

Verdere toebehoren zijn: 8 secties ijzeren buizen met 3 inch diameter om een mast van ca. 10 meter hoogte op te stellen, een hamer, een 1,5 meter lange piket, reserveantenne, 2 isolatoren, 2 grondmasten, een morselamp om signalen naar de vliegtuigen te sturen, 1 toolkit, message forms, carbonpapier en pencil, technische notities voor het gebruik van het draadloos station, reserveset kristallen, pericon, zincite, chalcopryiet en carborundum (silicon carbide).

Dit alles werd ter plaatse gebracht door motortransport (autocar) maar meestal door paarden. Dit alles was in gebruik aan het westelijk front in de omgeving van Leper. In 1925 kwamen de meeste van deze loopgravenzenders en -ontvangers op de surplusmarkt in Engeland aan spotprijzen. De hierboven beschreven ontvanger werd bijvoorbeeld aangeboden voor de prijs van 5 pond sterling (advertentie in "THE WIRELESS WORLD" van 18 februari 1925).

In de beginjaren van de radio waren enkel de benamingen korte- en langegolf in gebruik, met de grens rond 700 meter golflengte. De middengolf ontstond in de late jaren 1920 toen de omroepzenders opkwamen en de golflengte tussen 200 en 600 meter gebruikten (de 'middengolf'). De kortegolf moest een stuk prijsgeven en eindigde dan rond 200 meter.

In een volgend artikel komt de radioapparatuur uitgerust met radiolampen aan bod.

Les autres accessoires sont: 8 sections de tube en acier de 3 inch de diamètre, qui permettent d'assembler un mât de +/- 10 mètres, un marteau, un piquet de 1,5 mètre, une antenne de réserve, 2 isolateurs, 2 poteaux, une lampe morse pour envoyer des signaux aux avions, 1 boîte à outils, des formulaires de messages, papier carbone et crayons, une notice technique pour usage de la station sans fil, un set de cristaux de réserve (en calcopyrite, zincite et péricon) et carborundum (carbure de silicium).

Tout ceci est conduit sur place par transport motorisé (autocar) mais souvent également par chevaux. Ce matériel était utilisé sur le front de l'ouest, dans la région de Ipre. En 1925 la pluparts de ces émetteur et récepteurs de tranchées se sont retrouvés sur le marché de surplus en Grande Bretagne à des prix dérisoires; par ex. le récepteur décrit ci-dessus a été proposé au prix de 5 Livres Sterling (annonce dans le "WIRELESS WORLD" du 18 février 1925).

Dans les jeunes années de la radio, seules les dénominations ondes courtes et longues étaient acceptées, la limite étant située à 700 mètre de longueur d'onde. Les ondes moyennes sont nées vers la fin des années 1920 avec l'apparition des stations de radiodiffusions qui utilisaient des longueurs d'ondes entre 200 et 600 mètres, de cette plage est née la dénomination ondes moyennes. Les ondes courtes durent céder un peu de champ et se terminent autour de 200 mètres.

Seront à l'honneur dans le prochain article, les appareils radio équipés de lampes.

Keuze (na berekening) van een koelement ('thermal heatsink') Mise en oeuvre (après calculs) d'un dissipateur thermique ("thermal heatsink")

Door/par ON4LAJ (section/sectie UBA-MNS) – Vertaling NL: ON5EX, ON5UK

Algemeenheden

Het doel van dit artikel is om (na berekening) het juiste koelement te kiezen dat doorgaans nodig is voor een elektronische component bestaande uit halfgeleiderovergangen (type P-N of N-P) op basis van silicium, germanium, enz. (diode, transistor, triac, enz.).

Theoretisch bekeken kan thermische geleiding (tussen een 'warmtebron' en een 'koudebron') plaatsvinden:

- **door geleiding:** een materiaal (aluminium, koper, ...) geleidt de warmte
- **door convectie:** een vloeistof (water) of gas (lucht) geleidt de warmte
- **door straling:** de warmtebron stuurt infrarode stralen uit

De begrippen T_j (junctietemperatuur) en T_{jmax} (maximum junctietemperatuur)

Wanneer een elektronische component in werking wordt gesteld, ondergaan de halfgeleiderovergangen een opwarming; de temperatuur van de overgang neemt toe. De junctietemperatuur T_j, uitgedrukt in graden celsius, is beperkt tot een maximumwaarde T_{jmax}, die wordt bepaald door de constructietechniek van de component, maar vooral door het gekozen materiaal: silicium, germanium, ... Boven deze temperatuurwaarde wordt de overgang – en meteen de component – vernietigd. De huidige onderdelen bevatten meestal meerdere overgangen. Zo bevat een klassieke transistor 2 overgangen (de emitter-basis en de basis-collector overgang), een spanningsregelaar meerdere transistoren en diodes. Het is ondenkbaar om elke overgang T_{jmax} te bepalen. In de data sheet van de fabrikant komt één enkele T_{jmax} voor (wellicht deze voor de 'gevoeligste' junctie van de component).

Eerste, belangrijke conclusie: **T_{jmax} mag nooit bereikt of overschreden worden**, op gevaar af de component te vernietigen.

Généralités

Le but du présent article est de permettre (après calculs) de choisir le dissipateur thermique qui généralement accompagne un composant électronique (diode, transistor, triac, ...) composé de jonctions "semi-conductrices" (type P-N ou N-P) à base de silicium, germanium, ...

En théorie, on rappellera qu'un transfert thermique (entre une "source chaude" et une "source froide") peut se faire:

- **par conduction:** un matériau (aluminium, cuivre, ...) est utilisé pour véhiculer la chaleur.
- **par convection:** un fluide (air, eau, ...) est utilisé pour réaliser le transfert thermique.
- **par rayonnement:** la "source chaude" réalise le transfert thermique en émettant un rayonnement (des rayons "infra-rouges").

Notion de T_j (la température de jonction) et de T_{jmax} (la température de jonction maximale)

Lors de la mise en exploitation d'un composant électronique, les jonctions du composant subissent un échauffement; il y a augmentation de la température de la jonction. La température d'une jonction (la T_j exprimée en degré Celsius) est limitée (en fonction de la technique de construction du composant et surtout en fonction du matériau choisi: silicium, germanium, ...) à une valeur maximale (la T_{jmax}) qui, dépassée, provoquera la destruction de la jonction (et par conséquent la destruction du composant). Actuellement, les composants intègrent généralement plusieurs jonctions. En effet, un transistor "classique" intègre 2 jonctions (la jonction émetteur-base et la jonction base-collecteur), un composant "régulateur de tension" intègre plusieurs transistors, plusieurs diodes, Il est évident qu'il serait impensable de considérer chacune de ces jonctions. En fait, le constructeur d'un composant spécifie (dans la "data sheet" du composant) une seule

Bij wijze van voorbeeld: T_{jmax} van een silicium vermogentransistor is ca. 150 °C.

Het begrip Pd (gedissipeerd vermogen)

Het gedissipeerd vermogen Pd (uitgedrukt in watt) van een overgang in werking (onderworpen aan een potentiaalverschil U en waardoor een stroom I vloeit) ligt aan de basis van een temperatuuroptoeime van de overgangen. Twee praktische berekeningen van Pd:

- het gedissipeerd vermogen Pd van een vermogentransistor met $V_{ce} = 6\text{ V}$ en $I_{ce} = 10\text{ A}$ bedraagt: $Pd = 6 \times 10 = 60\text{ W}$
- het gedissipeerd vermogen van een spanningsregelaar met $V_{in} = 20\text{ V}$, $V_{out} = 10\text{ V}$ en $I_{out} = 1\text{ A}$ bedraagt: $Pd = (V_{in} - V_{out}) \times I_{out} = (20 - 10) \times 1 = 10\text{ W}$

Het begrip Ta (omgevingstemperatuur)

Het in werking stellen van een elektronische component (en dus van zijn overgangen) gebeurt in een thermische omgeving (over het algemeen de omgevende lucht) die wordt gekenmerkt door het begrip ‘omgevingstemperatuur’: Ta (uitgedrukt in graden celsius).

Welke Ta moet in aanmerking genomen worden bij de berekeningen met betrekking tot een koelelement?

Het antwoord hierop ligt niet voor de hand en wordt bepaald door de warmteomgeving van de werkende component. Ziehier drie voorbeelden:

Voorbeeld 1

Stel:

- de component maakt deel uit van een schakeling met maar enkele onderdelen (min of meer van elkaar verwijderd) die weinig warmte afgeven
- de schakeling bevindt zich in een omgeving met nageoeg constante temperatuur (bijvoorbeeld een normaal verwarmd lokaal)
- er is geen belangrijke toename van de omgevingstemperatuur voorzien

In dit geval kan men voor Ta de temperatuur van het lokaal aannemen; over het algemeen kiest men $T_a = 25\text{ °C}$.

Voorbeeld 2

Stel:

- de component maakt deel uit van een schakeling met veel andere onderdelen die warmte afgeven
- de schakeling is in een gesloten behuizing geplaatst met onvoldoende ventilatiesleuven
- zonnestrallen beïnvloeden de omgevingstemperatuur
- er is geen ventilator voorzien om de warmte te verwijderen (door gedwongen convectie van de omgevingslucht)

In dit geval kan de Ta voor de berekeningen ongeveer 55 °C bedragen.

Voorbeeld 3

Stel:

- dat de behuizing van de schakeling bovenop andere behuizingen is geplaatst zonder voldoende afstand om de warmte te ventileren
- dat zonnestrallen de omgevingstemperatuur beïnvloeden
- dat de ventilator (voor de koeling van de behuizing) defect kan raken
- dat een verhoging van de lokale temperatuur mogelijk is

In dit geval zal de in de berekeningen op te nemen Ta relatief hoog liggen, bijvoorbeeld ca. 75 °C.

Zelf kies ik systematisch de waarde 75 °C voor Ta in de berekeningen voor de koeling van de component, zodat de werking van de component onder ‘strengere’ thermische condities verzekerd blijft (ventilatordefect, beduidende toename van de temperatuur in het lokaal, enz.).

Het begrip Rth (thermische weerstand)

Door het begrip ‘thermische weerstand’ kan men de temperatuursverhoging als gevolg van het door de component gedissipeerde vermogen bepalen.

T_{jmax} (probablement celle relative à la jonction la plus “fragile” du composant).

La première considération importante à retenir est **qu’il est impératif de ne jamais atteindre ou dépasser la T_{jmax} du composant** (sinon il y a risque de destruction du composant).

Citons par exemple la T_{jmax} d’un transistor de puissance (à base de silicium) qui est de l’ordre de 150°C.

Notion de Pd (Puissance dissipée)

Mise en exploitation, la jonction (soumise à une différence de potentiel U et traversée par un courant I) présente une Pd (puissance dissipée exprimée en Watts) qui sera à l’origine d’une augmentation de la température des jonctions. Calculons la Pd à partir de 2 exemples pratiques:

- un transistor de puissance (dont le V_{ce} est de 6 V et le I_{ce} de 10 A) présentera une puissance dissipée $Pd = 6 \times 10 = 60\text{ W}$.
- un régulateur de tension qui fonctionne avec une V_{in} de 20 V, une V_{out} de 10 V et un I_{out} de 1 A, présentera une puissance dissipée $Pd = (V_{in} - V_{out}) \times I_{out} = (20 - 10) \times 1 = 10\text{ W}$.

Notion de Ta (la température ambiante)

La mise en exploitation d’un composant électronique (et donc de ses jonctions) se fait dans un environnement thermique (généralement l’air ambiant) caractérisé par la notion de “température ambiante”: la Ta (exprimée en degré Celcius).

Quelle est la Ta à considérer dans les calculs relatifs à un dissipateur thermique? La réponse n’est pas évidente et sera fonction du milieu thermique dans lequel le composant sera exploité. Prenons 3 exemples:

Exemple n°1

Supposons:

- que le composant fait partie d’un circuit qui ne contient que quelques composants (plus ou moins éloignés les uns des autres) qui ne dégagent pas trop de chaleur
- que le circuit est placé dans un milieu dont la température est plus ou moins constante (par exemple une pièce habitable normalement chauffée)
- qu’il n’est prévu aucune augmentation importante de la température du milieu ambiant

Dans ce cas, la Ta à utiliser dans les calculs peut être la température du local dans lequel le composant est exploité; généralement on choisira une Ta de 25°C.

Exemple n° 2

Supposons:

- que le composant fait partie d’un circuit qui contient de nombreux autres composants qui dégagent de la chaleur
- que le circuit est placé dans un coffret fermé dont les ouïes de ventilation sont insuffisantes
- que les rayons du soleil influencent la température ambiante
- qu’aucun ventilateur n’est prévu pour évacuer la chaleur (par convection forcée de l’air ambiant)

Dans ce cas, la Ta à utiliser dans les calculs peut être de l’ordre de 55°C.

Exemple n° 3

Supposons:

- que le coffret (qui contient le circuit) est empilé sur d’autres coffrets et cela sans respecter une distance suffisante pour évacuer la chaleur
- que les rayons du soleil influencent la température ambiante
- qu’une panne du ventilateur (chargé du refroidissement du boîtier) est à envisager
- qu’une augmentation de la température du local est envisagée

Dans ce cas, la Ta à utiliser dans les calculs sera relativement élevée; elle sera par exemple de l’ordre de 75°C.

Personnellement (dans les calculs relatifs au refroidissement d’un composant), je choisi systématiquement une Ta de 75°C. Cela me permet d’envisager de faire fonctionner le composant dans des conditions

De thermische weerstand (uitgedrukt in graden celsius per watt) vertegenwoordigt de temperatuursverhoging als gevolg van een stijging met 1 W van het gedissipeerd vermogen.

Zo betekent een Rth van 4 °C/W dat een stijging van Pd met 1 W een temperatuurstijging van 4 °C veroorzaakt.

In de warmteberekeningen worden verschillende Rth beschouwd:

- Rth j-c: Rth junctie-behuizing (Rth junction-case)
- Rth c-h: Rth behuizing-koelelement (Rth case-heatsink)
- Rth h-a: Rth koelelement-omgevingslucht (Rth heatsink-ambient air)
- Rth c-a: Rth behuizing-omgevingslucht (Rth case-ambient air)
- Rth j-a: Rth junctie-omgevingslucht (Rth junction-ambient air)

Om de rol van elk van deze Rth te begrijpen, herinneren we eraan dat de overgang (junctie, binnenin de component) de warmtebron is; deze bron warmt op en draagt de warmte eerst over naar de behuizing van de component. Twee gevallen zijn te beschouwen:

- **De component is niet op een koelelement geplaatst:** de warmte wordt rechtsreeks door de behuizing van de component aan de omgevingslucht afgegeven.
- **De component is op een koelelement geplaatst:** de warmte wordt eerst overgedragen van de behuizing van de component naar het koelelement en vervolgens van het koelelement naar de omgevingslucht.

In de beide gevallen (t.t.z. met of zonder koelelement) is de in aanmerking te nemen Rth Rth j-a, dit wil zeggen deze (bekomen door optelling van de betrokken Rth) die zich globaal genomen situeert tussen de overgang van de component en de omgevingslucht.

Rth j-c (Rth junctie-behuizing, Rth junction-case)

Rth j-c vertegenwoordigt de thermische weerstand tussen de overgang en de behuizing van de component. De warmteoverdracht (tussen de overgang en de behuizing van de component) vindt plaats door geleiding in het halfgeleidermaterieel (silicium, germanium, ...).

De fabrikant van de component geeft in zijn data sheet de waarde van Rth j-c aan naargelang het type behuizing (TO-220, TO-3P, ...).

Voorbeeld: een component in TO-3P behuizing kan een Rth j-c hebben van 0,6 °C/W.

Rth c-h (Rth behuizing-koelelement, Rth case-heatsink)

Rth c-h vertegenwoordigt de thermische weerstand tussen de behuizing van de component en het koelelement ("thermal heatsink"). De warmteoverdracht (tussen de behuizing van de component en het koelelement) vindt plaats door geleiding.

De fabrikant van de component geeft in de data sheet de waarde van Rth c-h aan volgens het type behuizing (TO-220, TO-3P, ...) van de component.

Voorbeeld: een component in TO-3P behuizing kan een Rth c-h hebben van 0,2 °C/W.

Opmerkingen met betrekking tot 'thermally conductive grease' en tussenstukken (mica of silicone)

De fabrikant van de component preciseert over het algemeen of de hierbovenvermelde Rth c-h geldt bij gebruik of niet-gebruik van 'thermisch vet' ("thermally conductive grease"). Dit thermisch vet (warmtegeleidend maar niet elektrisch geleidend) wordt in een fijn laagje aangebracht om de warmteoverdracht te bevorderen.

De behuizing van de component kan 'geïsoleerd' of 'niet-geïsoleerd' zijn. In het geval van een 'geïsoleerde' behuizing zijn alle verbindingen van de component (emitter, basis, collector, ...) elektrisch geïsoleerd van de behuizing.

In het geval van een niet-geïsoleerde behuizing is een aansluiting van de component (bijvoorbeeld de collector van een vermogentransistor) elektrisch verbonden met de behuizing ervan. Als de niet-geïsoleerde component rechtstreeks aan het koelelement is vastgehecht, zal deze op het potentiaal van de component komen te liggen. Het koelelement

thermiques "sévères" (telles que panne du ventilateur, importante augmentation de la température du local, ...).

Notion de Rth (Résistance thermique)

La notion de résistance thermique permet de quantifier l'augmentation de température provoquée par la puissance dissipée par le composant. La résistance thermique (exprimée en degré Celsius par Watt) symbolise l'augmentation de température provoquée par une augmentation de 1 W de la puissance dissipée.

Par exemple, une Rth de 4°C/W signifie qu'une augmentation de 1W de la Pd provoquera une augmentation de 4°C de la température.

Dans les calculs thermiques, on doit distinguer différentes Rth:

- la Rth j-c (Rth "junction-case") (Rth "jonction-boitier")
- la Rth c-h (Rth "case-heatsink") (Rth "boitier-dissipateur")
- la Rth h-a (Rth "heatsink-ambient air") (Rth "dissipateur-air ambient")
- la Rth c-a (Rth "case-ambient air") (Rth "boitier-air ambient")
- la Rth j-a (Rth "junction-ambient air") (Rth "jonction-air ambient")

Pour comprendre le rôle joué par chacune des Rth, il faut se rappeler que la "source chaude" est la jonction (située dans le composant); celle-ci s'échauffe et transfère la chaleur d'abord au boîtier du composant. Deux cas sont alors à envisager:

- **si le composant n'est pas placé sur un dissipateur thermique**, la chaleur est alors directement transmise du boîtier du composant vers l'air ambiant.
- **si le composant est placé sur un dissipateur thermique**, la chaleur est d'abord transmise du boîtier du composant vers le dissipateur thermique et ensuite du dissipateur thermique vers l'air ambiant.

Dans les 2 cas (c'est-à-dire avec ou sans dissipateur thermique), la Rth à utiliser dans les calculs sera la Rth j-a c'est-à-dire celle (obtenue par l'addition des Rth concernées) qui se situe globalement entre la jonction du composant et l'air ambiant.

La Rth j-c (Rth "junction-case") (Rth "jonction-boitier")

La Rth j-c représente la Rth située entre la jonction et le boîtier du composant. Le transfert thermique (entre la jonction du composant et le boîtier du composant) s'effectue par conduction dans le matériau semi-conducteur (silicium, germanium, ...).

Le constructeur du composant spécifie la Rth j-c du composant (via une "data sheet") et ce selon le type de boîtier (TO-220, TO-3P, ...) du composant.

Par exemple, un composant en boîtier TO-3P peut présenter une Rth j-c de 0,6°C/W.

La Rth c-h (Rth "case-heatsink") (Rth "boitier-dissipateur")

La Rth c-h représente la Rth située entre le boîtier du composant et le dissipateur thermique ("thermal heatsink"). Le transfert thermique (entre le boîtier du composant et le dissipateur thermique) se fait par conduction. Le constructeur du composant spécifie la Rth c-h du composant (via une "data sheet") et ce selon le type de boîtier (TO-220, TO-3P, ...) du composant. Par exemple, un composant en boîtier TO-3P peut présenter une Rth c-h de 0,2°C/W.

Remarques concernant la "thermally conductive grease" et les entretoises (en mica ou en silicone)

Le constructeur du composant précise généralement si la Rth c-h citée est celle qui est relative à l'utilisation ou non de "graisse thermique" ("thermally conductive grease"). Celle-ci (qui est thermiquement conductrice et pas électriquement conductrice) est posée en une fine couche pour améliorer le transfert thermique.

Le boîtier du composant peut être du type "isolé" ou "non isolé".

Si le boîtier est du type "isolé", toutes les connexions du composant (émetteur, base, collecteur, ...) sont électriquement isolées du boîtier du composant.

zal hierdoor (in bepaalde gevallen) slechts voor één enkele component kunnen dienen en moet elektrisch geïsoleerd worden van de kast, van andere warmtegeleiders, ... Hiertoe wordt een (mica of silicone) tussenstuk geplaatst tussen het koelelement en de behuizing van de component. Merk op dat de schroeven waarmee de component aan de warmtegeleider is vastgehecht, hetzij isolerend zijn (nylon schroeven bijvoorbeeld), hetzij door kleine isolerende busjes steken. Het is in ieder geval aanbevolen om (voor een goed warmtetransport) een dun laagje thermisch vet op beide zijden van het tussenstuk aan te brengen, t.t.z.:

- tussen de behuizing van de component en een kant van het tussenstuk
- tussen het koelelement en de andere kant van het tussenstuk

Rth h-a (Rth koelelement-omgevingslucht, Rth heatsink-ambient air)

Rth h-a vertegenwoordigt de thermische weerstand tussen het koelelement en de omgevingslucht en wordt in de berekeningen enkel toegepast indien een koelelement aanwezig is.

Het warmtetransport (tussen koelelement en omgevingslucht) vindt plaats door convectie en straling.

De waarde van Rth h-a wordt bepaald door:

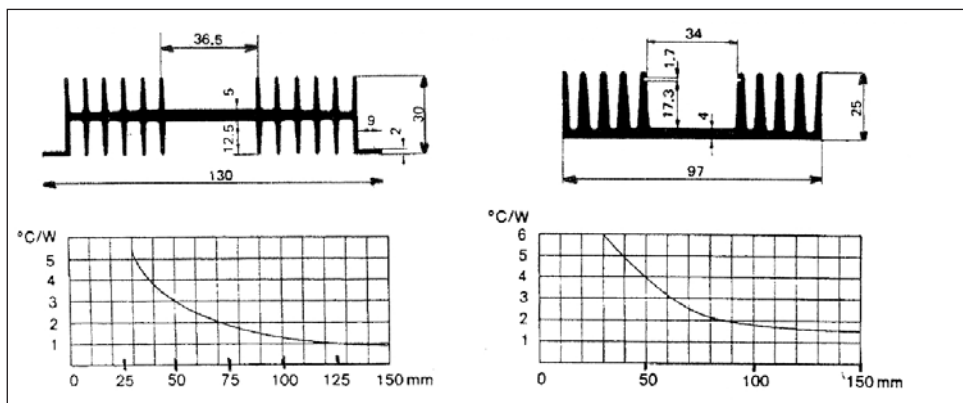
- de specificaties opgegeven door de **fabrikant van het koelelement** (cfr. data sheet)
- de afmetingen (het volume) van het koelelement, evenals het materiaal waaruit het koelelement is samengesteld (ruw aluminium of zwart geschilderd aluminium, koper, goud, ...).

Wordt het koelelement bij een fabrikant aangekocht, dan laat Rth h-a zich aflezen uit de data sheet. Bepaalde fabrikanten leveren het koelelement per lopende meter (bij vaste hoogte en breedte) en de gebruiker zaagt het koelelement (na berekening) op de gepaste lengte.

Voorbeeld: we schatten de af te zagen lengte van het koelelement (dat per meter wordt verkocht) om een berekende Rth h-a waarde te bekomen, vertrekkende van de twee hierbij afgebeelde koelelementen.

Om met het links afgebeelde koelelement (130 mm breed, 30 mm hoog) een Rth h-a van 1 °C/W te bekomen, moet een lengte van 125 mm afgezaagd worden.

Om met het rechts afgebeelde koelelement (97 mm breed, 25 mm hoog) een Rth h-a van 2 °C/W te bekomen, moet een lengte van 80 mm afgezaagd worden.



Het bepalen van Rth h-a van een gerecupereerd koelelement is moeilijker, vermits de fabrikant onbekend is en de data sheet ontbreekt. Bovendien is een koelelement geen gecodeerd elektronisch onderdeel zoals een weerstand of condensator.

Theoretisch zou men de Rth h-a van het koelelement kunnen meten door een ΔPd van 1 W op de aan het koelelement vastgehechte component toe te passen en Δt (temperatuur) van het koelelement te meten. Als een wijziging van Pd van 1 W een temperatuurswijziging van 4 °C veroorzaakt, dan mag men inderdaad aannemen dat de Rth h-a van het koelelement 4 °C/W bedraagt.

Helaas is de uitvoering van deze meting een zeer delicate zaak. In de praktijk zal men eerder gebruik maken van een diagram (zoals afgebeeld

Si le boîtier est du type "non isolé", une des connexions du composant (par exemple le collecteur d'un transistor de puissance) est électriquement reliée au boîtier du composant.

Dans ce cas, on remarquera que, si le composant "non isolé" est directement fixé sur le dissipateur thermique, celui-ci sera au potentiel du composant. Le dissipateur ne pourra (dans certains cas) accueillir qu'un seul composant et devra être électriquement isolé du coffret, des autres dissipateurs, ...

Pour isoler électriquement un composant "non isolé", on place une entretoise (en mica ou en silicone) entre le dissipateur et le boîtier du composant.

On remarquera que les vis de fixation (qui fixent le composant sur le dissipateur) sont soit isolantes (par exemple en nylon) ou traversent de petites entretoises isolantes qui sont placées dans le trou de fixation du composant.

Dans tous les cas, il est conseillé (pour garantir un bon transfert thermique) de poser une fine couche de graisse thermique de chaque côté de l'entretoise c'est-à-dire entre:

- d'une part le boîtier du composant et une face de l'entretoise
- d'autre part le dissipateur et l'autre face de l'entretoise

La Rth h-a (Rth "heatsink-ambient air") (Rth "dissipateur-air ambiant")

La Rth h-a représente la Rth située entre le dissipateur et l'air ambiant et sera utilisée (dans les calculs) uniquement si on utilise un dissipateur thermique.

Le transfert thermique (entre le dissipateur et l'air ambiant) se fait par convection et par rayonnement.

La valeur de la Rth h-a est:

- spécifiée par le **constructeur du dissipateur** (via une "data sheet")
- fonction des dimensions (le volume) du dissipateur ainsi que du matériau qui constitue le dissipateur (aluminium brut ou peint en noir, cuivre, or, ...).

Si le dissipateur est acheté chez un constructeur de dissipateurs, une "data sheet" permet de connaître la Rth h-a du dissipateur. Certains constructeurs fournissent le dissipateur en longueur de 1 mètre (la largeur et la hauteur du dissipateur étant fixes). Dans ce cas, l'utilisateur coupe (après avoir fait les calculs thermiques) la longueur utile.

Exemple: A partir des 2 dissipateurs repris ci-après, estimons la longueur à couper dans le dissipateur (vendu en 1 mètre de longueur) pour présenter une Rth h-a calculée.

Pour que le dissipateur de gauche (largeur de 130 mm et hauteur de 30 mm) présente une Rth h-a de 1 °C/W il faut couper une longueur de 125 mm.

Pour que le dissipateur de droite (largeur de 97 mm et hauteur de 25 mm) présente une Rth h-a de 2 °C/W il faut couper une longueur de 80 mm.

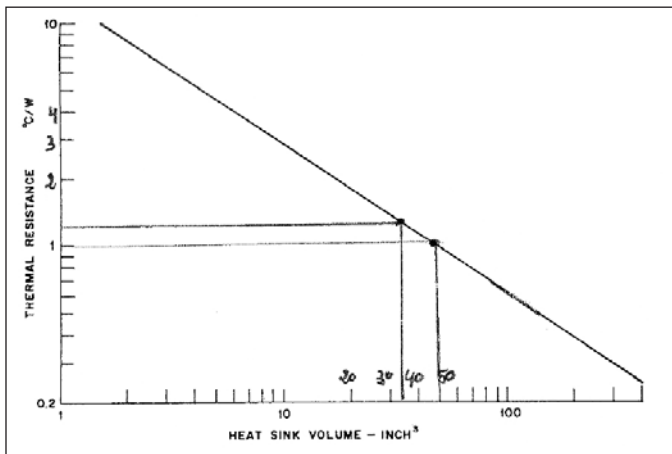
Si le dissipateur est un élément de récupération, il est difficile d'en connaître la Rth h-a car le constructeur de ce dissipateur étant inconnu, il est impossible d'accéder à la "data sheet" du dissipateur. De plus, un dissipateur est un élément électro-

nique qui n'est pas codé et qui peut difficilement être mesuré.

En effet, certains éléments électroniques (les résistances, les condensateurs, ...) possèdent un code et peuvent être mesurés (ohmmètre, capacimètre, ...).

Par contre, un dissipateur thermique n'a pas de code et sa Rth h-a peut être difficilement mesurée.

Théoriquement, la Rth h-a du dissipateur pourrait être mesurée en provoquant un "delta Pd" de 1W (au niveau du composant fixé sur le dissipateur) et en mesurant le "delta température" au niveau du dissipateur. En effet, si une variation de la Pd de 1W provoque une variation de la température de 4°C, on peut dire que la Rth h-a du dissipateur est de 4°C/W.



in het 'ARRL Handbook' dat een raming van $R_{th\ h-a}$ geeft in functie van het volume (in inch^3) van het koelelement.

Nemen we als voorbeeld een gerecupereerd koelelement (met aan de ene zijde een componentenvlak en aan de andere zijde een plaat met koelvinnen) met de volgende afmetingen: 13 cm breed, 3 cm hoog, 21 cm lang. Het volume in inch^3 (1 $\text{inch} = 2,54\text{ cm}$) is: $(13/2,54) \times (3/2,54) \times (21/2,54) = 5,12 \times 1,18 \times 8,27 = 50\ \text{inch}^3$.

Volgens het diagram bedraagt de $R_{th\ h-a}$ van dit koelelement, bij een volume van $50\ \text{inch}^3$: $1\ \text{°C/W}$.

Rth c-a (Rth behuizing-omgevingslucht, 'Rth case-ambient air')

$R_{th\ c-a}$ is de thermische weerstand R_{th} tussen de behuizing van de component en de omgevingslucht. Hij wordt toegepast in berekeningen **zonder koelelement** (tussen component en omgevingslucht).

Het warmtetransport (tussen de behuizing van de component en de omgevingslucht) vindt plaats door convectie en straling.

$R_{th\ c-a}$ wordt door de fabrikant opgegeven in de data sheet van het onderdeel, bijvoorbeeld $35\ \text{°C/W}$.

Let op de zeer hoge waarde van $R_{th\ c-a}$. Zonder warmtegeleider (tussen de component en de omgevingslucht) zal een toename met $1\ \text{W Pd}$ een (merkelijke) toename van de temperatuur met $35\ \text{°C}$ veroorzaken.

Rth j-a (Rth junctie-omgevingslucht, 'Rth junction-ambient air')

$R_{th\ j-a}$ is de R_{th} tussen de junctie van de component en de omgevingslucht. $R_{th\ j-a}$ is de som van alle hiervoor beschreven R_{th} :

- **er is geen koelelement** (tussen de component en de omgevingslucht): enkel de behuizing van de component staat in voor het warmtetransport met de omgevingslucht. In dit geval is $R_{th\ j-a} = R_{th\ j-c} + R_{th\ c-a}$
- **er is een koelelement** (tussen de component en de omgevingslucht): de behuizing van de component zit vast op een koelelement dat in staat is voor het warmtetransport met de omgevingslucht. In dit geval is $R_{th\ j-a} = R_{th\ j-c} + R_{th\ c-h} + R_{th\ h-a}$

De formule

De volgende formule laat toe om het warmtetransport tussen de component en de omgeving onder controle te houden:

$$T_j = T_a + (Pd \times R_{th\ j-a})$$

- T_j (in °C) is de temperatuur van de overgang
- T_a (in °C) is de omgevingstemperatuur
- Pd (in W) is het door de component gedissipeerde vermogen
- $R_{th\ j-a}$ (in °C/W) is de berekende R_{th} tussen de overgang van de component en de omgeving:
- Zonder koelelement (tussen component en omgevingslucht): $R_{th\ j-a} = R_{th\ j-c} + R_{th\ c-a}$
- Met koelelement (tussen component en omgevingslucht): $R_{th\ j-a} = R_{th\ j-c} + R_{th\ c-h} + R_{th\ h-a}$

Malheureusement, la mise en pratique de cette mesure de la $R_{th\ h-a}$ est très délicate à mettre en œuvre.

En pratique, pour estimer la $R_{th\ h-a}$ d'un dissipateur de récupération, il est possible d'utiliser un abaque (tel que présenté dans le "ARRL handbook") qui donne une estimation de la $R_{th\ h-a}$ en fonction du volume (spécifié en Inch^3) du dissipateur thermique.

Examinons par exemple, un dissipateur thermique de récupération (qui présente une face plane pour y fixer les composants et une face composée d'ailettes de refroidissement) dont les dimensions sont les suivantes: largeur de 13 cm, hauteur de 3 cm et longueur de 21 cm. Sachant que 1 $\text{inch} = 2,54\text{ cm}$, calculons (en Inch^3) le volume de ce dissipateur: $\text{volume} = (13/2,54) \times (3/2,54) \times (21/2,54) = 5,12 \times 1,18 \times 8,27 = 50\ \text{Inch}^3$.

Pour un volume de $50\ \text{Inch}^3$, l'abaque nous donne (pour le dissipateur examiné) un $R_{th\ h-a}$ de $1\ \text{°C/W}$.

La Rth c-a (Rth "case-ambient air") (Rth "boitier-air ambiant")

La $R_{th\ c-a}$ représente la R_{th} située entre le boîtier du composant et l'air ambiant et sera utilisée dans les calculs **si on n'utilise pas de dissipateur thermique** (entre le composant et l'air ambiant).

Le transfert thermique (entre le boîtier du composant et l'air ambiant) se fait par convection et par rayonnement.

Cette $R_{th\ c-a}$ est spécifiée (dans une "data sheet") par le constructeur du composant.

Par exemple, un composant peut présenter une $R_{th\ c-a}$ de $35\ \text{°C/W}$.

On remarquera que la valeur de cette $R_{th\ c-a}$ est très élevée. On peut donc constater que, si on n'utilise pas de dissipateur thermique (entre le composant et l'air ambiant), une augmentation de $1\ \text{W}$ de Pd provoquera une augmentation (élevée) de température de $35\ \text{°C}$.

La Rth j-a (Rth "junction-ambient air") (Rth "jonction-air ambiant")

La $R_{th\ j-a}$ représente la R_{th} située entre la jonction du composant et l'air ambiant.

Cette $R_{th\ j-a}$ est le résultat de l'addition des différentes R_{th} citées ci-avant et cela selon que l'on utilise ou pas un dissipateur thermique:

- **si on n'utilise pas de dissipateur thermique** (entre le composant et l'air ambiant), le boîtier du composant est directement chargé du transfert thermique avec l'air ambiant. Dans ce cas, la $R_{th\ j-a} = R_{th\ j-c} + R_{th\ c-a}$
- **si on utilise un dissipateur thermique** (entre le composant et l'air ambiant), le boîtier du composant est fixé sur un dissipateur thermique qui est chargé du transfert thermique avec l'air ambiant. Dans ce cas, la $R_{th\ j-a} = R_{th\ j-c} + R_{th\ c-h} + R_{th\ h-a}$

La formule

La formule qui permet de gérer le transfert thermique entre le composant et le milieu ambiant est:

$$T_j = T_a + (Pd \times R_{th\ j-a})$$

- T_j est la température de la jonction (exprimée en degré Celcius)
- T_a est la température du milieu ambiant (exprimée en degré Celcius)
- Pd est la puissance dissipée par le composant (exprimée en Watt)
- $R_{th\ j-a}$ est la R_{th} calculée entre la jonction du composant et le milieu ambiant (exprimé en °C/W):
- si on n'utilise pas de dissipateur thermique (entre le composant et l'air ambiant): $R_{th\ j-a} = R_{th\ j-c} + R_{th\ c-a}$
- si on utilise un dissipateur thermique (entre le composant et l'air ambiant): $R_{th\ j-a} = R_{th\ j-c} + R_{th\ c-h} + R_{th\ h-a}$

Cette formule montre que la T_j est en fait la somme de deux températures:

- d'une part la T_a (voir antérieurement)
- d'autre part une température qui est le produit de Pd et de $R_{th\ j-a}$

De formule toont aan dat T_j in feite de som is van twee temperaturen:

- enerzijds T_a (zie hiervoor)
- anderzijds de temperatuur die het product is van P_d en $R_{th\ j-a}$

Men zal zich herinneren dat:

- P_d hoog is wanneer de component 'vermogen' verwerkt
- $R_{th\ j-a}$ klein is wanneer een koelelement wordt gebruikt
- $R_{th\ j-a}$ groot is zonder gebruik van een koelelement
- T_j kleiner moet zijn dan T_{jmax}

Merk op dat de formule verschillende gedaanten kan aannemen, al naargelang de behoeften:

- $R_{th\ j-a} = (T_j - T_a) / P_d$
- $P_d = (T_j - T_a) / R_{th\ j-a}$
- ...

Praktische toepassingen van de formule

Zoals zal worden aangetoond via studie van een praktijkgeval, kan men aan de hand van bovenstaande formule:

- het juiste koelelement kiezen zodat T_{jmax} (de maximum temperatuur van de overgang) van de component niet wordt overschreden
- T_j (de temperatuur van de overgang van de component) berekenen bij al dan niet gebruik van een koelelement
- inschatten of het gebruik van een koelelement noodzakelijk is
- inschatten of een 'klein' dan wel een 'groot' koelelement vereist is
- de invloed van T_a (omgevingstemperatuur) op de afkoeling van de component nagaan
- ...

Studie van een praktijkgeval

Beschouwen we een spanningsregelaar (in TO3-P behuizing) onder de volgende bedrijfsvoorwaarden:

- $V_{in} = 20\text{ V}$
- $V_{out} = 10\text{ V}$
- $I_{out} = 1\text{ A}$

De in de data sheet van de regelaar vermelde R_{th} -waarden zijn:

- $R_{th\ j-c} = 0,6\text{ }^\circ\text{C/W}$
- $R_{th\ c-a}$ (voor TO3-P behuizing) = $35\text{ }^\circ\text{C/W}$
- $R_{th\ c-h}$ (met gebruik van 'thermally conductive grease') = $0,4\text{ }^\circ\text{C/W}$
- $T_{j\ max}$ van de component = $150\text{ }^\circ\text{C}$

Men beschikt over 2 koelelementen met een $R_{th\ h-a}$ van respectievelijk $1\text{ }^\circ\text{C/W}$ en $4\text{ }^\circ\text{C/W}$.

Gevraagd wordt:

1. Om na te gaan of een koelelement noodzakelijk is
2. Om één van de twee koelelementen te kiezen (indien noodzakelijk)
3. Om de invloed van T_a (omgevingstemperatuur) te controleren

Is een koelelement noodzakelijk?

Berekening van T_j van de component bij een T_a van $75\text{ }^\circ\text{C}$:

- $T_j = T_a + (P_d \times R_{th\ j-a})$
- $P_d = (V_{in} - V_{out}) \times I_{out} = (20 - 10) \times 1 = 10\text{ W}$
- $R_{th\ j-a}$ (zonder koelelement) = $R_{th\ j-c} + R_{th\ c-a} = 0,6 + 35 = 35,6\text{ }^\circ\text{C/W}$
- $T_j = 75 + (10 \times 35,6) = 431\text{ }^\circ\text{C}$

Conclusie: uit de vergelijking van T_j ($431\text{ }^\circ\text{C}$) met T_{jmax} ($150\text{ }^\circ\text{C}$) blijkt dat het gebruik van een koelelement (tussen de regelaar en de omgevingslucht) onontbeerlijk is.

Keuze van het koelelement

In het geval van het 'klein' koelelement (met $R_{th\ h-a} = 4\text{ }^\circ\text{C/W}$):

- $R_{th\ j-a}$ (met koelelement) = $R_{th\ j-c} + R_{th\ c-h} + R_{th\ h-a} = 0,6 + 0,4 + 4 = 5\text{ }^\circ\text{C/W}$
- $T_j = T_a + (P_d \times R_{th\ j-a}) = 75 + (10 \times 5) = 125\text{ }^\circ\text{C}$
- **conclusie:** uit de vergelijking van T_j ($125\text{ }^\circ\text{C}$) met T_{jmax} ($150\text{ }^\circ\text{C}$) volgt dat het 'klein' koelelement voldoet; T_j ($125\text{ }^\circ\text{C}$) komt echter dicht in de buurt van T_{jmax} ($150\text{ }^\circ\text{C}$).

On se rappellera que:

- si le composant travaille en "puissance", la P_d sera élevée
- si on utilise un dissipateur thermique, la $R_{th\ j-a}$ sera petite
- si on n'utilise pas de dissipateur thermique, la $R_{th\ j-a}$ sera grande
- la T_j doit être plus petite que la T_{jmax}

On remarquera que cette formule peut prendre différentes formes selon les besoins:

- $R_{th\ j-a} = (T_j - T_a) / P_d$
- $P_d = (T_j - T_a) / R_{th\ j-a}$
- ...

Les applications pratiques de la formule

Comme nous le verrons dans l'étude d'un cas pratique, la formule permet:

- de choisir le dissipateur thermique à utiliser pour ne pas dépasser la T_{jmax} (température de jonction maximale) du composant
- de calculer la T_j (température de la jonction du composant) selon qu'on utilise ou pas un dissipateur thermique
- d'estimer si un dissipateur thermique est nécessaire ou pas
- d'estimer si le dissipateur à utiliser sera un "petit" ou un "gros" dissipateur
- de voir l'influence de la T_a (température ambiante) sur le refroidissement du composant
- ...

Examen d'un cas pratique

Soit un régulateur de tension (en boîtier TO3-P) qui est exploité dans les conditions suivantes:

- $V_{in} = 20\text{ V}$
- $V_{out} = 10\text{ V}$
- $I_{out} = 1\text{ A}$

Les R_{th} fournies par la "data sheet" du régulateur sont:

- $R_{th\ j-c} = 0,6\text{ }^\circ\text{C/W}$
- $R_{th\ c-a}$ (pour un boîtier TO3-P) = $35\text{ }^\circ\text{C/W}$
- $R_{th\ c-h}$ (avec utilisation de "thermally conductive grease") = $0,4\text{ }^\circ\text{C/W}$

La $T_{j\ max}$ du composant = $150\text{ }^\circ\text{C}$

On possède 2 dissipateurs thermiques dont les $R_{th\ h-a}$ sont de $1\text{ }^\circ\text{C/W}$ et de $4\text{ }^\circ\text{C/W}$.

On demande:

1. de voir si un dissipateur thermique est nécessaire
2. de choisir (si nécessaire) un des 2 dissipateurs thermiques
3. de vérifier l'influence de la T_a (la température du milieu ambiant)

Voir si un dissipateur thermique est nécessaire.

Calcul de la T_j du composant en considérant une T_a de $75\text{ }^\circ\text{C}$:

- $T_j = T_a + (P_d \times R_{th\ j-a})$
- $P_d = (V_{in} - V_{out}) \times I_{out} = (20 - 10) \times 1 = 10\text{ W}$
- $R_{th\ j-a}$ (sans dissipateur) = $R_{th\ j-c} + R_{th\ c-a} = 0,6 + 35 = 35,6\text{ }^\circ\text{C/W}$
- $T_j = 75 + (10 \times 35,6) = 431\text{ }^\circ\text{C}$

Conclusion: si on compare la T_j ($431\text{ }^\circ\text{C}$) avec la T_{jmax} ($150\text{ }^\circ\text{C}$), on constate qu'il est indispensable d'utiliser un dissipateur thermique (entre le régulateur et l'air ambiant).

Choisir un des 2 dissipateurs thermiques.

Dans le cas du "petit" dissipateur (dont la $R_{th\ h-a}$ est de $4\text{ }^\circ\text{C/W}$):

- $R_{th\ j-a}$ (avec un dissipateur) = $R_{th\ j-c} + R_{th\ c-h} + R_{th\ h-a} = 0,6 + 0,4 + 4 = 5\text{ }^\circ\text{C/W}$
- $T_j = T_a + (P_d \times R_{th\ j-a}) = 75 + (10 \times 5) = 125\text{ }^\circ\text{C}$
- **conclusion:** si on compare la T_j ($125\text{ }^\circ\text{C}$) avec la T_{jmax} ($150\text{ }^\circ\text{C}$), on voit que le dissipateur peut convenir; cependant on constate que la T_j ($125\text{ }^\circ\text{C}$) est assez proche de la T_{jmax} ($150\text{ }^\circ\text{C}$).

Dans le cas du "gros" dissipateur (dont la $R_{th\ h-a}$ est de $1\text{ }^\circ\text{C/W}$):

- $R_{th\ j-a}$ (avec un dissipateur) = $R_{th\ j-c} + R_{th\ c-h} + R_{th\ h-a} = 0,6 + 0,4 + 1 = 2\text{ }^\circ\text{C/W}$

In het geval van het 'groot' koelelement (met $R_{th\ h-a} = 1\text{ °C/W}$):

- $R_{th\ j-a}$ (met koelelement) = $R_{th\ j-c} + R_{th\ c-h} + R_{th\ h-a} = 0,6 + 0,4 + 1 = 2\text{ °C/W}$
- $T_j = T_a + (P_d \times R_{th\ j-a}) = 75 + (10 \times 2) = 95\text{ °C}$
- **conclusie:** uit de vergelijking van T_j (95 °C) met T_{jmax} (150 °C) volgt dat het 'groot' koelelement voldoet en dat T_j (95 °C) ver beneden T_{jmax} (150 °C) ligt.

Invloed van T_a

Welke omgevingstemperatuur T_a kan voor problemen zorgen bij gebruik van het 'klein' ($R_{th\ h-a} 4\text{ °C/W}$) of 'groot' ($R_{th\ h-a} 1\text{ °C/W}$) koelelement?

Stel: $T_j = T_{jmax} = 150\text{ °C}$. Dan is, op basis van de formule $T_j = T_a + (P_d \times R_{th\ j-a})$, $T_a \rightarrow T_{jmax} = 150 = T_a + (P_d \times R_{th\ j-a})$.

Gebruik van het 'klein' koelelement:

- $150 = T_a + (10 \times 5) \rightarrow 150 = T_a + 50 \rightarrow T_a = 150 - 50 = 100\text{ °C}$.
- **conclusie:** bij het 'klein' koelelement wordt T_{jmax} bereikt als T_a stijgt tot 100 °C.

Gebruik van het 'groot' koelelement:

- $150 = T_a + (10 \times 2) \rightarrow 150 = T_a + 20 \rightarrow T_a = 150 - 20 = 130\text{ °C}$.
- **conclusie:** bij het 'groot' koelelement wordt T_{jmax} bereikt als T_a stijgt tot 130 °C.

Tot slot een belangrijke opmerking. Het warmtetransport kan beduidend worden verbeterd door gedwongen luchtconvectorie, namelijk door één of meerdere **ventilatoren** in te schakelen. Dit aspect werd in dit artikel niet behandeld.

Tot zover dit artikel. Voor commentaar en/of opmerkingen kan je mij contacteren via on4laj@uba.be of roger.capouillez@skynet.be.

73, ON4LAJ (sectie UBA-MNS)

- $T_j = T_a + (P_d \times R_{th\ j-a}) = 75 + (10 \times 2) = 95\text{ °C}$
- **conclusie:** si on compare la T_j (95 °C) avec la T_{jmax} (150 °C), on voit que le dissipateur peut convenir et que la T_j (95 °C) est assez éloignée de la T_{jmax} (150 °C).

Influence de la T_a .

Quelle est la T_a qui poserait problème dans le cas de l'utilisation du "petit" dissipateur (dont la $R_{th\ h-a}$ est de 4 °C/W) ou du "gros" dissipateur (dont la $R_{th\ h-a}$ est de 1 °C/W)?

A partir de la formule $T_j = T_a + (P_d \times R_{th\ j-a})$, posons $T_j = T_{jmax} = 150\text{ °C}$ et calculons la $T_a \rightarrow T_{jmax} = 150 = T_a + (P_d \times R_{th\ j-a})$

Dans le cas du "petit" dissipateur:

- $150 = T_a + (10 \times 5) \rightarrow 150 = T_a + 50 \rightarrow T_a = 150 - 50 = 100\text{ °C}$.
- **conclusie:** si on utilise le "petit" dissipateur, la T_j max sera atteinte si la T_a monte à 100 °C.

Dans le cas du "gros" dissipateur:

- $150 = T_a + (10 \times 2) \rightarrow 150 = T_a + 20 \rightarrow T_a = 150 - 20 = 130\text{ °C}$.
- **conclusie:** si on utilise le "gros" dissipateur, la T_j max sera atteinte si la T_a monte à 130 °C.

Avant de terminer cet article, il est important de remarquer qu'il est possible d'améliorer grandement le transfert thermique et ce en utilisant une convection forcée de l'air notamment **en utilisant un ventilateur** (ou plusieurs ventilateurs). Ceci ne sera pas abordé dans le présent article.

Ici se termine l'article. Pour tous commentaires et/ou remarques vous pouvez me contacter via l'adresse on4laj@uba.be ou roger.capouillez@skynet.be.

73's QRO de ON4LAJ (section UBA-MNS).

Doordenker Enigme

door/par ON7YD – Traduction: ON4KCY

Doordenker ON7YD #13

We hebben een schakeling, opgebouwd uit een dubbelgebalanceerde mixer (DBM) en een versterker (AMP). Aan de ingang sluiten we een (voldoende sterk) signaal met een frequentie van 40 MHz aan. Wat is het uitgangssignaal?

(bij de DBM: LO = lokale oscillator, RF = mixeringang en IF = mixeruitgang)

Oplossing

Het ingangssignaal (40 MHz) gaat naar de LO-ingang van de mixer. De uitgang van de mixer (IF) gaat via de versterker naar de ingang van de mixer. De mixer wordt dus gevoed door het eigen (versterkte) uitgangssignaal. We hebben dus een mixer die 'mengt met zichzelf'. De versterking tussen IF en RF is voldoende om het mengverlies (typisch 6 tot 8 dB) te compenseren.

Bij een dubbelgebalanceerde mixer is:

$$f_{IF} = |f_{LO} \pm f_{RF}|$$

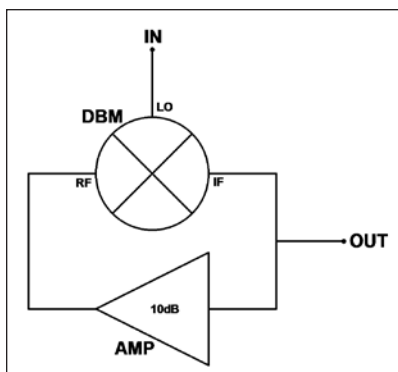
(waarbij $|\dots|$ staat voor de absolute waarde).

In dit geval is:

$$f_{LO} = f_{IN} \text{ en } f_{IF} = f_{RF} = f_{OUT}$$

Waaruit volgt dat:

$$f_{OUT} = |f_{IN} \pm f_{OUT}|$$



Enigme ON7YD #13

Nous avons un schéma composé d'un mixer doublement balancé (DBM) et d'un amplificateur (AMP). A l'entrée, nous injectons un signal (suffisamment fort) avec une fréquence de 40 MHz. Quel est le signal de sortie?

(DBM: LO = Oscillateur local, RF = entrée mixer et IF = sortie mixer)

Solution

Le signal d'entrée (40 MHz) est injecté à l'entrée du mixer. La sortie du mixer (IF) va via l'amplificateur à l'entrée du mixer. Le mixer est donc alimenté par son propre signal de sortie amplifié. Nous avons donc un mixer qui se mélange avec lui-même. L'amplification entre IF et RF est suffisante pour compenser la perte du mélange (typiquement 6 à 8 dB).

Dans le mixer doublement balancé:

$$f_{IF} = |f_{LO} \pm f_{RF}|$$

(dans lequel $|\dots|$ est la valeur absolue).

Dans ce cas:

$$f_{LO} = f_{IN} \text{ en } f_{IF} = f_{RF} = f_{OUT}$$

Il s'en suit:

$$f_{OUT} = |f_{IN} \pm f_{OUT}|$$