

# De mogelijkheid om preventief onderhoud te plegen aan de hand van trillingsonderzoek

Ing. Roel Terraneo Raadgevend Ingenieursbureau De Boer & Peffer, Almere

Het onderhoud aan productiemiddelen is in twee soorten van onderhoud op te splitsen, n.l. curatief onderhoud en preventief onderhoud.

Bij curatief onderhoud moet het productiemiddel hersteld worden, omdat men de machine zolang heeft laten doordraaien, dat hij tot stilstand is gekomen. De schade is dan groter dan alleen de prijs van het onderdeel, dat de schade veroorzaakte. Bovendien komt het uitvallen van het productiemiddel op een niet voorspelbaar moment. Dit leidt tot grote bedrijfseconomische verliezen.

Bij preventief onderhoud gaat men periodiek de onderhoudstoestand van de machine onderzoeken. Hiermee zijn natuurlijk ook kosten gemoeid. Men bereikt hiermee dat, nadat men 'know-how' opgebouwd heeft, kan voorspellen wanneer een bepaald onderdeel vervangen moet worden. Daarmee blijven de onderhoudskosten beperkt tot de prijs van het onderdeel, dat vervangen moet worden, en de arbeidskosten, die daarmee gemoeid zijn. Bovendien kan de vervanging uitgevoerd worden op een bedrijfseconomisch gunstig moment.

## Probleemstelling

Bij het onderzoek van de onderhoudstoestand van een productiemiddel geeft men er de voorkeur aan de slijtage van onderdelen vroegtijdig te signaleren. Bij vroegtijdig signaleren van slijtage maakt men gebruik van het feit, dat een machine meestal niet plotseling uitvalt. In het algemeen zullen de verschillende slijtageverschijnselen al in een veel vroeger stadium te constateren zijn. Als men in zo'n geval het versleten onderdeel opspoort, dan kan men voorkomen dat bij een ander onderdeel het slijtageproces versneld wordt. Een primitieve manier van preventief onderhoud is het op vastgestelde tijdstippen vervangen van bepaalde machineonderdelen. Op deze manier voorkomt men dat een productiemiddel plotseling uitvalt. Dit houdt echter in dat men onnodig vroeg bepaalde onderdelen vervangt. Het is voordeliger om het tijdstip voor een onderhoudsbeurt te laten afhangen van de onderhoudstoestand van de machine. Indien een uitspraak gedaan kan worden over de onderhoudstoestand van de machine, zonder deze aan het productieproces te onttrekken, wordt zeer waarschijnlijk een aanzienlijke kostenbesparing verkregen. Op deze manier hoeven de reparaties alleen uitgevoerd te worden als de conditie van de machine daar aanleiding toe geeft.

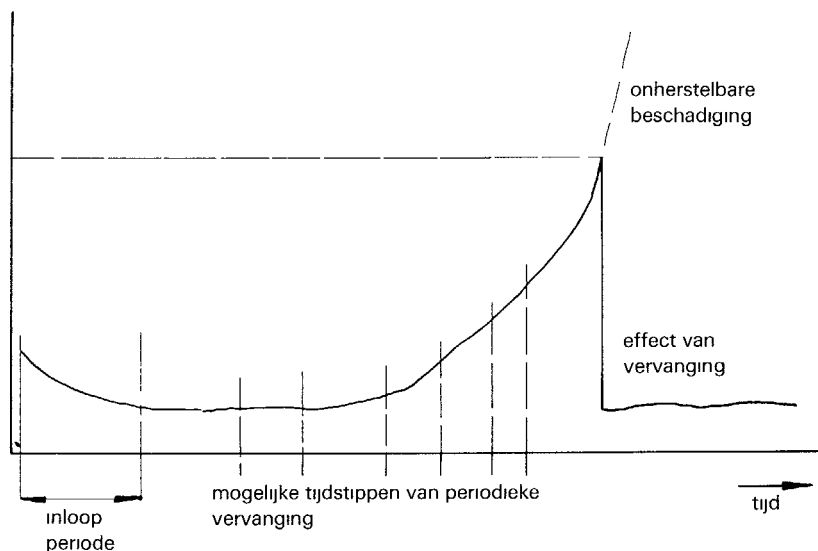
De trillingen, die een machine afgeeft, zijn het gevolg van interne processen, b.v. rollende lagers, in elkaar grijpende tandwielen, enz. Uit de trillingen aan het machine oppervlak kan informatie gehaald worden over de veroorzakers van die trillingen. Hiermee zou men een uitspraak kunnen doen over de onderhoudstoestand van de machine. Het liefst zou men nog iets verder willen gaan. Uit de trillingen zou men door ze

op een bepaalde manier te verwerken informatie kunnen halen over de veroorzakers van die trillingen.

Gaat men uit van de totale trillingsenergie zoals die gemeten kan worden aan het oppervlak van een machine dan kan men constateren, dat na het in gebruik stellen van een nieuwe machine het geluidsniveau en dus het trillingsniveau daalt. Dit is het zogenaamde inlopen. Dit inlopen is in feite het egaliseren van de bij de fabricage ontstane oneffenheden. Na verloop van tijd blijkt het trillingsniveau weer te gaan stijgen. Dit is te wijten aan de slijtage, zoals deze optreedt in de verschillende onderdelen. Door dit slijtageproces zullen er nieuwe oneffenheden ontstaan. Daardoor worden nieuwe trillingen geïntroduceerd. Deze trillingen zullen in energieniveau blijven stijgen totdat de machine uitvalt. Het boven beschreven proces is grafisch weergegeven in figuur 1.

Als men nu een praktijksituatie bekijkt, b.v. een spectrum van een draaibank, dan ontstaat er zo'n ingewikkeld spectrum, dat het haast ondoenlijk is om in dit spectrum een specifiek onderdeel, b.v. een lager te herkennen. De interpretatie van het spectrum moet aanleiding geven tot een eenduidige bepaling van welk lager versleten is.

Een belangrijk aspect, dat de complexiteit van het spectrum veroorzaakt is het



Figuur 1 Deze curve toont hoe geplande vervanging of reparatie van een onderdeel eerder plaatsvindt dan de staat van onderhoud dit zou uitwijzen.

feit, dat een stoorbron via een onbekend dynamisch systeem met het meetpunt verbonden is. Het dynamisch systeem, dat de afstand tussen de stoorbron en het meetpunt overbrugt, wordt bepaald door de constructie. Het gedrag van dit dynamisch systeem hangt af van de massastijfheid en de mate van demping van de constructieonderdelen

Om nu zo'n dynamisch systeem te beschrijven moet men erg diep op de theoretische achtergronden van de systemen regeltechniek ingaan [6]. Als men er echter vanuit gaat, dat het dynamische systeem tussen een bepaalde stoorbron en een bepaald meetpunt tijdsafhankelijk is, kan men toch de gevonden spectra vergelijken om eventuele niveauverschillen, die door het slijtageproces optreden, te constateren.

Bij het trachten te herkennen van een spectrum van een specifiek kogellager in het spectrum van het meetpunt moet men zich er rekenschap van geven, dat het spectrum van de stoorbron, in dit geval het lager, beïnvloed is door het dynamische systeem, dat zich bevindt tussen de stoorbron en het meetpunt. Dit houdt in dat door bij voorbeeld resonantieachtige effecten het lagerspectrum als een geheel ander spectrum aan het machineoppervlak waargenomen wordt.

**Het registreren en verwerken van de trillingen.**

Het registreren van de trillingen gebeurt in het algemeen door middel van een versnellingsopnemer. De versnellingsopnemer is gebaseerd op het principe van piezo-elektriciteit. De principiële constructie is weergegeven in figuur 2.

materiaal gedrukt door middel van een stijve veer. De hele constructie is gemonteerd in een metalen huis, met een zeer dikke grondplaat.

Aangezien de versnelling van de massa verantwoordelijk is voor de indrukking, geldt:

$$U = as$$

De versnellingsopnemer geeft dus een spanning die evenredig is met de versnelling waaraan de versnellingsopnemer onderhevig is.

Uit het door de versnellingsopnemer afgegeven signaal moet informatie verkregen worden over het beschadigde of versleten onderdeel. Het verkrijgen van informatie over het beschadigde of versleten onderdeel moet in principe mogelijk zijn, want een versleten of beschadigd onderdeel, bijvoorbeeld een kogellager, zal een grotere energiebijdrage leveren dan een nieuw ingelopen kogellager. Eveneens zal het versleten of beschadigde onderdeel een specifiek frequentiespectrum opwekken.

**Enkele theoretische aspecten van de signaalverwerking**

Voor er met de verwerking van de trillingen verder gegaan wordt, is het misschien nuttig om op enkel theoretische aspecten van de aan de machine gemeten trillingen in te gaan. Geïnteresseerden worden verwezen naar [5]. Het stochastisch proces dat door de versnellingsopnemer geregistreerd wordt, kan beschouwd worden als een stationair stochastisch proces.

Een stationair stochastisch proces is te beschrijven door enkele parameters. Eén van de belangrijkste begrippen bij de behandeling van de parameters die stationaire stochastische processen beschrijven, is de mathematische verwachtingswaarde,  $E\{x(t)\}$ .

Deze waarde is in feite de gemiddelde waarde,  $\mu_x$  en gedefinieerd als:

$$\mu_x = E\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)Pr\{x(t)\}dx$$

met  $x(t)$  als momentele waarde van de functie en  $Pr\{x(t)\}$  als de kans op die momentele waarde.

Veronderstelt men dat het stochastisch proces ergodisch is dan geldt dat de mathematische verwachtingswaarde,  $E\{x(t)\}$ , gelijk is aan het tijdsgemiddelde van  $x(t)$ .

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} x(t) dt = E\{x(t)\} = \mu_x$$

met  $\gamma$  als de waarnemingstijd. In het verdere verloop van het verhaal wordt verondersteld, dat het signaal,  $x(t)$ , een gemiddelde waarde nul heeft. Deze veronderstelling is toegestaan, omdat er te allen tijde voor gezorgd kan worden dat  $\hat{x}(t) = x(t) - \mu_x$ .

Een andere belangrijke parameter is de variantie:  $\sigma^2$ . Deze wordt gedefinieerd als:

$$\sigma^2 = E\{[\hat{x}(t)]^2\} = E\{[x(t) - \mu_x]^2\} = E\{x^2(t)\} - \mu_x^2$$

De wortel uit de variantie noemt men de standaarddeviatie,  $\sigma$ . Als wordt verondersteld dat  $\hat{x}(t)$  genormeerd wordt op een éénheidsstandaarddeviatie, dan is  $\tilde{x}(t) = \hat{x}(t)/\sigma$ .

Van veel waarde is ook de kruiscorrelatie functie;  $\rho_{\tilde{x}_1, \tilde{x}_2}(\tau)$ .

Deze is gedefinieerd als:

$$\rho_{\tilde{x}_1, \tilde{x}_2}(\tau) = E\{\tilde{x}_1(t)\tilde{x}_2(t + \tau)\}$$

waarin  $\tilde{x}_1(t)$  de grootte van de genormeerde functie is op een tijdstip  $t$  en  $\tilde{x}_2(t + \tau)$  de grootte van een andere genormeerde functie op een tijdstip  $t + \tau$  later.

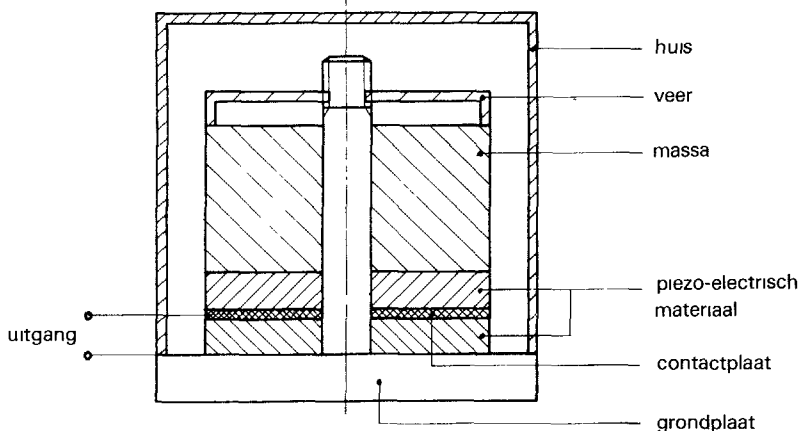
Als nu  $\tilde{x}_1 = \tilde{x}_2$ , dan noemen we deze correlatiefunctie, de autocorrelatiefunctie,  $\rho_{\tilde{x}\tilde{x}}(\tau)$ . Deze functie kunnen we beschrijven als

$$\rho_{\tilde{x}\tilde{x}}(\tau) = E\{\tilde{x}(t)\tilde{x}(t + \tau)\}$$

Uit de kruiscorrelatiefunctie kan men een andere belangrijke parameter afleiden,

$\gamma$  is hoofdletter  $\tau$ , in drukletters is dit  $T$ .

$\rho$  is de griekse letter  $\rho$ , in drukletters is dit  $P$  of  $q$



Figuur 2 Schematische constructie van een versnellingsopnemer

De massa in de versnellingsopnemer rust op het actieve element, in dit geval een kristal. Dit element bestaat uit twee plaatjes piezo-elektrisch materiaal, gescheiden door een contact-plaatje. De massa wordt tegen het piezo-elektrische

Een stochastisch proces,  $x(t; \xi)$  wordt ergodisch genoemd, als alle statistische eigenschappen (met waarschijnlijkheid = 1) bepaald kunnen worden uit één enkele steekproef van  $x(t, \xi)$ , dus in het tijdsdomein

namelijk het vermogensdichtheidspectrum,  $R_{\tilde{x}_1\tilde{x}_2}(j\omega)$ .

Deze functie is de Fourier-getransformeerde van de kruiscorrelatiefunctie en is gedefinieerd als.

$$R_{\tilde{x}_1\tilde{x}_2}(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} P_{\tilde{x}_1\tilde{x}_2}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau$$

Voor de autocorrelatiefunctie is het vermogensdichtheidspectrum.

$$R_{\tilde{x}\tilde{x}}(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \varrho_{\tilde{x}\tilde{x}}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau$$

Uit deze vermogensdichtheidspectra kan men aflezen hoe de vermogensdichtheid over de verschillende frequenties verdeeld zijn

Daar het onmogelijk is om een signaal gedurende een oneindig lange tijd waar te nemen, is het dus ook onmogelijk de voorgaande parameters,  $\mu_x$  en  $\varrho_{\tilde{x}\tilde{x}}(\tau)$ , te bepalen.

Op grond van een niet-oneindig lange waarnemingstijd is het echter wel mogelijk een schatting voor deze grootheden te verkrijgen. Een schatting verkrijgt men door gebruik te maken van een eindige functie die men schatter noemt. Zo'n schatter bepaalt op numerieke wijze uit een stuk van de functie  $x(t)$  een schatting van  $\mu_x$  en  $\varrho_{\tilde{x}\tilde{x}}(\tau)$

Hieronder worden de schatters gegeven:

De schatter voor de gemiddelde waarde,  $\mu_x$  is.

$$M_{\tilde{x}} = \frac{1}{\gamma} \int_0^{\gamma} \tilde{x}(t) dt$$

De schatter voor de autocorrelatiefunctie,  $\varrho_{\tilde{x}\tilde{x}}(\tau)$  is:

$$r_{\tilde{x}\tilde{x}}(\tau) = \frac{1}{2\gamma} \int_{-\gamma}^{+\gamma} \tilde{x}(t) \tilde{x}(t+\tau) dt$$

De schatter voor het vermogensdichtheidspectrum,  $R_{\tilde{x}\tilde{x}}(j\omega)$  is:

$$c_{\tilde{x}\tilde{x}}(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} r_{\tilde{x}\tilde{x}}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau.$$

De bovenstaande schatters blijken exact te zijn, dat wil zeggen, als  $\gamma \rightarrow \infty$  wordt:

$$M_{\tilde{x}} \rightarrow \mu_x, r_{\tilde{x}\tilde{x}}(\tau) \rightarrow \varrho_{\tilde{x}\tilde{x}}(\tau) \text{ en } c_{\tilde{x}\tilde{x}}(j\omega) \rightarrow R_{\tilde{x}\tilde{x}}(j\omega)$$

Dit is eenvoudig na te gaan door van de schatters de mathematische verwachtingswaarde te nemen:

$$E\{M_{\tilde{x}}\} = \mu_x = 0, E\{r_{\tilde{x}\tilde{x}}(\tau)\} = \varrho_{\tilde{x}\tilde{x}}(\tau), \text{ en } E\{c_{\tilde{x}\tilde{x}}(j\omega)\} = R_{\tilde{x}\tilde{x}}(j\omega).$$

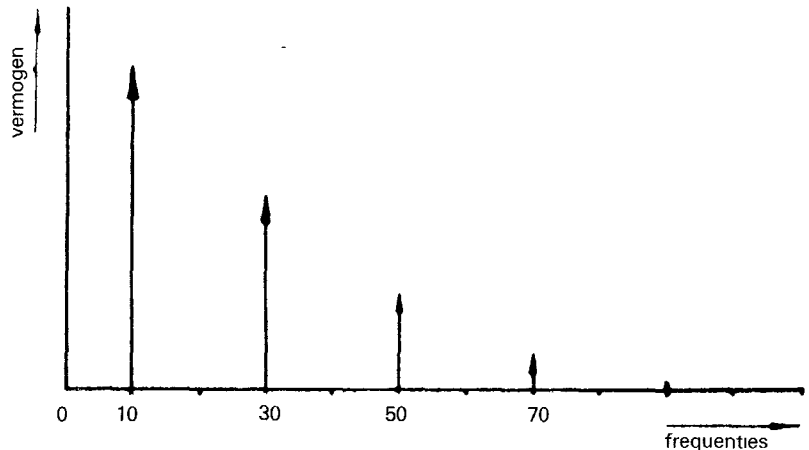
Wil men  $\varrho_{\tilde{x}\tilde{x}}(\tau)$  met een redelijke betrouwbaarheid krijgen dan mag  $\tau$  maximaal  $1/10\gamma$  genomen worden (Blackman and Turkey, 1954).

Als men het vermogensdichtheidspectrum van een deterministisch signaal,

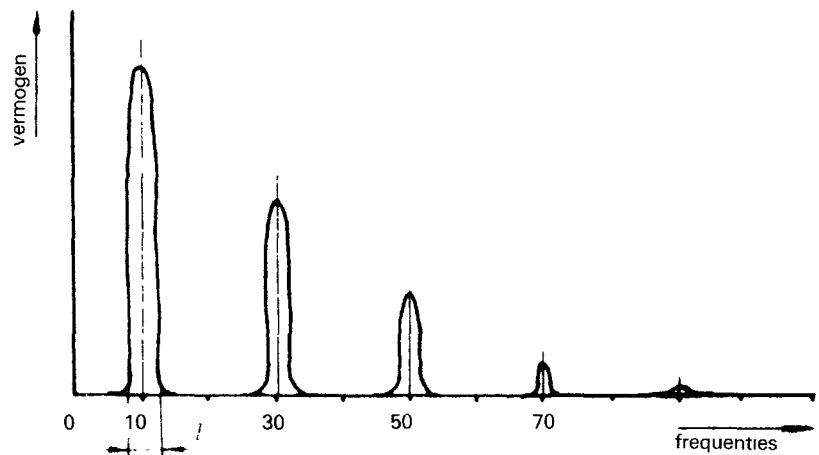
den, omdat de breedte van een piek bepaald wordt door de observatietijd,  $\gamma$ . De breedte van de piek is  $b = f(\frac{1}{\gamma})$ .

(Blackman and Turkey 1954)

Zoals al eerder beschreven was, zet de versnellingsopnemer de trillingen, die waargenomen worden, om in een elektronisch signaal ( $U = a\delta$ ) Nadat dit signaal met zijn ruisvormig karakter versterkt is kan het aangeboden worden aan een frequentie-analysator Deze frequentie-analysator verwerkt het aangeboden signaal tot het frequentie-



Figuur 3 Het vermogensdichtheidspectrum van een deterministisch signaal met een aantal sinus componenten



Figuur 4 Het vermogensdichtheidspectrum, verkregen met een schatter, van een deterministisch signaal met een aantal sinus componenten

dat bestaat uit een aantal sinuscomponenten, theoretisch uitzet, dan vindt men een aantal pieken voor de betreffende frequenties. (Zie fig. 3).

Met behulp van een schatter voor het vermogensdichtheidspectrum vindt men het spectrum zoals dit in fig 4 is weergegeven.

Er worden dan door middel van de schatters geen oneindig smalle pieken gevon-

spectrum, zodat vergelijking in de tijd mogelijk is.

De geëigende verwerkingsmethode d.m.v een computer verloopt als volgt:

- Het stationair stochastische signaal,  $x(t)$ , wordt bemonsterd met een frequentie, die tenminste tweemaal de hoogst voorkomende signaalfrequentie is (Shannon).
- Het analoge bemonsterde signaal

wordt omgezet naar een digitale waarde,  $\bar{x}(t)$ , zodat verwerking in een computer mogelijk is. In de computer wordt het bemonsterde gediscrètiseerde signaal met een schatter verwerkt. Daarmee worden schattingen verkregen van gemiddelde waarde, correlatiefunctie en vermogensdichtheidsspectra.

Met behulp van deze informatie zou dan de dynamische systemen tussen stoorbronnen en meetpunten geïdentificeerd kunnen worden.

Beschouwt men de literatuur over het preventief onderhoud door middel van trillingsonderzoek, dan komt e.e.a. niet geheel met elkaar overeen. Uit eerdere onderzoeken van de auteur is gebleken dat frequentiespectra van verschillende proefopstellingen praktisch onafhankelijk zijn van het verschil-toerental tussen de binnen- en buitenring van de kogellagers [8].

Alleen het vermogen bleek hiervan afhankelijk te zijn. Dit is geheel in tegenstelling met de theoretische formules gegeven door ing. Holthoorn [4]. De frequentiespectra gevonden met deze formules zijn afhankelijk van het verschil-toerental tussen de binnen- en buitenring.

Ook Warring [7] geeft theoretische formules die afhankelijk zijn van het verschil-toerental.

Als men tenslotte de uitgave van Bruel en Kjaer [2] beschouwt, dan worden ook hier theoretische formules gegeven die afhankelijk zijn van het verschil in toerental tussen binnen- en buitenring van het kogellager.

Onderlinge vergelijking van de literatuur levert iets vreemds op. De gevonden specifieke theoretische frequenties lopen namelijk sterk uiteen.

Bovendien zijn een aantal van deze theoretische formules in de praktijk onbruikbaar, omdat hierin een term voorkomt, die het aantal onregelmatigheden, op een element van een kogellager weer geeft. In de praktijk zal echter niet of nauwelijks het aantal onregelmatigheden achterhaald kunnen worden.

## Conclusie

Het doormeten van een gereedschapsmachine en een uitsluitel geven over de staat van onderhoud van de machine is een moeilijke zaak.

Daarom is een diepgaande studie over trillingen, een goede meetopstelling en een goede analyse-methode nodig.

Een belangrijke rol spelen de dynamische systemen tussen stoorbronnen en de

meetpunten, omdat deze op elkaar ingrijpen. Wil men ondanks deze problemen toch preventief onderhoud plegen door mid-

del van trillingsonderzoek, dan is de werkmethode met de computer de meest geeignende.

### Geraadpleegde literatuur:

- 1 Bruel and Kjaer , An introduction to vibration measurement.
- 2 Bruel and Kjaer , Application notes on the use of vibration measurements for machinery condition monitoring
- 3 Bruel and Kjaer ; Mechanical vibration and shock measurement, Application of Bruel and Kjaer. (uitgave van Bruel and Kjaer)
- 4 Holthoorn, ing. H G F , Vibratie-analyse uit hoofde van preventief onderhoud, publicatie in P. T. Werktuigbouw 26-6-'74
- 5 Kok, J J en Stassen, H G ; Signaaltheorie, 2e druk, naar college 1-85, TH-Delft
- 6 Swieten, dr ir. A.C M van , Systeem- en Regeltechniek
- 7 Warring, R.H. , Handbook of noise and vibration control, pt edition, uitgeave Trade and technical press ltd, Morden, Surrey, England
- 8 Terraneo, Ing. Roel. Preventief onderhoud d.m.v. trillingsonderzoek, Hilversum 1978

### Symbolen lijst

- b = breedte
- $c_{\bar{x}\bar{x}}(j\omega)$  = schatter voor het vermogensdichtheidsspectrum
- $E\{x(t)\}$  = mathematische verwachtingswaarde van de functie  $x(t)$
- $H(\theta)$  = overbrengingsverhouding
- $M_{\bar{x}}$  = schatter voor de gemiddelde waarde
- $Pr\{x(t)\}$  = de kans op de momentele waarde van de functie  $x(t)$
- $r_{\bar{x}\bar{x}}(\tau)$  = schatter voor de autocorrelatie functie
- $R_{\bar{x}\bar{x}}(j\omega)$  = vermogensdichtheidsspectrum
- $R_{\bar{x}_1\bar{x}_2}(j\omega)$  = vermogensdichtheidsspectrum
- s = versnelling
- t = tijdsvariabele
- U = spanning
- v = snelheid
- $x(t)$  = tijdsafhankelijke functie
- $\hat{x}(t)$  = de functie  $x(t)$  genormeerd op  $\mu_x$
- $\bar{x}(t)$  = de functie van  $\hat{x}(t)$  genormeerd op  $\sigma = 1$
- $\alpha$  = constante
- $\mu_x$  = gemiddelde waarde
- $\xi$  = vertegenwoordigt het stelsel parameters van de kansverdeling
- $Q_{\bar{x}\bar{x}}(\tau)$  = autocorrelatie functie
- $Q_{\bar{x}_1\bar{x}_2}(\tau)$  = kruiscorrelatie functie
- $\sigma$  = standaard deviatie
- $\sigma^2$  = variantie
- $\Sigma$  = sommatie
- $\tau$  = tijdsverschil
- $\gamma$  = waarnemingstijd
- $\omega$  = hoeksnelheid
- S(f) = Fourier transformatie van  $x(t)$
- $\alpha$  = alfa
- $\theta$  = thêta
- $\mu_x$  = mu<sub>x</sub>
- $\xi$  = ksi
- $\rho$  = rho
- $\sigma$  = sigma
- $\Sigma$  = hoofdletter sigma
- $\tau$  = tau
- $\gamma$  = hoofdletter tau
- $\omega$  = omega