

Zijn er naast capaciteiten, weerstanden, zelfinducties en wederzijdse inducties nog andere, soortgelijke grootheden denkbaar? *)

door B. D. H. Tellegen

Natuurkundig Laboratorium der N.V. Philips' Gloeilampenfabrieken
Eindhoven - Nederland

Voordracht gehouden voor het Nederlandsch Radiogenootschap op 25 Febr. 1948

SUMMARY

Besides the capacitor, the resistor, the inductor, and the ideal transformer a fifth, linear, constant, passive network element is conceivable which violates the reciprocity relation and which is defined by (10). We have denoted it by the name of "ideal gyrator". By its introduction the system of network elements is completed and network synthesis is much simplified. The gyrator can be realized by means of a medium consisting of particles carrying both permanent electric and permanent magnetic dipoles or by means of a gyromagnetic effect of a ferromagnetic medium.

1. Inleiding

Het natuurkundig onderzoek van elektrische verschijnselen heeft geleid tot het doen ontstaan van verschillende toestellen, welke naderhand door de techniek zijn gebruikt als elementen om elektrische netwerken op te bouwen.

Uit de electrostatica is de *condensator* voortgekomen, gekenmerkt door

$$i = C \frac{dv}{dt}, \quad (1)$$



Fig. 1.
Condensator.

*) De inhoud van dit artikel is grotendeels een iets verkorte bewerking van een artikel in de Philips Research Reports¹⁾, waarin ook verdere onderzoekingen op dit gebied zullen worden gepubliceerd.

waarin i de stroom en v de spanning voorstelt. C heet de *capaciteit* van de condensator en is steeds positief.

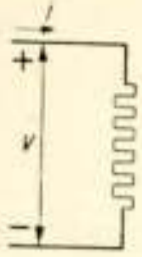


Fig. 2.
Weerstand.

Uit het onderzoek van stationnaire stromen is de *stroomgeleider* voortgekomen, gekenmerkt door

$$v = Ri. \quad (2)$$

R heet de *weerstand* van de stroomgeleider en is steeds positief.

Uit het electromagnetisme is de *spoel* voortgekomen, gekenmerkt door

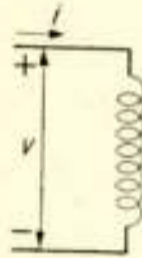


Fig. 3.
Spoel.

$$v = L \frac{di}{dt}. \quad (3)$$

L heet de *zelfinductie* van de spoel en is steeds positief.

Het stelsel van twee *gekoppelde spoelen* wordt gekenmerkt door

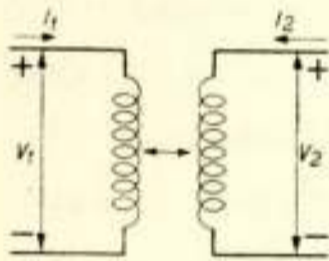


Fig. 4.
Twee gekoppelde
spoelen.

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt}, \\ v_2 &= M \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

M heet de *wederzijdse inductie* en wordt begrensd door $M^2 \leq L_1 L_2$.

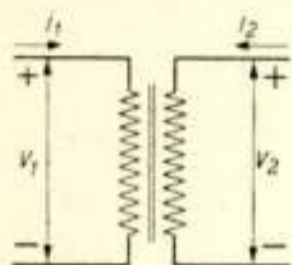
Bij de verdere ontwikkeling der natuurkunde zijn niet méér soortgelijke toestellen ontstaan. De techniek heeft zich daarna van deze toestellen meester gemaakt om er elektrische netwerken mee op te bouwen en wij willen beginnen met in enkele trekken het beeld te schetsen van wat de techniek daarmee heeft gedaan.

1,1. De netwerkelementen

Wat de netwerkelementen zelf betreft, vele soorten condensatoren, weerstanden en spoelen zijn geconstrueerd voor verschillende doeleinden: met verschillende waarden, bruikbaar voor verschillende stromen en spanningen, vaste en variabele. Spoedig werd ontdekt dat elementen gekenmerkt door (1), (2) of (3) beschouwd moeten worden als *ideale elementen*, die practisch

alleen benaderd kunnen worden. Iedere condensator, bijv., heeft wat verliezen en wat zelfinductie, en soortgelijke opmerkingen gelden voor weerstanden en spoelen.

Het stelsel van twee gekoppelde spoelen gaf aanleiding tot een ingrijpender ontwikkeling. Door de koppelingsfactor, $\frac{M^2}{L_1 L_2}$, zo dicht mogelijk gelijk aan één te maken ontstond de transformator, die in het ideale geval gekenmerkt wordt door



$$\left. \begin{aligned} i_1 &= -u i_2, \\ v_2 &= u v_1. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

u heet de *transformatieverhouding*.

Fig. 5.
Ideale
transformator.

Voor algemene beschouwingen over netwerken kunnen wij beter deze *ideale transformator* als het vierde netwerkelement beschouwen dan het algemene stelsel van twee gekoppelde spoelen.

Wat de energie betreft: een ideale condensator en een ideale spoel kunnen alleen energie ophopen; een ideale weerstand kan alleen energie dissiperen; een ideale transformator kan echter energie noch ophopen, noch dissiperen, maar kan alleen energie doorgeven, daar volgens (5) de opgenomen energie steeds nul is:

$$i_1 v_1 + i_2 v_2 = 0. \quad (6)$$

1,2. De netwerken

Door de vier soorten netwerkelementen met elkaar te verbinden kunnen netwerken worden opgebouwd, welke aanleiding geven tot verschillende problemen. Wanneer gegeven stroom- of spanningsbronnen in een gegeven netwerk aanwezig zijn, kunnen wij vragen naar de stromen en spanningen van de verschillende takken van het netwerk. Deze problemen worden aangeduid met de naam *netwerkanalyse* en kunnen in het algemeen als opgelost worden beschouwd.

Voor technische doeleinden zijn de netwerken echter vaak niet gegeven, doch wordt gevraagd netwerken op te bouwen met bepaalde eigenschappen. De hieruit voortkomende problemen dragen de naam van *netwerksynthese* en wij zullen deze iets nauwkeuriger beschouwen.

Om deze problemen op te lossen worden de netwerken op verschillende wijzen ingedeeld. In de eerste plaats worden de

netwerken ingedeeld naar het aantal klemmen, welke wij steeds op zodanige wijze tot paren verenigd zullen onderstellen dat de stroom die bij een klem van een paar wordt toegevoerd steeds gelijk is aan de stroom die bij de andere klem van hetzelfde paar wordt afgevoerd. Wij onderscheiden zo tweepolen, vierpolen, enz. In de tweede plaats worden de netwerken ingedeeld in weerstandsloze netwerken en netwerken met weerstand. In de derde plaats worden de netwerken, naar de orde van de differentiaalvergelijking waartoe zij aanleiding geven, ingedeeld in netwerken van de nulde orde, eerste orde, enz.

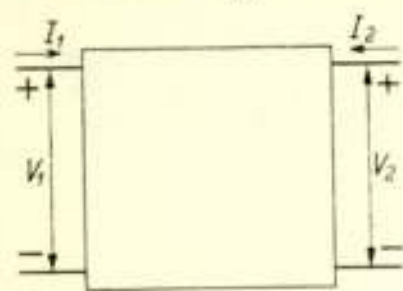
Een tweepool wordt gekenmerkt door één betrekking tussen de spanning en de stroom van de klemmen, welke in complexe vorm bijv. geschreven kan worden als



$$V = Z I. \quad (7)$$

De tweepoolparameter Z heet de impedantie van de tweepool en is een functie van de frequentie.

Fig. 6.
Tweepool.



Een vierpool wordt gekenmerkt door twee betrekkingen tussen de spanningen en de stromen van de klemmen, welke in complexe vorm bijv. geschreven kunnen worden als

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= Z_{11} I_1 + Z_{12} I_2, \\ V_2 &= Z_{21} I_1 + Z_{22} I_2. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Fig. 7.
Vierpool.

De vierpoolparameters Z_{11} , Z_{12} , Z_{21} , Z_{22} zijn functies van de frequentie.

Een $2n$ -pool wordt zo gekenmerkt door n soortgelijke betrekkingen tussen de spanningen en de stromen van de klemmen. De overeenkomstige parameters van twee $2n$ -polen met verschillende netwerken kunnen gelijke functies van de frequentie zijn. Zulke $2n$ -polen heten *gelijkwaardig*.

Het probleem van de netwerksynthese kan worden geformuleerd als het zoeken van de noodzakelijke en voldoende voorwaarden waaraan een stelsel functies van de frequentie moet voldoen, opdat deze de parameters van een $2n$ -pool kunnen voorstellen die is op te bouwen met behulp van bovengenoemde vier soorten netwerkelementen, en voorts het aangeven bij ieder zo'n stelsel parameters van tenminste één wijze waarop een bijbehorend netwerk kan worden opgebouwd.

Wanneer echter gevraagd wordt een $2n$ -pool met bepaalde eigen-

schappen op te bouwen, kunnen de $2n$ -poolparameters in de regel niet als gegeven worden beschouwd, doch moeten deze eerst worden bepaald. Wij zullen nu in het algemeen des te beter aan bepaalde eisen kunnen voldoen, naarmate wij bereid zijn het netwerk ingewikkelder te maken. Daar de indeling van de netwerken naar de orde in algemene trekken een indeling naar de ingewikkeldheid is, kan het probleem van de netwerksynthese ook worden geformuleerd als het zoeken van de parameters van de algemeenste $2n$ -polen van een bepaalde orde die zijn op te bouwen met behulp van de vier soorten netwerkelementen, en het aangeven bij ieder zo'n stelsel parameters van tenminste één wijze waarop een bijbehorend netwerk kan worden opgebouwd.²⁾

Het synthese-probleem is voor beide betekenissen opgelost voor weerstandsloze tweepolen, voor weerstandsloze vierpolen en voor tweepolen met weerstand. Voor vierpolen met weerstand is het alleen in de eerste betekenis opgelost.

De synthese van weerstandsloze tweepolen is tot stand gebracht door Foster³⁾, de synthese van weerstandsloze vierpolen van een bepaalde orde door de schrijver²⁾, de synthese van tweepolen met weerstand door Brune⁴⁾. De resultaten tot een zekere orde zijn weergegeven in fig. 8. Bij de weerstandsloze tweepolen bestaan van iedere orde twee soorten, waarbij wij in bovengenoemde zin gelijkwaardige tweepolen als één soort vormende beschouwen. Bij de weerstandsloze vierpolen bestaan, de nulde orde uitgezonderd, van oneven orde vier soorten en van even orde vijf soorten. Bij de tweepolen met weerstand bestaan van de 0e, 1e, 2e, 3e, 4e orde respectievelijk 1, 2, 5, 12, 29 soorten.

De synthese van vierpolen met weerstand is onderzocht door Gewertz⁵⁾, die er in slaagde om nodige en voldoende voorwaarden voor de parameters te vinden. Het probleem om alle vierpolen van een bepaalde orde te vinden werd door hem niet aangepakt. Wij zouden dus kunnen trachten dit op te lossen. Dit is van groot technisch belang, daar vierpolen een uitgebreide toepassing vinden. Wij zagen echter dat zowel de synthese van weerstandsloze vierpolen als die van tweepolen met weerstand ingewikkelder is dan de synthese van weerstandsloze tweepolen, en dus moeten wij verwachten dat de synthese van vierpolen met weerstand nog ingewikkelder zal zijn.

2. *Probleemstelling — de ideale gyrator*

Laten wij om deze redenen, voordat wij dit probleem trachten op te lossen, een ogenblik stil staan en omkijken. Wat doen

Orde	Weerstandsloze tweepolen	Weerstandsloze vierpolen			Tweepolen met weerstand				
0									
1									
2									
3									
Orde	ledere	Nul	Oneven	Even (>0)	0	1	2	3	4
Aantal	2	3	4	5	1	2	5	12	29

Fig. 8.

Synthese van weerstandsloze tweepolen, weerstandsloze vierpolen en tweepolen met weerstand.

wij eigenlijk? De vier netwerkelementen danken hun ontstaan aan de natuurkunde, en de techniek heeft deze zonder meer geaccepteerd. Het is de moeite waard ons af te vragen, of het stelsel van de vier netwerkelementen een volledig stelsel is. De natuurkundige heeft geen reden deze vraag te stellen. Hij onderzoekt de verschijnselen van de natuur die zich aan hem voordoen. Voor de technicus, die bruikbare systemen wil scheppen, is deze vraag echter van de grootste betekenis, en dus stellen wij ons de vraag: „Zijn er naast de vier bekende netwerkelementen nog andere, soortgelijke elementen denkbaar?”

Op het eerste gezicht lijkt deze vraag vrij vaag: wat is soortgelijk? — wat is denkbaar? De vraag blijkt echter een zeer duidelijke betekenis te hebben indien wij letten op de methoden en resultaten van de netwerksynthese. Deze berusten op het eerst zoeken van algemene eigenschappen van $2n$ -polen die opgebouwd zijn uit de vier bekende netwerkelementen, en het daarna trachten iedere $2n$ -pool die deze eigenschappen bezit te verwezenlijken met behulp van deze elementen. Deze eigenschappen zijn:

- 1) het verband tussen de spanningen en de stromen van de klemmen wordt gevormd door een stelsel van de gewone *lineaire* differentiaalvergelijkingen met
- 2) *constante* coëfficiënten;
- 3) de $2n$ -pool is *passief*, d.w.z. hij kan geen energie leveren;
- 4) de *reciprociteitsbetrekking*.

Deze laatste eigenschap wordt uitgedrukt door de gelijkheid van die coëfficiënten van de vierpoolvergelijkingen welke symmetrisch liggen t.o.v. de hoofddiagonaal indien deze vergelijkingen de beide spanningen uitdrukken in de beide stromen of omgekeerd en de positieve zin van de spanningen en de stromen overeenkomt met die van fig. 7. In (8) is dus $Z_{21} = Z_{12}$ en ook (4) levert een voorbeeld van deze vorm van de reciprociteitsbetrekking. Indien echter de stroom van een klemmenpaar en de spanning van het andere klemmenpaar worden uitgedrukt in de spanning van het eerste paar en de stroom van het tweede paar, wordt de reciprociteitsbetrekking uitgedrukt door de tegengestelde gelijkheid van de overeenkomstige coëfficiënten. Uit (8) volgt nl. dat

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \left(\frac{1}{Z_{11}} \right) V_1 - \left(\frac{Z_{12}}{Z_{11}} \right) I_2, \\ V_2 &= \left(\frac{Z_{21}}{Z_{11}} \right) V_1 + \left(Z_{22} - Z_{21} \frac{Z_{12}}{Z_{11}} \right) I_2. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

De vergelijkingen (5) geven een voorbeeld van deze vorm van de reciprociteitsbetrekking.

De bovengenoemde onderzoeken over netwerksynthese tonen aan dat iedere tweepool en iedere vierpool welke deze vier eigenschappen bezit verwezenlijkt kan worden door een netwerk opgebouwd uit de vier elementen.

Vragen wij bijv. naar de tweepolen met weerstand van de eerste orde, dan kunnen wij voor het verband tussen stroom en spanning opschrijven

$$a_0 \frac{di}{dt} + a_1 i = b_0 \frac{dv}{dt} + b_1 v.$$

Dit is een *lineaire* differentiaalvergelijking met *constante* coëfficiënten van de *eerste orde*. Uit de *passiviteit* is af te leiden dat de coëfficiënten alle hetzelfde teken hebben. Het blijkt nu dat deze tweepool te verwezenlijken is met een van beide schakelingen voor tweepolen met weerstand van de eerste orde uit fig. 8, en wel met de eerste als $\frac{a_0}{b_0} < \frac{a_1}{b_1}$ en met de tweede als

$$\frac{a_0}{b_0} > \frac{a_1}{b_1}.$$

Op soortgelijke wijze is dit voor alle tweepolen en vierpolen aan te tonen. Het lijkt onwaarschijnlijk dat dit voor $2n$ -polen met $n > 2$ anders zou zijn. Indien wij ons dus beperken tot $2n$ -polen die de vier genoemde eigenschappen bezitten is het antwoord op onze hoofdvraag negatief: er zijn geen andere, soortgelijke netwerkelementen denkbaar. Indien wij de mogelijkheden willen uitbreiden, moeten wij een of meer van de vier eigenschappen laten vallen.

Laten wij de eerste eigenschap, de lineariteit, vallen, dan zal het beginsel van superpositie niet langer gelden en krijgen de systemen veel ingewikkelder eigenschappen. Wij willen deze eigenschap dus behouden.

Laten wij de tweede eigenschap, de constantheid, vallen, dan

kunnen de coëfficiënten functies van de tijd worden, bijv. periodieke functies. De wet van behoud van frequentie zal dan niet meer gelden en dit maakt de eigenschappen van de systemen ook veel ingewikkelder. Wij willen deze tweede eigenschap dus eveneens behouden.

Laten wij de derde eigenschap, de passiviteit, vallen, dan moet het systeem een of andere energiebron bevatten. Versterkbuizen, bijv., waarvan de eigenschappen bij het versterken van kleine trillingen beschreven worden door lineaire vergelijkingen met constante coëfficiënten, hebben een gelijkspanningsbron van energie nodig en vormen dus ingewikkelder elementen dan de tot nu toe beschouwde passieve elementen. Dus willen wij deze derde eigenschap ook behouden.

De vierde eigenschap, de reciprociteit, is echter van veel minder belang dan de andere drie. Een $2n$ -pool die de eerste drie eigenschappen bezit, doch de vierde niet, kan terecht gelijksoortig worden genoemd aan $2n$ -polen welke uit de vier bekende netwerkelementen zijn opgebouwd. Dus lijkt het de moeite waard te onderzoeken waar wij toe geleid worden indien wij vasthouden aan de eerste drie eigenschappen maar de vierde laten vallen.

Wij zullen een nieuw soort netwerkelement nodig hebben om deze $2n$ -polen te kunnen verwezenlijken, in het bijzonder zullen wij een element nodig hebben dat niet voldoet aan de reciprociteitsbetrekking. Deze eis heeft geen betekenis voor een tweepoolelement, zoals C , R en L , dus moeten wij zoeken naar een nieuw vierpoolelement. De eenvoudigste soorten vierpolen zijn de weerstandsloze vierpolen van de nulde orde. Dat zijn vierpolen waarvoor $i_1 v_1 + i_2 v_2 = 0$, daar dit uitdrukt dat energie noch gedissipeerd noch opgehoopt kan worden. De ideale transformator, waarvan de vergelijkingen door (5) worden gegeven,

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= -u i_2, \\ v_2 &= u v_1, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

is een voorbeeld van zo'n vierpool, welke tevens aan de reciprociteitsbetrekking voldoet. Een andere dergelijke vierpool, welke echter niet aan de reciprociteitsbetrekking voldoet, is een vierpool gekenmerkt door

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= -s i_2, \\ v_2 &= s i_1. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Inderdaad volgt uit (10) dat $i_1 v_1 + i_2 v_2 = 0$, terwijl de coëffi-

cienten van (10) niet gelijk zijn, zoals de reciprociteitsbetrekking eist, doch tegengesteld gelijk.

Om later te vermelden redenen zullen wij zo'n vierpool aanduiden met de naam van *ideale gyrator*. Wij zullen de ideale gyrator opvatten als een vijfde netwerkelement.

3. Eigenschappen van de ideale gyrator

De ideale gyrator heeft de eigenschap dat hij een stroom in een spanning „gyreert”, en omgekeerd. De coëfficiënt s , die de dimensie van een weerstand heeft, noemen wij de *gyratieweerstand*, terwijl wij $\frac{1}{s}$ de *gyratiegeleiding* noemen. In schema's

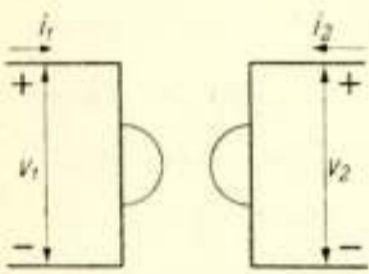


Fig. 9.

Symbol voor de ideale gyrator.

zullen wij de gyrator voorstellen door het symbool van fig. 9.

De volgende eigenschappen van de ideale gyrator kunnen gemakkelijk uit (10) worden afgeleid.

Laten wij de secondaire klemmen open, $i_2 = 0$, dan worden de primaire klemmen kortgesloten, $v_1 = 0$, en omgekeerd. Verbinden wij de secondaire klemmen door een zelfinductie L , resp. capaciteit C , dan vinden wij tussen de primaire klemmen een capaciteit $C = \frac{L}{s^2}$, resp. zelfinductie $L = s^2 C$. In het alge-

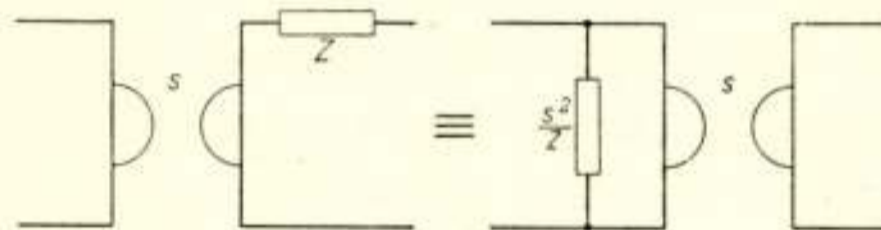


Fig. 10.

Een impedantie in serie met een klemmenpaar van een ideale gyrator komt overeen met een andere impedantie parallel aan het andere klemmenpaar.

meen, verbinden wij de secondaire klemmen door een impedantie Z , dan vinden wij tussen de primaire klemmen een impedantie $\frac{s^2}{Z}$. Een impedantie Z in serie met, resp. parallel aan,

de secondaire klemmen komt overeen met een impedantie $\frac{s^2}{Z}$ parallel aan, resp. in serie met, de primaire klemmen (fig. 10).

Twee ideale gyratoren in cascade vormen een ideale transformator; een ideale gyrator en een ideale transformator in cascade vormen een andere ideale gyrator.

4. Netwerken met ideale gyratoren

Zouden wij beschikken over gyratoren, dan zouden wij alle netwerkproblemen van de techniek opnieuw kunnen onderzoeken. Daar de uitbreiding van het stelsel van vier netwerkelementen tot vijf relatief groot is, kunnen wij verwachten dat dan voor de meeste netwerkproblemen belangrijk betere oplossingen mogelijk zouden zijn. Als voorbeeld noemen wij het systeem van twee gelijke, critisch gekoppelde, afgestemde kringen, zoals gewoonlijk gebruikt worden in tussenfrequentie-versterkertrappen van superheterodyneontvangers. Worden deze op geschikte wijze gekoppeld via een gyrator en een weerstand, dan kan de versterking per trap, vergeleken met die van inductief of capacitef gekoppelde kringen onder soortgelijke omstandigheden, een factor $1 + \sqrt{2}$ groter zijn.

Alvorens te onderzoeken hoe een ideale gyrator verwezenlijkt of benaderd zou kunnen worden, willen wij eerst onze aandacht wijden aan de theorie van netwerken die ideale gyratoren mogen bevatten. Daar de reciprociteitsbetrekking voor de methoden van de netwerkanalyse van ondergeschikte betekenis is, wordt dit deel van de netwerktheorie door de invoering van de gyrator slechts weinig beïnvloed. De netwerksynthese wordt echter in hoge mate beïnvloed en blijkt sterk vereenvoudigd te worden.

De synthese van weerstandsloze tweepolen wordt niet gewijzigd door de invoering van de gyrator. Wij kunnen alleen toevoegen dat de twee soorten tweepolen van een bepaalde orde in elkaar overgaan door deze aan een ideale gyrator te verbinden, zoals boven reeds is vermeld voor de tweepolen van de eerste orde, de L en de C .

De synthese van weerstandsloze vierpolen wordt sterk vereenvoudigd door de invoering van de gyrator. Voor iedere orde zijn er twee soorten, die in elkaar overgaan door een ideale gyrator aan een klemmenpaar van de vierpool te verbinden. In fig. 11 zijn schakelingen voor deze soorten getekend voor de nulde, eerste en tweede orde. Behalve de getekende schakelingen zijn ook hier vele gelijkwaardige schakelingen mogelijk.

De schakelingen voor de weerstandsloze vierpolen van dezelfde

orde zonder gyrator uit fig. 8 zijn bijzondere gevallen hiervan. Door de gyrationweerstand van een gyrator nul te maken gaat deze nl. over in twee kortgesloten klemmenparen; door de gyrationweerstand oneindig te maken gaat deze over in twee open klemmenparen. Met behulp hiervan ontstaan uit de nulde orde vierpolen van fig. 11 onmiddellijk de nulde orde vierpolen van fig. 8. Door in de eerste orde vierpolen van fig. 11 de gyratoren te vervangen door kortgesloten klemmenparen ontstaan twee van de vier vierpolen van de eerste orde van fig. 8. Door in de eerste orde vierpolen van fig. 11 de C , resp. L , in serie met een

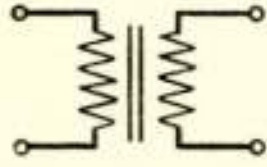
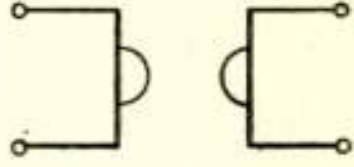
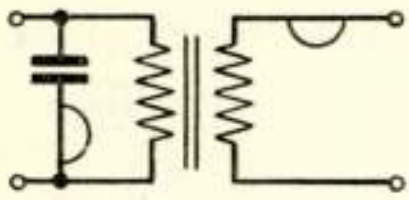
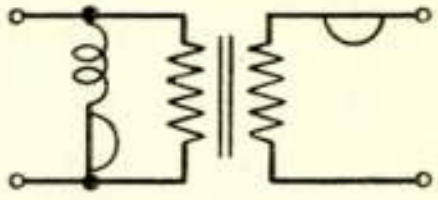
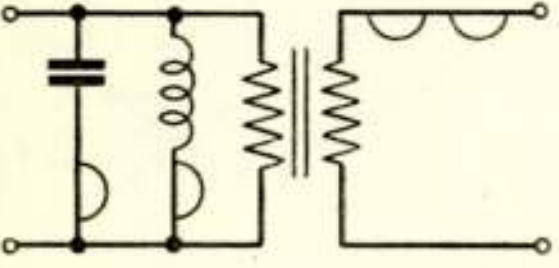
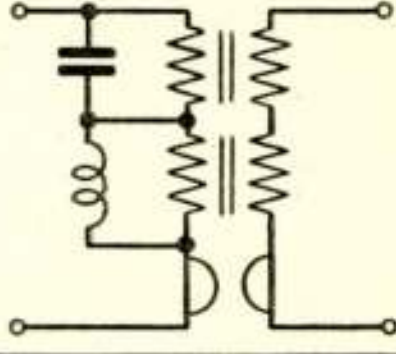
Orde	Weerstandsloze vierpolen met gyrator	
0		
1		
2		
Orde	Iedere	
Aantal	2	

Fig. 11.

Synthese van weerstandsloze vierpolen met gyrator.

gyratortak te vervangen door een L , resp. C , parallel aan de andere gyratortak en daarna de gyrator te vervangen door twee open klemmenparen ontstaan de twee andere van de vier vierpolen van de eerste orde van fig. 8. Op overeenkomstige wijze zijn uit de eerste vierpool van de tweede orde van fig. 11 vier vierpolen van de tweede orde van fig. 8 en uit de tweede vierpool van de tweede orde van fig. 11 één vierpool van de tweede orde van fig. 8 af te leiden.

Wat de synthese van tweepolen met weerstand betreft, door de toevoeging van de gyrator ontstaan daarvoor geen nieuwe mogelijkheden, daar de eigenschappen van een tweepool niet afhangen van de reciprociteitsbetrekking. Het aantal netwerken

dat nodig is om de algemeenste tweepool van een bepaalde orde te verwezenlijken, kan door het gebruik van gyratoren echter tot één worden teruggebracht. Wij komen tot zo'n netwerk voor een tweepool van een bepaalde orde door uit te gaan van een van beide soorten weerstandsloze vierpolen van dezelfde orde en een van beide klemmenparen daarvan te sluiten over een weerstand, waardoor de vierpool in een tweepool overgaat.

Deze resultaten van de netwerksynthese laten zien hoe zeer deze vereenvoudigd wordt door invoering van de ideale gyrator, en tonen aan dat pas door deze aan de vier bekende netwerkelementen toe te voegen een volledig stelsel elementen ontstaat.

5. Verwante problemen bij mechanische en electro-mechanische stelsels

Stelsels waarvan de eigenschappen beschreven worden door lineaire differentiaalvergelijkingen met constante coëfficiënten werden het eerst onderzocht in de mechanica in de theorie van kleine trillingen. Thomson en Tait in hun „Treatise on natural philosophy” geven hiervan een uitvoerig overzicht. In deze vergelijkingen kunnen bijzondere termen voorkomen, door hen „gyroscopische” of „gyrostatiche” termen genoemd, „because they occur when fly-wheels each given in a state of rapid rotation form part of the system by being mounted on frictionless bearings connected through framework with other parts of the system; and because they occur when the motion considered is motion of the given system relatively to a rigid body revolving with a constrainedly constant angular velocity round a fixed axis”.⁶⁾ De vergelijkingen (10) vertonen een grote verwantschap met deze termen. Dit is de reden waarom wij voor het nieuwe netwerkelement de naam gyrator hebben gekozen.

Gyroscopische termen treden ook op in de vergelijkingen van electro-mechanische systemen waarin magnetische krachten een rol spelen, indien wij daarin de stroom door een snelheid en de spanning door een kracht vervangen.⁷⁾⁸⁾ In de vergelijkingen van electro-mechanische systemen waarin elektrische krachten een rol spelen treden bij dezelfde vervanging van elektrische door mechanische grootheden zulke termen niet op. Wanneer wij dus een electro-mechanisch systeem van de ene soort in cascade schakelen met een electro-mechanisch systeem van de andere soort, op zodanige wijze dat de mechanische delen met elkaar worden verbonden, zal een elektrische vierpool ontstaan

waarvoor de reciprociteitsbetrekking niet zal gelden. ⁹⁾¹⁰⁾

Wij zouden dus kunnen trachten de ideale gyrator te benaderen met behulp van electro-mechanische toestellen. Door hun traagheid kunnen zulke toestellen bij hoge frequenties alleen gebruikt worden door gebruik te maken van mechanische resonanties (zoals bij piëzo-kwartsoscillatoren) en dus slechts in een beperkt frequentiegebied. Willen wij een gyrator ontwikkelen welke ook hoogfrequent bruikbaar is over een groot frequentiegebied, dan zullen wij moeten trachten hiervoor een weg te vinden zonder gebruik te maken van electro-mechanische middelen.

6. De oorsprong van de reciprociteitsbetrekking

Daar de gyrator niet voldoet aan de reciprociteitsbetrekking, beginnen wij met ons de oorsprong van deze betrekking voor ogen te stellen in de hoop daardoor een weg te vinden om ons hiervan te bevrijden.

Beschouwen wij eerst twee geïsoleerde geleiders 1 en 2 met potentialen v_1 en v_2 en ladingen Q_1 en Q_2 . De ladingen zijn lineaire functies van de potentialen van de vorm

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= C_{11} v_1 + C_{12} v_2, \\ Q_2 &= C_{21} v_1 + C_{22} v_2. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Om de ladingen met dQ_1 en dQ_2 te laten toenemen moet een energie

$$v_1 dQ_1 + v_2 dQ_2 = (C_{11} v_1 + C_{21} v_2) dv_1 + (C_{12} v_1 + C_{22} v_2) dv_2 \quad (12)$$

worden toegevoerd. Daar dit een totale differentiaal van de elektrische energie U moet zijn, moet

$$\left. \begin{aligned} C_{11} v_1 + C_{21} v_2 &= \frac{\partial U}{\partial v_1}, \\ C_{12} v_1 + C_{22} v_2 &= \frac{\partial U}{\partial v_2}, \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

waaruit wij komen tot

$$C_{21} = \frac{\partial^2 U}{\partial v_1 \partial v_2} = \frac{\partial^2 U}{\partial v_2 \partial v_1} = C_{12}, \quad (14)$$

de reciprociteitsbetrekking van de electrostatica.

Netwerkvergelijkingen zoals (8) worden gewoonlijk geschreven met spanningen en stromen als veranderlijken. Wij kunnen uit (11) hiertoe komen door te differentiëren naar de tijd. Wij krijgen dan

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= C_{11} \frac{dv_1}{dt} + C_{12} \frac{dv_2}{dt}, \\ i_2 &= C_{21} \frac{dv_1}{dt} + C_{22} \frac{dv_2}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Het verband $C_{21} = C_{12}$ drukt hierin de reciprociteitsbetrekking voor netwerken uit.

Gaan wij uit van de vergelijking van twee gekoppelde spoelen

$$\left. \begin{aligned} \Phi_1 &= L_{11} i_1 + L_{12} i_2, \\ \Phi_2 &= L_{21} i_1 + L_{22} i_2, \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

waarin de i 's de stromen en de Φ 's de fluxen door de spoelen voorstellen, dan komen wij op overeenkomstige wijze als boven tot $L_{21} = L_{12}$. Door te differentiëren naar de tijd komen wij tot

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= L_{11} \frac{di_1}{dt} + L_{12} \frac{di_2}{dt}, \\ v_2 &= L_{21} \frac{di_1}{dt} + L_{22} \frac{di_2}{dt}, \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Ook hierin drukt $L_{21} = L_{12}$ de reciprociteitsbetrekking voor netwerken uit.

7. Het ons bevrijden van de reciprociteitsbetrekking

Om ons van de reciprociteitsbetrekking te kunnen bevrijden moeten wij uitgaan van een systeem dat gekenmerkt wordt door een paar grootheden Q_1 , v_1 en een paar grootheden Φ_2 , i_2 . De vergelijkingen worden dan

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= C v_1 + A i_2, \\ \Phi_2 &= A v_1 + L i_2, \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

waarin nu de twee coëfficiënten A aan elkaar gelijk zijn. Door te differentiëren naar de tijd komen wij tot

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= C \frac{dv_1}{dt} + A \frac{di_2}{dt}, \\ v_2 &= A \frac{dv_1}{dt} + L \frac{di_2}{dt}, \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

wat, volgens paragraaf 2, in strijd is met de reciprociteitsbetrekking indien $A \neq 0$.

De vergelijkingen (19) tonen veel overeenkomst met de vergelijkingen (4). Op eenzelfde wijze als wij uit (4) de ideale transformator kunnen benaderen, kunnen wij uit (19) de ideale gyrator benaderen.

8. De verwezenlijking van de gyrator

Ons doel is dus tot een systeem te komen gekenmerkt door

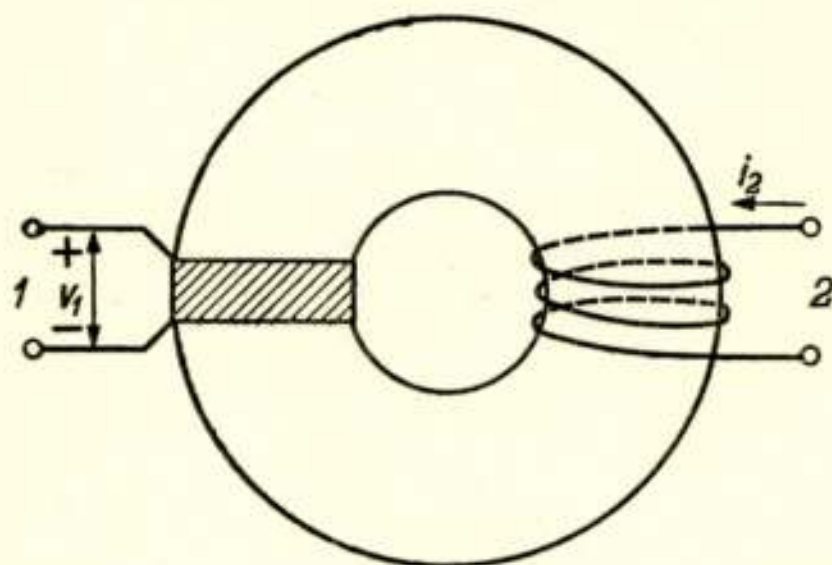


Fig. 12.

Een constructie van de gyrator.

(18). Om te onderzoeken hoe dit bereikt kan worden, laten wij eerst zien dat wij zo'n systeem kunnen opbouwen indien wij zouden beschikken over een medium gekenmerkt door verbanden tussen de veldvectoren van de gedaante

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{D} &= \varepsilon \mathbf{E} + \gamma \mathbf{H}, \\ \mathbf{B} &= \gamma \mathbf{E} + \mu \mathbf{H}. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Laten wij het systeem van fig. 12 beschouwen. Dit bestaat uit twee vlakke, parallelle elektroden, waartussen zich een medium bevindt gekenmerkt door (20). Verder is er een juk van magnetisch materiaal met een zeer grote permeabiliteit, waarom een spoel is gewikkeld. De elektroden vormen de klemmen 1 van het systeem, de spoelenden vormen de klemmen 2.

Als S het oppervlak van de elektroden en van de doorsnede

van het juk voorstelt, zal de lading Q_1 van de electroden bedragen*)

$$Q_1 = SD = \varepsilon SE + \gamma SH \quad (21)$$

en de flux Φ_2 door de spoel zal bedragen

$$\Phi_2 = nSB = \gamma nSE + \mu nSH, \quad (22)$$

waarin n het aantal windingen van de spoel is. De veldvectoren in het medium zullen alle loodrecht op de electroden staan.

Is l de afstand van de electroden, dan zal de spanning v_1 tussen de electroden bedragen

$$v_1 = lE, \quad (23)$$

en de stroom i_2 door de spoel zal bedragen

$$i_2 = \frac{Hl}{n}. \quad (24)$$

Door (23) en (24) in (21) en (22) te substitueren krijgen wij

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= \frac{\varepsilon S}{l} \cdot v_1 + \frac{\gamma n S}{l} \cdot i_2, \\ \Phi_2 &= \frac{\gamma n S}{l} \cdot v_1 + \frac{\mu n^2 S}{l} \cdot i_2. \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

Dit komt overeen met (18).

8,1. *Het medium*

Om media gekenmerkt door (20) te onderzoeken voeren wij eerst de electriche polarisatie \mathbf{P} en de magnetische polarisatie \mathbf{J} in door te stellen

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \quad \text{en} \quad \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mathbf{J},$$

en verder stellen wij $\varepsilon - \varepsilon_0 = \varkappa$ en $\mu - \mu_0 = \chi$.

Door dit in (20) te substitueren krijgen wij

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{P} &= \varkappa \mathbf{E} + \gamma \mathbf{H}, \\ \mathbf{J} &= \gamma \mathbf{E} + \chi \mathbf{H}. \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

Wat stelt dit voor? De coëfficiënten \varkappa en χ zijn gewone electriche en magnetische susceptibiliteiten, de coëfficiënt γ is

*) Wij gebruiken gerationaliseerde Giorgi-eenheden.

iets nieuws. De term $\gamma \mathbf{E}$ drukt uit dat als het medium wordt geplaatst in een electricch veld, het magnetisch gepolariseerd zal worden; de term $\gamma \mathbf{H}$ drukt uit dat als het medium wordt geplaatst in een magnetisch veld, het electricch gepolariseerd zal worden.

Wij kunnen tot een medium met zulke eigenschappen komen, indien de deeltjes van het medium zowel permanente electricche als permanente magnetische dipoolmomenten bezitten welke in alle deeltjes parallel of anti-parallel zijn, en indien deze deeltjes in het medium kunnen draaien. Wordt zo'n medium in een electricch veld gebracht, dan zullen de electricche dipolen worden gericht en worden de magnetische dipolen tevens gericht; het overeenkomstige zal gebeuren als het medium in een magnetisch veld wordt gebracht.

Media met grote, permanente, draaibare, electricche dipolen zijn er in overvloed, bijv. water, dat zijn grote electricche susceptibiliteit behoudt tot zeer hoge frequenties.

Media met permanente, draaibare, magnetische dipolen zijn de paramagnetische stoffen, doch de susceptibiliteit daarvan is zo klein dat deze voor ons doel niet in aanmerking komen. In ferromagnetische stoffen is de susceptibiliteit het gevolg van de instelling van de electronenspins, doch het is moeilijk zich voor te stellen hoe daarmee een electricche dipool gekoppeld zou kunnen worden. Wij kunnen ons echter een medium voorstellen bestaande uit kleine ferromagnetische deeltjes met permanente momenten, kleine permanente magneetjes, gesuspendeerd in een of andere geschikte vloeistof.

Wij verrichtten enige voorlopige proeven in deze richting door magneetstaal te malen en de kleinste deeltjes uit te zeven. Deze bleken onder het microscoop een grootte van ongeveer een micron te hebben. Hiervan werd een stabiele suspensie gemaakt, welke gebracht werd in een reageerbuisje waarom een spoel was gewikkeld. De zelfinductie van deze spoel werd gemeten. Daarna werd de suspensie gemagnetiseerd door deze tussen de polen van een permanente magneet door te gieten, waarna deze weer in het reageerbuisje werd gebracht. De zelfinductie bleek een factor 1,3 groter te zijn geworden. Het is echter vrij moeilijk om tot een suspensie te komen die lange tijd stabiel blijft; dit eist zeer kleine magnetische deeltjes.

9. Een andere verwezenlijking van de gyrator

Daar experimenten in deze richting vrij moeilijk lijken, werd

het de moeite waard geacht eerst te onderzoeken of er essentieel andere mogelijkheden zijn om de gyrator te verwezenlijken. Daar de ideale transformator een zekere overeenkomst vertoont met de ideale gyrator, willen wij ook deze in die onderzoeken betrekken.

Uit het oogpunt van netwerktheorie zijn de ideale transformator en de ideale gyrator netwerkelementen die gedefiniëerd worden door (5) en (10), onafhankelijk van enige methode om deze fysisch te realiseren. Om te onderzoeken hoe dit zou kunnen geschieden, richten wij onze aandacht eerst op de klemmen. Ieder klemmenpaar bestaat uit twee klemmen die op korte afstand van elkaar zijn gelegen. Van deze klemmen gaan twee draden van goed geleidend materiaal uit, die de klemmen verbinden met het eigenlijke element. Binnen het element kunnen deze draden gescheiden of verbonden zijn. Zijn de draden gescheiden, dan kunnen wij de einden vervormen tot electroden. Brengen wij een spanning tussen de klemmen, dan zal een lading Q naar de electroden vloeien en dus een stroom $i = \frac{dQ}{dt}$

ontstaan. Zijn de draden verbonden, dan kunnen wij deze vervormen tot een spoel. Voeren wij een stroom aan de klemmen toe, dan zal een flux Φ door de spoel vloeien en dus een spanning $v = \frac{d\Phi}{dt}$ ontstaan. Wij zullen de eerste soort klemmenparen daar-

om aanduiden met elektrisch en de tweede soort met magnetisch. Naar de soorten klemmenparen van een vierpoolelement zullen wij dit aanduiden met dubbelelectrisch, dubbelmagnetisch of electromagnetisch. Wij zouden nu kunnen trachten zowel de transformator als de gyrator te verwezenlijken met elk van deze drie soorten.

9,1. *Het algemene medium*

Tussen de electroden van een elektrisch klemmenpaar en binnen de spoel van een magnetisch klemmenpaar kunnen wij nu een stoffelijk medium aanbrengeu. De soort vierpool die dan ontstaat zal voor een groot deel afhangen van de eigenschappen van dit medium. Wij vragen daarom naar de algemeenste lineaire betrekkingen waardoor de elektrische en magnetische eigenschappen van een medium fenomenologisch kunnen worden beschreven. Deze betrekkingen zullen bestaan uit betrekkingen tussen de elektrische en

magnetische polarisaties \mathbf{P} en \mathbf{J} en de elektrische en magnetische veldsterkten \mathbf{E} en \mathbf{H} welke deze polarisaties doen ontstaan.

Een voorbeeld van betrekkingen van deze aard wordt gegeven door de vergelijkingen (26), maar deze hebben niet de algemeenste vorm die deze betrekkingen kunnen aannemen. In de eerste plaats kan het medium anisotroop zijn. Voor zo'n medium krijgen de vergelijkingen de vorm waarin de drie componenten van \mathbf{P} en de drie componenten van \mathbf{J} volgens de richtingen van een of ander rechthoekig assenstelsel worden uitgedrukt in de drie componenten van \mathbf{E} en de drie componenten van \mathbf{H} volgens dezelfde richtingen. In de tweede plaats kunnen wij onderstellen dat alle componenten sinusvormig met de tijd veranderen met dezelfde hoekfrequentie ω . De componenten kunnen dan worden voorgesteld door complexe grootheden, waardoor de amplitude en de fase van iedere component kunnen worden uitgedrukt. Wij komen zo tot een stelsel van zes lineaire, homogene vergelijkingen tussen twaalf complexe grootheden en met complexe coëfficiënten.

Daar de ideale transformator en de ideale gyrator geen dissipatie vertonen, zullen wij ons beperken tot media zonder dissipatie. Voor zo'n medium zijn enige eigenschappen van de coëfficiënten af te leiden. Beperken wij ons verder tot twee dimensies, dan komen wij tot vergelijkingen van de volgende gedaante, welke desgewenst eenvoudig tot drie dimensies zijn uit te breiden.

$$\left. \begin{aligned} P_x &= \kappa_{xx} E_x + (\kappa_{xy} + j\lambda_{xy}) E_y + (\gamma_{xx} + j\delta_{xx}) H_x + (\gamma_{xy} + j\delta_{xy}) H_y, \\ P_y &= (\kappa_{xy} - j\lambda_{xy}) E_x + \kappa_{yy} E_y + (\gamma_{yx} + j\delta_{yx}) H_x + (\gamma_{yy} + j\delta_{yy}) H_y, \\ J_x &= (\gamma_{xx} - j\delta_{xx}) E_x + (\gamma_{yx} - j\delta_{yx}) E_y + \chi_{xx} H_x + (\chi_{xy} + j\zeta_{xy}) H_y, \\ J_y &= (\gamma_{xy} - j\delta_{xy}) E_x + (\gamma_{yy} - j\delta_{yy}) E_y + (\chi_{xy} - j\zeta_{xy}) H_x + \chi_{yy} H_y. \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

De coëfficiënten in de hoofddiagonaal zijn reëel, coëfficiënten die symmetrisch t.o.v. de hoofddiagonaal liggen zijn toegevoegd complex.

De coëfficiënten bevatten zes groepen grootheden, aangeduid door $\kappa, \lambda, \gamma, \delta, \chi, \zeta$, welke zes verschillende eigenschappen van het medium voorstellen. Worden de klemmenparen van een vierpool met elkaar gekoppeld met behulp van een van deze eigenschappen van het medium waarmede de vierpool is opgebouwd, dan zal deze vierpool van een bepaalde soort zijn.

In de eerste plaats zal de vierpool al of niet aan de recipro-

citeitsbetrekking voldoen. Om dit te onderzoeken differentiëren wij de vergelijkingen (27) naar de tijd. De linkerzijden worden dan $\frac{dP_x}{dt}$, $\frac{dP_y}{dt}$, $\frac{dJ_x}{dt}$, $\frac{dJ_y}{dt}$ en de rechterzijden mogen wij daar-

bij vermenigvuldigen met $j\omega$. Nu is $\frac{dP}{dt}$ een deel van een stroom,

$\frac{dJ}{dt}$ is een deel van spanning, E is een deel van een spanning

en H is een deel van een stroom. Als wij dus in gedachten houden wat in paragraaf 2 is gezegd over de wijze waarop de reciprociteitsbetrekking uitgedrukt wordt door gelijkheid of tegengesteld gelijkheid van bepaalde vierpoolcoëfficiënten, zien wij dat die vierpolen waarvan de klemmenparen met elkaar gekoppeld zijn met behulp van de eigenschap van het medium voorgesteld door κ , δ of χ , resp. λ , γ of ζ , wel, resp. niet, aan de reciprociteitsbetrekking voor netwerken zullen voldoen.

Verder hebben P en E betrekking op elektrische klemmenparen en J en H op magnetische klemmenparen. Dus, indien een transformator of een gyrator zou kunnen worden verwezenlijkt door twee klemmenparen met elkaar te koppelen met behulp van een van de genoemde zes eigenschappen van het medium, zou

κ	alleen kunnen leiden tot een dubbelelectrische transformator,
λ	tot een dubbelelectrische gyrator,
γ	tot een electromagnetische gyrator,
δ	tot een electromagnetische transformator,
χ	tot een dubbelmagnetische transformator,
ζ	tot een dubbelmagnetische gyrator.

Wij komen dus zowel voor de transformator als voor de gyrator tot drie essentieel verschillende wijzen waarop wij zouden kunnen trachten deze te verwezenlijken.

Laten wij de eigenschappen van het medium thans nader beschouwen. De κ 's stellen de elektrische susceptibiliteit voor en de χ 's de magnetische susceptibiliteit. De γ 's zijn de veralgemening van de coëfficiënt γ van paragraaf 8,1, waarin wij wezen op de experimentele moeilijkheden om een medium met γ -eigenschappen te verwezenlijken. De λ 's en ζ 's geven twee andere wijzen om de gyrator te verwezenlijken.

Zoals wij zagen, zouden de λ 's alleen kunnen leiden tot een dubbelelectrische gyrator. Dubbelelectrische elementen hangen

van de eigenschappen van het elektrische veld af. Het elektrische veld heeft wegens $\text{curl } \mathbf{E} = 0$ slechts beperkte mogelijkheden: spanningsverhoging is onmogelijk in een diëlectricum. Als gevolg daarvan is de enige ideale transformator welke mogelijk is met behulp van een diëlectricum, een transformator één op één, welke nauwelijks de naam transformator verdient. Daar soortgelijke beperkingen verwacht mogen worden bij pogingen om een ideale gyrator te verwezenlijken met behulp van een λ -eigenschap, zullen wij hier niet verder naar zoeken.

Er blijft dus over de ζ -eigenschap van een medium te onderzoeken en de verwezenlijking van een gyrator met behulp daarvan. Om de ζ -eigenschap te onderzoeken onderstellen wij het medium gekenmerkt door χ 's en ζ 's alleen; de κ 's, λ 's, γ 's en δ 's stellen wij nul. De vergelijkingen (27) reduceren dan tot twee, die de componenten van \mathbf{J} uitdrukken in de componenten van \mathbf{H} .

In plaats van deze vergelijkingen te bestuderen is het eenvoudiger de omgekeerde vergelijkingen te bestuderen, waarin de componenten van \mathbf{H} uitgedrukt worden in de componenten van \mathbf{J} . Wanneer wij in deze vergelijkingen j door $\frac{\mathbf{I}}{\omega} \cdot \frac{d}{dt}$ vervangen, komen wij tot vergelijkingen van de vorm

$$\left. \begin{aligned} H_x &= \xi_{xx} J_x + \left(\xi_{xy} - \eta \frac{d}{dt} \right) J_y, \\ H_y &= \left(\xi_{xy} + \eta \frac{d}{dt} \right) J_x + \xi_{yy} J_y. \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

De ξ 's vormen een inverse susceptibiliteit. Wij zijn in het bijzonder geïnteresseerd in de termen met η . Deze termen beschrijven een of ander transversaal effect: een veranderingssnelheid van de magnetische polarisatie, $\frac{dJ}{dt}$, moet een component van de magnetische veldsterkte doen ontstaan loodrecht op $\frac{dJ}{dt}$. Zo'n effect kan worden verwacht in een ferromagnetisch medium dat verzadigd is in de z -richting, bijv. door het in een voldoende sterk veld in de z -richting te plaatsen. De spins van de electronen welke bijdragen tot het ferromagnetisme zullen dan alle parallel in de z -richting staan. Wanneer de magnetisatie verandert in een richting loodrecht op de z -

richting, bijv. in de y -richting, zullen de spins draaien. Daar de electronen niet alleen een magnetisch moment doch ook een mechanisch impulsmoment bezitten, is er een neiging van de spins om daarbij in de x -richting af te wijken. Deze neiging is gelijkwaardig met de werking van een component van het magnetische veld in die richting en kan in evenwicht worden gehouden door een component in tegengestelde richting. Dit effect is verwant aan de verschillende bekende soorten gyromagnetische effecten.

Om dit te onderzoeken werd een kubus van „ferroxcube” voorzien van drie onderling loodrechte jukken, eveneens van ferroxcube, waarom drie spoelen waren gewikkeld.*) Door een van de spoelen werd gelijkstroom gestuurd om het permanente magnetische veld op te wekken. De beide andere spoelen werden daardoor gyromagnetisch gekoppeld, zoals door metingen kon worden aangetoond.

*) Dit samenstel van ferroxcube werd mij geleverd door Dr J. L. Snoek, die ik hiervoor mijn dank betuig.

Literatuur

- 1) B. D. H. Tellegen, The gyrator, a new electric network element, Philips Res. Rep. **3**, 81-101, 1948.
- 2) B. D. H. Tellegen, Netwerksynthese, in het bijzonder de synthese van weerstandsloze vierpolen, T. Ned. Radio-genoot. **9**, 235-258, 1942.
- 3) R. M. Foster, A reactance theorem, Bell Syst. tech. J. **3**, 259-267, 1924.
- 4) O. Brune, Synthesis of a finite two-terminal network whose driving-point impedance is a prescribed function of frequency, J. Math. Phys. **10**, 191-236, 1931.
- 5) C. Gewertz, Synthesis of a finite four-terminal network from its prescribed driving-point functions and transfer function, J. Math. Phys. **12**, 1-257, 1933.
- 6) W. Thomson and P. G. Tait, Treatise on natural philosophy, Part I, section 345 VI.
- 7) H. Poincaré, Etude du récepteur téléphonique, Eclair. électr. **50**, 221-234, 1907.
- 8) Ph. le Corbeiller, Origine des termes gyroscopiques dans les équations des appareils électromécaniques, Ann. P.T.T. **18**, 1-22, 1929.
- 9) H. Jefferson, Gyroscopic coupling terms, Phil. Mag. **36**, 223-224, 1945.
- 10) E. M. McMillan, Violation of the reciprocity theorem in linear passive electromechanical systems, J. acous. Soc. Am. **18**, 344-347, 1946.

Discussie

Ir W. Beukema: Door het laten vallen van de reciprociteitseis blijkt aan de vier netwerkelementen, L , C , R en de ideale transformator, de gyrator te kunnen worden toegevoegd. Uit uw betoog is gebleken dat de ideale transformator verkregen kan worden door het achter elkaar schakelen van twee gyratoren. Vervalt hiermee niet de ideale transformator als netwerkelement?

Prof. Ir B. D. H. Tellegen: Inderdaad zou men dit kunnen zeggen en ook nog L of C kunnen laten vervallen, omdat deze met behulp van een gyrator uit elkaar zijn af te leiden. Wij zouden dan slechts drie netwerkelementen overhouden. Indien wij echter onder netwerkelementen verstaan de tweepolen en vierpolen welke gekenmerkt worden door één parameter, blijven wij bij vijf. Dit is veelal te prefereren.

Ir B. van Dijl: In hoeverre sluiten vergelijkingen als

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{D} &= \varepsilon \mathbf{E} + \gamma \mathbf{H}, \\ \mathbf{B} &= \gamma \mathbf{E} + \mu \mathbf{H}, \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

aan bij de vergelijkingen van Maxwell?

T. De vergelijkingen van Maxwell, in de vorm

$$\begin{aligned} \text{rot } \mathbf{E} &= -\dot{\mathbf{B}}, & \text{rot } \mathbf{H} &= \dot{\mathbf{D}} + \mathbf{S}, \\ \text{div } \mathbf{B} &= 0, & \text{div } \mathbf{D} &= \rho, \end{aligned}$$

gelden universeel. Zij moeten wel onderscheiden worden van de vergelijkingen welke het verband tussen \mathbf{B} , \mathbf{D} en \mathbf{S} enerzijds en \mathbf{E} en \mathbf{H} anderzijds aangeven. Het is dit laatste verband dat wij veralgemeend hebben.

E. J. Post: Kunnen de coëfficiënten γ in het vergelijkingenpaar (20) ook in een isotroop medium bestaan?

T.: Dit is inderdaad mogelijk. De vergelijkingen (20) zijn vectorvergelijkingen en drukken isotropie uit. Ook als men denkt aan een medium met deeltjes die zowel een electricisch als een magnetisch dipoolmoment bezitten, ziet men dat dit een isotroop medium kan zijn.

Ir J. K. Schouten: a) U bent uitgegaan, afgezien van de weerstand, van drie elementen als bouwstenen van een netwerk. Zou het geen zin hebben om meer algemeen uit te gaan van één element, nl. van een vierpool gevormd door een verliesvrije homogene leiding?

b) Uit uw voordracht meen ik op te maken dat u de gyrator beschouwt

als het vierde en laatste element van een bepaald systeem. Is het, in verband met het feit dat hiervoor een bepaald medium nodig is, niet beter dit element onder te brengen bij de andere elementen waarvoor ook een bijzonder medium nodig is, zoals bijv. bij niet-lineaire elementen of negatieve weerstanden?

c) Welke mogelijkheid, zoals bijv. detectie bij een niet-lineair element, kan men verwachten bij dit nieuwe element?

T.: a) De eigenschappen van een verliesvrije homogene leiding zijn ingewikkelder dan die van de beschouwde elementen. Een leiding wordt beschreven door partiële differentiaalvergelijkingen, de beschouwde elementen door gewone. Een leiding is een systeem van oneindig hoge orde en het heeft m.i. geen zin deze als uitgangspunt te nemen.

b) De gyrator is een lineair, constant, passief netwerkelement en behoort dus tot het stelsel van elementen met deze eigenschappen. Dit acht ik van veel groter belang voor de indeling dan de wijze van realiseren.

c) De gyrator levert de mogelijkheid ons vrij te maken van de reciprociteitsbetrekking; in het bijzonder is het daarmee mogelijk een vierpool te construeren waarbij wel energie van de ingang naar de uitgang kan worden doorgegeven, doch de uitgang niet op de ingang terugwerkt. Belangrijker acht ik dat door toevoeging van de gyrator de mogelijkheden voor het construeren van lineaire, constante, passieve netwerken worden vergroot.

Waarnemingen door Amateurs

De commissie van het Genootschap voor contact met radio-amateurs zond het Bestuur in Februari het volgende voorlopige rapport, waarvan de voornaamste punten zijn doorgegeven aan het secretariaat der U.R.S.I.:

1. Na het eerste voorbereidende werk in verband met het op te nemen contact met Radio-amateurs tot het doen van een aantal waarnemingen aan atmosferische invloeden op de voortplanting van radiogolven, komt het de „contact commissie” nuttig voor een aantal punten naar voren te brengen.

Zoals met enige leden van Uw bestuur besproken werd, zijn de voorbereidingen van de te leggen contacten beperkt gebleven tot die van de „skip-distance”. Deze voorbereidingen werden getroffen op het radiostation te Noordwijk.

2. Om een inzicht te verkrijgen in het verloop van de skipdistance moeten signalen van stations onderzocht worden op een afstand kleiner dan 3000 km. Immers van deze stations kan verwacht worden dat zij nog met correspondenten werken op een afstand van 3000 km (of een veelvoud daarvan), terwijl Nora zich reeds in de dode zône bevindt. De ervaring heeft echter geleerd, dat indien deze situatie zich voordoet, er in de regel al op een andere golflengte wordt overgegaan, aangezien de verbinding tussen de correspondenten in dat geval voor commerciële doeleinden niet zeer geschikt meer is.

3. Voor een onderzoek komen het meest in aanmerking stations gelegen in de sector begrensd door de richting naar het Zuiden en het Oosten t.o.v. Nederland, aangezien de stations in meer Noordelijke richtingen sterker aan storingen van magnetische invloeden onderhevig zullen zijn en wellicht beter in latere phase onderzocht kunnen worden. In westelijke richtingen zijn geen stations voor onderzoek aanwezig.

4. Voorlopig werden een aantal commerciële stations onderzocht in de richting van Moskou en in die van Tanger. Hoewel de ervaringen nog als zeer voorlopig beschouwd moeten worden, kan opgemerkt worden, dat de stations in de meeste gevallen moeilijk te indentificeren zijn, daar zij wegens bepaalde dienstregelingen met vaste correspondenten werken en slechts gedurende een zeer korte tijd roepletters geven om daarna in de regel over te gaan op snel morseschrift of telex, multiplex. Daar het indentificeren voor geroutineerde ambtenaren moeilijkheden mede blijkt te brengen en een waardering van de ontvangst van dergelijke uitzendingen meer technische hulpmiddelen vergt dan waarover de amateur beschikt, zijn hierin een groot aantal problemen gelegen en worden de resultaten die langs deze weg met amateurs te verkrijgen zijn, dubieus. Ondanks deze feiten zal voortgegaan worden met het zoeken naar zenders en zullen inlichtingen over diensturen ingewonnen worden.

5. Teneinde na te gaan waartoe amateurs in staat zijn (door de ambtenaren te Nora moet dit werk tussen de dienstuitvoering in waargenomen worden), wordt contact gezocht met enige prominente amateurs. Hun zullen enige aanwijzingen gegeven worden, zodat langs deze weg nog enkele voorlopige

resultaten te verkrijgen zijn. Hierbij zullen wellicht een aantal amateur-zendstations ingeschakeld kunnen worden.

6. Hoe een en ander ook uit moege vallen, het lijkt geen twijfel dat deze onderzoeken veel meer effect zullen sorteren indien de U.R.S.I. coördinerend op zou treden en een aantal administraties of maatschappijen zou verzoeken op bepaalde uren, waarin zich interessante verschijnselen kunnen voordoen, zenders van bepaalde frequenties bij te zetten, die in die tijd roepletters (en eventueel tekst met aanwijzingen) in handtempo geven.

Hoewel de hieraan verbonden bezwaren niet te overzien zijn, komt het de commissie voor dat, gezien het belang van de waarnemingen, een poging in deze richting ondernomen dient te worden.

Namens de contact commissie,
Ir B. VAN DIJL, secretaris.

Octrooien

Openbaar gemaakt 16 Februari 1948:

- O.A. 121917 kl. 21a⁴35b. N.V. Philips. Werkwijze om in een uit een wisselstroomnet gevoede inrichting voor het overdragen van elektrische signalen de brom te compenseren door middel van een met de brom corresponderende compensatiespanning, die op de momenten dat de over te dragen signalen afwezig zijn, wordt geregistreerd.
- O.A. 114308. kl. 21e27h. N.V. Philips. Werkwijze voor het bepalen van de verlieshoek van een condensator, waarbij het niet noodzakelijk is de capaciteitswaarde van de condensator nauwkeurig te kennen.
- O.A. 105063. kl. 95a3d. N.V. Philips. Multivibratorschakeling, waarbij een bijzonder grote flanksteilheid van de opgewekte trillingen wordt verkregen.
- O.A. 98726. kl. 95n2a3. Western Electric Co., Dipoolantenne, gekoppeld met een transmissieleiding voor het overdragen van een zeer brede frequentieband, waarbij de reactantie van de antenneimpedantie in de over te dragen band wordt gecompenseerd.
- O.A. 101927. kl. 95d2h2. N. V. Philips. Geneutraliseerde balansversterker met middelen voor het onderdrukken van parasitaire trillingen, welke middelen bestaan uit een Lecher-draadsysteem, waarvan de werkzame lengte op een gunstige wijze gekozen is.

Openbaar gemaakt 15 Maart 1948:

- O.A. 116992. kl. 95h2b. N.V. Philips. Verbetering van een trillingskring voor zeer hoge frequenties bestaande uit twee coaxiale geleiders en een binnen de buitengeleider aangebrachte geconcentreerde capaciteit, waardoor de stroomdichtheid in verschillende delen van deze capaciteit uniform is.
- O.A. 74303. kl. 95i1b1. Murphy Radio Ltd. Superheterodyne ontvanger met automatische correctie van de afstemming, waarbij bij verschillende generatorfrequenties de correctie in Hz constant is.

Openbaar gemaakt 15 April 1948:

- O.A. 114600. kl. 21e11. N.V. Philips. Oscillograaf, waarbij behalve de vorm van de te onderzoeken spanning ook de grootte daarvan kan worden bepaald en wel met behulp van een amplitudebegrenzer waarvan de drempelspanning instelbaar is en afzonderlijk kan worden afgelezen.
- O.A. 111028. kl. 21a⁴71c. N.V. Philips. Werkwijze voor het uitvoeren van een analyse van een frequentiespectrum volgens de zoektoonmethode

met onderscheiding van werkelijk en schijnbaar aanwezige spectrumcomponenten.

- O.A. 125316. kl. 95c2. N.V. Philips. Schakeling voor het begrenzen en detecteren van frequentiegemoduleerde trillingen.
- O.A. 121537. kl. 97cb4c. N.V. Philips. Inrichting voor het in cyclische volgorde distribueren van signaalimpulsen over een aantal ontvanginrichtingen.
- O.A. 127358. kl. 21g13a3. N.V. Philips. Meervoudige elektrische ontladingsbuis met een aantal electrodesystemen in één, in een aantal kanalen onderverdeelde ballon. In het bijzonder van belang voor miniaturbuisen.
- O.A. 117392. kl. 21a⁴73a. Comp. Générale de T.S.F. Werkwijze voor het vervaardigen van een aanpassingsinrichting voor een discontinuïteit in een holle geleider voor ultrakorte golven.

He.

Ontvangen Tijdschriften enz.

Journal of the Franklin Institute, Maart 1948.

Wireless Engineer, April, Mei 1948.

Proceedings Cambridge Phil. Society, 44 Part. 2, April 1948.

Electrical Communication, 24, Nr 4, December 1947.

Radio Revue, April, Mei 1948.

De Ingenieur, Jrg. 60, Nrs 13-19.

Radio Expres, Jrg. 25, Nrs. 6-8.