

# Voorkom oververhitting

*Bewegende mechanismen worden in de precisietechnologie vaak aangedreven door een servomotor. Voor het juiste ontwerp is het belangrijk dat deze het koppel en de snelheid levert die nodig zijn voor het goed functioneren van het mechanisme. Bij de keuze van een goede servomotor wordt de precisietechnoloog geconfronteerd met hele andere specificaties, zoals de warmteontwikkeling van de motor. Is de servomotor te klein gekozen dan wordt deze te warm; wordt de servomotor te groot gekozen dan is deze onnodig duur of te volumineus. Dit artikel presenteert een rekenwijze waarmee de temperatuur en de warmteontwikkeling van een gelijkstroommotor en borstelloze motor nauwkeurig kunnen worden voorspeld. Dit kan helpen oververhitting en overdimensionering te voorkomen.*

• *Edward Hage* •

Oververhitting en overdimensionering lijken twee begrippen die niks met elkaar te maken hebben. Toch zijn ze de keerzijden van dezelfde medaille bij de keuze en aanschaf van elektromotoren. Oververhitting is namelijk het meest voorkomende faalmechanisme van een te krap gedimensioneerde elektromotor. Vooral bij moderne elektromotoren met sterke magneten en een compacte bouwwijze kan de motor zijn warmte moeilijk kwijt. Oververhitting kan leiden tot:

- het falen van de windingsisolatie, hetgeen resulteert in kortsluiting en mogelijk uitbranden van de motor;
- het falen van de lagers, hetgeen resulteert in een vastlopende motor;
- degradatie van de magneten (de magneten verliezen permanent aan kracht), zodat de motor nooit meer het piekkoppel kan leveren waarvoor het ontworpen is.

Het is daarom belangrijk oververhitting te voorkomen. Veelal wordt dit bereikt door de motor groter te kiezen dan aanvankelijk is berekend. De noodzakelijke mate van overdimensionering is vaak giswerk, omdat de werkelijke eindtemperatuur onbekend is. Om maar voldoende zekerheid te hebben, wordt

de motor sterk overgedimensioneerd, waardoor deze onnodig duur wordt. Dat is de prijs voor de extra 'zekerheid'. Gedetailleerde bepaling van de temperatuur van de motor kan voorkomen dat men te veel overdimensioneert. Men weet precies waar de grens ligt, zodat met kennis van zaken een motor kan worden gekozen. Hier wordt uitdrukkelijk niet voorgesteld om de grens van het toelaatbare op te zoeken – wel dat men met beleid een overdimensionering kan bepalen als men de grens daadwerkelijk kent.

Voor het vooraf voorspellen van de motortemperatuur is het nodig af te wijken van een 'ideale' voorstelling van een motor waarbij dissipatie recht evenredig is met het koppel. In werkelijkheid neemt de dissipatie namelijk meer dan evenredig toe als een groter koppel wordt gevraagd. Dit heeft vergaande consequenties en vraagt om een rekenwijze die daarmee rekening houdt, om aldus voor een bepaalde applicatie de beste motor te kunnen bepalen.

## Warmteontwikkeling in de motor

Als de motor een koppel levert zal een stroom vloeien die

# en overdimensionering

dissipatie veroorzaakt in de eindige weerstand van de motorwindingen. De volgende effecten treden dan op:

1. De windingen zullen opwarmen en dit zal de Ohmse weerstand  $R$  van de windingen doen toenemen.
2. De magneten zullen opwarmen en dit zal de motorconstante  $k$  doen afnemen.

De verhoogde weerstand  $R$  zal de elektrische dissipatie doen verhogen (gevolg van effect 1). Bij een afgenomen motorconstante is een grotere stroom  $I$  nodig om hetzelfde koppel  $T$  te kunnen leveren. Deze grotere stroom zal de elektrische dissipatie eveneens verhogen (gevolg van effect 2). Formule 1 vat het gevolg van deze twee effecten samen.

$$P_{diss} = I^2 R = \frac{T^2}{k^2} R \quad \uparrow \uparrow P_{diss} = \frac{T^2}{k^2} \uparrow R$$

Formule 1. Elektrische dissipatie en stroom nemen toe bij een hogere temperatuur.

Deze verhoogde elektrische dissipatie zal resulteren in een verdere verhoging van de temperatuur die op haar beurt de stroom  $I$  en de weerstand  $R$  verder zal doen verhogen. Dit is een cumulatief effect dat uiteindelijk resulteert in een evenwichtssituatie voor de dissipatie.

Opmerking: De cumulatieve verwarming zal niet in alle situaties resulteren in een evenwichtssituatie. Bij een significante overbelasting van de motor zal de dissipatie en de temperatuur zo veel stijgen dat beide termen naar oneindig verdwijnen. In de praktijk zal dit resulteren in het uitbranden van de motor. Dit is dus zeker geen theoretische situatie!

De effecten van de temperatuur op  $k$  en  $R$  worden beschreven met Formules 2 en 3.

$$R(\theta_{winding}) = R_{ref} \cdot [1 + (\theta_{winding} - \theta_{ref}) \cdot \alpha]$$

Formule 2. Temperatuurafhankelijkheid van  $R$ .

$$k(\theta_{magneet}) = k_{ref} \cdot [1 + (\theta_{magneet} - \theta_{ref}) \cdot TK_{Br}]$$

Formule 3. Temperatuurafhankelijkheid van  $k$ .

De weerstand  $R$  is afhankelijk van de windingstemperatuur  $\theta_{winding}$ .  $R_{ref}$  is de referentieweerstand en  $k_{ref}$  is de referentiemotorconstante gegeven op een referentietemperatuur  $\theta_{ref}$  van 20 °C.

Deze formules vertellen het volgende:

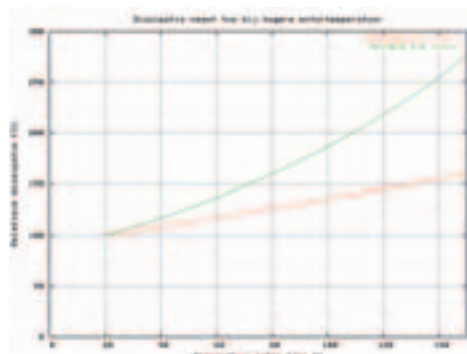
- De weerstand  $R$  zal lineair toenemen met de windings-temperatuur volgens  $\alpha$ . Deze materiaalconstante bedraagt voor koper (het materiaal van de windingen) 0,00393 K<sup>-1</sup>.
- De motorconstante  $k$  zal lineair afnemen met de magneet-temperatuur volgens  $TK_{Br}$  (afnemen omdat  $TK_{Br}$  altijd een negatieve waarde heeft). Deze materiaalconstante verschilt per magneetsoort; zie Tabel 1.

Tabel 1. Verval van de magnetische fluxdichtheid  $TK_{Br}$  voor verschillende magneetmaterialen.

Materiaal	$TK_{Br}$ [%/K]
Gegoten of gesinterd SmCo	-0,005 tot -0,07
Gelijmd (bonded) SmCo	-0,04
Gesinterd SmCo <sub>5</sub>	-0,04
Gesinterd Sm <sub>2</sub> Co <sub>17</sub>	-0,03
Ferriet	-0,2
Alnico	-0,01 tot -0,025
Gelijmd (bonded) NdFeB	-0,2
Gesinterd NdFeB	-0,07 tot -0,16
Nd <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B	-0,1

## Hogere dissipatie

Met Formules 1 t/m 3 kan de dissipatie worden bepaald bij verhoogde motortemperatuur. Dit wordt gegeven in Figuur 1 voor twee waarden van  $TK_{Br}$ . De dissipatie is uitgedrukt als percentage van de dissipatie bij omgevingstemperatuur (100% bij 20 °C). Voor het reken gemak wordt aangenomen dat de windings- en magneettemperatuur aan elkaar gelijk zijn.



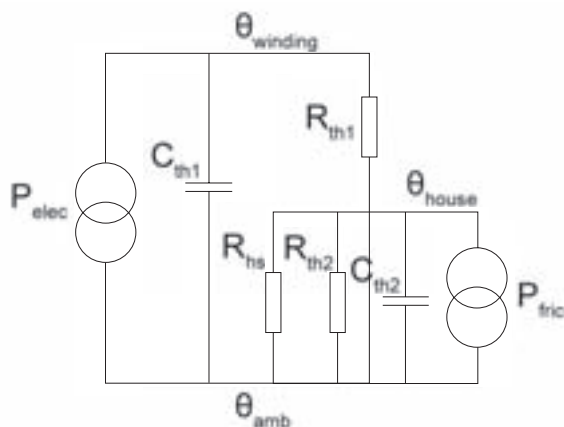
Figuur 1. Dissipatie neemt toe bij toenemende motortemperatuur.

Uit Figuur 1 kan worden geconcludeerd dat de dissipatie behoorlijk stijgt als functie van de motortemperatuur. Bij 108 °C is de dissipatie (voor  $TK_{Br} = -0,2\%/K$ ) reeds 200%, oftewel twee keer zo groot als bij omgevingstemperatuur. De maximale temperatuur wordt veelal bepaald door de isolatieklasse van de windingen. Voor de hoogste isolatieklasse H bedraagt de maximale windingstemperatuur 180 °C (volgens norm IEC:2004 60034-1). Omdat de dissipatie sterk stijgt, is het essentieel om te bepalen of we in de buurt komen van de maximale temperatuur. Dit vereist meer informatie over de motor.

**Thermisch model motor**

De uiteindelijke motortemperatuur is afhankelijk van de uitvoering van de motor. Met een thermisch model kan worden weergegeven hoe de temperatuur afhangt van de eigenschappen van de motor en de dissipatie. In Figuur 2 wordt het thermische model getoond; het is generiek voor alle elektromotoren met permanente magneten (PM).

*Gedetailleerd thermisch model*



- $P_{elec}$  = elektrische dissipatie
- $P_{fric}$  = mechanische frictie
- $R_{th1}$  = thermische weerstand tussen windingen en huis
- $R_{th2}$  = thermische weerstand tussen huis en omgeving
- $R_{hs}$  = additionele heatsink
- $C_{th1}$  = thermische capaciteit tussen windingen en huis
- $C_{th2}$  = thermische capaciteit tussen huis en omgeving
- $\theta_{winding}$  = windingstemperatuur
- $\theta_{house}$  = huis- of statortemperatuur
- $\theta_{amb}$  = omgevingstemperatuur

Figuur 2. Gedetailleerd thermisch model voor PM-motor.

Als er thermisch evenwicht heerst, kunnen de temperaturen worden bepaald volgens Formules 4 en 5.

$$\theta_{winding} = P_{elec}(R_{th1} + R_{th2}) + P_{fric}R_{th2} + \theta_{amb}$$

Formule 4. Evenwichtstemperatuur van de windingen voor gedetailleerd thermisch model.

$$\theta_{house} = P_{elec}R_{th2} + P_{fric}R_{th2} + \theta_{amb}$$

Formule 5. Evenwichtstemperatuur van de motorbehuizing voor gedetailleerd thermisch model.

*De magneettemperatuur*

De magneettemperatuur is niet aangegeven in Figuur 2, want afhankelijk van het motortype. Er zijn hier drie motortypen te onderscheiden:

- borstelmotoren,
- borstelloze motoren,
- synchronmotoren.

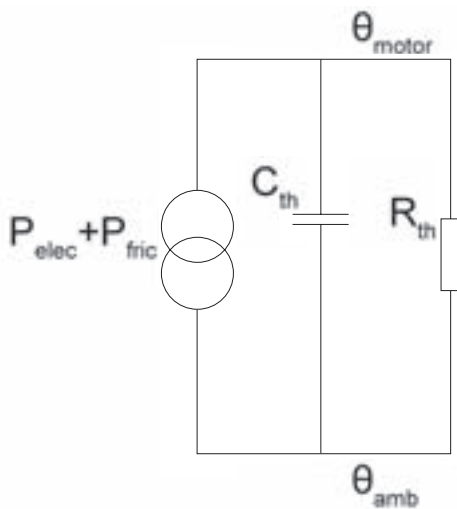
Bij borstelloze en synchronmotoren zijn de magneten bevestigd aan de rotor, en de windingen aan de behuizing. Bij de borstelmotor zijn de magneten bevestigd aan de behuizing en de windingen aan de rotor. Voor de borstelloze en de synchronmotor geldt dat de magneettemperatuur ongeveer gelijk is aan de windingstemperatuur. Bij een borstelmotor is tussen de magneet en de windingen een luchtspleet aanwezig die de thermische weerstand domineert. Daarom zal de magneettemperatuur veel dichterbij de behuizing- dan bij de windingstemperatuur liggen.

Zodoende is de magneettemperatuur per type motor samen te vatten als:

$$\begin{aligned} \theta_{magneet} &= \theta_{house} && \text{borstelmotor} \\ \theta_{magneet} &= \theta_{winding} && \text{borstelloze motor en AC synchron} \end{aligned}$$

*Simpel thermisch model*

Met het thermische model zoals gegeven in Figuur 2 kunnen de windings- en behuizingstemperatuur apart worden bepaald. Hiervoor is het nodig om de thermische weerstand tussen de windingen en huis, en tussen huis en omgeving (respectievelijk  $R_{th1}$  en  $R_{th2}$ ) te kennen. Soms wordt deze informatie niet verschaft door fabrikanten, zodat de afzonderlijke temperaturen niet kunnen worden bepaald. Vaak volstaan fabrikanten met het geven van één thermische weerstand voor de gehele motor. In dat geval wordt het simpele, minder nauwkeurige model van Figuur 3 toegepast. Hier is sprake van één motortemperatuur.



- $P_{elec}$  = elektrische dissipatie
- $P_{fric}$  = mechanische frictie
- $R_{th}$  = thermische weerstand tussen motor en omgeving
- $C_{th}$  = thermische capaciteit van de motor
- $\theta_{motor}$  = motortemperatuur
- $\theta_{amb}$  = omgevingstemperatuur

Figuur 3. Simpel thermisch model voor PM-motor.

Als er thermisch evenwicht heerst kan de motortemperatuur worden bepaald volgens Formule 6. Deze geldt voor het simpele thermisch model.

$$\theta_{motor} = (P_{elec} + P_{fric}) R_{th} + \theta_{amb}$$

Formule 6. Evenwichtstemperatuur van de motor voor simpel thermisch model.

Voor de volledigheid geldt hier, onafhankelijk van type motor:

$$\theta_{motor} = \theta_{magnet} = \theta_{winding} = \theta_{hous}$$

Formule 7. Temperatuur van de motor voor simpel thermisch model.

### Voorbeeld: berekening juiste motortemperatuur

Nu kan de motortemperatuur worden bepaald, zodat de invloed van de verhoogde dissipatie duidelijk wordt. Voor de berekening gaan we voor het gemak uit van het simpele ther-

mische model en een elektromotor met onderstaande gegevens en aandrijfsituatie:

- Werkpunt ( $T$ ;  $\omega$ ) = (1 Nm; 2.000 rpm)
- Motoreigenschappen:  $R = 10 \Omega$ ,  $k = 0.4714 \text{ Nm/A}$  (beiden bij  $20^\circ\text{C}$ ) en  $R_{th} = 1 \text{ K/W}$ .
- Omgevingstemperatuur:  $20^\circ\text{C}$ .
- Magneetsoort: verlijmd NdFeB, waarbij  $TK_{Br} = -0.2 \text{ \%/K}$ .
- Frictie: buiten beschouwing gelaten.

Volgens Formule 1 kan de dissipatie worden bepaald en ingevuld in Formule 6 levert dit de motortemperatuur:

$$P_{elec} = \frac{T^2}{k^2} R = \frac{1}{0.4714^2} 10 = 45 \text{ W}$$

$$\theta_{motor} = P_{elec} R_{th} + \theta_{amb} = 45 \cdot 1 + 20 = 65^\circ\text{C}$$

De motortemperatuur wordt dus  $65^\circ\text{C}$  als  $k$  en  $R$  niet afhankelijk zouden zijn van de temperatuur. Zoals we weten zal de dissipatie toenemen omdat  $R$  en  $k$  wel veranderen. Deze grootheden worden (Formule 7 ingevuld in Formules 2 en 3):

$$R(\theta_{motor}) = R_{ref} \cdot [1 + (\theta_{motor} - \theta_{ref}) \cdot \alpha] = 10 \cdot [1 + (65 - 20) \cdot 0.00393] = 11.77 \Omega$$

$$k(\theta_{motor}) = k_{ref} \cdot [1 + (\theta_{motor} - \theta_{ref}) \cdot TK_{Br}] = 0.4714 \cdot [1 + (65 - 20) \cdot -0.002] = 0.429 \text{ Nm/A}$$

Deze waarden ingevuld in dezelfde formules levert:

$$P_{elec} = \frac{T^2}{k^2} R = \frac{1}{0.429^2} 11.77 = 63.95 \text{ W}$$

$$\theta_{motor} = P_{elec} R_{th} + \theta_{amb} = 63.95 \cdot 1 + 20 = 84^\circ\text{C}$$

De motortemperatuur is nu  $84^\circ\text{C}$  en dus  $19^\circ\text{C}$  hoger dan eerder bepaald. Maar nog is dit niet de uiteindelijke motortemperatuur, omdat  $R$  en  $k$  bij  $84^\circ\text{C}$  immers weer anders zijn. Hun waarden moeten net zolang worden ingevuld in Formule 1 en 6 totdat het resultaat niet meer verandert. In Tabel 2 zijn de resultaten van deze iteratieve berekening gegeven. De juiste motortemperatuur wordt pas bekend na 21 iteraties en bedraagt  $112^\circ\text{C}$  in plaats van  $65^\circ\text{C}$ .

Tabel 2. Iteratieve berekening van de motortemperatuur.

Iteratie	$\Theta_{motor}$ [°C]	$R$ [ $\Omega$ ]	$k$ [Nm/A]
1	65,0	10,00	0,4714
2	84,0	11,77	0,4290
3	94,0	12,51	0,4111
4	100,0	12,91	0,4016
5	103,9	13,15	0,3959
6	106,4	13,30	0,3923
... 11	111,1	13,56	0,3859
... 16	111,9	13,61	0,3848
... 21	112,0	13,62	0,3846

### Conclusie

Uit het voorbeeld kunnen we concluderen dat de invloed van de Ohmse weerstand  $R$  en de motorconstante  $k$  op de temperatuur zeer significant is. Als deze invloed niet wordt meegenomen, wordt een foutieve eindtemperatuur berekend van 65 °C in plaats van de juiste 112 °C. Het is gemakkelijk te begrijpen dat dergelijke fouten kunnen leiden tot het vroegtijdig falen van een elektromotor.

### Database

Het enige dat nog rest is de benodigde motorgegevens te verzamelen uit catalogi en websites van fabrikanten. Dan is een objectieve vergelijking mogelijk van de prestaties van verschillende merken; de motoren worden immers op dezelfde manier doorgerekend. De ontwerper is niet meer afhankelijk van het subjectieve advies van een fabrikant, niet zelden ingegeven door de huiver voor oververhitting, hetgeen een te dure motor kan opleveren.

Het vinden van de motorgegevens kost echter veel spouwerk; hier biedt [www.specAmotor.com](http://www.specAmotor.com) een oplossing. De site is kosteloos te gebruiken en biedt een database met meer dan 10.000 motorconfiguraties van dertien merken. SpecAmotor rekent al die configuraties door voor een specifieke toepassing na opgave van gewenste koppel en snelheid. De motortemperatuur wordt dan bepaald zoals hiervoor beschreven. De geschiktheid van een motor wordt daarbij getoetst aan de temperatuur én aan de navolgende criteria:

- Maximale stroom: de stroom mag voor korte perioden erg hoog zijn, maar niet zo hoog dat de magneten demagnetiseren.
- Maximale snelheid: deze wordt voor een borstelloze motor bepaald door de lagering die geschikt is tot een bepaald toerental. Voor borstellessen motoren wordt de maximale snelheid veelal beperkt door contactverlies van de bor-

stels ten gevolge van de onrondheid van de collector, hetgeen gepaard gaat met ernstige vonkvorming.

- Maximaal vermogen: voor borstellessen motoren wordt dit veelal beperkt door de commutatiegrens.
- Maximaal koppel: als een reductiekastje voor de motor aanwezig is, zal dit een maximaal piekkoppel kunnen doorleiden. Grotere koppels leiden tot mechanische schade van de reductie.
- Maximale klemspanning: vooral relevant bij borstellessen motoren, waar een te hoge klemspanning vonkvorming tussen borstels en collector veroorzaakt en de levensduur van de motor verkort.

De berekeningen zijn gevalideerd door John Compter, een autoriteit op het gebied van elektromotor-ontwerp en werkzaam bij Philips Applied Technologies; zie ook het kader over zijn boek dat gratis beschikbaar is via specAmotor.

### Auteursnoot

Edward Hage studeerde aan de HTS in Amsterdam en Werktuigbouwkunde aan de Universiteit Twente. Daarna werkte hij bij E.Co Engineering in Hengelo en bij ASML als mechatronicus in de Stages-groep. In 2004 startte Hage met Confirmat in Helmond om internetconcepten voor de technische gemeenschap, zoals specAmotor, te gaan ontwikkelen.

### Gratis boek

SpecAmotor biedt via de website gratis het boek "Electrical drives for precision engineering designs" van John Compter aan. Dit boek is bedoeld voor engineers die een elektromotor zoeken voor nauwkeurige toepassingen. Zo'n motor moet zijn last nauwkeurig, maar ook snel kunnen positioneren op de gewenste locatie. Compter laat zien welke motoren hiervoor geschikt zijn, en geeft een uitgebreide vergelijking met voor- en nadelen van de verschillende motortypes. Daarna gaat hij in op het thermische gedrag van motoren en toont aan dat waarden die normaal 'constant' worden verondersteld, helemaal niet constant zijn. Dit kan de prestaties van de motor significant verslechteren. Door rekening te houden met deze invloed bij de keuze van een motor, kan oververhitting worden voorkomen. SpecAmotor gebruikt deze kennis bij het berekenen van de beste motor. Compter sluit af met een uitvoerige behandeling van lineaire en voice-coil motoren.

[www.specamotor.com](http://www.specamotor.com)