

Levensduur schatten van elektrolytische condensatoren

Grafisch hulpmiddel en rekenmodel

Aluminium elektrolytische condensatoren ('elco's' of 'elcaps') zijn essentieel voor het functioneren van uiteenlopende elektronische circuits. De levensduur van die circuits is dikwijls direct afhankelijk van de levensduur van de elco's [9]. Dit artikel beschrijft de constructie van elco's en belicht gerelateerde termen als ESR, rimpelstroom, zelfopwarming, chemische stabiliteit en betrouwbaarheid. Ook wordt gekeken naar twee tools voor het schatten van de levensduur van elco's.

DR. ARNE
ALBERTSEN,
JIANGHAI EUROPE
GMBH

Aluminium elektrolytische condensatoren bestaan uit een sterk opgeruwde anodefolie, bedekt met een dunne diëlektrische laag en een precies passende kathode, de elektrolytische vloeistof.

De vloeibare elektrolyt maakt deze opbouw bijzonder:

- De stroom loopt dank zij bewegende ionen. Temperatuurverhoging vermindert de viscositeit en verlaagt de elektrische weerstand (ESR).
- Het kookpunt van de elektrolyt be-

grenst de maximaal toelaatbare zelfopwarming die wordt veroorzaakt door rimpelstroom en omgevingstemperatuur.

- Elektrolytverliezen, veroorzaakt door elektrochemisch zelfherstel en uitdroging, verminderen de levensduur van elektrolytische condensatoren [7].

Equivalente serieweerstand ESR

De ESR ('equivalent series resistance') maakt een eenvoudige berekening mogelijk van de thermische verliezen die

optreden tijdens het functioneren van elco's [1].

De ESR (figuur 2) is de som van een constante (bij benadering), een frequentieafhankelijk deel en een temperatuurafhankelijk deel [2]:

$$ESR = R_o + R_d + R_e$$

R_o is het ohmse deel (folie, verbindingpunten en soldeeraansluitingen), R_d het frequentieafhankelijke deel (diëlektrische laag (figuur 3a, [3])), en R_e de temperatuurafhankelijke weerstand (elektrolyt en papier (figuur 3b)).

Om betrouwbare ontwerpen te verkrijgen moet bij het kiezen van elektrolytische condensatoren niet worden uitgegaan van de nominale waarden van de ESR, maar van de maximum waarden.

Rimpelstroom

Meestal is op een gelijkspanning een wisselspanning of rimpel gesuperponeerd. Deze veroorzaakt een rimpelstroom en zelfopwarming van de elco. Omdat stroom met elke frequentie bijdraagt aan de zelfopwarming [8], moeten de RMS-waarden (root mean square) van de opgegeven rimpelstromen worden bekeken:

$$I_a = \sqrt{\left(\frac{I_{f1}}{F_{f1}}\right)^2 + \left(\frac{I_{f2}}{F_{f2}}\right)^2 + \dots + \left(\frac{I_{fn}}{F_{fn}}\right)^2}$$



I_a is de RMS-waarde van alle rimpelstromen

$I_{f_1} \dots I_{f_n}$ zijn de RMS-waarden van de rimpelstromen met frequenties $f_1 \dots f_n$

$F_{f_1} \dots F_{f_n}$ is een stroomcorrectiefactor voor frequenties $f_1 \dots f_n$

$$F_{f_i} = \sqrt{\frac{ESR(f_0)}{ESR(f_i)}}$$

waarbij f_0 = referentiefrequentie van de nominale rimpelstroom

De correctiefactoren voor de stromen zijn afkomstig van de frequentieafhankelijkheid van de ESR en worden opgegeven in de datasheets.

Zelfopwarming van elco's

In werking stijgt de temperatuur van de elco boven de omgevingstemperatuur. In stabiele toestand komt het toegevoerde vermogen P_{el} overeen met het warmtevermogen P_{th} dat aan de omgeving wordt gedissipeerd.

$$P_{el} = P_{th}$$

De belangrijkste koelmechanismen voor elco's zijn straling en convectie. Warmtegeleiding is meestal maar heel gering. Hoe goed de elco warmte kan afstralen is afhankelijk van het oppervlaktmateriaal van de component. De kleur van de elco speelt geen rol.

De bijdrage van convectie aan het totale koeleffect kan worden verbeterd door geforceerde koeling [5].

De individuele equivalente thermische weerstanden van elk koelingsmechanisme kunnen worden samengevoegd tot een enkele thermische weerstand R_{th} .

De kerntemperatuur T_c kan worden be-

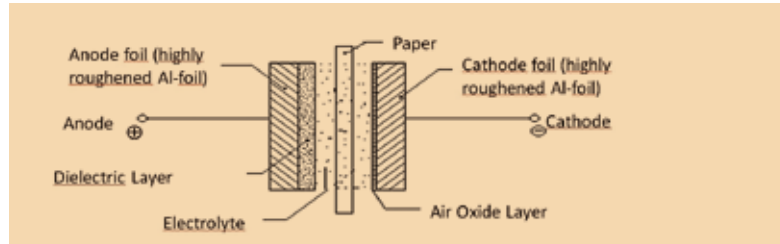
$$T_c = \Delta T \times \frac{R_{th}^{inside}}{R_{th}} + T_s$$

waarbij $\Delta T = I^2 \times ESR \times R_{th}$

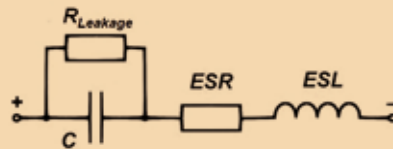
De gecombineerde interne thermische weerstanden liggen in de orde van

$$R_{th}^{inside} \cong 1 \sim 3 \frac{K}{W}$$

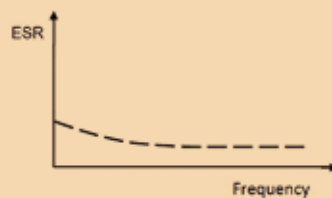
De meting van de oppervlaktetemperatuur T_s op de bodem van de behuizing van de elco (de 'can') geeft een goede benadering van de kerntemperatuur T_c voor radiale en kleine 'snap-in' elco's (can-diameters ≤ 25 mm). Voor grotere can-afmetingen wordt een rechtstreekse meting van de kerntemperatuur aanbevolen. Jianghai heeft



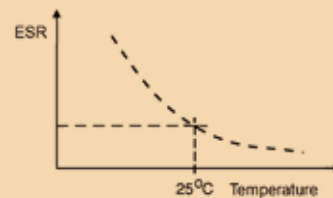
Figuur 1: De opbouw van een elektrolytische condensator.



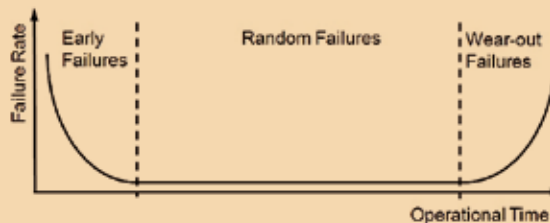
Figuur 2: Vervangschema van een elco.



Figuur 3a: ESR versus frequentie.



Figuur 3b: ESR versus temperatuur.



Figuur 4: FIT rate versus tijd.

daarvoor op aanvraag elco's met thermokoppels.

Chemische stabiliteit

Elektrolytsystemen zijn multi-compound mengsels, en het is absoluut vereist dat zij chemisch stabiel zijn. Een goede indicator voor chemische stabiliteit is de zogeheten 'shelf life' (rechterkolom in tabel 1). In tegenstelling tot de gebruikelijke opslag van elco's bij matige temperatuur, is de shelf life test een veeleisende versnelde levensduurtest die de componenten blootstelt aan hun maximale temperatuur, zonder dat een spanning is aangelegd.

Een hoge shelf life waarde is een goede indicator voor de chemische stabiliteit, de zuiverheid van materialen en een goede productiekwaliteit.

Betrouwbaarheid en levensduur

De aan elkaar verwante eigenschappen 'betrouwbaarheid' en 'levensduur' geven antwoord op vragen als 'hoeveel elco's zullen er falen gedurende het gebruik van mijn toepassing?' en 'hoe lang zullen de elco's in mijn toepassing blijven leven?'

Het kenmerkende tijdsverloop voor de betrouwbaarheid van elco's volgt de zogeheten badkuipkromme [6]. De uitval (failure rate of FIT rate) λ geeft het aantal fouten per tijdseenheid (FIT = 'failures in time' in 10^{-9} failures/uur).

De badkuipkromme in figuur 4 toont drie duidelijk verschillende segmenten:

	Useful Life		Load Life	Endurance Test	Shelf Life
Lifetime	7000h	>200000h	5000h	5000h	1000h
Leakage Current	Not more than specified value		Not more than specified value	Not more than specified value	Not more than specified value
Capacity Change	Within $\pm 30\%$ of initial value		Within $\pm 20\%$ of initial value	Within $\pm 20\%$ of initial value	Within $\pm 20\%$ of initial value
Dissipation Factor	Not more than 300% of specified value		Not more than 200% of specified value	Not more than 130% of specified value	Not more than 200% of specified value
Condition:					
Applied Voltage	U_R	U_R	U_R	U_R	$U_R = 0$
Applied Current	I_R	$1,6 \times I_R$	I_R	$I_R = 0$	$I_R = 0$
Applied Temperature	105°C	40°C	105°C	105°C	105°C
Failure Rate Level	$\leq 1\%$ Failure Rate	$\leq 1\%$ Failure Rate	guaranteed		

Tabel 1: Complete definitie van testcondities en toegelaten marge.

1. De 'early failure' periode (afnemende FIT rate λ);
2. De periode binnen de normale levensduur beschrijft het optreden van willekeurige fouten (constante FIT rate λ);
3. Het laatste segment ontstaat door slijtage en veranderingen buiten de acceptabele limieten aan het einde van de reguliere levensduur – of daarna (toenemende FIT rate λ).

Tegen het eind van het productieproces worden alle elco's onderworpen aan 'post-forming' (vergelijkbaar met een burn-in). Vroeg optredende fouten in de toepassing zijn daardoor uitzonderlijk [1].

Voor de rest van dit artikel gaan we ervan uit dat de elco werkt in het deel van de badkuipkromme waar de willekeurige fouten optreden. Het einde van de levensduur is bereikt als bepaalde parameters vooraf gedefinieerde limieten overschrijden. Het is gangbare praktijk om bij het ontwerpen van een applicatie toe te staan dat een bepaald deel van de componenten buiten deze limieten valt.

Bij het vergelijken van datasheets van verschillende elcofabrikanten, blijkt dat veel terminologie niet consistent wordt

gebruikt. Je ziet aanduidingen als 'load life', 'useful life', 'endurance', 'life expectancy', 'operational life', en 'service life'. Naast verschillende limieten die het eind van de levensduur definiëren, gebruiken sommige fabrikanten zelfs verschillende standaarden om te accepteren dat een deel van de geteste componenten buiten het gespecificeerde gebied valt. Dat alles maakt een vergelijking van de verschillende levensduurwaarden van verschillende leveranciers bijzonder moeilijk.

Op dit moment bestaan er geen valide standaarden die kunnen worden gebruikt om een exacte definitie van de termen en hun betekenis te verkrijgen. Jianghai kiest ervoor om alle relevante definities en testcondities te vermelden in de datasheet (tabel 1).

Levensduurdiagram en -model

Om gebruikers te voorzien van hulpmiddelen om de levensduur van elco's te schatten, heeft Jianghai levensduurdiagrammen en een levensduurmodel ontwikkeld. Het levensduurdiagram kijkt naar de belangrijkste parameters (temperatuur, rimpelstroom) en geeft een grafisch beeld van toelaatbare combinaties van deze parameters. Het levensduurmodel houdt ook rekening met de invloed van de daadwerkelijk tijdens de levensduur gebruikte spanning.

De levensduurdiagrammen (figuur 5) kijken niet naar combinaties van rimpelstroom en omgevingstemperatuur die kunnen leiden tot temperaturen die te dicht bij, of zelfs boven, het kookpunt van de elektrolyt komen. Zulke belastingcondities mogen alleen worden gebruikt in overleg met Jianghai.

De invoer voor het levensduurmodel bestaat uit type specifieke parameters uit de datasheet met toepassing specifieke parameters als omgevingstemperatuur, rimpelstroombelasting en de aangelegde spanning tijdens gebruik

[4]. In geval van geforceerde koeling moet de waarde voor de rimpelstroom dienovereenkomstig worden aangepast.

Voorbeeld levensduurschatting

Het volgende voorbeeld dient als illustratie van een praktische toepassing van het levensduurdiagram en het levensduurmodel.

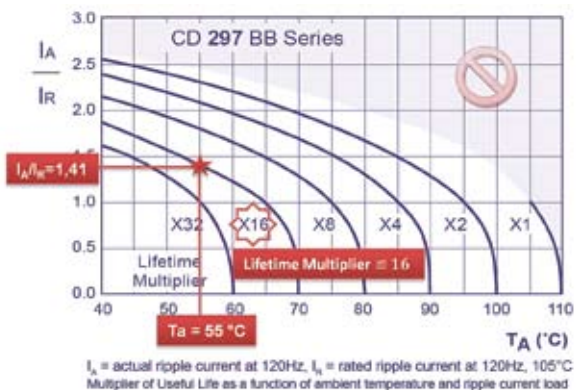
Stel dat een 105 °C elco, type 390 μ F, 400 V, 35 x 45 mm uit de snap-in serie CD_297_BB van Jianghai werkt bij een omgevingstemperatuur $T_a = 55$ °C en een rimpelstroom van 2,51 A_{rms} bij 20 kHz. De werkspanning is gelijk aan de opgegeven spanning van 400 V, zodat alleen de omgevingstemperatuur en de rimpelspanning meetellen in de levensduurschatting. De koeling gebeurt in dit voorbeeld door vrije convectie en straling.

De datasheet geeft een nominale rimpelstroom aan van $I_R = 1,27 A_{rms}$ bij 120 Hz en 105 °C en een frequentiecorrectiefactor van 1,4 voor frequenties boven 10 kHz en spanningen van 315 ~ 450 V. De levensduur ('useful life') wordt dan gespecificeerd als $L_o = 7000$ uur bij nominale belasting condities. De verhouding tussen de werkelijk rimpel I_A en de nominale rimpelstroom I_R wordt dan berekend als

$$\frac{I_A}{I_R} = \frac{2,51 A_{rms}}{1,27 A_{rms}} = 1,41$$

Uit het levensduurdiagram (figuur 5), halen we een benaderde waarde voor de 'lifetime multiplier' van 16 op het snijpunt van omgevingstemperatuur en rimpelstroomverhouding. De schatting voor 'useful life' voor deze elco in deze toepassingen en onder de genoemde omstandigheden is:

$$L_X = L_o \times 16 = 7000 \text{ u} \times 16 = 112\,000 \text{ uur} \approx 13 \text{ jaar}$$



Figuur 5: De lifetime multiplier wordt gevonden op het snijpunt van de parameters van de condensator in werking.

Als alternatief kan de levensduur ook worden geschat door het gebruiken van het numerieke levensduurmodel:

$$L_X = L_0 \times K_T \times K_R \times K_V$$
$$= L_0 \times 2^{\frac{T_0 - T_a}{10K}} \times K_i \left[1 - \left(\frac{I_a}{I_0} \right)^2 \right]^{\frac{\Delta T_0}{10K}} \times \left(\frac{U_a}{U_r} \right)^{-n}$$

Invullen van de waarden

$$L_0 = 7000 \text{ uur}, T_0 = 105 \text{ }^\circ\text{C}, T_a = 55 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$I_A = 2,51 \text{ A}_{\text{rms}} / 1,4 = 1,79 \text{ A}_{\text{rms}},$$

$$I_R = 1,27 \text{ A}_{\text{rms}}, \Delta T_0 = 5 \text{ K}$$

$$U_r = U_a; 0,8 \leq (U_a/U_r) \leq 1 \rightarrow n = 5$$

levert

$$L_X = 7000 \text{ uur} \times 32 \times 0,5 \times 1 =$$
$$112\,000 \text{ uur} \cong 13 \text{ jaar}$$

Het resultaat van de numerieke schatting komt dus overeen met het resultaat van de grafische oplossing met het levensduurdiagram.

Kortom

Aluminium elektrolytische condensatoren bepalen vaak de levensduur van

elektronische producten. Een grondige kennis van enkele van de belangrijke parameters en verouderingsconcepten van deze componenten is nodig om te kunnen komen tot een betrouwbaar elektronicaontwerp met een voorspelbare levensduur.

Kenmerkende elektrische en thermische eigenschappen van elco's zijn hier belicht, evenals de definities voor betrouwbaarheid en levensduur. Er zijn twee methoden beschikbaar voor het schatten van de levensduur: een grafische methode (het levensduurdiagram) en een numerieke berekening (het levensduurmodel). De bruikbaarheid van de modellen en hun resultaten is afhankelijk van het specifieke product en de toepassing waarin het wordt gebruikt. Het is uiteraard altijd mogelijk de leverancier te consulteren voor begeleiding bij het ontwerpproject en het bevestigen van schattingen. ■

Referenties

- [1] Both, J., *Aluminium-Elektrolytkondensatoren, Teil 1 - Ripplestrom und Teil 2 - Lebensdauerberechnung*, BC Components, 10 februari 2000
- [2] Gasperi, M. L., *A Method for Predicting the Expected Life of Bus Capacitors*, IEEE Industry

Applications Society, Annual Meeting, New Orleans, Louisiana, 5 ... 9 oktober 1997

[3] Mirsky, G., *Determining end-of-life, ESR, and lifetime calculations for electrolytic capacitors at higher temperatures*, EDN, 20 augustus 2008

[4] Parler, S.G., *Deriving Life Multipliers for Aluminum Electrolytic Capacitors*, IEEE Power Electronics Society Newsletter, vol. 16, no.1, 11 ...12, february 2004

[5] Parler, S.G., *Thermal Modeling of Aluminum Electrolytic Capacitors*, IEEE Industry Applications Society Conference, oktober 1999

[6] Stiny, L., *Handbuch passiver elektronischer Bauelemente*, Franzis Verlag, Poing, 2007

[7] Thiesbürger, K.H., *Der Elektrolytkondensator*, Roederstein, Landshut, 1991

[8] Van de Steeg, T., *Selecting electrolytic capacitors for power supplies*, Dataweek Electronics & Communications Technology, uitgave 28 februari 2001

[9] Venet, P., A. Lahyani, G. Grellet, A. Ah-Jaco, *Influence of aging on electrolytic capacitors function in static converters: Fault prediction method*, Eur. Phys. J. AP 5, 71-83 (1999)

Inl.: Heynen, Gennep

Tel.: (0485) 550909