

Navorsings- en oorsigartikels

Masjiengereedskap-toestandmonitering en optimering van masjineringsprosesse - 'n Oorsig

C. Scheffer* en P. S. Heyns

Dinamiese Stelsels-groep, Departement Meganiese en Lugvaartkundige Ingenieurswese
Universiteit van Pretoria, Pretoria, 0002

Ontvang Oktober 2000; aanvaar April 2001

UITTREKSEL

Nuwe ontwikkelings in sensortegnologie, seinprosessering en beheerstelsels stel vervaardigingsaanlegte in staat om hul masjiene meer effektief te benut. Alhoewel sekere nuwe ontwikkelings reeds hul regmatige funksie in die bedryf vervul, het baie van die nuwe prosesmoniterings- en optimeringstegniese nog nie hul plek in die nywerheid gevind nie. Met hierdie werk word 'n omvattende oorsig gegee van resente ontwikkelinge in die veld, met besondere fokus op die toestandsmonitering van beitels van numeries beheerde masjiene. Die doel met die oorsig is om 'n koherente beeld van vordering in die internasionale arena te skep en sodoende by te dra tot 'n skerper fokus in Suid-Afrikaanse navorsingspogings in hierdie aktuele veld, asook die beter aanwending van beskikbare tegnologie om die mededingendheid van die Suid-Afrikaanse vervaardigingsektor te verbeter.

ABSTRACT

Tool condition monitoring and machining process optimisation - A review

New developments in sensor technology, signal processing and control systems can result in more efficient manufacturing. Not all new process monitoring and optimisation schemes have yet been implemented. In this article, an extensive survey of recent developments in the field is presented, with the focus on tool condition monitoring of numerically controlled machines. The purpose of this review is to create an awareness of progress in the international arena and consequently contribute to a sharper focus in South African research efforts, and also to contribute to the implementation of new technology which can improve the competitiveness of the South African manufacturing industry.

1. INLEIDING

Om die hoë kapitale uitgawes tydens die aankoop van toerusting te regverdig, moet vervaardigers elke masjien optimaal benut. Monitering van die vervaardigingsproses speel 'n baie belangrike rol indien verliese in produksie, oormatige beitelslytasie of -brekasje vermy moet word. Dit geld veral vir onbemande masjiene, waar die proses kontinu in werking is sonder dat 'n operateur benodig word om foute uit te ken en reg te stel. Die toenemende belangstelling in die ontwerp van beheerstelsels vir vervaardigingsprosesse word gesteun deur ontwikkelings op die gebied van sensors, seinprosessering en ook die suksesvolle implementering van sogenaamde 'intelligente beheerstelsels'. 'n Voorvereiste vir moderne moniteringstelsels is dat dit intyds die toestand of status van die proses kan gee.

Vandag word dit algemeen aanvaar dat intelligente, sensor gebaseerde vervaardiging uiters belangrik is om die betroubaarheid van 'n vervaardigingsproses te verseker.¹ Gesofistikeerde seinprosessering verskaf die informasie wat nodig is vir die optimering, monitering en beheer van die proses. As gevolg van die baie faktore wat vervaardigingsprosesse beïnvloed, is analitiese wiskundige modelle onprakties vir die intydse monitering van 'n vervaardigingsproses. Sensors word dus gebruik om hierdie probleem te oorbrug: dit verskaf die informasie wat suiwer wiskundige modelle nie kan verskaf nie. Hierdie inligting word dan gebruik om die toestand van die proses te bepaal. Oppervlakafwerking- en prosesopti-

meringstudies word baie dikwels saam met studies van masjiengereedskap-toestandsmonitering (MTM) aangetref. Om 'n koherente beeld te skep van die globale veld, word ontwikkelings op die gebied van prosesoptimering en oppervlakafwerking met relevansie tot MTM ook behandel.

2. PROSESMONITERING

2.1 Sensors vir prosesmonitering

'n Wye verskeidenheid sensors vir prosesmonitering is tans beskikbaar. Die algemeenste sensors wat in die bedryf gebruik word, is lasselle en akoestiese-emissiesensors. Ander sluit in sensors vir:^{1,2}

- Vlamopsporing
- Klankintensiteitsmeting
- Smeringsdeteksie
- Botsingsdeteksie
- Positionering
- Begreningsmeting
- Beitelskadedeteksie
- Spoedmeting
- Stofmeting
- pH-meting
- Vlakmeting
- Termiese deformasiedeteksie
- Oppervlakrofheidsmeting
- CO₂-gasmetering
- Rookopsporing
- Beeldherkenning
- Temperatuurmeting
- Beitelslytasiemonitering
- Versnellingsmeting
- Seismiese meting
- Klampkragmeting
- Stroommeting
- Draaimomentmeting
- Drukmeting
- Humiditeitsmeting
- Snyselmonitering
- Akoestiese-emissie(AE)-meting
- Temperatuurverspreidingsmeting
- Verkoelingsstof-temperatuurmeting

* Outeur aan wie korrespondensie gerig kan word

Die meeste van hierdie sensors word gebruik vir 'n spesifieke moniteringstaak. Die doel van die monitering val gewoonlik binne een van die volgende fokusareas:¹

- Die masjien (toestand en werkverrigting).
- Die beitels (slytasie, smering, belyning).
- Die werkstuk (oppervlakafwerking, toleransie, geometrie).
- Die proses (snyselformasie, energieverbruik, temperatuur).

Die ontwikkeling van intelligente sensortegnologie bied ook heelwat nuwe uitdagings vir die vervaardigingsindustrie.^{1,3-5} Die tyd wat nodig is vir seinprosessering word aansienlik verminder wanneer daar van intelligente sensors gebruik gemaak word en stel dus die beheerstelsel in staat om onmiddellik op foute te reager. Tesame met gesofistikeerde seinprosessering word relatief goedkoop, vinnige en akkurate metings moontlik. Met beheerstelsels wat veranderings kan aanbring op feitlik dieselfde tyd as die meting, kan die masjineringsparameters beheer word om die spoed en akkuraatheid van die proses te optimeer.

In huidige navorsing val die klem telkens op 'n tegniek om die sensordata saam te voeg vir besluitneming. Hierdie tegniek maak meer akkurate en robuuste dataklassifikasie moontlik en kan ook datastelle met geruis hanteer. Kunsmatige neurale netwerke is 'n tipiese sensorsamevoegingstrategie, wat komplekse prosesse kan hanteer wat nie analities gemodelleer kan word nie.

2.2 Toepassings vir moniteringstelsels

Toepassings vir beitelslytasie- en oppervlakafwerking-moniteringstelsels kom voor in 'n wye verskeidenheid vervaardigingsprosesse. Die intydse monitering van beitelslytasie bring mee dat die beitels betyds vervang kan word met minimum afdyd op die produksielyn. 'n Paar industrieë wat kan baat by sulke stelsels is:

- Die motorbedryf.
- Vervaardiging van masjienkomponente.
- Massaproduksie van huishoudelike produkte.
- Optimering van masjineringsprosesse.
- Elektriese / Meganiese produkvervaardiging.

Byrne et al.¹ het bepaal dat meeste moniteringstelsels gebruik word vir draai- en boorwerk, met frees- en slypwerk in die tweede plek. 'n Moniteringstelsel word meesal benodig om beitelslytasie, -brekasië of botsing te monitor. Vir die meeste vervaardigers is dit belangriker as kwaliteit.

3. BEITELSLYTASIEMONITERING

3.1 Inleiding

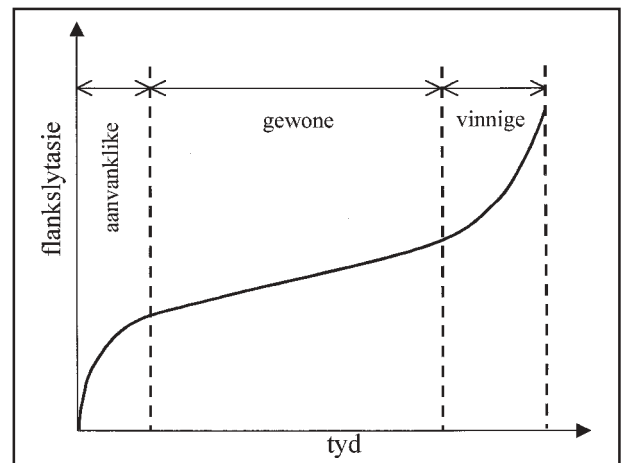
Om die slytasie van snybeitels te monitor, is 'n moeilike taak. Beitelslytasie induseer baie klein veranderinge in 'n proses met 'n wye dinamiese band. Verder is dit ook moeilik om te bepaal of 'n verandering in 'n sein te wyte is aan beitelslytasie of 'n verandering in die masjineringsstoestand. Beitelslytasie-monitering kan in die volgende stappe onderverdeel word:⁶

- Keuse van sensors en aanhegtingspunte.
- Genereer 'n stel kenmerke uit die sensordata wat beïnvloed word deur beitelslytasie.
- Klassifikasie van die kenmerke om die graad van slytasie te bepaal.

Deur die jare heen is verskillende slytasiemodusse geïdentifiseer. Die voorkoms van 'n sekere modus word bepaal deur:⁶⁻⁸

- Beitelmetaal.
- Werkstukmetaal.
- Beitelgeometrie.
- Masjineringsparameters.

Die slytasie van beitels word ook gewoonlik in vyf fases verdeel, naamlik:⁹ aanvanklike, gewone, mikro-brekasië, vinnige fase en brekasië. Die meeste navorsers tot dusver kon ten minste die aanvanklike, gewone en vinnige fases met hul moniteringstelsels identifiseer. Dit is ook al deur verskeie navorsers waargeneem dat die slytasie gedurende die aanvanklike en vinnige slytasiëfasies teen 'n hoër tempo plaasvind as die ander fases. Die redes vir hierdie gedrag wissel na gelang van die beitelmetaal, maar word vir die aanvanklike fase toegeskryf aan die vinnige verlies van die skerp snykant. In die vinnige fase word dit toegeskryf aan die feit dat die beskermingslaag van die beitelmetaal weggeslyt word, en dus vinniger slytasiëtempo's veroorsaak. Die tipiese verloop van hierdie drie fases as funksie van tyd (of lengte van die snit) word in figuur 1 voorgestel.



Figuur 1: Tipiese verloop van beitelslytasie as funksie van tyd.

3.2 Beitelslytasiemodusse

Dit is baie belangrik om te onderskei tussen die verskillende slytasiemodusse. Sekere modusse kan vermy word deur die masjineringsparameters reg te kies. Die algemeenste slytasiemodusse in die bedryf (vir draaiwerk) is flankslytasie, brekasië, kraterslytasie en plastiese vervorming.¹⁰ Ander modusse is groeflytasie, kraak en snippering. Die algemeenste slytasiemodusse word voorgestel in figuur 1. Flank- en kraterslytasie word algemeen aanvaar as normale slytasiemodusse, aangesien die ander vermy kan word deur die masjineringsparameters reg te kies. Die groei van flank- en kraterslytasie hou direk verband met tyd, in teenstelling met sommige van die ander slytasiemodusse wat enige tyd onverwags kan voorkom, selfs met 'n nuwe beitel. Flankslytasie het die grootste invloed op die uiteindelijke kwaliteit van die gemasjineerde werkstuk.¹¹ Daarom is die verskynsel van flankslytasie al in diepte nagevors, en maniere om te voorspel en te voorkom word al baie jare lank deur navorsers ondersoek.

3.3 Beitelslytasie-moniteringstegnieke

3.3.1 Direkte en indirekte metodes

Maniere om beitelslytasie te monitor, kan in twee kategorieë verdeel word, naamlik direkte en indirekte metodes. Direkte metodes het te make met die meting van volumetriese verlies op die beitelpunt. Indirekte metodes volg patrone in sensordata om 'n slytasiemodus te identifiseer.¹ Direkte metodes is baie sensitief vir snysels, stof en snyvloei-stof, en daarom word hierdie metodes nie algemeen in die bedryf gebruik nie.

Indirekte metodes kan soms minder akkuraat wees as direkte metodes, maar hierdie metodes word algemeen in die bedryf gebruik, omdat dit makliker is om te implementeer en te

interpreteer. Dit is ook meer betroubaar, koste-effektief en robuust. Vir sommige toepassings sal 'n direkte metode ook glad nie prakties moontlik kan wees nie, as gevolg van die aard van die proses.

3.3.2 Kontinue en onderbroke stelsels

Die tweede belangrike onderskeid wat getref moet word in beitelmoniteringstelsels is tussen kontinue en onderbroke stelsels.¹ In die geval van kontinue stelsels word die meting intyds geneem, en die parameter wat gemeet moet word, is deurlopend vir besluitneming beskikbaar. Hierdie tipe benadering maak intydse monitering moontlik, wat verseker dat die stelsel betyds op foute in die proses kan reageer. In die geval van onderbroke stelsels word die parameter wat geëvalueer moet word slegs geneem gedurende onderbrekings in die snyproses. Hierdie benadering het ooglopende nadele, maar is vir sommige spesifieke gevalle nuttig, byvoorbeeld die meet van slytasie op die beitels van 'n masjineringsentrum met 'n beitelmagasyn.

3.3.3 Sensors vir beitel-slytasiemonitering

Monitering van snybeitels vind gewoonlik plaas in aggresiewe omgewings. Daarom moet die sensors wat vir hierdie taak aangewend word robuust wees. In baie gevalle word die masjien met 'n hele aantal sensors geïnstrumenteer, om sodoende die werkverrigting van die moniteringstelsel te verbeter. Sensors wat gebruik word vir MTM moet aan sekere vereistes voldoen, soos byvoorbeeld:¹

- So na as moontlik aan die snyproses meet.
- Moet geen vermindering aan die styfheid van die beitelhouer meebring nie.
- Moet nie die werkspasie of masjineringsparameters beperk nie.
- Moet oor lang tydperke kan werk, en teen lae koste vervang kan word.
- Moet weerstand hê teen snysels en stof asook teen termiese en elektromagnetiese invloede.
- Moet onafhanklik van die beitel en werkstuk kan funksioneer.
- Moet klein genoeg wees om op die beitelhouer te pas.
- Moet die sein betroubaar kan versend van roterende na vaste dele op die masjien.

3.4 Beitelmoniteringstelsels

In hierdie afdeling word beitelmoniteringstelsels in meer besonderhede bespreek. Oppervlakrofheidanalises is ook 'n indirekte MTM-metode, maar sal afsonderlik bespreek word omdat dit 'n wyer veld is wat nie net deur beitel-slytasie beïnvloed word nie.

3.4.1 Wiskundige modelle: Analities en empiries

Analitiese wiskundige modelle kan aangewend word om die

effek van die beitelgeometrie en masjineringsparameters op die masjineringsproses te bestudeer. Hierdie modelle is egter te kompleks om in 'n intydse MTM-stelsel te gebruik. Die nielineêre en stochastiese aard van die masjineringsproses maak die opstel van sulke modelle baie moeilik en vereis baie eksperimentele werk.⁶ 'n Transformasie tussen die seinkarakteristieke en die natuurwette wat die proses beskryf, word benodig. As gevolg van die kompleksiteit van die proses kan 'n analitiese model nie altyd opgestel word nie.

Die enigste oorblywende opsie is empiriese modelle, wat parametries of nieparametries kan wees. Parametriese modelle is gewoonlik 'n aanpassing van die analitiese model, en het beperkte vermoëns. Hierdie metode vereis ook die insette van 'n deskundige om die onderliggende meganismes van die proses te transformeer met 'n stel reëls. Nieparametriese modelle word gebaseer op 'n statistiese beskrywing van natuurlike verskynsels.

Empiriese modelle is al suksesvol aangewend vir die beskrywing van sekere vervaardigingsprosesse. Grabec et al.¹² het empiriese modelle aangewend om die slytasie van beitels op 'n draaibank te voorspel, asook om oppervlakrofheid in slypprosesse te voorspel. Ruiz et al.¹³ het 'n multisensorbenadering gevolg om beitel-slytasie te voorspel, en het die slytasie bevredigend voorspel met drie verskillende empiriese identifikaasietodes.

'n Algemene wiskundige model vir beitel-slytasie is die Taylor-beitelleeftydvergelyking.¹¹ Die vergelyking is:

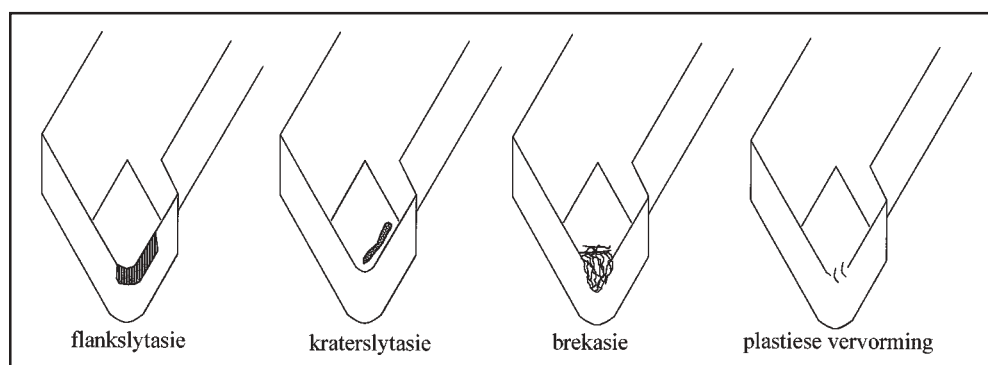
$$VT^n = C$$

Dit gee die verhouding tussen die werkspoed V , die beitelleeftyd T , en twee parameters, n en C , wat materiaalkonstantes is. Die Taylor-parameters word empiries bepaal as dit onbekend is. Die metode is handig om 'n tentatiewe waarde vir die beitelleeftyd te bereken. Eksperimente het bepaal dat die Taylor-vergelyking 'n $\pm 35\%$ korrekte voorspelling van die ware beitelleeftyd kan gee. Hierdie vergelyking kom algemeen in die literatuur voor en verskeie weergawes is al ontwikkel om die akkuraatheid te verbeter.

Die gebruik van 'n analitiese model om snykragte te bepaal vir MTM is deur Braun et al.¹⁴ ontwikkel. Ravindra et al.¹⁵ het 'n wiskundige model gebaseer op meervoudige regressie-analise. Die model beskryf die slytasie/tyd- en slytasie/kragverhoudings vir draaiwerk. Daar is aangetoon dat 'n goeie korrelasie tussen die snykragte en die slytasie van die beitel bestaan.

3.4.2 Kraggebaseerde monitering

Die feit dat gesleete beitels 'n toename in die snykragte veroorsaak, is al deur heelwat navorsers vasgestel. Verskillende tipes sensors is al ontwikkel om die snykragte te meet vir 'n verskeidenheid van prosesse, byvoorbeeld:¹



Figuur 2: Algemene slytasiemodusse.

- Direkte dinamometers

Hierdie sensors se werking berus op die piëso-elektriese effek, en kan die dinamiese snykragte baie akkuraat meet. Hierdie tipe sensors is egter baie duur en kan nie beskerm word teen oorbelasting nie. Daarom word dit nie baie in die bedryf gebruik nie. Dit is ook moeilik om die sensors te beskerm teen die aggresiewe snyvloeistof. Beitelrorings wat die onderskeie kragkomponente kan meet, is ook beskikbaar, maar is baie duur.

- Plate en ringe

Plate wat krag kan meet kan redelik maklik op draaibanke aangebring word tussen die beiteloring en die slee. Hierdie dun plate is toegerus met piëso-elektriese sensors. Hierdie sensors het voordele bo die direkte dinamometers, maar hulle word egter onderwerp aan faktore wat hul verrigting baie negatief beïnvloed, soos termiese uitsetting van die slee.

- Penne en verlengingsensors

Hierdie tipe sensors kan gebruik word om beitelbrekasië te monitor vir growwe masjineringsoperasies. Die sensors word aangebring op kragdraende masjienkomponente om sodoende die kragte in die struktuur direk te meet. Die beste posisie om die sensor aan te bring, kan egter net eksperimenteel bepaal word, wat nadelig is.

- Verplasingssensors

Kontaklose verplasingssensors kan direk op die beitelhouer gemonteer word om die buiging of verplasing van die beitelpunt te bepaal.¹⁸ Hierdie sensors word egter onderwerp aan die hoë risiko van skade en sturing wat veroorsaak word deur snysels, stof en snyvloeistof.

- Kragmetende laers

Laers en busse kan spesiaal geïnstrementeer word met rekstrookies in sekere posisies om sodoende die snykragte te meet. Kragmetende laers benodig 'n laagdeurlaatfilter om die rollerfrekwensie uit te skakel, en daarom is hoë-frekwensie-prosesserings nie moontlik nie. Die kragmetende busse is slegs toelaatbaar vir sekere toepassings omdat dit die styfheid van die masjien kan beïnvloed.

- Krag en draaimoment by die spilkop

Om die draaimoment by die spilkop teen 'n hoë resolusie te meet (binne die hele bereik van die motor), kan baie moeilik wees. Verder moet die sein ook telemetrie versend word. Die meeste masjiene kan ook nie toegerus word met sulke sensors nie omdat daar nie genoeg plek op die masjien beskikbaar is om die toestel vas te heg nie.

3.4.3 Stroommeting van die motor

'n Meting van die stroom wat die masjien se motor verbruik, is 'n redelike maklike alternatief tot die bogenoemde stelsels en kan maklik geïnstalleer word. 'n Wye verskeidenheid van toerusting is beskikbaar wat hierdie taak kan verrig. Daar kom egter skommeling in die stroom voor as gevolg van variërende wrywing, en gevolglik is die stelsel nie altyd akkuraat nie. Brekasië kan ook nie met hierdie tipe stelsel gemonitor word nie, omdat die stelsel die fout eers raaksien nádat 'n redelike mate van skade aan die werkstuk aangerig is. Die drywing wat die spilkop verbruik, is ook proporsioneel aan die primêre snykrag, maar is gewoonlik nie sensitief genoeg vir MTM nie. Die snyproses verbruik slegs 'n klein gedeelte van die totale energie in die stelsel. Monitoringstelsels gebaseer op hierdie beginsel kan egter gebruik word vir sekere prosesse.¹⁷

3.4.4 Vibrasie

Piëso-elektriese versnellingsmeters kan masjienvibrasies meet wat veroorsaak word deur ossillasies in die snykragte. Vorige werk het aangetoon dat vibrasievlakke deur beitelshlytasie beïnvloed word (sien onderstaande verwysings). Versnellingsmeters voldoen aan baie van die vereistes vir MTM, omdat sekere versnellingsmeters weerstand kan bied teen die aggresiewe masjineringsomgewing. Versnellingsmeters is ook relatief goedkoop, en kan oor 'n breë frekwensiebereik meet. Vir hierdie redes word versnellingsmeters gereeld gebruik vir MTM.^{9,17,19-25}

Een van die grootste probleme wanneer die beitelleeftyd deur middel van vibrasie gemonitor word, is om die toepaslike frekwensieband wat deur beitelshlytasie beïnvloed word, te identifiseer. Masjineringsprosesse produseer hoëamplitude-vibrasies wat nie verband hou met beitelshlytasie nie. Die toepaslike frekwensieband vir die meeste masjineringsoperasies is gewoonlik van 0 - 10 kHz. Bonifacio en Diniz⁹ stel voor dat die 0 - 8 kHz-band ondersoek moet word. Ander outeurs het gevind dat twee frekwensiebereiche sensitief is vir beitelshlytasie: Die eerste in 'n lae band, 0 - 1000 Hz, en die tweede by 'n hoër waarde, gewoonlik laer as 8 kHz. Dit wil voorkom asof die frekwensies wat sensitief is vir beitelshlytasie baie afhanklik is van die spesifieke masjineringsoperasie en dus moet die waarde eerder eksperimenteel bepaal word.

3.4.5 Akoestiese-emissie

Snyprosesse veroorsaak hoë elastiese spanningsgolwe wat deur die masjien se struktuur voortplant. Verskeie bronne uit die snyproses veroorsaak hierdie spanningsgolwe wat bekend staan as akoestiese-emissie (AE). Bronne van AE in die metaal-snyproses is:

- Wrywing op die beitelneus en flank.
- Plastiese vervorming in die hoofskuifvlak.
- Kraakformasie en -voortplanting.
- Impak van die snysel op die werkstuk.
- Snyselbrekasië.

Die feit dat kraakformasie AE genereer, maak AE baie geskik om beitelbrekasië te monitor. Alhoewel 'n verskeidenheid van AE-sensors bestaan, kan slegs sekere in die masjineringsomgewing gebruik word. AE-sensors, wat spesifiek vir MTM ontwerp is, kan op 'n toepaslike plek op die masjien aangebring word. 'n Nuwe ontwikkeling is om die koelmiddel te gebruik om die AE-golwe van die beitel na die sensor te versend. Die voordeel is dat die afstand tussen die beitelpunt en die sensor verminder en sodoende dempingseffekte minimeer. Probleme met hierdie benadering is die feit dat 'n borrelvrye koelmiddel benodig word en ook dat die monitoring versteur kan word as snysels deur die koelmiddelstroom vloei. Nog 'n benadering is om telemetrie datatransmissie te gebruik. Heelwat AE-gebaseerde beitelshlytasie en brekasiëmoniteringstelsels is al met sukses geïmplementeer.^{17,26-30}

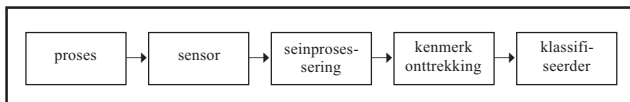
3.4.6 Ander metodes

'n Paar ander metodes vir direkte en indirekte MTM (uitsluitend oppervlakroefheidsmonitering) is:

- Ultrasoniese stelsels.³¹
- Kontaklose kapasitiewe sensors.³²
- Kamerastelsels.^{33,34}
- Laserstrooimetodes.³⁵
- Stereo-afbeeldings.³⁶

3.5 Besluitnemingstegnieke

'n Besluit aangaande die graad van beitelshydrasie kan geneem word as data beskikbaar is uit enige van die bogenoemde benaderings. Hierdie besluit staan bekend as die *klassifikasie*. Met komplekse probleme is dit beter om die beskikbare kennis op een of ander manier te kombineer vir beter resultate. Die onderskeie funksies van 'n moderne MTM-stelsel word diagrammaties voorgestel in figuur 3. 'n Bespreking van klassifikasietegnieke vir MTM volg, met 'n inleidende bespreking oor *kenmerke* waarop die meeste besluitnemingstegnieke gebaseer word.



Figuur 3 : Funksies van 'n moderne MTM-stelsel.

3.5.1 Kenmerke

Die meeste besluitnemingstegnieke vir prosesmonitering word gebaseer op kenmerke. Informasie van die krag, vibrasie of AE-sein kan gebruik word om die toestand van die snybeitel te bepaal. Kenmerke kan uit die seine onttrek word wat tendense met toenemende slytasie toon. Sodra hierdie kenmerke uit die data onttrek is, kan die kenmerke gebruik word om die toestand van die beitel te bepaal deur 'n klassifikasie- of patroonherkenningstegniek.³⁷

Hierdie kenmerke kan onttrek word uit tyd- en/of frekwensiedomeindata, byvoorbeeld:

- Gemiddeld.
- Variansie.
- Skeefheid.
- Kurtose.
- Kruinfaktor.
- Energie in 'n sekere frekwensieband, deur middel van die vinnige Fourier Transform (FFT).
- Outoregressiewe (AR) en outoregressiewe bewegende gemiddelde (ARMA) koëffisiënte.

'n Baie nuttige benadering uit die literatuur is om AR- en ARMA-koëffisiënte as kenmerke te gebruik. Die AR-koëffisiënte vir 'n sein bevat inligting omtrent die karakteristieke van die sein. Indien die sein verander gedurende die snyproses as gevolg van beitelshydrasie, sal die modelkoëffisiënte ook verander. Dus kan AR- en ARMA-koëffisiënte as kenmerke vir MTM aangewend word.³⁷

El-Wardany et al.¹⁹ het gevind dat die oombliklike verhouding van absolute gemiddelde waardes ($RAMV_t$) nuttig is om vals alarms uit te skakel vir monitering van boorpuntbrekasië. Die waarde word bereken tesame met kurtose en kepstrumanalise. Die outeurs voer aan dat die kurtosewaarde nuttig is om oorgangs- en spontane gedrag in die vibrasieseine te identifiseer. Kepstrumanalise kan gebruik word om harmonieke in die spektrum te identifiseer en dan hul relatiewe groottes te bepaal. Boorpuntbrekasië veroorsaak 'n piek by die kwefrensie wat ooreenstem met een spilkoprewolusie. Die $RAMV_t$ -waarde is gebruik om die aanvang van kurtose en kepstrumanalise te sneller.

3.5.2 Tendense, drumpelwaardes

'n Baie eenvoudige besluitnemingstegniek kan gebaseer word op tendense in die kenmerke. Indien 'n sekere kenmerk, of stel kenmerke, 'n sekere voorafbepaalde drumpelwaarde bereik,

word 'n skatting van die beitelshydrasie gemaak. Hierdie drumpelwaardes moet eksperimenteel bepaal word. Die probleem met hierdie metode is om akkurate drumpelwaardes te bepaal, veral vir uiteenlopende masjinerings toestande.

3.5.3 Verhoudings tussen frekwensiebande

Sommige outeurs stel voor dat twee frekwensiebande vir die sein geïdentifiseer moet word.⁹ Die een band moet sensitief wees vir beitelshydrasie en die ander nie. Byvoorbeeld, as die meting vir die band van 0 - 8000 Hz geneem is, moet dit opgebreek word in 'n 0 - 4000-Hz band, en 'n 4000 - 8000 Hz-band. As die laer band meer sensitief is vir beitelshydrasie, kan 'n verhouding tussen die twee bande bereken word. Indien hierdie verhouding 'n sekere voorafbepaalde waarde oorskry, kan 'n besluit oor die beiteltoestand geneem word. Hierdie benadering kan ook gebruik word om data van 'n nuwe beitel met 'n geslede beitel te vergelyk. Die probleem met hierdie metode is dat dit nie brekasië kan monitor nie. Wanneer brekasië voorkom, sal die verhoudingsmetode nie die skielike daling in die sein interpreteer as brekasië nie.

3.5.4 Neurale netwerke

Die gebruik van 'n kunsmatige neurale netwerk (KNN) as 'n sekondêre, meer gesofistikeerde besluitnemingstegniek is al deur heelwat navorsers ondersoek vir 'n wye verskeidenheid van toepassings in vervaardiging, ook vir MTM.^{6,38-51} Die gebruik van 'n KNN maak besluitneming meer akkuraat omdat dit groot hoeveelhede onafhanklike kenmerke tegelykertyd aanwend om 'n klassifikasie te maak. KNN'e kan onduidelike informasie uit data interpreteer, en is ook baie robuust.

KNN'e is ook 'n tipe sensorsamevoegingstegniek, omdat data van 'n verskeidenheid sensors gebruik kan word vir klassifikasie. Die kombinerings van kenmerke uit vibrasie, AE, krag- en stroomseine resulteer in 'n netwerk wat die beiteltoestand meer akkuraat kan bepaal op 'n gegewe tydperk.⁶ Die algemeenste KNN wat getoets is vir die monitering van masjineringsoperasies is die trupropagering-algoritme.

Ondanks die populariteit van trupropagering-algoritme, benodig dit 'n korrekte klassifikasie in elke leerstelwaarneming, en dit beperk die suksesvolle implementering van hierdie tipe netwerk vir intydse beitelmonitering. Die rede hiervoor is dat die masjineringsoperasie onderbreek moet word om die korrekte waarde van die slytasie te meet en in te voer. Omdat die stelsel ook baie kombinasies van beitelstipe, materiaal, en snytoestande moet kan hanteer, is 'n gekontroleerde algoritme soos trupropagering onwenslik. Dit is dus nuttig om 'n KNN aan te wend wat ongekontroleerde leerstelwaarnemings gebruik. 'n Onlangse studie in die veld van MTM vir draaiprosesse deur Scheffer⁵² gebruik 'n selfreëlkaart (SOM), 'n tipe KNN gebaseer op ongekontroleerde leerstelwaarnemings. Die resultate van die studie toon aan dat die SOM die beiteltoestand effektief kan bepaal uit insetdata met ruis. Die ongekontroleerde leerproses van die SOM maak die gebruik daarvan baie aantreklik vir MTM as gevolg van die eenvoud daarvan. Die suksesvolle implementering van neurale netwerke vir MTM berus op die regte keuse van die tipe netwerk, en ook die beskikbaarheid van betroubare leerstelle.

3.5.5 Vae logika

Heelwat outeurs⁵³⁻⁵⁸ oorweeg vae logika om beitelshydrasie te monitor. Dit is bekend dat vaelogikastelsels groot potensiaal het vir gebruik in intelligente vervaardigingstelsels. In teenstelling met neurale netwerke, kan vaelogikastelsels gestruktureerde kennis binne 'n numeriese raamwerk enkodeer. Verder kan vae logikabeheerstelsels ook die funksies van stelsels bepaal met slegs 'n gedeeltelike beskrywing van die stelsel, wat

moeilik met neuralenwerkmodelle gedoen kan word.

Neurale netwerke en vaelogikastelsels word ook gekombineer in sogenaamde vae nete (VN). VN-stelsels kan 'n eenvoudige prosedure implementeer vir 'n komplekse stelsel soos 'n masjineringsproses. VN vereis min rekenaargeheue en het ook die vermoë om te kan aanpas wanneer daar veranderinge in die proses voorkom. 'n Intydse VN-stelsel om beitelbrekasië vir freeswerk te monitor, is ontwerp en suksesvol geïmplementeer deur Chen en Black.⁵³

3.5.6 Ander metodes

Daar bestaan ook 'n aantal ander besluitnemingstegnieke, wat insluit:

- Die koherensiefunksie-metode.²⁰
- Kennisgebaseerde ekspertstelsels (KBES).¹⁰
- Patroonherkenningsalgoritmes.¹

4. OPPERVLAKROFHEIDANALISES

4.1 Inleiding

Oppervlakroftheid is een van die belangrikste faktore om in ag te neem wanneer die kwaliteit van die masjineringsproses geëvalueer word. Aangesien dit soms makliker is om die oppervlakroftheid van die gemasjineerde werkstuk te meet in plaas van die werklike slytasie op die beitel, word oppervlakroftheidestimasië ook gebruik om die toestand van die beitel te monitor.⁵⁹

Masjineringsparameters soos snyspoed, voertempo, snitdiepte, beitelgeometrie en materiaaleienskappe van die beitel en die werkstuk het 'n groot invloed op die oppervlakafwerking van die werkstuk. As al die faktore bekend is en die masjineringsparameters korrek gekies, kan 'n intydse oppervlakrofheidsmoniteringstelsel ook 'n geslede beitel aantoon.^{60,61} Oppervlakinspeksies word in die bedryf tipies na afloop van die proses gedoen, wat nie optimaal is nie omdat 'n aantal foutiewe werkstukke vervaardig kan word vóórdat inspeksie plaasvind. Dit onderstreep die feit dat dit belangrik is om toerusting te ontwikkel wat die oppervlakafwerking intyds kan monitor sonder om die proses te onderbreek.

Heelwat metodes is al ondersoek om oppervlakafwerking intyds te monitor. 'n Paar voorbeelde is:⁵⁹

- Korrelasie tussen die oppervlakroftheid en vibrasie.
- Beeldprosessering deur lig- en lasermetodes.⁶⁰
- Rofheidmeting met 'n kontaklose induktansiesensor.
- Direkte meting met 'n stilus.
- Ultrasoniese sensore.⁶⁰

Net soos met MTM-stelsels, kan rofheidmeetstelsels ook verdeel word in direkte en indirekte metodes. Die volgende afdeling bespreek beitel-slytasie en vibrasiemonitering met relevansie tot oppervlakrofheidsmonitering in meer diepte.

4.2 Oppervlakroftheid en beitel-slytasie

Die oppervlakroftheid van gemasjineerde komponente hou soms direk verband met die hoeveelheid slytasie op die snybeitel (vir sekere slytasiemodusse).^{62,63} 'n Logiese gevolg is om die oppervlakrofheidsinformatie te gebruik om die proses optimaal te beheer terwyl die beitel progressief meer slyt. Die voertempo en die diepte van die snit moet dan verminder of vermeerder om dieselfde afwerking te verkry. Hiervoor kan 'n relatief eenvoudige geometriese beheerstelsel gebruik word wat die oppervlakroftheid meet, die fout bepaal, en dan die masjineringsparameters optimaal verstel. Die einddoel is om 'n geoutomatiseerde intydse moniteringstelsel te ontwerp wat enige probleme sal regstel.⁶⁰ Bonifacio en Diniz⁹ het gevind dat die vibrasie van

die beitel 'n betroubare parameter is om die groei van oppervlakroftheid vir sekere draaiopprosesse te monitor, en kon so die einde van die beitel-leeftyd voorspel.

4.3 Vibrasiemonitering en oppervlakrofheidsanalises

Die gemiddeld van die oppervlakroftheid van 'n gemasjineerde werkstuk kan beskryf word as die superposisie van 'n teoretiese profiel wat deur kinematika bepaal word, en 'n ossillatoriese profiel wat ontstaan as gevolg van die relatiewe vibrasie tussen die beitel en die werkstuk.⁶⁴ Die kinematika van die proses word beïnvloed deur parameters soos snyspoed en voertempo, terwyl die relatiewe vibrasie die gevolg is van die wisselende weerstand tussen die beitel en die werkstuk, wat 'n klou-gly-proses veroorsaak.

Die ware profiel kan bepaal word deur die relatiewe vibrasie tussen die beitel en die werkstuk te meet. Op hierdie manier kan die oppervlakafwerking van die werkstuk intyds bepaal word. Daar is egter heelwat praktiese probleme met hierdie benadering omdat akkurate metings in die masjinerings-omgewing baie moeilik is. Een probleem is dat klapper tussen die beitel en die werkstuk groot vibrasies veroorsaak wat nie op die oppervlakafwerking gesuperponeer kan word nie. Nog 'n probleem is dat los onderdele in die masjien en ander eksterne faktore baie geraas in die sensorseine veroorsaak. Die metode is egter al suksesvol geïmplementeer vir droë draaiwerk deur Jang et al.⁵⁹

Bonifacio en Diniz het geëksperimenteer met karbidbeitels in draaiopprosesse, en vibrasiemetinge in die 0 - 8 kHz-bereik geneem. Die vibrasie is in twee rigtings gemeet, naamlik in die rigting van voer en ook in die rigting van die snit. Die rms-waarde van die sein is gebruik om datastelle te vergelyk. Die voertempo en die snyspoed is ook gedurende die eksperimente gevarieer. Hulle het gevind dat die snyspoed 'n groter invloed het op die beitel-leeftyd as die voertempo. Daar is ook bepaal dat vibrasie- en oppervlakrofheidsparameters goed korreleer met die graad van slytasie op die beitel.

5. OPTIMERING VAN VERVAARDIGINGSPROSESS

5.1 Inleiding

MTM-studies word dikwels ingesluit binne die raamwerk van masjineringsprosesoptimeringstudies. Om hierdie rede word basiese konsepte rakende prosesoptimering hier behandel. Gedurende die optimering van die meeste masjineringsprosesse, is die doelfunksie afhanklik van ekonomiese faktore. Pogings om die optimale masjineringsparameters te bepaal, kan in drie hoofkategorieë verdeel word.⁶⁵

- Rekenaargesteuendeontwerp (RGO)-metodes.
- Operasionelenavorsing (ON)-metodes.
- Kunsmatige-intelligensie (KI)-metodes.

Hierdie metodes kan gebaseer word op 'n van-lyn-af-verstellingstelsel, of 'n intydse aanpasbarebeheerstelsel (AB), wat in twee kategorieë verdeel word:

- Aanpasbarebeheeroptimering (ABO).
- Aanpasbarebeheerbegrensing (ABB).

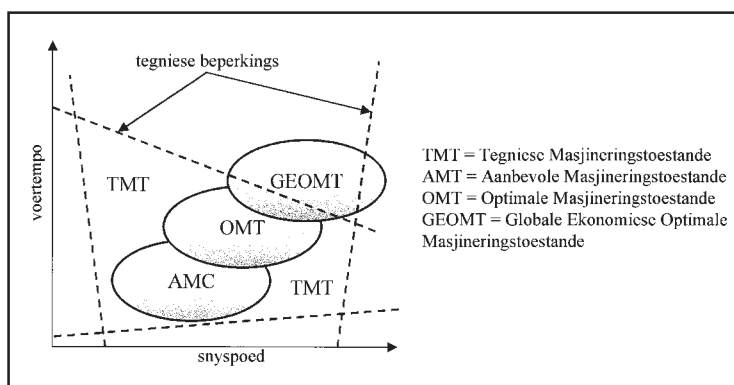
Die algemeenste optimeringsprobleem vir 'n draaiopproses sal voertempo en snyspoed as veranderlikes hê, met die doelfunksie gekoppel aan ekonomiese faktore. Dit word skematies voorgestel in figuur 4. Die optimeringsprobleem word begrens deur die tegniese beperkings van die masjien. Die verskaffer van die masjien skryf konserwatiewe masjineringsstoestande voor, wat die aanbevole masjineringsstoestande (AMT) genoem word. Daar kan egter 'n optimale masjineringsstoestand (OMT) bereken word vir

elke proses. Die globale ekonomiese optimale masjinerings-toestande (GEOMT) is optimaal indien daar geen tegniese begrensings was nie. Ermer⁶⁶ het 'n geometriese programmeringstegniek ontwikkel om die masjineringsparameters te optimeer vir minimum koste, met sekere begrensings. Hierdie baie vroeë werk, die eerste in sy soort wat begrensings in ag geneem het, het nie die invloed van die begrensings wat beitelstytasie meebring in ag geneem nie. Da, Sadler en Jawahir⁶⁷ stel 'n rekenaargesteunde metodologie voor om die optimale masjineringsparameters te bepaal vir draaiprosesse. Hierdie metode neem die invloed van die progressiewe beitelstytasie in ag.

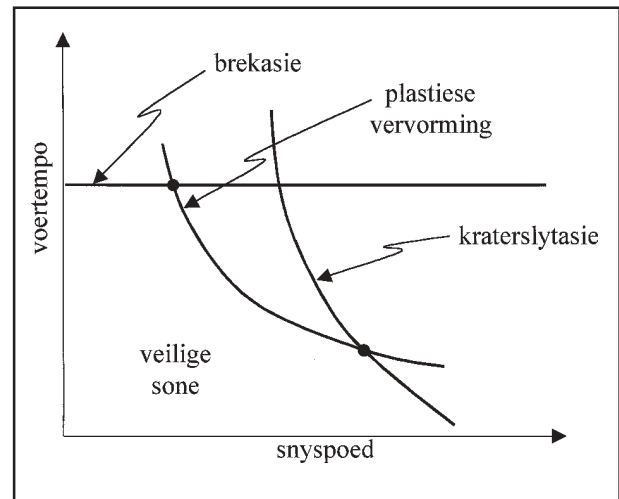
Da et al.⁶⁷ voer aan dat die meeste navorsing tot op hede in die veld van masjineringsprosesoptimering die aanname maak dat die proses altyd plaasvind met splinternuwe, ongesleete beitels. In 'n meer realistiese situasie sal die verrigting van die masjien varieer as gevolg van beitelstytasie. Empiriese vergelykings, gebaseer op vorige navorsing, is gebruik om die gedrag van die verskillende veranderlikes te verklaar. Nelineêre programmeringstegnieke is gebruik om die OMT te bepaal vir 'n sekere toestand van die beitel.

Choudhury et al.⁶⁸ het 'n aangepaste weergawe van die Taylor-vergelyking gebruik (met snykragmetings as insette) om die OMT te bepaal vir draaiwerk. Hierdie benadering het die outeurs in staat gestel om die optimale snytoestande te bepaal met die minimum hoeveelheid eksperimente, gegewe 'n databasis met die onbekende empiriese konstantes en materiaalenskappe. 'n Rekenaarprogram lees die huidige masjinerings-toestande, bepaal die beitelleeftyd deur die Taylor-vergelyking, en bereken dan die optimale masjineringsparameters deur van 'n voorafberekende optimeringsmodel gebruik te maak. Zhou en Wysk⁶⁹ het 'n metode voorgestel vir probabilistiese optimering in bondelproduksie, deur ook van die Taylor-vergelyking gebruik te maak. Hulle benadering het ook 'n beitelstatusopnemingsfunksie ingesluit (nie intyds) om 'n beitelstytasie-indeks te bepaal. Hierdie indeks speel 'n belangrike rol in die keuse vir die optimale masjineringsparameters vir die volgende bondel.

Yen en Wright⁷⁰ het 'n optimeringsprosedure voorgestel vir aanpasbare beheer (AB) in masjinering. 'n Veilige werkspasie word bepaal deur begrensings van drie slytasiemodusse. Beheerveranderlikes soos snyspoed en voertempo kan geoptimeer word vir maksimum metaalverwyderingstempo. Die progressiewe ontwikkeling van flankslytatie word ook in ag geneem om die prosedure dinamies op te dateer. 'n Belangrike bydrae van hierdie werk is die ontwikkeling van 'n model wat die slytatiebegrensings koppel aan beheer- en toestandsveranderlikes. Hierdie benadering word voorgestel in figuur 5, waar die optimum snyspoed en voertempo vir draaiwerk bepaal word met drie slytasiemodusse as begrensings.



Figuur 4: Skematiese voorstelling van optimale toestande.



Figuur 5: Optimering van draaiprosesse met slytasiemodusse as begrensings.

Obikawa et al.⁷¹ het 'n MTM-stelsel voorgestel wat geïntegreer is met 'n optimeringsstelsel. Die beitelstytasie word geskat deur die AR-koëffisiënte wat die snykragte modelleer, te bereken, en dan te gebruik as insette vir 'n KNN. Die masjineringsparameters word geoptimeer om te verseker dat 'n bepaalde hoeveelheid komponente betroubaar vervaardig kan word voordat die einde van die beitelleeftyd bereik word. Jang en Seireg⁷² het 'n optimeringsprosedure voorgestel waarmee die masjineringsparameters geoptimeer kan word vir gespesifiseerde oppervlakafwerking van die werkstuk. Beitelstytasie, dimensionele akkuraatheid en snyselfformasie word geneem as begrensings. Op hierdie manier word die maksimum metaalverwyderingstempo bepaal vir die gespesifiseerde oppervlakafwerking.

5.2 Aanpasbare beheer

Aanpasbare beheer (AB) is die kontinue verandering van masjinerings-toestande deur van 'n intydse beheerstelsel gebruik te maak, soos byvoorbeeld die vaelogika-AB-stelsel ontwikkel deur Tarnag et al.⁷³ Die AB-stelsel moet verstel kan word vir verskillende prosesse, en dan geoptimeer word vir die huidige proses. Die kombinerende van verskillende sensore kan ook die verrigting van 'n AB-stelsel verbeter. Hierdie benadering staan bekend as intelligente vervaardiging.^{74,75} Die volgende moniterings- en beheerfunksies is belangrik in sulke stelsels.⁷⁶

- Gevorderde prosesmonitering om falings te voorkom, met relevansie tot:
 - beitelstytasie
 - beitelstplintering
 - beitelbrekasie
 - botsings
 - vibrasies
 - motorstroom.
- Aanpasbarebeheeroptimering (ABO), met relevansie tot:
 - maksimum produksietempo
 - maksimum produktiwiteit
 - gemengde funksie van produktiwiteit en produksietempo.
- Aanpasbarebeheerbegrensing (ABB) met relevansie tot:
 - snykragte
 - klappervibrasies.

ABO verstel die masjineringsparameters sodat 'n voorafbepaalde verrigtingsindeks bevredig word. Die doel van ABB-stelsels is om die proses te optimeer sodat die masjineringsparameters tot hul maksimum verstel word met die gegewe beperkings van die masjien. Om al die funksies in 'n enkele moniteringstelsel te implementeer, mag dalk te veeleisend wees, en daarom word vereenvoudigde weergawes ontwikkel wat slegs 'n paar veranderlikes bevat, soos:

- Gevorderde prosesmonitering vir 'n langtermynplan.
- ABB van voertempo met relevansie tot die snykragte.
- ABO van voertempo met relevansie tot maksimum produktiwiteit.

In meer gesofistikeerde stelsels kan veranderlikes soos die snitdiepte en voertempo ook ingesluit word.

5.3 Benaderings vir die optimering van die masjineringsproses

Die konvensionele metodes om numeries beheerde masjineringsparameters te kies, is gebaseer op riglyne uit handboeke en die ervaring van die operateur. In meeste van die gevalle word die parameters konserwatief gekies om falings te voorkom. Die resultaat is dat die metaalverwyderingstempo baie laag is.⁶⁵ 'n Optimeringstrategie kan dus oorweeg om dit te verbeter deur een van die volgende benaderings te volg:

5.3.1 Rekenaargesteundeontwerp (RGO)-benaderings

Hierdie van-lyn-af-benadering gebruik proses-, beitelstlytatie- en snykragmodelle gebaseer op voorafkennis uit eksperimente. Gebaseer op hierdie modelle kan 'n rekenaarsimulasie van die numeriese beheerkode die snykragte en beitelstlytatie bereken. Met hierdie resultaat kan die metaalverwyderingstempo geoptimeer word sonder om die begrensings van die masjien te oorskry. Die voordeel van hierdie benadering is dat dit maklik is om te implementeer, en effektief werk vir meeste toepassings. 'n Nadeel is dat die benadering slegs van-lyn-af werk. RGO-benaderings word verdeel in drie subkategorieë, naamlik:

- Masjineringsprosesmodelle.
- Rekenaarsimulasies.
- Masjineringsparameteroptimering.

5.3.2 Operasionelenavorsing (ON)-benaderings

Die doel van ON-benaderings is om die globale koste van die masjineringsoperasie te minimeer deur 'n aantal faktore in ag te neem, soos byvoorbeeld die strategie wat deur Jeang⁷⁷ en Akturk et al.⁷⁸ voorgestel word. Hierdie metodes word gebruik vir van-lyn-af-verstellings as gevolg van die kompleksiteit van die berekenings. Die voordeel is die daarstelling van 'n model wat kan aanpas by veranderings in die proses. Gopalakrishnan en Al-Khayyal⁷⁹ het 'n masjineringsparameter-optimeringstrategie voorgestel gebaseer op geometriese programmering, wat 'n tipiese ON-benadering is.

5.3.3 Kunsmatige-intelligensie (KI)-benaderings

KI-metodes kan gebruik word om 'n masjineringsproses te optimeer. KI-metodes kan 'n ABO- of ABB-tipe stelsel wees, of dit kan ook 'n van-lyn-af-stelsel wees. 'n Intydse AB tipe stelsel word egter verkies by KI-benaderings. KI-tipe metodes poog om outomaties die masjineringsparameters te optimeer gebaseer op data van sensors wat die proses monitor. Die beheerstelsel moet onmiddellik kan reageer as veranderings in proses voorkom om betroubaarheid te verseker. Daar bestaan 'n aantal vorige studies wat poog om KI intyds aan te wend vir optimale beheer.^{80,81} Hierdie studies kan verdeel word in drie kategorieë:

- Neurale netwerke.
- Probalistiese interferensie.
- Kennisgebaseerde ekspertstelsels (KBES).⁸²

6. GEVOLGTREKKING

Dit is duidelik uit die vakliteratuur dat MTM- en prosesoptimeringstelsels bestaan uit 'n aantal konsepte wat op verskeie maniere gekombineer word. Sommige van hierdie tegnieke is relatief oud en het hul regmatige plek in die bedryf gevind. Ander metodes is nuut en steeds in die ontwikkelingsfase. Die behoefte aan meer aanpasbare moniteringstelsels is duidelik uit al die verskillende benaderings wat tot dusver ontwikkel is om spesifieke probleme aan te pak. Dit wil voorkom asof daar vir elke vervaardigingsproses 'n spesifieke moniteringstelsel nodig is. Die doel van huidige navorsing is om sekere van die suksesvolle tegnieke vir MTM en prosesoptimering te kombineer. Dit bring mee dat die moniteringstelsel makliker kan aanpas by verskillende prosesse, met die bykomende voordeel dat die masjineringsparameters intyds geoptimeer kan word.

LITERATUURVERWYSINGS

1. Byrne, G., Dornfeld, D., Inasaki, I., Ketteler, G., König, W., Teti, R. (1995). Tool condition monitoring (TCM) - The status of research and industrial application, *Annals of the CIRP*, 44(2), 541-567.
2. Pfeifer, T., Thrum, H. (1996). Open systems link sensors and measurement applications to machine tool control units, *Measurement*, 19(2), 113-121.
3. Bryzek, J. (1994). Smarter, less costly sensors are on the way, *Process and Control Engineering*, 47(6), 40-43.
4. Kinghorn, I. (1994). Smart sensor technology - the next generation, *Paper Technology*, 35(2), 39-41.
5. Tanaka, N., Snyder, S.D., Hansen, C.H. (1996). Distributed parameter modal filtering using smart sensors, *Journal of Vibration and Acoustics, Transactions of the ASME*, 118, 630-640.
6. Silva, R.G., Rueben, R.L., Baker, K.J., Wilcox, S.J. (1998). Tool wear monitoring of turning operations by neural network and expert system classification of a feature set generated from multiple sensors, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 12(2), 319-332.
7. Kopac, J. (1998). Influence of cutting material and coating on tool quality and tool life, *Journal of Materials Processing Technology*, 78, 95-103.
8. Nurul, A.K.M., Amin et al. (1998). Selection of cemented carbide turning tools using EMF and optimization criteria, *Journal of Materials Processing Technology*, 77, 59-63.
9. Bonifacio, M.E.R., Diniz, A.E. (1994). Correlating tool wear, tool life, surface roughness and tool vibration in finish turning with coated carbide tools, *Wear*, 173(1-2), 137-144.
10. Lever, P.J.A., Marefat, M.M., Ruwani, T. (1997). A machine learning approach to tool wear behavior operational zones, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 33(1), 264-273.
11. Rao, S.B. (1986). Tool wear monitoring through the dynamics of stable turning, *Journal of Engineering for Industry*, 108, 184-189.
12. Grabec, I., Govekar, E., Susic, E., Antolovic, B. (1998). Monitoring manufacturing processes by utilizing empirical modeling, *Ultrasonics*, 36, 263-271.
13. Ruiz, A., Guinea, D., L.J. Barrios, D., Betancourt, F. (1993). An empirical multi-sensor estimation of tool wear, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 7(2), 105-199.
14. Braun, W.J., Miller, M.H., Schultze, J.F. (1999). The development of machine-tool force reconstruction for wear identification, *Proceedings of the 17th International Modal Analysis Conference*, Florida, U.S.A., 94-98.
15. Ravindra, H.V., Srinivasa, Y.G. Krishnamurthy, R. (1993). Modeling of tool wear based on cutting forces in turning, *Wear*, 169(1), 25-32.
16. Szecsi, Tamas (1998). Automatic cutting-tool condition monitoring on CNC lathes, *Journal of Materials Processing Technology*, 77, 64-69.

17. Barrios L.J. et al. (1993). Experimental comparison of sensors for tool-wear monitoring on milling, *Sensors and Actuators A*, 37-38, 589-595.
18. Santochi, M., Dini, G., Tantussi, G. (1996). A sensor-integrated tool for cutting force monitoring, *Annals of the CIRP*, 46(1), 49-52.
19. El-Wardany, T.I., Gao, D., Elbestawi, M.A. (1996). Tool condition monitoring in drilling using vibration signature analysis, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 36(6), 687-711.
20. Li, X.Q., Wong, Y.S., Nee, A.Y.C. (1997). Tool wear and chatter detection using the coherence function of two crossed accelerations, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 37(4), 425-435.
21. Jiang, C.Y., Zhang, Y.Z., Xu, H.J. (1987). In-process monitoring of tool wear stage by the frequency band energy method, *Annals of the CIRP*, 36(1), 45-48.
22. Kim, S., Klamecki, B.E. (1997). Milling cutter wear monitoring using spindle shaft vibration, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 119(1), 118-119.
23. Shea, Joseph M. (1990). Using forced vibration to determine machine tool condition, *IRD Mechanalysis Technical Report*, 129.
24. Meredith, D. (1998). Practical tool condition monitoring, *Manufacturing Engineering*, January 1998, 34-39.
25. Bähre, D., Müller, M., Warnecke, G. (1997). Basic characteristics on cutting effects in correlation to dynamic effects, 1997 *Technical Papers of the North American Manufacturing Research Institution of SME*, 21-26.
26. Jemielnak, K., Otman, O. (1998). Tool failure detection based on analysis of acoustic emission signals, *Journal of Materials Processing Technology*, 76, 192-197.
27. Ravindra, H.V., Srinivasa, Y.G., Krishnamurthy, R. (1997). Acoustic emission for tool condition monitoring in metal cutting, *Wear*, 212, 78-84.
28. Carolan, T.A., Kidd, S.R., Hand, D.P., Wilco, S.J., Wilkonson, P., Barton, J.S., Jones, J.D.C., Reuben, R.L. (1997). Acoustic emission monitoring of tool wear during the face milling of steels and aluminum alloys using a fibre optic sensor Part 1: Energy Analysis, *Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers*, 211(B), 299-309.
29. Carolan, T.A., Kidd, S.R., Hand, D.P., Wilco, S.J., Wilkonson, P., Barton, J.S., Jones, J.D.C., Reuben, R.L. (1997). Acoustic emission monitoring of tool wear during the face milling of steels and aluminum alloys using a fibre optic sensor Part 2: Frequency Analysis, *Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers*, vol. 211, (B), 311-319.
30. Tansel, I.N., Trujillo, M.E., Bao, W., Arkan, T.T. (1997). Detection of tool breakage in micro-end-milling operations by monitoring acoustic emission, 1997 *Technical Papers of the North American Manufacturing Research Institution of SME*, 69-74.
31. Abu-Zahra, N.H., Nayfeh, T.H. (1997). Calibrated method for ultrasonic on-line monitoring of gradual wear during turning operations, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 37(10), 1475-1484.
32. Caiazzo, F., Palazzo, G.S., Pasquino, R. (1998). The influence of working parameters on the response of a capacitive sensor used in-process for the measurement of tool wear, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 38, 871-879.
33. Kurada, S., Bradley, C. (1997). A machine vision system for tool wear assessment, *Tribology International*, 30(4), 295-304.
34. Novak, A., Wiklund, H. (1996). On-line prediction of the tool life, *Annals of the CIRP*, 45(1), 93-96.
35. Wong, Y.S., Nee, A.Y.C., Li X.Q., Reisdorf, C. (1997). Tool condition monitoring using laser scatter pattern, *Journal of Materials Processing Technology*, 63, 205-210.
36. Karthick, A., Chandra, S., Ramamoorthy, B., Das, S. (1997). 3D tool wear measurement and visualization using stereo imaging, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 37(11), 1573-1581.
37. Kumar, S.A., Ravindra, H.V., Srinivasa, Y.G. (1997). In-process tool wear monitoring through time series modeling and pattern recognition, *International Journal of Production Research*, 35(3), 739-751.
38. Dimla, D.E., Lister, P.M., Leighton, N.J. (1996). Investigation of a single-layer perceptron neural network to tool wear inception in a metal turning process, *Proceedings of the 1997 IEE Colloquium on Modeling and Signal Processing for Fault Diagnosis*, 3/1 - 3/4.
39. Venkatesh, K., Zhou, M., Caudill, R.J. (1997). Design of artificial neural networks for tool wear monitoring, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 8(3), 215-226.
40. Dimla, D.E., Lister, P.M., Leighton, N.J. (1997). Tool condition monitoring in metal cutting through application of MLP neural networks, *Proceedings of the 1997 IEE Colloquium on Fault Diagnosis in Process Systems*, 174, 9/1-9/3.
41. Zhou, Q., Hong, G.S., Rahman, M. (1995). A new tool life criterion for tool condition monitoring using a neural network, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 8(5), 579-588.
42. Das, S., Roy, R., Chattopadhyay, A.B. (1996). Evaluation of wear of turning carbide inserts using neural networks, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 36(7), 789-797.
43. Luetzig, G., Sanchez-Castillo, M., Langari, R. (1997). On tool wear estimation through neural networks, *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Neural Networks - part 4 of 4, Houston, TX, USA*, 4, 2359-2363.
44. Quan, Y., Zhou, M., Luo, Z. (1998). On-line robust identification of tool-wear via multi-sensor neural network fusion, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 11, 717-722.
45. Choudhury, S.K., Jain, V.K., Rama Rao, Ch. V. V. (1999). On-line monitoring of tool wear in turning using a neural network, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 39, 489-504.
46. Das, S., Chattopadhyay, A.B., Murthy, A.S.R. (1996). Force parameters for on-line tool wear estimation: A neural network approach, *Neural Networks*, 9(9), 1639-1645.
47. Lee, J.H., Kim, D.E., Lee, S.J. (1998). Statistical analysis of cutting force ratios for flank-wear monitoring, *Journal of Materials Processing Technology*, 74, 104-114.
48. Liu, T.I., Chen, W.Y., Anatharaman, K.S. (1998). Intelligent detection of drill wear, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 12(6), 863-873.
49. Talbott, C.M. (1998). Prognosis of residual machine life, *Proceedings of the Maintenance and Reliability Conference (MARCON 98)*, University of Tennessee, Knoxville, 11-14.
50. Chukwujekwu Okafor, A., Adetona, O. (1995). Predicting quality characteristics of end-milled parts based on multi-sensor integration using neural-networks: individual effects of learning parameters and rules, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 6(6), 389-400.
51. Lou, K., Lin, C. (1997). An intelligent sensor fusion system for tool monitoring on a machining center, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 13, 556-565.
52. Scheffer, C. (1999). Monitoring of tool wear in turning operations using vibration measurements, *Masters dissertation*, University of Pretoria, South Africa.
53. Chen, J.C., Black, J.T. (1997). A Fuzzy-nets-in-process (FNIP) system for tool breakage monitoring in end-milling operations, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 37(6), 783-800.
54. Xiaoli, L., Yingxue, Y., Zhejun, Y. (1997). On-line tool condition neural network with improved fuzzy neural network, *High Technology Letters*, 3(1), 30-38.
55. Fu, P., Hope, A.D., Javed, M.A. (1997). Fuzzy classification of milling tool wear, *Insight*, 39(8), 553-557.
56. Li, S., Elbestawi, M.A. (1996). Fuzzy clustering for automated tool condition monitoring in machining, *Mechanical Systems & Signal Processing*, 10(5), 533-550.
57. Kuo, R.J., Cohen, P.H. (1999). Multi-sensor integration for on-line tool wear estimation through radial basis function networks and fuzzy neural network, *Neural Networks*, 12, 355-370.
58. Kuo, R.J., Cohen, P.H. (1998). Intelligent tool wear estimation system through artificial neural networks and fuzzy modeling, *Artificial Intelligence in Engineering*, 12, 229-242.
59. Jang, D. Y., Choi, Y., Kim, H., Hsiao, A. (1996). Study of the correlation between surface roughness and cutting vibrations to develop an on-line roughness measuring technique in hard turning, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 36(4), 453-464.
60. Coker, S. A., Shin, Y. C. (1996). In-process control of surface roughness due to tool wear using a new ultrasonic system, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 36(3), 411-422.
61. Wilkinson, P., Reuben, R.L., Jones, J.D.C., Barton, J.S., Hand, D.P., Carolan, T.A., Kidd, S.R. (1997). Surface finish parameters as diagnostics of tool wear in face milling, *Wear*, 205, 47-54.
62. Vajpayee, S., (1981). Analytical study of surface roughness in turning, *Wear*, 70, 165-175.
63. Chou Y. K., Evans, C.J. (1997). Tool wear mechanism in continuous cutting of hardened tool steels, *Wear*, 212(1), 59-65.
64. Thomas, M., et al., (1996). Effect of tool vibration on surface roughness during lathe dry turning process, *Computers & Industrial En-*

- gineering, 31(3-4), 637-644.
65. Park Kyung Sam, Kim, Soung Hie (1998). Artificial intelligence approaches to determination of CNC machining parameters in manufacturing: a review, *Artificial Intelligence in Engineering*, 12, 127-134.
 66. Ermer, D.S. (1971). Optimization of the constrained machining economics problem by geometric programming, *Journal of Engineering for Industry*, 93(4), 1067-1072.
 67. Da, Z. J., Sadler, J.P., Jawahir, I.S. (1997). Predicting optimum cutting conditions for turning operations at varying tool-wear states, *Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of SME*, 25, 75-80.
 68. Choudhury, S.K., Kumar, E., Ghosh, A. (1999). A scheme of adaptive turning operations, *Journal of Materials Processing Technology*, 87, 119-127.
 69. Zhou, Chen, Wysk, R.A. (1992). Tool status recording and its use in probabilistic optimization, *Journal of Engineering for Industry*, 114, 494-499.
 70. Yen, D.W., Wright, P.K. (1983). Adaptive control in machining – a new approach based on the physical constraints of tool wear mechanisms, *Journal of Engineering for Industry*, 105, 31-38
 71. Obikawa, T., Kaseda, C., Matsumura, T., Gong, W.G., Shirakashi, T. (1996). Tool wear monitoring for optimizing cutting conditions, *Journal of Materials Processing Technology*, 62, 374-379.
 72. Jang, D.Y., Seireg, A. (1992). Machining parameter optimization for specified surface conditions, *Journal of Engineering for Industry*, 114, 254-257.
 73. Tarn, Y.S., Chen, S.T., Wang, Y.S. (1998). Adaptive control of machining operations, *Key Engineering Materials*, 138-140, 263-287.
 74. Hatamura, Y., Nagao, T., Mitsuishi, M. (1993). A fundamental structure for intelligent manufacturing, *Precision Engineering*, 15(4), 266-273.
 75. Davies, A. (1994). The intelligent machine, *Manufacturing Engineer*, 73(4), 182-185.
 76. Lundholm, T., Lindstrom, B. (1991). A flexible real-time control system for turning, *Annals of the CIRP*, 40(1), 441-444.
 77. Jeang, A. (1998). Reliable tool replacement policy for quality and cost, *European Journal of Operational Research*, 108, 334-344.
 78. Akturk, M.S., Avci, S. (1996). Tool allocation and machining conditions optimization for CNC machines, *European Journal of Operational Research*, 94, 335-348.
 79. Gopalakrishnan, B., Al-Khayyal, F. (1991). Machine parameter selection for turning operations with constraints: an analytical approach based on geometric programming, *International Journal of Production Research*, 29(9), 1897-1908.
 80. Nicolescu, C.M. (1996). On-line identification and control of dynamic characteristics of slender workpieces in turning, *Journal of Material Processing Technology*, 58, 374-378.
 81. Martinez, D.R., Hinnerichs, T.D., Redmond, J.M. (1996). Vibration control for precision manufacturing using piezoelectric actuators, *Journal of Intelligent Materials Systems and Structures*, 7, 182-191.
 82. Billatos, S.B., Tseng, P. (1991). Knowledge-based optimization for intelligent manufacturing, *Journal of Manufacturing Systems*, 10(6), 464-475.



STEPHAN HEYNS

Stephan Heyns is professor en hoof van die Afdeling Struktuurmeganika in die Departement Meganiese en Lugvaartkundige Ingenieurswese aan die Universiteit van Pretoria, waar hy ook sy Ph.D.-graad in 1988 verwerf het. Hy is voorsitter van die departement se Dinamiese Stelsels-groep. Sedert 1982 is aktief as navorser en tree hy op as konsultant vir talle firmas in die breë velde van struktuurdinamika en vibrasie. Sy huidige navorsing fokus veral op die velde van vibrasiemonitering en vibrasie-attenuasie. Hy is geregistreer as professionele ingenieur.



CORNIE SCHEFFER

Cornie Scheffer voltooi in 1998 die B.Ing.-graad in Meganiese Ingenieurswese aan die Universiteit van Pretoria. Hy skryf daarna in vir die M.Ing.-graad in Meganiese Ingenieurswese aan die Universiteit van Pretoria en verwerf die graad met lof. Sederdien het hy vir die Ph.D.-graad ingeskryf by die Universiteit van Pretoria en is hy voltids besig met navorsing in die Dinamiese Stelsels-groep. Mnr. Scheffer se algemene belangstelling is vibrasiemonitering, met spesifieke fokus op die aanwending van gesofistikeerde seinprosesseringstegniese vir die toestandsmonitering van snybeitels van numeriese beheerde masjiene.