \text{ V} / 1 \text{ mA} = 3,3 \text{ k}\Omega$ . En pratique, j'ai choisi une résistance fixe de 2,7 k $\Omega$  en série avec un potentiomètre de 0-30 k $\Omega$ .

#### La résistance série placée dans la sortie HT+

La résistance (50  $\Omega$  / 50W) placée en série dans la sortie HT+, permet de limiter (et même d'éliminer) les dégâts provoqués par un éventuel "flashover" (voir antérieurement).

Rappelons que lors d'un "flashover", il y a apparition d'un courant de court-circuit (très élevé mais de courte durée) qui s'établit entre l'anode et une des grilles (généralement la grille-écran g2 – parfois la grille de commande g1) et qui est susceptible d'endommager le tube et/ou certains des composants des circuits d'alimentation (de l'anode, de la grille-écran g2 et de la grille de commande g1).

Concernant cette résistance série de limitation, on remarquera que le choix de la valeur ohmique ainsi que de la puissance à dissiper doivent se faire par estimation car il est difficile de prévoir les caractéristiques présentées par un éventuel "flashover". Généralement:

- la valeur ohmique choisie représente quelques dizaines d'ohms (pour limiter en conséquence l'éventuel courant de court-circuit provoqué par le "flashover"). La valeur qui a été choisie est de 50  $\Omega$ .
- la valeur de la puissance à dissiper sera au moins égale à celle qui est à dissiper lors d'un fonctionnement normal. Pour un IHT de 1A, la puissance à dissiper sera de  $P = R \times I^2 = 50 \times 1 = 50 \text{ W}$ . La valeur qui a été choisie est de 50 W.

#### L'affichage de la VHT et du IHT

L'affichage se fera via des afficheurs LCD dont la position du point décimal sera choisie pour exprimer des kV (pour la VHT) et des A (pour l'IHT). L'affichage de la VHT se fait à partir d'un afficheur LCD (0-20 VDC) sous le format d'affichage "nn.nn" - par exemple 1,95 kVDC mesuré sera affiché 01.95kVDC.

Wiskundige weetjes:  
als  $e^y = z \rightarrow y = \ln(z)$

$\ln$  is een neperiaanse logaritme:  $\ln(z) = 2,3 \times \log_{10}(z)$   
 $e = 2,71828\dots$

Als

$U=12 \text{ VDC}$  en  $U_c=4 \text{ VDC} \rightarrow t=RC \times \ln((12/(12-4))) = RC \times \ln(1.5) = RC \times 0,4054$

- bij een RC van 0,1 seconde (potentiometer in de stand 0 k $\Omega$ )  
 $\rightarrow t = 0,1 \times 0,4054 = 0,04$  seconde
- bij een RC van 2,6 seconde (potentiometer in de stand 25 k $\Omega$ )  
 $\rightarrow t = 2,6 \times 0,4054 = 1,05$  seconde

Samengevat:

de tijdschakelaar zal de 33  $\Omega$  / 50 W weerstand kortsluiten na 0,04 seconde met de potmeter in zijn kleinste stand en na 1,05 seconde in zijn hoogste stand.

Merk op dat:

- de vertragingstijd in de praktijk kan afwijken van de berekende tijd door de tolerantie (in min of in plus) van de condensator, in de buurt van 20 %
- een 1 M $\Omega$  weerstand over de condensator C werd geplaatst opdat de condensator zich zou ontladen wanneer de tijdschakeling in rust gaat

#### De schakeltransistor

De schakeltransistor die het relais (12 VDC / 110  $\Omega$ ) stuurt, is een klassieke transistor in staat om ca. 100 mA  $I_c$  te geleiden (vereiste  $I_c = 12 \text{ V} / 110 \Omega = 100 \text{ mA}$ ). Met de weerstand in de basis kan de basisstroom  $I_b$  worden bijgesteld (om het relais zonder haperingen te doen aantrekken).

Berekening van de weerstand ( $R_b$ ) in de basis

In het geval van een transistor in 'gemeenschappelijke emitterschakeling', geldt:  $I_c = \beta \times I_b$  (' $\beta$ ' ~ 100).

Voor een  $I_c$  van 100 mA, moet  $I_b$  1 mA zijn. Met de formule  $U_c = V_{be} + (R_b \times I_b)$  kunnen we de vereiste waarde van  $R_b$  berekenen  $\rightarrow 4 \text{ V} = 0,7 \text{ V} + (R_b \times 1 \text{ mA})$   
 $\rightarrow R_b = (4 \text{ V} - 0,7 \text{ V}) / 1 \text{ mA} \rightarrow R_b = 3,3 \text{ V} / 1 \text{ mA} = 3,3 \text{ k}\Omega$ . Ik gebruikte in de praktijk een vaste 2,7 k $\Omega$  weerstand in serie met een 0-30 k $\Omega$  potentiometer.

#### De serieweerstand in de hoogspanningsuitgang HT+

Met de 50  $\Omega$  / 50W weerstand in serie met de hoogspanningsuitgang HT+ kan beschadiging door een eventuele vonkoverslag worden ingedijkt of zelfs vermeden.

Ter herinnering: tijdens een vonkoverslag treedt een (zeer hoge, maar kortstondige) kortsluitstroom op tussen de anode en één van de roosters (meestal het schermrooster g2, soms het stuurrooster g1). Hierdoor kan de buis of kunnen bepaalde onderdelen van de voedingschakelingen (anode, scherm- en stuurrooster), beschadigd worden.

Omdat het moeilijk is om de kenmerken van een vonkoverslag op voorhand te bepalen, moet de waarde van de serieweerstand geschat worden. In het algemeen:

- de gekozen weerstandswaarde bedraagt enkele tientallen  $\Omega$  (om de eventuele kortsluitstroom door flashover te begrenzen). Praktische waarde: 50  $\Omega$
- de vermogendissipatie zal minstens gelijk zijn aan de dissipatie bij normale werking. Bij IHT = 1 A,  $P = R \times I^2 = 50 \times 1 = 50 \text{ W}$ . Praktische waarde: 50 W.

#### Aflezing van VHT en IHT

De aanduiding van VHT en IHT gebeurt door middel van LCD-displays met het decimaalteken in kV (voor VHT) en A (voor IHT).

De uitlezing van VHT gebeurt met een 0-20 VDC LCD-display met notatieformaat 'nn.nn'. Zo zal een meetwaarde van 1,95 kVDC als 01.95 kVDC worden afgebeeld.



Pour mesurer la VHT, on placera (entre la sortie HT+ et la masse) une résistance de 100 MΩ, qui, sous une VHT de 3000 VDC, laissera passer un courant de mesure (Im) de 30 μA ( $I_m = V/R = 3000 \text{ V} / 100 \text{ M}\Omega = 30 \text{ }\mu\text{A}$ ). En pratique cette résistance de 100 MΩ sera constituée d'une série de résistances telles que:

- 9 résistances de 10 MΩ
- 1 résistance de 9 MΩ
- 1 résistance de 900 kΩ
- 1 résistance de 100 kΩ (précision de 1%)
- 1 potentiomètre de 0-100 kΩ

Le potentiomètre de 0-100 kΩ (qui est destiné à compenser les tolérances présentées par les résistances utilisées) est réglé pour que le Im soit de 30 μA et ce pour une VHT de 3000 VDC. La résistance qui permet de mesurer la VHT est la résistance de 100 kΩ (précision 1%) car la tension à ses bornes alimente l'afficheur LCD (0-20 VDC). En effet, pour une VHT de 3000 VDC, le Im est de 30 μA et la tension aux bornes de la résistance de 100 kΩ est de  $100 \text{ k}\Omega \times 30 \text{ }\mu\text{A} = 3 \text{ VDC}$ . En résumé, pour une VHT de 3000 VDC, l'afficheur mesure 3 VDC et affiche (selon le format d'affichage "nn.nn") une tension de 03.00kVDC.

On remarquera:

- que la résistance de 100 kΩ sera placée (pour des raisons évidentes de sécurité) du côté "froid" (ç-à-d. le plus loin possible de la sortie HT+)
- la présence d'une résistance de 1 Ω / 30 W (voir ci-après – l'affichage du IHT) dont la valeur est à négliger dans la mesure de la VHT
- que la puissance à dissiper des résistances utilisées est de peu d'importance car le Im est faible (pour VHT de 3000 VDC, le Im est de 30 μA) – pour une résistance de 10 MΩ, la puissance à dissiper sera de 9 mW ( $P = R \times I^2 = 10 \text{ M}\Omega \times 30^2 \text{ }\mu\text{A} = 9 \text{ mW}$ )

L'affichage du IHT se fait à partir d'un afficheur LCD (0-2 VDC) sous le format d'affichage "n.nnn" - par exemple 1,252 VDC mesuré sera affiché 1.252ADC. Pour mesurer le IHT, on placera (entre la sortie HT- et la masse) une résistance de 1 Ω (précision de 1%) dont la tension aux bornes alimentera l'afficheur LCD (0-2 VDC). En effet, on constatera qu'une résistance de 1 Ω traversée par un courant, présente à ses bornes une tension dont la valeur est celle du courant; la grandeur mesurée (en volts) et affichée correspond au courant qui traverse la résistance. Par exemple, si  $I = 1 \text{ A} \rightarrow U = R \times I = 1 \times 1 = 1 \text{ V}$ ; si  $I = 2 \text{ A} \rightarrow U = R \times I = 1 \times 2 = 2 \text{ V}$ ; si  $I = 0,5 \text{ A} \rightarrow U = R \times I = 1 \times 0,5 = 0,5 \text{ V}$ .

La résistance de 1 Ω doit avoir une puissance à dissiper qui sera calculée en fonction du IHT maximum à considérer. Pour un IHT maximum de 2 A, la puissance à dissiper sera de 4 W ( $P = R \times I^2 = 1 \times 2^2 = 4 \text{ W}$ ). En pratique, la résistance utilisée sera une résistance de 1 Ω / 30 W à 1% de précision.

On remarquera que la sortie HT- n'est pas directement reliée à la masse; elle est reliée à la cathode du tube testé.

#### *Le chassis qui porte le tube GU74B*

Le tube à régénérer et à tester (placé sur le "socket SK-1A") est continuellement ventilé et protégé contre les "flashovers" et ce grâce à 2 "tubes à gaz" (GTA=Gas Tube Arrestor); l'un (de 350 VDC) protège la grille de commande g1 et l'autre (de 400 VDC) protège la grille d'écran g2.

On remarquera la présence d'une résistance (de 10 Ω / 50 W dans le circuit de cathode) ainsi qu'un ensemble de résistances (1 kΩ, 50 kΩ, 100 kΩ dans le circuit d'anode) qui sont utilisées pendant les différentes phases de régénération du tube (voir antérieurement).

Les tensions d'alimentation (-Vg1, +Vg2 et VHT) sont appliquées simultanément par l'intermédiaire de l'interrupteur I2 qui commande 2 relais:

- un relais (Rg) dont les contacts NO (protégés par des MOV de 200 et de 369 VDC) alimentent les 2 grilles g1 et g2
- un relais (RTH) "haute tension" (relais KILOVAC HC-2 pour 8 kV - 25 A) dont le contact NO (protégé par une MOV 3 kVDC) alimente l'anode du tube

*(à suivre)*

VHT wordt gemeten via een 100 MΩ weerstand (tussen HT+ en massa). Bij 3000 VDC HT+ is de meetstroom (Im) 30 μA ( $I_m = V/R = 3000 \text{ V} / 100 \text{ M}\Omega = 30 \text{ }\mu\text{A}$ ).

In de praktijk wordt de 100 MΩ weerstand samengesteld uit diverse serieweerstanden, zoals:

- 9 x 10 MΩ
- 1 x 9 MΩ
- 1 x 900 kΩ
- 1 x 100 kΩ (1% nauwkeurig)
- 1 x 0-100 kΩ potentiometer

De 0-100 kΩ potentiometer (bedoeld om de diverse weerstandstoleranties te compenseren) wordt ingesteld voor Im = 30 μA bij 3000 VDC VHT. VHT wordt met het 0-20 VDC display gemeten over de 100 kΩ (1% nauwkeurige) weerstand.

Bij 3000 VDC VHT is Im 30 μA en de spanning over de 100 kΩ weerstand:  $100 \text{ k}\Omega \times 30 \text{ }\mu\text{A} = 3 \text{ VDC}$ .

Samengevat: bij 3000 VDC VHT meet het display 3 VDC, weergegeven als 03.00 kVDC.

Opmerkingen:

- om evidente veiligheidsredenen wordt de 100 kΩ weerstand aan het 'koude' einde geplaatst (zo ver mogelijk van de HT+ uitgang weg)
- de invloed van de 1 Ω / 30 W weerstand (zie verder: weergave van IHT) op de meting van VHT, is verwaarloosbaar
- het dissipatievermogen van de gebruikte weerstanden is van weinig belang, gezien de kleine waarde van Im (30 μA bij 3000 VDC). Voor een 10 MΩ weerstand is het dissipatievermogen 9 mW ( $P = R \times I^2 = 10 \text{ M}\Omega \times 30^2 \text{ }\mu\text{A} = 9 \text{ mW}$ )

De uitlezing van IHT verloopt via een LCD (0-2 VDC) display met 'n.nnn' als notatieformaat.

Een meetwaarde 1,252 VDC zal worden afgebeeld als 1.252ADC. Om IHT te kunnen meten wordt tussen de HT- uitgang en de massa een 1% precisieweerstand van 1 Ω geplaatst, waarvan de klemspanning de ingang van het display stuurt.

De spanning over een weerstand van 1 Ω heeft dezelfde waarde als de stroom door de weerstand. Bijvoorbeeld: als  $I = 1 \text{ A} \rightarrow U = R \times I = 1 \times 1 = 1 \text{ V}$ ; als  $I = 2 \text{ A} \rightarrow U = R \times I = 1 \times 2 = 2 \text{ V}$ ; als  $I = 0,5 \text{ A} \rightarrow U = R \times I = 1 \times 0,5 = 0,5 \text{ V}$ .

Het vermogen van de 1 Ω weerstand wordt berekend in functie van de maximum IHT. Voor een maximum IHT van 2 A, is het te dissiperen vermogen 4 W ( $P = R \times I^2 = 1 \times 2^2 = 4 \text{ W}$ ). Praktisch gezien wordt een 1 Ω / 30 W met 1% nauwkeurigheid ingeschakeld.

Merk op dat HT- niet rechtstreeks aan massa ligt, maar verbonden is met de kathode van de testbuis.

#### *Het chassis voor de GU74B*

De te regenereren en te testen buis (in een 'SK-1A voet' geplaatst) wordt permanent gekoeld en tegen vonkoverslag beveiligd door twee GTA (Gas Tube Arrestors); een 350 VDC GTA voor het gl-stuurrooster en een 400 VDC GTA voor het g2-scherfrooster.

De 10 Ω / 50 W weerstand in de kathodekring en het geheel van weerstanden in de anodekring (1 kΩ, 50 kΩ, 100 kΩ) worden gebruikt tijdens de diverse regeneratiefasen (zoals eerder beschreven).

De voedingsspanningen (-Vg1, +Vg2 et VHT) worden simultaan aangelegd door middel van de schakelaar I2 die twee relais aanstuurt:

- een relais (Rg) waarvan de NO-contacten (beveiligd door MOV van 200 et 369 VDC) de g1 en g2 roosters voeden
- een 'hoogspanningsrelais' (RTH, KILOVAC HC-2 8 kV - 25 A) waarvan het NO-contact (beveiligd door een 3 kVDC MOV) de anode van de buis voedt.

*(wordt vervolgd)*