

Niet alleen in het bedrijfsleven bestaat de wens om productieprocessen door middel van meet- en regeltechnieken volledig te beheersen. Ook een amateur kan de behoefte gevoelen een stevige vinger in de pap van zijn speelgoederen of audioapparatuur te houden om daarmee de werking zo precies mogelijk overeenkomstig de werkelijkheid of zijn wens te doen geschieden. De beheersing van het toerental van een electromotor bijvoorbeeld stelt hem in staat de rijsnelheid en de versnelling van elektrisch voortgedreven speelgoedvoertuigen zodanig te regelen, dat ze zich 'net als echt' gedragen, terwijl de audioliefhebber daarvan baat kan hebben om van eenvoudige batterijgevoede cassette- of platenspelers de jank en jengel op te heffen.

W. Jak

eenvoudige toerental stabilisator

De hier beschreven toerentalstabilisator werkt zeer effectief: hij stelt de gebruiker in staat om het toerental van kleine elektromotoren van pakweg één omwenteling per seconde tot maximaal toerental te regelen en het gekozen toerental – met uitzondering van het maximum toerental – stabiel te houden.

Terugkoppeling

Sta mij toe vanuit mijn filosofische inslag te schilderen hoe na het stenen-, bronzen-, ijzeren- en tenslotte het glazen tijdperk reeds sedert enige decennia het tijdperk van de terugkoppeling is aangebroken. Dat is nog zo recentelijk, dat de omvang en de waarde van de terugkoppeling nog lang niet in alle lagen van wetenschap en maatschappij onderkend en begrepen worden. Wij elektronici echter hebben er gelukkig al kaas van gegeten.

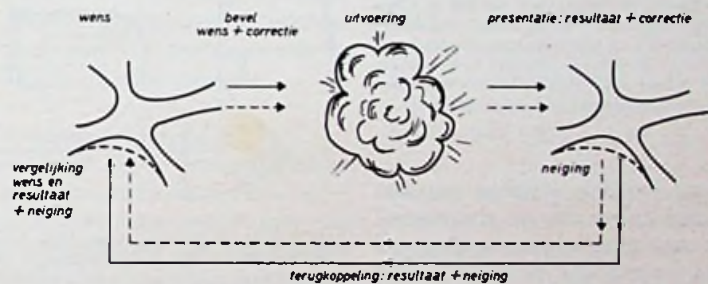
Terugkoppeling is geen grondstof, het is een werkwijze. Het is in feite de steen der wijzen, welke voor kenners geen stoffelijke steen, maar even concrete, onomstotelijke kennis behelst. Allicht dat pas na kennisname van alle mogelijke ten dienste staande materialen en energieën de manier van toepassing, de wijze van scheppen onder de loop genomen kon worden.

Terugkoppeling is niet de toverformule zelf, het is slechts de titel van een gedragscode of werkwijze, die als een rode draad door het leven loopt. Toepassing van deze code in de techniek, waartoe wij ons hier beperken, maar ook in maatschappelijke processen, brengt ons als mens precies in de positie die we nastreven: die van een spelman in een paradijs.

Onder terugkoppeling verstaan we de werkwijze, waarbij het uiteindelijke resultaat vergeleken wordt met de oorspronkelijke wens, waarna op grond van het verschil tussen wens en resultaat de aanvullende ingreep kan volgen, die het resultaat toch precies zo doet zijn als we willen. Zie afb. 1.

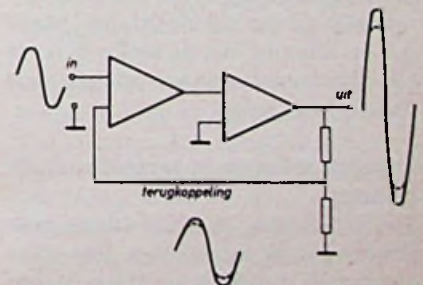
gegeven. Zie afb. 2. En even buiten de techniek om: wanneer ge uw geliefde een kus geeft, zijn het zenuwsignalen (terugkoppelsignalen) vanuit de tastzin in de lippen en de spieren, die er voor zorgen dat dat met de gewenste tederheid gebeurt.

Als we nu het toerental van een elektro-



Afb. 1.

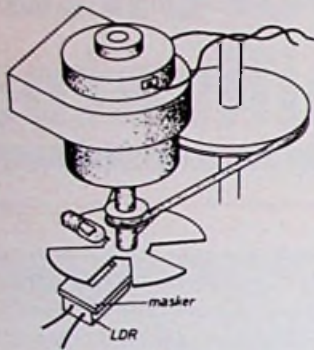
We kennen terugkoppeling in versterkers – daar tot tegenkoppeling gedoopt – waarbij het uitgangssignaal naar de ingang wordt teruggevoerd en daar wordt vergeleken. Wanneer het uitgangssignaal relatief te gering dreigt te worden, bijvoorbeeld doordat de weergever bij een bepaalde frequentie een lage impedantie heeft, zal bij vergelijking met het ingangssignaal direct blijken hoeveel het uitgangssignaal dreigt achter te blijven. Het verschilsignaal (of correctiesignaal) gaat nu met het oorspronkelijke ingangssignaal (stuur-)signaal door de versterker heen en heeft een zodanige extra sturing van de eindtrap tot gevolg, dat ondanks de belastingtoename van de weergevers (bij die ene frequentie) toch het oorspronkelijke, relatief grote uitgangssignaal wordt



Afb. 2. Over de hier symbolisch weergegeven tweetraps versterker heeft terugkoppeling vanuit de uitgang naar de ingang plaats. Elke neiging tot vervorming van het uitgangssignaal komt bij vergelijking met het oorspronkelijke ingangssignaal in de eerste versterkertrap onmiddellijk tot uiting in een aanvullende sturing van de versterkertrappen, waardoor toch de oorspronkelijke signaalvorm versterkt wordt afgegeven en de neiging nagenoeg wordt onderdrukt. Hoe sterker de tegenkoppeling, hoe effectiever de correctie.

motor willen beheersen, zullen we, vooropgesteld dat we een elektronische oplossing wensen, het toerental in een evenredig elektrisch signaal moeten omzetten om dit met het elektrische stuursignaal te kunnen vergelijken.

Het stuursignaal (de wens) komt uit een handregelaar of een andere stuurkring en dit stuursignaal gebiedt een bepaald toerental. In geval het werkelijke toerental van de motor (het resultaat) te laag is,



Afb. 3. Omzetting van het toerental in een evenredige stroomimpulstrein door de LDR. Om invloed van de kruisvormige vlieder op het motorgedrag (lawaai door excentriciteit en wind en vergroting van de massa) gering te houden, nemen we de diameter van de vlieder zo klein mogelijk. We maken hem van blik en lijmen hem met componentenlijm op de as van de aandrijfmotor. Gloeilampje en LDR moeten er bij gemonteerd kunnen worden. De optische afstelling heeft t.o.v. een magnetisch systeem het voordeel ongevoelig te zijn voor het storende magnetische veld van de motor.

zal weinig terugkoppelsignaal ontstaan en bij vergelijking met het stuursignaal zal een aanvulling op het stuursignaal gevormd worden, die de motor sneller zal doen draaien. In de vergelijkingsschakeling zal de verschillenspanning of het aanvullende correctiesignaal dan ook altijd bijna nul zijn. Hoe meer het correctiesignaal van nul afwijkt, hoe zwaarder de belasting van de motor blijkt te zijn (hoe moeizamer het resultaat zich naar de wens voegt).

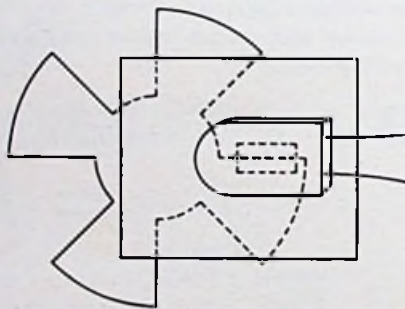
Toerental omzetten in evenredige regelspanning

Bij de oplossing, die hier aan de orde komt, wil ik uit eerbied voor onze voorvaders en medetechnici gewag maken van een hartveroverende keur aan reguleurs en servosystemen, die aan stoommachines, explosiemotoren, stoom- en waterkracht turbines een stabiel toerental verlenen. Ik lik nog heden ten dage vaak mijn vingers af bij kennisname van de alleraardigste schakelingen, die ontwerpers van betere cassette- en platenspelers ter regulering van de bandsnelheid of

omwentelingssnelheid van de draaitafel hebben uitgedokterd.

De omzetter, waarin aan het toerental van de motor het terugkoppelsignaal wordt ontleend, bestaat in ons ontwerp uit een vast opgestelde LDR met gloeilampje, waar tussendoor een vierbladige vlieder op de as van de motor draait, zie afb. 3.

Wanneer de motor draait, zal bij elke omwenteling de lichtstroom van het gloeilampje naar de LDR vier maal onderschept worden, waardoor bij elke omwenteling vier maal een weerstandsverandering optreedt. Het aantal weerstandsveranderingen per seconde van de LDR hangt aldus ten nauwste samen met het toerental - van de motor. Met de weerstandsveranderingen kunnen we in een elektronische kring veel doen, zie afb. 5. Bij de oplossing die de schakeling van afb. 6 geeft, worden de weerstandsveranderingen per tijdseenheid (bepaald door de RC-tijd van R_6 en C_3) geteld: hoe



Afb. 4. Vorm van de kruisvormige vlieder en het masker voor de LDR. Omdat de LDR duidelijke weerstandsverschillen kan ondergaan, is het noodzakelijk dat de wiken van de vlieder hem steeds goed afdekken. Het masker vóór de LDR dient ervoor het strooitlicht te weren en alleen licht tussen de wiken door te laten. Het gat in het masker moet daartoe smal zijn.

meer weerstandsveranderingen, hoe hoger uitgangsspanning U_{TK} aan de uitgang van de schakeling.

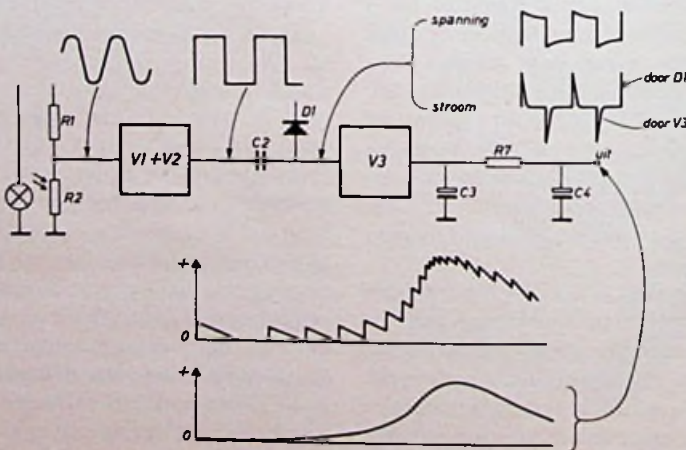
De werking

Te zamen met R_1 vormt de LDR een spanningsdeler, waarvan de uitgangsspanning onder invloed van de herhaaldelijk onderbroken lichtstroom op de LDR groter en kleiner is. Door C_1 wordt de gelijkstroomcomponent uit de veranderende uitgangsspanning geblokkeerd en worden alleen de spanningsspelingen naar de basis van V_1 gevoerd.

Deze spanningspelingen zijn zo groot, dat V_1 en op zijn beurt ook V_2 overstuurd wordt, met het gevolg dat de uitgangsspanning op de collector van V_2 een blokvorm heeft gekregen: de collectorspanning verkeert óf op aardpotentiaal als V_2 geleidt (vermeerdert met de kniespanning van V_2), óf op voedingsspanningspotentiaal als V_2 spert.

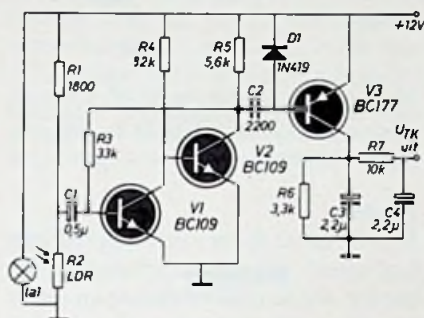
De werking van deze trap met V_1 en V_2 wordt ondersteund door R_3 , welke het stuursignaal uit de spanningsdeler met de LDR meehelpt (in- en uitgangssignaal hebben dezelfde fase). De schakeling met V_1 en V_2 draagt hierdoor het karakter van een bi-stabiele multivibrator of flip-flop. Dank zij deze trap beschikken we over een blokvolgsignaal, waarvan de grootte steeds dezelfde is (beweegt tussen massa en voedingsspanningspotentiaal), de flanksteilheid steeds gelijk is (dank zij de aard van de schakeling) en alleen de frequentie (het aantal pulsen per seconde) verschilt. Deze vormt een maat voor het toerental van de motor.

De omzetting van deze frequentie in een overeenkomstige regelspanning gaat al heel eenvoudig in de daarop volgende teldetector met C_2 en V_3 . Wanneer de uitgangsspanning aan de collector van

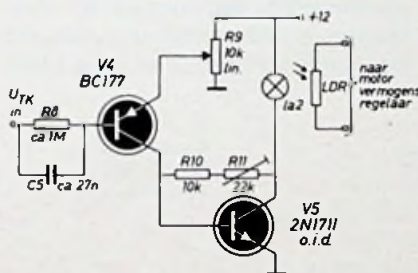


Afb. 5. Blokschema van de schakeling, waarin de stroomimpulstrein door de LDR wordt omgezet in een evenredige gelijkspanning.

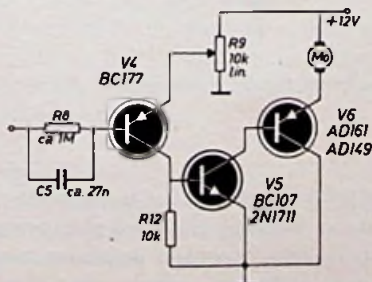
V2 abrupt van voedingsspanningspotentiaal naar aardpotentiala beweegt, zal deze spanningssprong via C2 naar V3 worden doorgegeven en deze zal hierdoor even in geleiding komen. Doordat de basis-emitterovergang van V3 slechts een beperkte kniespanning (ca. 0,6 V toelaat) zal de spanningssprong aan de collector van V2 slechts in geringe mate door de basis van V3 gevolgd worden. Nu heeft C2 een geringe waarde en de spanningssprong aan de collector van V2 wordt dan ook niet door C2-V3 belemmerd.



Afb. 6. Schakeling voor omzetting van de impulsrein uit de LDR in een evenredige terugkoppelspanning. Alle weerstanden $\frac{1}{4}$ W; alle elco's 15 V; $I_a = 12$ V - 50 mA.



Afb. 7. Vergelijkingsschakeling, waarin het terugkoppelsignaal uit de schakeling van afb. 6 wordt vergeleken met het stuuringsignaal uit de toerenregelaar R9. Het resultaat - de stroom door V4 - bepaalt het motorvermogen. In deze schakeling wordt het motorvermogen via een tweede LDR en la 2 geregeld (zie RB januari 1976 blz. 10 fig. 7, waarin R7 door de LDR wordt verwisseld). M.b.v. R11 wordt de ruststroom door V5 en dus de rustinstelling van la 2 en LDR bepaald. Alle weerstanden $\frac{1}{4}$ W. ($I_c = 0,5$ A en $P = 3$ W); $I_a = 12$ V - 50 mA.



Afb. 8. Vergelijkingsschakeling als in afb. 7, nu echter voor directe sturing van een kleine gelijkstroommotor uit dezelfde voedingsspanning. Alle weerstanden $\frac{1}{4}$ W. V4 = BC177, V5 = BC107... 2N1711; V6 = AD161 of AD149.

Wat er gebeurt is, dat C2 abrupt wordt opgeladen (negatief aan de zijde van V2) en het is deze laadstroom die V2 even opent. Heel even maar, want C2 is klein en is snel opgeladen. Bij de volgende spanningssprong aan de collector van V2 wordt C2 weer ontladen door D1, waarna de cyclus zich kan herhalen.

Gedurende de korte momenten, dat V3 geopend wordt, ontvangt C3 enige lading uit V3, welke lading door R6 weer wegvloeit. Bij een laag toerental, als V3 per tijdsduur slechts weinig gestuurd wordt, kan zich over C3 slechts weinig spanning opbouwen: de binnenkomende impulsen vloeien de een na de ander vrijwel geheel via R6 naar aarde af. Bij toenemend toerental zal V3 echter steeds vaker even in geleiding zijn en een laadimpuls aan C3 afgeven, waardoor er zich over C3 een grotere spanning kan vormen

De impulsen vloeien wel via R6 naar aarde af, maar er komen er zoveel binnen, dat er eerst een grote spanning moet worden opgebouwd eer ze door de weerstand kunnen afvloeien.

Omdat de spanning over C3 bij elke impuls fluctueert, is voorzien in R7 en C4 als afvlakfilter, zodat over C4 een nagenoeg zuivere gelijkspanning ontstaat, waarvan de grootte evenredig is met het toerental van de elektromotor.

De vergelijkingsschakeling

Het laatste deel van de toerentalstabilisator is weergegeven in afb. 7. Hierin is V5 de eigenlijke stuurtrap voor de motor en daarbij geldt dus, dat hoe meer stroom door V5 wordt gestuurd, hoe meer stroom de motor ontvangt. De schakeling werd beproefd in combinatie met de triac vermogensregelaar in RB januari 1976 blz. 8, waarbij de koppeling tussen deze toerentalstabilisator en de voornoemde vermogensregelaar optisch geschiedde d.m.v. een gloeilampje en LDR.

Wat belet de lezer echter om de motor direct in de regelkring op te nemen, zoals in afb. 8. (Het zou de minder goede werking kunnen zijn, want motorregeling met triac in combinatie met wisselstroom werkt beter dan een motorregeling met een transistor in een gelijkstroomkring.) Welnu, V5 ontvangt zijn sturing uit V4. Met R9 wordt de emitter van V4 op een bepaalde positieve spanning gebracht, welke bepalend is voor het gewenste toerental van de motor. Zolang de motor nog niet of te langzaam draait, zal er over C4 in afb. 6 nog geen, resp. onvoldoende correctiespanning voorhanden zijn. Van

uit het aardpotentieel van C4 zal via R8 basisstroom naar V4 vloeien, waardoor deze gaat geleiden en op zijn beurt V5 wordt gestuurd. Deze sturing is direct zo groot, dat de motor een flink aanloopkoppel heeft. Op het moment dat de motor gaat draaien, ontstaat er spanning over C4, welke de basisstroom door R8 naar V4 verkleint.

Wanneer bij een bepaald toerental een zodanige spanning over C4 ontstaat, dat deze de emitterspanning van V4 benadert, dan neemt de sturing aan V4 af en daarmee het aanloopkoppel van de motor. Het toerental zal zich instellen op een zodanige waarde, dat de spanning over C4 nagenoeg gelijk (iets minder) is dan die op de emitter van V4. Bij toenemende belasting en lager toerental zal de afnemende spanning over C4 direct meer sturing van V4 tot gevolg hebben, waardoor de stabilisatie een feit is.

Regeloscillaties

Hier aangekomen begint het duivelse element in me te gniffelen en zich te verknukelen bij de gedachte aan de even merkwaardige als razende problematiek, die een terugkoppelkring zijn schepper kan bieden. Wie een terugkoppelkring maakt zonder geheel van zijn eigenschappen en hebbelijkheden op de hoogte te zijn, kan zich lelijk aan deze steen der wijzen vertillen. Er zijn maar weinig mensen die hem goed doorhebben: je moet er wel een hele hoge piet van een technicus of een Odysseus van een ploeteraar voor zijn. Er is zo veel over te vertellen, dat ik er gewoon niet aan hoeft te beginnen. Nochtans dringt het goede element in me om te getuigen van de glorie van een goed functionerende regelkring en ik zou door middel van het volgende de lezer bij zijn eigen experimenten willen begeleiden.

Wanneer men de schakeling heeft gemaakt, doet men er verstandig aan eerst te controleren of de terugkoppelspanning U_{TK} in afb. 6 evenredig met het toerental van de motor van nul tot maximum oploopt. Men kan bij gebreken R1 en de LDR verwisselen, de waarde van R1 of R3 wijzigen, C2 veranderen, de transistoren door andere met grotere versterking vervangen. Lees ook het onderschrift bij afb. 4 goed.

Vervolgens controleert men of de motorregelaar rond afb. 7 of afb. 8 goed werkt, waarbij de basis van V4 niet met U_{TK} , maar via een weerstand van ca. 1 M Ω met massa wordt doorverbonden. Als dat goed werkt, kan men U_{TK} aan de basis van

V4 toevoeren. Hoop maar niet dat het span goed functioneert: het zal oscilleren. Het volgende gebeurt: met R9 stellen we een bepaald toerental in. Omdat er aanvankelijk geen terugkoppelspanning is, vertoont de motor een sterk aanloopkoppel en wel des te meer naarmate R8 kleiner is. (Beredeneer zelf waarom.) De motor loopt aan en zet het (altijd trage) mechaniek in werking. Op het moment dat de terugkoppelspanning U_{TK} de regelspanning aan de basis van V4 nadert, neemt de stuurstroom af; de motor krijgt een kleiner aanloopkoppel met de bedoeling om op het gewenste toerental een exact evenwicht met de belasting te gaan vormen. Zo ver komt het helaas niet.

Het mechaniek, dat door de motor wordt aangedreven, is traag en vertoont een vliegwielerwerking, evenals de motor zelf en vooral niet te vergeten de elektronische stuurtrap van de motor (de LDR op de plaats van R7 in de schakeling van fig. 7 in RB januari 1976 blz. 10). De terugkoppelingsspanning komt ook met enige vertraging tot zijn nominale waarde als gevolg van het afvlak netwerk met C3, C4 en R7. Het gevolg van deze traagheden (mechaniek en elektronica) is dat de motor nog met een te groot aanlooppakket doordraaft als het gewenste toerental al is bereikt. De terugregeling komt wel, maar met vertraging en zet pas goed in als de motor al te hard draait.

De terugkoppelspanning kan nu even groter worden dan de regelspanning en V4 spert: algehele afwezigheid van sturing. Het toerental van het mechaniek zeult nu weer terug tot beneden de gewenste waarde, hetgeen – met enige vertraging – weer aan V4 wordt medegedeeld. Motor ontvangt weer stroom en zal weer flink aantrekken. Helaas, op het gewenste toerental is de terugkoppelspanning weer te laag om terug te regelen en nou ja, wie snapt het nu nog niet: een lied zonder einde van een driftig aan- en uitdraaiend mechaniek, maar geen stabiel toerental.

Wees er op bedacht dat juist dit bizarre resultaat wordt verkregen op een moment dat we ons zoveel moeite getroosten om het tegendeel te bereiken. Het verraaft het vooruitzicht op een weldadige oplossing. Onze constructie mist nog bezieling: de tovenaars moet er met zijn stafte nog een klein sterretje in blazen.

Dat doet hij als volgt:

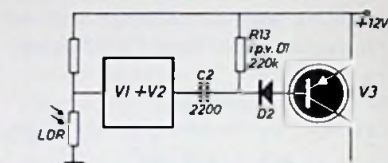
Wanneer R8 erg groot wordt gekozen is de terugkoppeling gering. De stabilisatie werkt dan lauw of nauwelijks en regel-

oscillaties zullen dan ook niet optreden. Door R8 te verkleinen begint de stabilisatie in werking te treden en worden de eerste oscillatoire tendenzen merkbaar. Door nu een condensator C5 over R8 aan te sluiten zijn we in staat om de terugkoppelspanning vóór te laten ijlen en de vertragingen in de rest van het ontwerp te compenseren. Bij een bepaalde waarde van C5 t.o.v. R8 verdwijnen de regeloscillaties!

Vervolgens bemoeie de amateurtovenaar zich R8 zo klein mogelijk te maken teneinde de stabilisatie maximaal op te voeren, terwijl hij door geringe wijzigingen van C5 de oscillaties tracht te smoren. Een gering inslingeren op het stabiele toerental is soms wel toelaatbaar, men ziet maar.

Niet-lineaire terugkoppeling

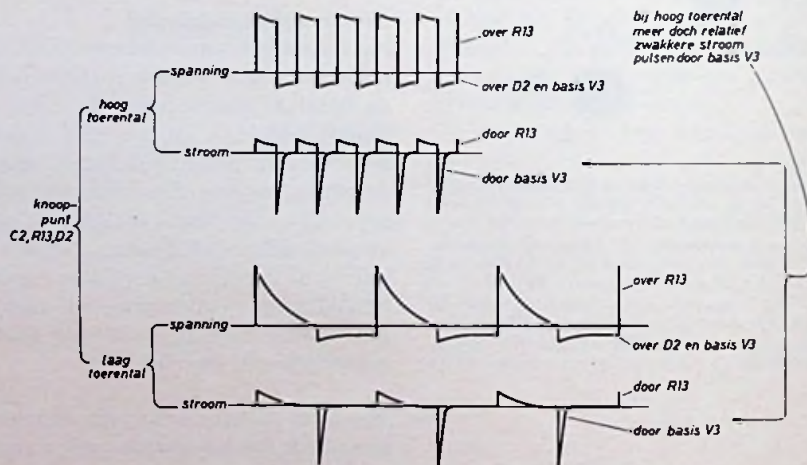
De schakeling werd beproefd in een elektrische speelgoedtrein. Het bleek dat vooral bij de laagste rijsnelheden een straffe stabilisatie wenselijk is en minder bij de hogere rijsnelheden. Hieraan kan heel eenvoudig worden voldaan m.b.v. de schakeling van afb. 9. De verklaring hiervan is als volgt: Doordat de diode D1 vervangen is door een weerstand, zal C2 niet erg snel worden ontladen als de collectorspanning van V2 van massa naar voedingsspanningspotentiaal floept. Bij



Afb. 9. Deel van de schakeling van afb. 6 rond V3, waarin D1 door R13 is vervangen en D2 is toegevoegd (D2 = 1N419 o.i.d.) omwille van een niet-lineaire terugkoppelspanning.

Tenslotte

Het feit, dat de motor een terugkoppelsig-naal afgeeft aan de regelschakeling, impliceert dat de regelschakeling en motor bij elkaar in het apparaat of voertuigje ondergebracht moeten worden. Om het toerental te kunnen instellen is op elk apparaat wel een plaatsje voor R9 te vinden. Betreft de onderneming het verlevendigen van een speelgoedvoertuig, dan kan men met R9 wel in de maag zitten.



Afb. 10. Stroom- en spanningsimpulsvormen bij lage en hoge toerentallen op het knooppunt C2, R13, D2 in de schakeling van afb. 9.

lage toerentallen, met 'lange' tijden tussen de elkaar opvolgende impulsen, heeft dat geen invloed, want C2 zal dan toch steeds geheel ontladen zijn als de spanning aan de collector van V2 weer omhoog gaat en V3 een impuls ontvangt. Bij hoge toerentallen echter volgen de impulsen elkaar zo snel op, dat C2 niet de

De snelheid wil men in het algemeen op afstand bedienen. Het hoeft geen betoog dat dat kan, eventueel draadloos, door een regelspanning vanuit een zender-ontvanger aggregaat aan de emitter van V4 toe te voeren, welke regelspanning dan tussen massa- en voedingsspannings-potentiaal moet bewegen.