

SUMMARY

The application of analogue computers for water distribution analysis and its development in Great Britain

The simulation of non-linear properties of liquid flow systems in electric models was made possible by the discovery of the non-linear properties of the wolfram lighting bulb. Apparatuses based on this principle for computing pipeline systems have been developed by the British Aircraft Corporation for the Water Research Association in 1963. Also some water and gas companies, i.a. the Water Department of Birmingham and the Metropolitan Water Board in London have bought analogue computers. The functioning of these computers is explained, while possibilities of their application in solving practical problems are discussed. The main advantage of analogue computers over digital ones is that their functioning is closer to reality, thereby reducing the quantity of preparatory studies on the pipe network.

De toepassing van een analogonrekenmachine voor de analyse van de waterdistributie en haar ontwikkeling in Groot-Brittannië

1. Historisch overzicht

Elektrische modellen voor de bestudering van de eigenschappen van elektrische distributienetten worden al zo'n 40 jaar gebruikt, maar de toepassing van deze techniek voor waterdistributienetten is van jongere datum. Dat komt omdat de elementen van een elektrisch systeem lineaire eigenschappen hebben — ze volgen de wet van Ohm — maar de leidinggedeelten van een vloeistofstelsel gedragen zich volgens niet-lineaire stromingswetten. De moeilijkheid van de nabootsing van deze stromingswetten werd voor het eerst opgelost door onderzoekers in Duitsland en door McLroy in de Ver. Staten in de veertiger jaren, waarbij zij gebruik maakten van de niet-lineaire eigenschappen van wolframgloeilampen. De analyseapparaten volgens McLroy worden sinds het begin van de jaren vijftig gemaakt; in dezelfde periode werden door het Montan-Forschung-concern in Duitsland analyseapparaten gemaakt voor mijnventilatie, en later voor water- en gasnetten, waarbij elektromechanische en elektrische circuits werden gebruikt om de stromingswetten te simuleren. Toename van de belangstelling in Groot-Brittannië voor de toepassing van een analogonrekenmachine leidde tot de vervaardiging van een analyseapparaat voor de Water Research Association door de British Aircraft Corporation in 1963. Dit apparaat is sinds het begin van 1964 in bedrijf bij de WRA. Deze vereniging heeft een bureau voor dienstverlening aan haar leden voor het analyseren van distributiesystemen; tot nu toe zijn ongeveer 70 projecten bestudeerd. Analyseapparaten van BAC zijn eveneens geleverd aan een aantal water- en gasbedrijven, waaronder het Water Department van de stad Birmingham en de Metropolitan Water Board in Londen. Andere projecten in Engeland omvatten een pneumatische analogonrekenmachine, die werd ontwikkeld door de British Hydromechanics Research Association, waarbij de waterstroom in pijpen gesimuleerd wordt door de stroming van lucht door uitstroomopeningen, en een elektrische analogonrekenmachine, vervaardigd door de Universiteit van Salford. Het laatste apparaat simuleert de stromingswet van Colebrook in plaats van de eenvoudiger wetten van Haze-Williams en soortgelijke stromingswetten, waarop de apparaten van McLroy, Montan-Forschung en BAC gebaseerd zijn.

2. Algemene beschrijving van de analysator van BAC

2.1 Grondbeginselen van de onderdelen van de analysator

De essentiële eigenschappen van de belangrijkste bouwstenen van de analysator zullen in het volgende worden beschreven. De wet van Hazen-Williams stelt dat de drukken P_1 en P_2

aan de einden van een waterpijp met een hydraulische weerstand R afhankelijk zijn van de stroomsterkte Q volgens de betrekking

$$P_1 - P_2 = RQ^{1,85}$$

Het *pijpelement* is ontworpen voor eenzelfde betrekking tussen de spanningen E_1 en E_2 aan de aansluitingen (t.o.v. een vaste spanning in de analysator) en de stroom I , n.l.:

$$E_1 - E_2 = KI^{1,85}$$

Een netwerk van weerstanden en geblokkeerde diodes simuleert deze betrekking door middel van een opeenvolging van vier lineaire segmenten, waardoor de machtsexponent 1,85 wordt benaderd, terwijl een versterkerschakeling het werkgebied van het element, d.w.z. de waarde van K (overeenkomend met de hydraulische weerstand R) uitbreidt over een schaal van 30.000 : 1.

De vier segmenten bestrijken het gehele werkgebied van het element, d.w.z. 0—50V. Voor een gegeven instelling van K varieert I met E volgens de exponentiële wet binnen grenzen van $\pm 2\%$ bij $E = 30V$ en over het gebied $E = 2—35V$. Voor $E = 0—2V$ wordt deze begrenzing iets overschreden. Als de spanningsrichting van E wordt omgekeerd, gebeurt dat eveneens met de stroomrichting.

Er wordt gewoonlijk aangenomen dat het waterverbruik aan het aftakpunt van een net constant is en onafhankelijk van drukschommelingen ter plaatse. Het *belastingelement* werkt op dezelfde manier; het gedraagt zich als een constantstroomelement, waardoor een constante stroom vloeit vanaf het knooppunt, onafhankelijk van de knooppuntsspanning. De stroom in het belastingelement varieert minder dan 0,5% over het gehele werkgebied van de spanning in de analysator (0—50V). De stroomwaarde is instelbaar over een schaal van 1000 : 1.

Het is eveneens mogelijk om de stroom in het belastingelement te variëren door middel van een centrale regelaar. Dat betekent dat deze elementen tot een groep kunnen worden samengevoegd en hun stromen simultaan kunnen worden gevarieerd met hetzelfde percentage t.o.v. de oorspronkelijke instelling van elk afzonderlijk element.

De *broneenheid* is een spanningsbron waarvan de uitgangsspanning kan worden ingesteld van 0—50V. Deze uitgangsspanning is onafhankelijk van de belastingstroom. Een pompstation wordt gesimuleerd door een handregeling, zodat de uitgangsspanning en -stroom een punt van de pompkarakteristiek vastleggen. De broneenheden kunnen eveneens worden gebruikt als opjaagpompen. Wanneer een broneenheid als reservoir wordt gebruikt kan zij stroom uit het netwerk opnemen, d.w.z. zij is „opladdbaar”.

2.2 Schaalfactoren en de initiële instelling van de pipelementen

Het weerstandsgebied van de pipelementen (30.000 : 1) is ruim voldoende voor de behoeften van de distributieanalyse, en het kan indien nodig uiteraard nog worden uitgebreid door het gebruik van pipelementen in parallel- of serie-schakeling. Dit uitgebreider werkgebied kan echter niet worden gebruikt als zijn plaats in het geheel van alle mogelijke hydraulische weerstanden vastligt. De analysator moet zowel geschikt zijn voor het bestuderen van transportpijpleidingen (met leidingen van zeer grote doorsnede en met hoge doorstromingsnelheden) als voor plaatselijke distributienetten met zeer dunne leidingen en lage doorstromingsnelheden. Pijp- en belastingelementen worden dáár geplaatst waar zij het beste tegemoetkomen aan de eisen van een bepaald netwerk door te zorgen voor een uitgebreide reeks schaalfactoren voor druk en stromingsnelheid. Deze schaalfactoren zijn eenvoudig de omrekeningsfactoren tussen druk en spanning in de analysator en tussen stromingsnelheid en stroomsterkte. De bijbehorende grafiek toont het meetgebied, dat wordt verkregen door het gebruik van vijf druk- en zes stromings-schaalfactoren. Hoe men de schaalfactoren ook kiest, de aflezing van druk en stroming in de analysator heeft altijd de juiste waarde, en degene die het toestel bedient hoeft de aflezingen op geen enkele manier om te rekenen.

Een belangrijk gevolg van het gebruik van een ruime keus in schaalfactoren is dat het moeilijk wordt om geijkte regelingen voor de pipelementen te maken. In plaats daarvan wordt een eenvoudig systeem van initiële instellingen gebruikt. Een referentiespanning wordt beurtelings aangelegd aan ieder pipelement dat voor een bepaalde studie wordt gebruikt en dit wordt dan zo ingesteld, dat het element een doorstromingsnelheid (Q) vertoont, die overeenkomt met de gewenste hydraulische weerstand (R) en de verschillendruk (ΔP), welke gelijk is aan de referentiespanning, volgens de betrekking

$$Q = (\Delta P/R)^{0,54}$$

De waarden van Q als functie van R zijn gegeven in een aantal tabellen, die met de analysator worden meegeleverd. Er is een tabel voor iedere schaalfactor voor de druk.

2.3 De complete analysator

De analysatorapparatuur is gebaseerd op het gebruik van een hoofdpaneel en een aantal hulppanelen. Het hoofdpaneel bevat 60 pipelementen, 40 belastingelementen en 8 broneenheden, te zamen met het schakelbord (waarmee de verbindingen worden gemaakt tussen de verschillende analyselementen), de druk en stromingsschema's en andere centrale regelingen. De capaciteit van de analysator wordt uitgebreid door aan de installatie hulppanelen toe te voegen, die elk 30 pipelementen, 20 belastingelementen en 4 broneenheden bevatten. Meeraderige kabels verbinden deze panelen met het hoofdpaneel, dat het regelcentrum vormt voor de gehele analysator.

De WRA analysator werd uitgevoerd met ongeveer gelijke aantallen pipelementen en belastingelementen (100 van elk) en 16 bronnen. De ervaring leerde dat een verhouding van 3 : 2 voor pipelementen en belastingelementen beter zou zijn; deze verhouding is nu inderdaad toegepast. De maximale capaciteit waartoe de analysator kan worden uitgebreid wordt bepaald door de afmetingen van het schakelbord; de huidige capaciteit omvat 300 elementen, nl. 180 pijpen, 120 belastingen en bovendien 24 bronnen.

Indien vereist, wordt een element of broneenheid verbonden met het centrale druk- en stromingscontrolesysteem met behulp van de desbetreffende controleschakelaar. In het geval van de elementen heeft deze schakelaar ook een vóórstand, waarbij het element wordt aangesloten op de referentiedruk. De druk- en stromingswaarden worden digitaal voorgesteld met drie kenmerkende cijfers. Een aftast- en druinrichting maakt het mogelijk om de druk op bepaalde netwerkknoppunten en de doorstroming in bepaalde analyselementen

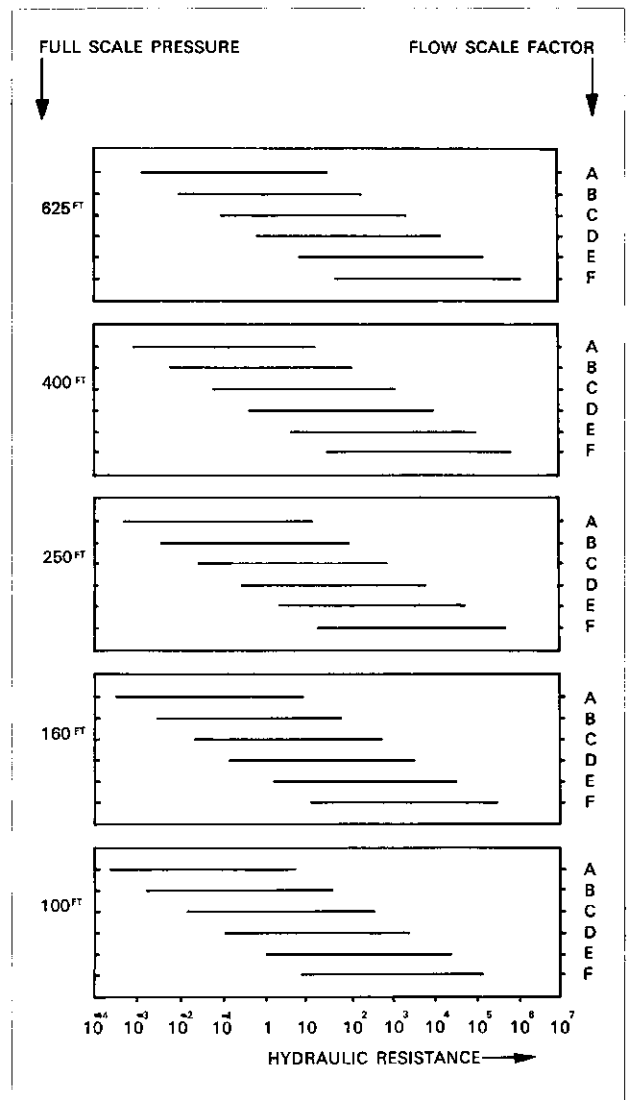
voortdurend vast te leggen met behulp van een elektrische schrijfmachine.

Het regelcentrum in het hoofdpaneel bevat de groepsregeling van de belastingstromen, de meting van de totale stroom in het netwerk en de mogelijkheid om elk gewenst pipelement te controleren op ingangs- of verschuldruk. Het schakelbord-systeem is gebaseerd op het gebruik van uitneembare panelen, zodat men snel van het ene netwerk kan overgaan op het andere.

Het drukreferentieniveau in de analysator kan willekeurig worden gekozen; er is een schakeling aangebracht, die de voorafgekozen waarde optelt bij alle knooppuntsdrukken, zodat deze worden afgelezen of gedrukt ten opzichte van de zeespiegel.

3. De stappen van een analysatorstudie

Een distributiestudie wordt uitgevoerd in drie stappen. Het is niet uitvoerbaar om iedere pijp en belasting in het systeem te simuleren; daarom bestaat de eerste stap in het maken van een vereenvoudigde versie van het netwerk. De pijpweerstand in het netwerk moeten worden berekend en de belastingen op de knooppunten geschat. De eerste stap omvat ook de meting van druk en stromingsnelheid op enkele punten in het systeem. Daarna volgt de tweede stap. Daarbij worden de analysatorelementen en broneenheden vastgelegd in overeenstemming met de gegevens die in de eerste stap zijn verkregen, en worden de verbindingen op een schakelbord ge-



maakt overeenkomstig het vereenvoudigde netwerkschema. De oplossing, die met de analysator wordt verkregen, wordt nu vergeleken met de meetgegevens uit de eerste stap. Pijpen belastingelementen worden nu zodanig bijgesteld dat een aanvaardbare aanpassing wordt verkregen tussen de analysator en het distributiesysteem. Dit proces maakt het soms nodig om enige metingen nog eens te controleren en misschien zelfs te herhalen.

Als bewezen is dat de analysator een voldoende nauwkeurig model van het netwerk is, kan de derde stap beginnen. Deze bestaat ten eerste in het nabootsen op de analysator van de bedrijfsomstandigheden, die ten grondslag liggen aan het probleem dat moet worden onderzocht — bv. een toename van de afname in het net, het breken van een leiding, het uitvallen van een pompstation enz., en ten tweede het gebruik van de analysator om een aanvaardbare oplossing te vinden voor het probleem. De analysator kan het hersenwerk van de distributiespecialist niet vervangen, en kan op zichzelf niet de beste oplossing van een probleem geven. Het is slechts een stuk gereedschap, maar dan toch een zeer waardevol gereedschap in de juiste handen.

Een aantal vragen rijzen bij de beschouwing van de implicaties van de drie analysestappen, en daarvan zullen de belangrijkste nu nader worden bekeken.

Vereenvoudiging van het netwerk. Dit is een essentiële stap, die echter niet te ver moet worden doorgevoerd, omdat te grote vereenvoudiging tot moeilijkheden leidt bij de aanpassing van de analysator aan het netwerk. Hier volgen enkele voorbeelden van vereenvoudigingsmethoden:

1. Twee of meer parallelle leidingen worden vervangen door de hydraulische substitutieweerstand; deze wordt voorgesteld door één enkel pijpelement.
2. Een vertakking van het netwerk wordt geëlimineerd, waarbij de belastingen in de vertakking worden samengevoegd; deze wordt voorgesteld door één enkel belastingelement op het knooppunt van het netwerk en de vertakking.
3. Als opeenvolgende aftakkingen gescheiden zijn door een zeer lage hydraulische weerstand worden ze te zamen genomen en beschouwd als één enkele aftakking.
4. Leidingen met een doorsnede, die kleiner is dan ongeveer één achtste van die van de grootste pijpen in het netwerk, worden geëlimineerd; hun belastingen worden samengevoegd en geplaatst op de knooppunten van de leidingen met het netwerk.

De capaciteit van de analysator. Deze hangt sterk af van de vereenvoudiging van het netwerk. De ervaring opgedaan met de WRA analysator toont aan, dat de capaciteit daarvan (totaal 200 leidingen en belastingen) in de meeste gevallen toereikend is; er hebben zich echter gevallen voorgedaan waarbij een capaciteit van 250 elementen (150 pijpen en 100 belastingen) de hoeveelheid werk voor de vereenvoudiging van het netwerk zou hebben beperkt. Het is waarschijnlijk juist om te stellen dat een analysator voor een dienstverlenend bureau een grotere capaciteit behoort te hebben dan die voor een enkel waterleidingbedrijf. De waterdistributienetten van de grotere steden in Engeland zijn verdeeld in zones, en elke zone kan gewoonlijk apart worden geanalyseerd. Dit verklaart de betrekkelijk kleine huidige capaciteit van de analysators in Birmingham en de MWB (resp. 100 en 150 elementen). Omgekeerd zal een groot netwerk gemakkelijker te vereenvoudigen zijn dan een kleiner, omdat de belangrijkste leidingen door hun afmetingen direct in 't oog springen; in een kleiner net is de verscheidenheid van leidingdoorsneden veel kleiner en daardoor wordt het vaststellen van de hoofdadere moeilijker.

Schatting van weerstand en belasting. De weerstand van iedere leiding in het vereenvoudigde netwerk wordt berekend uit de lengte, diameter en de geschatte ruwheidscoëfficiënt. De laatstgenoemde hangt af van de ouderdom en het materiaal van de leiding, alsmede van het soort water. Uit de aard

der zaak kan dit slechts een schatting zijn en het kan best nodig zijn om de waarden van de leidingweerstand te herzien als de analysator aangepast wordt aan het netwerk.

In Engeland wordt het huishoudelijke waterverbruik niet gemeten en daarom moet het ongemeten verbruik op ieder knooppunt van het vereenvoudigde netwerk worden geschat. Een geschikte methode is om van de bekende totale gemiddelde dagafname het totale gemeten verbruik af te trekken, waarna het totale huishoudelijke verbruik en verbruik ten gevolge van lekken overblijven. Deelt men dit door het totale oppervlak dat door het net wordt bestreken (of door het aantal inwoners of het aantal huizen) dan krijgt men de verbruikswaarde per oppervlakte-eenheid (of per hoofd of per huis). Daarna worden schattingen gemaakt van het oppervlak van het toeleveringsgebied, het aantal inwoners en het aantal huizen, dat door iedere aftakking van water wordt voorzien. Deze geven dan, vermenigvuldigd met de verbruikswaarde, het ongemeten verbruik. Het gemeten verbruik wordt daarbij opgeteld, zodat men tenslotte de geschatte afname krijgt op iedere aftakking.

Metingen aan het distributienet. Een bepaald aantal praktijkmetingen is noodzakelijk om te controleren in hoeverre de simulatie klopt. Deze meetgegevens moeten de drukken en stromingen van alle bronnen bevatten, die het net voeden, en de drukken aan ten minste acht aftakkingen of 10 % van het totaal (neem het grootste van beide getallen) moeten worden gemeten. De aftakkingen die voor een meting worden uitgekozen moeten zo gelijkmatig mogelijk over het net verdeeld zijn. Alle meetgegevens die zo worden verkregen moeten gelden voor hetzelfde tijdstip. Als men daarbij op hetzelfde tijdstip ook nog waarnemingen kan doen betreffende de stroming in enkele van de hoofdleidingen van het net, zal dat van groot nut zijn bij de analyse.

Het aanpassen van analysator en net. Als de oplossing door de analysator beschikbaar is wordt deze vergeleken met de metingen in het net. Gewoonlijk is het nodig de instellingen van enige pijpelementen en belastingelementen te veranderen, omdat deze instellingen gebaseerd zijn op schattingen. Bij deze wijzigingen moet men voorzichtig te werk gaan en elke wijziging moet aannemelijk worden gemaakt. Aangezien de totale afname gewoonlijk nauwkeurig bekend is, betekent een verhoging van de ene belasting een verlaging van een andere belasting. Een grote toename in leidingweerstand kan het enige middel zijn om de aanpassing te verbeteren; deze leiding moet dan worden onderzocht op mogelijke obstructies zoals gedeeltelijk dichtstaande afsluiters enz. Gewoonlijk is het mogelijk om de meeste knooppuntsdrukken aan te passen binnen 1 of 2 % van de volle schaalwaarde. Met het oog op de beperkte nauwkeurigheid van de metingen in het net moet men de aanpassing natuurlijk niet overdrijven. Indien mogelijk kan men de simulatie controleren door het netwerk zonder wijzigingen voor een tweede stel voorwaarden — bv. geldend op een ander tijdstip van de dag — te laten oplossen, waarvoor dan natuurlijk meetgegevens van dat tijdstip nodig zijn.

Nauwkeurigheid van de analysator. De fouten die optreden in de oplossingen vinden hun oorzaak in de benaderingen, die inherent zijn aan de werking van het pijpelement en in de storende invloeden van de stroom- en spanningsmeters op het netwerk. Deze fouten zijn aanvaardbaar als men ze vergelijkt met de nauwkeurigheid van de metingen in het distributienet. De oplossing van standaardnetwerken waarvan de juiste oplossingen bekend zijn, toont aan dat de analysator in de meeste gevallen de knooppuntsdruk binnen 1 % van de volle schaalwaarde van de druk benadert. Evenzo blijken de meeste leidingsstromen een onnauwkeurigheid te hebben van minder dan 1 % van de totale stroming in het netwerk.

Economische overwegingen. Naast de analogonrekenmachine bestaat er nog een rekentuig, dat zijn waarde voor distributieanalyse heeft bewezen. Dat is de grote digitale computer voor algemene toepassingen, die geprogrammeerd wordt voor het

oplossen van een netwerk door middel van de snelle herhaling van een bepaalde rekenmethode. Vergelijkt men beide technieken, dan heeft elk zijn voor- en nadelen. De analysator is gemakkelijk te begrijpen en te bedienen; de schakel tussen mens en machine is klein en direct, waardoor de gevolgen van wijzigingen in het netwerk onmiddellijk opvallen. Anderzijds moet men tijd besteden aan het instellen van de analysator voor het oplossen van een bepaald netwerk; het feit dat deze machine alleen geschikt is voor speciale toepassingen is economisch gezien een nadeel. Het gebruik van de digitale computer is niet beperkt tot het uitvoeren van netwerkanalyses en de netwerkgegevens kunnen snel in de computer worden gevoerd. Maar de schakel tussen de gebruiker en het rekentuig is bijlange na niet zo kort als in het geval van de analysator, met het gevolg dat een verkenningstudie van een netwerk moeizaam en kostbaar is als deze digitaal wordt uitgevoerd.

Vatten we de vergelijking in 't kort samen, dan kan worden gezegd dat de analysator het meest geschikt is om de beste oplossingen te vinden met feitelijk onvoldoende gegevens, en voor het snel onderzoeken van problemen, die samenhangen met de uitbreiding van netten. Het rekentuig beantwoordt het best aan zijn doel als het wordt gebruikt voor routineberekeningen aan netten (speciaal in 't geval van grote netten) met zeer veel invoergegevens, en als de hoofdeigenschappen van een net bekend zijn uit voorafgaande studies op een analysator.

De BAC analysator heeft verschillende eigenschappen — bv. de uitvoering met aftast- en drukapparatuur — die de analysesnelheid van het apparaat belangrijk verhogen, maar eveneens de prijs. Het gevolg is dat de aankoop van een analysator alleen verdedigbaar is als er voldoende werk is om hem vrijwel continu in bedrijf te houden.

Om de analogonrekenmachinetechniek ter beschikking te stellen van het kleinere waterleidingbedrijf en andere terloopse gebruikers, heeft BAC nu een analysator uitgebracht van het type „Series 2”. Dit apparaat bezit in principe dezelfde eigenschappen als het standaardmodel, maar de prijs is belangrijk lager geworden door het weglaten van die gedeelten, die wel bijdragen tot de analysesnelheid, maar niet tot de analysemogelijkheden.

5. Toekomstige ontwikkelingen

In tegenstelling tot digitale computers waarvan de rekensnelheden gedurende de laatste jaren drastisch zijn toegenomen (waardoor de oplostijd voor distributienetten is teruggebracht van uren tot seconden) werken de analogonrekenmachines al op maximale snelheid. Dat komt omdat hun werking in principe ogenblikkelijk is. Het zou natuurlijk mogelijk zijn om de insteltijd voor pijpelementen en belastingelementen te verkorten, maar dat zou de prijs van deze computer voor speciale toepassingen nog hoger maken.

De toekomstige ontwikkeling van de analogonrekenmachinetechniek ligt waarschijnlijk meer in het vlak van de toepassingen dan in de verfijning van de techniek zelf. Op het ogenblik is de analysator in wezen een ontwerp gereedschap dat apart wordt gebruikt, d.w.z. er is geen directe verbinding met het échte net. Het is mogelijk dat de analysator in de toekomst met het net wordt verbonden door telemetrische invoer van drukken op belangrijke knooppunten, zodat de analysator aangepast is aan het net. De analysator blijft aan het net aangepast door het — waarschijnlijk automatisch — bijregelen van de belastingen op deze knooppunten. De analysatorgegevens kunnen dan worden gebruikt als basis voor de regeling van pompstations, die het net voeden. Het is eveneens mogelijk dat een aanvullende computer in de installatie kan worden opgenomen voor de berekening van een optimaal gebruik van de pompstations. De analogonrekenmachine heeft ongetwijfeld bewezen een uiterst effectief instrument te zijn in handen van de distributiespecialist, en we mogen dan ook in de komende jaren een verdere uitbreiding van het toepassingsgebied verwachten zoals in het voorgaande is beschreven.