# SAMENVATTING DER ELEKTRICITEITSLEER

volgens het Giorgistelsel door Ir P. CORNELIUS Derde herziene uitgave

196 pag., 15,5 x 23,5 cm, 28 fig.

Het stelsel van Giorgi heeft de laatste jaren internationaal steeds meer erkenning gevonden. Dit stelsel biedt de mogelijkheid, de elektrische en magnetische veldgrootheden uit te drukken in stroom en spanning met de gebruikelijke eenheden ampère en volt. De nadruk is dan ook overal gelegd op het werken met veldbegrippen die uit de begrippen stroom en spanning afgeleid worden. Op deze wijze levert het werken met veldgrootheden weinig moeilijkheden op.

Een voorafgaande bestudering van de hogere wiskunde is hierbij niet vereist.

Dit boek richt zich tot een lezerskring, die zowel de ambitieuze radiotechnicus, de ingenieur als de experimentele fysicus omvat. Ook de theoretische fysicus en docenten in de elektriciteitsleer zullen vele nuttige gezichtspunten in dit boek aantreffen.



# TRANSFORMATOREN **SMOORSPOELEN** TRANSDUCTOREN LEKTRANSFORMATOREN

# P. F. VAN ELDIK en P. CORNELIUS

INLEIDING TOT HET BEGRIJPEND ONTWERPEN VAN WISSELSTROOMSPOELEN MET IJZERKERN

PHILIPS TECHNISCHE BIBLIOTHEEK

Dit boek is geschreven voor hen die bij het ontwerpen van transformatoren en andere wisselstroomspoelen met ijzerkern een helder inzicht in de samenhang van de bepalende factoren willen krijgen om daardoor tot optimale constructies te komen.

Teneinde dit te bereiken, wordt het magnetisch wisselveld op een eenvoudige en sprekende wijze als een elektrisch stroom-spanningsverschijnsel beschreven. Als wisselspanningen en -stromen aan ijzerkernspoelen in verband gebracht worden met de lengte, de doorsnede, het volume en de frequentie van het magnetisch wisselveld, komt men aan de hand van enkele fundamentele gedachtenexperimenten tot het begrip "specifieke windingsspanning'' en het begrip "specifieke stroomwindingen". Deze nieuwe veldgrootheden spelen een centrale rol.

In dit boek gaat men uit van de methode, dat de ontwerper begint met het onderling afwegen van de toelaatbare belastingen bij de volume-eenheid van ijzer, luchtspleet en koper om daarna de definitieve afmetingen van zijn constructie te verkrijgen.

Van grote betekenis is, dat bij de beschouwingen de hogere wiskunde voor een volledig inzicht in het magnetische wisselveld overbodig blijkt te zijn.

Naast waardevolle praktische aanwijzigingen krijgt de lezer een zeer eenvoudige toegang tot het magnetische wisselveld.



# TRANSFORMATOREN, SMOORSPOELEN, TRANSDUCTOREN EN LEKTRANSFORMATOREN



N.V. UITGEVERSMAATSCHAPPIJ CENTREX — EINDHOVEN

# TRANSFORMATOREN, SMOORSPOELEN, TRANSDUCTOREN EN LEKTRANSFORMATOREN

Inleiding tot het begrijpend ontwerpen van

#### WISSELSTROOMSPOELEN MET IJZERKERN

door

P. F. VAN ELDIK

en

P. CORNELIUS

1961

PHILIPS TECHNISCHE BIBLIOTHEEK

Mededeling van de uitgever

Het boek wordt uitgegeven in het Nederlands, Duits, Engels, Frans en Spaans

Dit boek bevat 86 pagina's en 26 figuren

U.D.C. Nr. 621.314.21 : 621.318.435

© N.V. Philips' Gloeilampenfabrieken - Eindhoven (Nederland) - 1961

Nadruk, ook gedeeltelijk, verboden

Gedrukt in Nederland

Vermelding van gegevens in dit boek impliceert geen vrijdom van octrooirechten

# WOORD VOORAF

Dit boek is geschreven voor hen die bij het ontwerpen van transformatoren en andere wisselstroomspoelen met ijzerkern een helder inzicht in de samenhang van de bepalende factoren willen krijgen om daardoor tot optimale constructies te komen.

Teneinde dit te bereiken wordt het magnetisch wisselveld op een eenvoudige en sprekende wijze als een *elektrisch* stroom-spanningsverschijnsel beschreven. Als de wisselspanningen en -stromen aan ijzerkernspoelen in verband gebracht worden met de lengte, de doorsnede, het volume en de frequentie van het magnetisch wisselveld, komt men aan de hand van enkele fundamentele gedachtenexperimenten tot het begrip "specifieke windingsspanning" en het begrip "specifieke stroomwindingen". Deze nieuwe veldgrootheden spelen verder een centrale rol.

De betekenis van onze methode is, dat de ontwerper begint met het onderling afwegen van de toelaatbare belastingen bij de *volume-eenheid* van ijzer, luchtspleet en koper om daarna de definitieve afmetingen van zijn constructie te verkrijgen.

Van nog grotere betekenis is, dat bij onze beschouwingswijze de hogere wiskunde voor een volledig inzicht in het magnetisch wisselveld overbodig is.

Wij danken de medewerkers van het Natuurkundig Laboratorium der N.V. Philips' Gloeilampenfabrieken te Eindhoven voor hun opbouwende kritiek, en wel in het bijzonder Ir J. M. van Hofweegen, Dr K. W. de Langen, Jhr. Ir H. van Suchtelen en Ir D. M. Duinker.

Eindhoven, februari 1961

P. F. van EldikP. Cornelius



# INHOUD

Hoofdstuk I. ALGEMENE GRONDSLAGEN	1
§ 1. Inleiding. De vier te bespreken spoelentypen	1
$\S$ 2. Het schijnbaar vermogen als kenmerkende grootheid	3
§ 3. Elektrisch-magnetische ketting	3
<ul> <li>§ 4. Het magnetisch veld als stroom-spanningsverschijnsel beschreven</li> <li>a. Stroomwindingen, windingsspanning.</li> <li>b. Specifieke stroomwindingen, specifieke windingsspanning</li> </ul>	4 5 7
c. Gelijkstroomvoormagnetisering	9
d. Luchtspleet; het magnetische veld in lucht	11
e. Belasting van een secundaire wikkeling	12
met voormagnetisering, en voor lucht	13
g. Vergelijking van de onderhavige beschouwingswijze van het magnetisme met de gebruikelijke	13
§ 5. Het product van kern- en vensterdoorsnede, voortkomend uit	
de elektrische gegevens	15
$\S$ 6. Het in rekening brengen van verdere eisen $\ldots$ . $\ldots$ .	17
Hoofdstuk II. DE BEREKENING VAN EEN TRANSFORMATOR	19
Hoofdstuk III. DE BEREKENING VAN EEN SMOORSPOEL	22
Hoofdstuk IV. DE BEREKENING VAN EEN TRANSDUCTOR .	24
§ 1. Algemene gezichtspunten	24
$\S$ 2. Het bruikbare werkgebied in de magnetiseringsgrafiek	25
§ 3. Het inpassen van een gereduceerde werklijn in het bruikbare werkgebied	26
§ 4. Het inpassen van een gereduceerde werkvlak in het bruikbare	28
WEINVELLEL	1.0

INHO	UD
AL TAAO	~~

<ul> <li>§ 5. De bepaling van de constructieve gegevens</li></ul>	31 34
Hoofdstuk V. DE BEREKENING VAN EEN LEKTRANSFOR- MATOR	36
Hoofdstuk VI. NABESCHOUWING OVER HET ELEKTROMAG- NETISCH GEDEELTE	43
Hoofdstuk VII. HET THERMISCH ONTWERP	47
§ 1. Inleiding	47
§ 2. Specifieke geleiderverliezen	47
§ 3. Specifieke ijzerverliezen	49
§ 4. Lineaire afmetingen, verliezen, rendement, temperatuur	50
§ 5. Temperatuurstijging, warmtecapaciteit, warmtegeleiding, warm-	
tesprong	52
§ 6. De keuze van de grenstemperatuur	57
§ 7. De bepaling van de toelaatbare vensterstroomdichtheid en spe-	
cifieke windingsspanning uit de grenstemperatuur of uit het	50
	39
§ 8. Slotbeschouwing	63
Aanhangsel: THEORETISCHE EN PRAKTISCHE WENKEN	65
§ 1. Omrekening van $B_{\max}$ in specifieke windingsspanning	65
§ 2. De impedantie van een smoorspoel. Het begrip specifieke impe-	
dantie	67
$\S$ 3. Berekening van de verlieshoek van een smoorspoel $\ldots$ .	68
§ 4. Primaire nullast-impedantie, spreiding en vervorming bij de	
transformator	70
§ 5. Nauwkeuriger bepaling van de magnetische weerstand van de luchtweg bij de lektransformator.	73
§ 6. Effectieve lengte van de luchtspleet bij een smoorspoel	74
§ 7. Het toenemen van de temperatuur van een koperdraad na het	
inschakelen van de stroom	76
Alfabetisch register	77

VIII

# Hoofdstuk I

# ALGEMENE GRONDSLAGEN

#### § 1. Inleiding. De vier te bespreken spoelentypen

In deze verhandeling willen wij een eenvoudige methode voor het ontwerpen van wisselstroomspoelen met ijzerkern uiteenzetten, die een beter inzicht geeft dan de gebruikelijke. Wij bepalen ons hierbij tot vier spoelentypen, bij het ontwerpen waarvan het schijnbaar vermogen (produkt van stroom en spanning ongeacht de fazehoek), dat de spoel opneemt of doorgeeft, een overwegende rol speelt, en waarbij slechts één nader te kiezen frequentie, bijvoorbeeld de netfrequentie, wordt beschouwd.\*

Wij vestigen er de aandacht op, dat onze methode berust op het invoeren van nieuwe begrippen voor de beschrijving van het magnetisch veld. Bij de vorming van deze begrippen gaan wij uit van proeven met wisselspanningen en -stromen, die worden betrokken op hun frequentie, op het windingstal van de wikkelingen waarin zij werkzaam zijn, en op de afmetingen van het magnetische veld waarmee zij zijn verbonden.

De ijzerkernspoelen waarvan het ontwerpen ons op de volgende bladzijden bezig zal houden, zijn: de transformator, de smoorspoel, de transductor en de lektransformator.

Bij een eenvoudige *transformator* zijn een primaire en een secundaire wikkeling dicht bij elkaar geïsoleerd op een ijzerkern gewikkeld. Hierdoor kan men de belasting, die op de secundaire wikkeling aangesloten wordt, scheiden van het net, dat met de primaire wikkeling is verbonden. Bovendien kan men door keuze van de verhouding van het secundaire tot het primaire aantal windingen secundair de gewenste wisselspanning verkrijgen. De magnetiseringsstroom van een gewone transformator is naar verhouding klein en kan in eerste instantie worden verwaarloosd. Hierdoor wordt, afgezien van verliezen, het door de verbruiker afgenomen schijnbaar vermogen nagenoeg gelijk aan het door het net te leveren schijnbaar vermogen.

Een *smoorspoel* bestaat uit één wikkeling op een ijzerkern, waarin vaak een korte luchtspleet is aangebracht. De smoorspoel neemt schijnbaar ver-

<sup>\*</sup> Wij noemen in deze verhandeling spoel het samenstel van kern en wikkeling.

mogen op, waarbij de spanning aan de spoel nagenoeg negentig graden in faze voor is ten opzichte van de stroom door deze spoel.

Een *transductor* is eveneens een smoorspoel, waarvan echter de stroomspanningsverhouding geregeld kan worden, door de ijzerkern vóór te magnetiseren b.v. met behulp van gelijkstroom\*. Een transductor heeft dus in het algemeen een wisselstroom- en een regelwikkeling. De beïnvloeding door de gelijkstroom komt tot stand door de niet-lineariteit van de magnetische eigenschappen van de ijzerkern. Het magnetische gedrag van lucht is daarentegen lineair en wordt door voormagnetisatie niet veranderd. Daarom mag de ijzerkern van een transductor geen luchtspleet bevatten; immers, door het aanbrengen van een luchtspleet zou de niet-lineariteit van het magnetische circuit en daarmee de regelbaarheid van de transductor verminderen.

De *lektransformator* is een ijzerkernspoel die de eigenschappen van een transformator combineert met die van een smoorspoel, die er mee in serie geschakeld is. Hiertoe brengt men de secundaire wikkeling niet, zoals bij de gewone transformator, zo dicht mogelijk bij de primaire wikkeling aan, maar op enige afstand er van. Daardoor kan bij belasting van de secundaire wikkeling een meer of minder groot gedeelte van het primaire magnetische veld zich, buiten de secundaire wikkeling om, door de lucht sluiten. Door deze luchtweg met behulp van een beweegbare aparte ijzerkern magnetisch meer of minder te overbruggen, kan men de belastingskarakteristiek van de secundaire wikkeling regelen.

Alvorens die eigenschappen van de verschillende beschreven spoelen naar voren te brengen welke speciaal voor de ontwerper belangrijk zijn, willen wij nog even de verschillende aspecten van het begrip vermogen bij wisselstroom in herinnering brengen. Meten wij van een wisselstroomverbruiker de stroom en de klemspanning (uiteraard de effectieve waarden, waarin onze meetinstrumenten zijn geijkt), dan wordt het produkt van deze stroom en deze spanning het *schijnbaar vermogen*, dat de verbruiker opneemt, genoemd. Het schijnbaar vermogen wordt in voltampère (VA) uitgedrukt.

Bij wisselstroom kunnen stroom en spanning in of uit faze zijn. Wil men de aandacht erop vestigen, dat bij een verbruiker, b.v. een weerstand, stroom en spanning in faze zijn, dan spreekt men over *werkzaam vermogen* of kortweg vermogen, dat in watt (W) wordt uitgedrukt. Wil men echter tot uitdrukking brengen, dat bij een verbruiker, b.v. een spoel met verwaarloosbare verliezen, stroom en spanning negentig graden uit faze zijn, dan spreekt men over *blind* of *reactief vermogen*, dat in VA of in "var" (volt ampère reactief) wordt uitgedrukt.

<sup>\*</sup> Eenvoudigheidshalve nemen wij voor de regelstroom steeds een gelijkstroom.

Met gebruikmaking van deze begrippen geven wij nu de volgende samenvatting:

De *transformator* geeft wisselvermogen door, waarbij de secondaire en de primaire stroom-spanningsverhouding, bij praktisch gelijkblijvend schijnbaar vermogen, willekeurig gekozen kunnen worden.

De *smoorspoel* neemt blind vermogen op, waarbij de stroom-spanningsverhouding willekeurig gekozen kan worden.

De *transductor* is een smoorspoel, waarvan de stroom-spanningsverhouding en daardoor het opgenomen blind vermogen geregeld kunnen worden met behulp van gelijkstroomwindingen.

De *lektransformator* is een transformator met een zodanige afstand tussen secundaire en primaire wikkeling, dat er een magnetische parallelweg ontstaat, die – bij gegeven windingsverhouding – de secundaire belastingskarakteristiek bepaalt. Door de afmetingen van genoemde parallelweg geschikt te kiezen, kan, binnen ruime grenzen, elke gewenste karakteristiek verwezenlijkt worden. Desgewenst kan de lektransformator zo worden geconstrueerd, dat de gebruiker de belastingskarakteristiek kan varieeren door regeling van de magnetische parallelweg. In tegenstelling met de gewone transformator behoeven het primaire en het secundaire schijnbaar vermogen niet aan elkaar gelijk te zijn.

Tot slot van deze inleiding zij vermeld, dat wij in principe uitgaan van niet-verzadigde ijzerkernen. Niet-lineariteit met verzadiging wordt bij onze twee transformatortypen en de smoorspoel als een ongewenst verschijnsel beschouwd; bij de transductor, die immers van het overgangsgebied tussen lineariteit en verzadiging gebruik maakt, zullen wij evenmin op de verzadigingsverschijnselen van ijzerkernen ingaan.

#### § 2. Het schijnbaar vermogen als kenmerkende grootheid

In schakelingen speelt het begrip zelfinductie bij spoelen een belangrijke rol. Bij onze beschouwingen letten wij echter in de eerste plaats op het schijnbaar vermogen, dat onze spoelen te verwerken krijgen. Dat hier het schijnbaar vermogen een voorname plaats zal innemen, houdt verband met het feit, dat bij gegeven maximale materiaalbelasting het volume van de te construeren spoel door het produkt van stroom en spanning bepaald wordt.

#### § 3. Elektrisch-magnetische ketting

Op de weg van de elektrische centrale naar de verbruiker wordt het vermogen beurtelings uit de elektrische vorm in de magnetische vorm omgezet en

I]

#### ALGEMENE GRONDSLAGEN

omgekeerd (zie fig. 1). Hierbij omsluiten de elektrische en de magnetische geleider elkaar als de schakels van een ketting, waarbij de ene schakel de energie aan de andere doorgeeft; bij de uitdrukking magnetische geleider moet men niet uitsluitend aan ijzerkernen, maar ook aan luchtwegen denken.

Dit beeld doet ons twee gezichtspunten aan de hand: één dat op de afmetingen van onze ijzerkernspoelen betrekking heeft, en een ander dat de weg opent tot de elektrische beschrijving van de magnetische geleider.



Fig. 1. Elektromagnetische ketting. Schematische voorstelling van de overbrenging van elektrisch wisselvermogen. De elektrische en de magnetische geleider omsluiten elkaar als de schakels van een ketting.

De afmetingen van de ijzerkern en van de wikkeling begrenzen elkaar, doordat de doorsnede van alle geleiders tezamen in de vensteropening van de ijzerkern moeten passen; omgekeerd moet ook de doorsnede van de ijzerkern in de opening van de wikkeling passen.

Het tweede gezichtspunt behelst, dat het elektrische wisselvermogen van de elektrische schakel doorgegeven wordt aan de magnetische schakel, en dat men dan ook het vermogen, dus wisselstroom en wisselspanning, van de elektrische schakel in de magnetische schakel terug zal vinden. Dit blijkt inderdaad het geval te zijn, zoals wij in de volgende paragraaf zullen toelichten.

#### § 4. Het magnetisch veld als stroom-spanningsverschijnsel beschreven

Als wij een wisselspanning met een bepaalde frequentie, b.v. 50 Hz, aan een ijzerkernspoel leggen, zal er door de windingen van deze spoel een wisselstroom gaan vloeien. Deze stroom zal veranderen, als wij de elektrische schakel wijzigen door het windingstal van de wikkeling te variëren. De stroom wordt eveneens beïnvloed door verandering van de magnetische schakel. Dit kan geschieden door variëren van de doorsnede en de lengte van de ijzerkern, verder door het aanbrengen van een luchtspleet, door gelijkstroomvoormagnetisering en tenslotte door stroomafname van een secundaire wikkeling op dezelfde ijzerkern. De stroom-spanningskarakteristiek van een ijzerkernspoel zal dus bij gegeven frequentie en gegeven materiaal, b.v. siliciumijzerplaat, van genoemde gegevens afhangen. De invloed van de

#### MAGNETISCH VELD ALS STROOM-SPANNINGSVERSCHIJNSEL

IJ

frequentie is eenvoudig te verdisconteren: bij gelijkblijvende andere gegevens is de wisselspanning evenredig met de frequentie.

Wij zullen de invloed van ieder gegeven afzonderlijk bekijken en met het verkregen inzicht twee *elektrische* begrippen, met name "specifieke windingsspanning" en "specifieke stroomwindingen", vormen, waarmee het gedrag van de *magnetische* schakel op eenvoudige wijze beschreven en in een grafiek samengevat kan worden. Met behulp van deze grafiek kunnen dan de constructieve gegevens van ijzerkernspoelen op grond van de vereiste prestaties door de ontwerper worden bepaald.

a. Stroomwindingen, windingsspanning. Er zullen nu enkele eenvoudige proeven besproken worden, die tot het beoogde doel leiden. Vooreerst denken we aan spoelen met ijzerkernen zonder luchtspleet met één wikkeling, waarvan het windingstal n is. Bij deze spoelen meten wij het verband tussen de stroom  $I_n$  en de spanning  $U_n$ .

Wij beginnen met de stroom-spanningskarakteristieken  $I_n = f(U_n)$ , d.w.z.  $I_n$  als functie van  $U_n$ , bij één frequentie op te nemen van spoelen met dezelfde ijzerkern, echter met verschillend aantal windingen n. Het blijkt, dat men bij al deze spoelen dezelfde karakteristiek krijgt, als men de stroomwindingen  $I = n I_n$  uitzet tegen de windingsspanning U = U/n. Men kan dit als volgt interpreteren: De wisselstroomwindingen sturen een magnetisch wisselveld door de ijzerkern, waarbij het voor het magnetische verschijnsel onverschillig is, of er b.v. 1/1000 A in 1000 windingen of 1A in 1 winding vloeit. Het wisselveld wekt in iedere winding die het omvat, een bepaalde spanning op. Bij serieschakeling van meer dan één winding worden de windingsspanningen bij elkaar opgeteld\*.

Om de betekenis van de begrippen stroomwindingen en windingsspanning duidelijk uit te laten komen, zullen wij deze grootheden uitdrukken in de eenheden ampèrewinding resp. volt-per-winding, terwijl deze veelal slechts in ampère resp. volt worden aangegeven. Daar het symbool W reeds als afkorting voor de eenheid watt wordt gebruikt, zullen wij in deze verhandeling de ampèrewinding afkorten met:  $A \cdot wdg$  en de volt-per-winding afkorten met: V/wdg.

Men kan dus voor een bepaalde ijzerkern, waarvoor b.v. bij 50 Hz de stroomwindingen als functie van de windingsspanning gegeven zijn, omgekeerd de gewone stroom-spanningskarakteristiek voor n windingen bepalen

<sup>\*</sup> Wij karakteriseren in het vervolg een magnetisch wisselveld door zijn effectieve windingsspanning en zijn frequentie.

door de windingsspanning met n te vermenigvuldigen en de stroomwindingen door n te delen.

Verder kan men binnen redelijke grenzen door keuze van het windingstal dezelfde spanning en stroom verkrijgen met ijzerkernen van onderling verschillende afmetingen, die dus met gelijk windingstal uiteenlopende stroomspanningskarakteristieken zouden hebben. Stel dat een zekere kern met één winding een bepaald schijnbaar vermogen bij een betrekkelijk hoge windingsspanning en lage stroomwindingen heeft, een andere kern daarentegen hetzelfde schijnbaar vermogen bij lage windingsspanning en hoge stroomwindingen, dan behoeven wij deze laatste kern slechts een overeenkomstig hoger aantal windingen te geven om de gewenste spanning  $U_n$  aan de spoel bij de gewenste stroom  $I_n$  door de spoel te verkrijgen.

Hiermee is de belangrijkste invloed van de elektrische schakel op stroom en spanning behandeld, voorzover het over het samenspel van de elektrische met de magnetische schakel gaat. Er is hierbij afgezien van de meestal kleine invloed van de weerstand van de wikkeling op stroom en spanning; immers, deze heeft niets met de magnetische schakel te maken.



Fig. 2. Op één winding gereduceerde stroom-spanningskarakteristiek van twee willekeurig gekozen ijzerkernen met onderling verschillende afmetingen, bij 50 Hz. In de figuur zijn ook lijnen van gelijk schijnbaar vermogen getekend. Om bij een zelfde spanning hetzelfde schijnbaar vermogen te kunnen opnemen, moet kern 2 meer windingen bevatten dan kern 1.

Ter meerdere verduidelijking herhalen wij het besprokene in een andere, iets beknoptere vorm. Met behulp van de begrippen windingsspanning U en

I]

stroomwindingen I kan men het elektrische gedrag van een bepaalde magnetische schakel in de vorm van een ijzerkern onafhankelijk van het aantal windingen beschrijven door de karakteristiek I = f(U). Men kan gemakkelijk inzien, dat het werkpunt op deze karakteristiek bepaald is door het schijnbaar vermogen dat een met deze kern vervaardigde spoel moet opnemen. Verder zien wij, dat bij twee spoelen die dezelfde stroom en spanning opnemen, maar ijzerkernen van onderling verschillende afmetingen bezitten, dit verschil bij onze beschrijvingswijze elektrisch tot uiting komt in een verschil van windingsspanning en stroomwindingen. Tenslotte kunnen wij nog opmerken, dat de voor een bepaalde kern typische karakteristiek, stroomwindingen – windingsspanning, overeenkomt met de stroom-spanningskarakteristiek van deze kern, als hij van een wikkeling van slechts één winding is voorzien (zie fig. 2).

Hieronder volgt een eenvoudige berekening, waarmee de toepassing van de besproken relaties wordt gedemonstreerd.

Gegeven de vereiste spanning  $U_n$  en stroom  $I_n$  van een te ontwerpen ijzerkernspoel, dus het schijnbare vermogen:

$$P=U_n I_n.$$

Stel dat wij de twee kernen van fig. 2 ter beschikking hebben. Kern 1 heeft dit vermogen bij de windingsspanning  $U_1$  en de stroomwindingen  $I_1$ , kern 2 daarentegen bij  $U_2$  en  $I_2$ . Hoeveel windingen  $n_1$ , resp.  $n_2$  moeten wij op de betreffende kernen leggen? Daar algemeen  $U_n = n U$  en  $I_n = I/n$  geldt, volgt hier:

$$n_1 = \frac{U_n}{U_1} = \frac{I_1}{I_n}$$
 en  $n_2 = \frac{U_n}{U_2} = \frac{I_2}{I_n}$ .

b. Specifieke stroomwindingen, specifieke windingsspanning. Met de begrippen stroomwindingen en windingsspanning kan men op eenvoudige wijze de magnetische eigenschappen beschrijven van een bepaalde ijzerkern, die dus een zekere lengte en doorsnede van de magnetische weg heeft, en wel onafhankelijk van het aantal windingen van de magnetiserende wikkeling. Willen wij nu het magnetisch gedrag van ijzerkernen algemener, en wel onafhankelijk van de afmetingen, beschrijven, dan is dit mogelijk door de doorsnede van de ijzerkern met de windingsspanning en de lengte van de ijzerweg met de stroomwindingen in verband te brengen, en aldus tot de begrippen specifieke windingsspanning resp. specifieke stroomwindingen over te gaan. Dit gaat als volgt in zijn werk:

Wij vergelijken spoelen met dezelfde lengte van de ijzerkern, echter verschillende kerndoorsneden; deze kunnen verkregen worden door b.v. de

#### ALGEMENE GRONDSLAGEN

kern uit meer of minder transformatorblikken van dezelfde vorm te stapelen. Als wij dezelfde stroomwindingen met dezelfde frequentie, b.v. 50 Hz, in deze spoelen willen verkrijgen, blijkt de nodige windingsspanning evenredig met de ijzerdoorsnede te zijn. Vergelijken wij nu spoelen met dezelfde ijzerdoorsnede, echter met verschillende lengten van de ijzerweg, dan blijken, bij gegeven windingsspanning en frequentie, de stroomwindingen evenredig met de ijzerlengte te zijn.

Men krijgt nu één enkele karakteristiek, die voor het betreffende kernmateriaal bij de gekozen frequentie geldt, als men de aan spoelen met verschillende ijzerkernen verkregen windingsspanningen en stroomwindingen op de bijbehorende kerndoorsnede resp. de bijbehorende ijzerlengte betrekt, en daarna de zo verkregen grootheden: stroomwindingen-per-ijzerlengte en windingsspanning-per-kerndoorsnede, tegen elkaar uitzet.

Met deze grootheden stroomwindingen-per-ijzerlengte en windingsspanning-per-kerndoorsnede, die wij "specifieke stroomwindingen" en "specifieke windingsspanning" noemen, is men in staat, het magnetische gedrag



Fig. 3. Stroom-spanningskarakteristiek van siliciumijzerplaat bij 50 Hz, gereduceerd op één winding en op eenheidslengte en -doorsnede. Deze wordt verkregen door de stroomwindingen die aan kernen van onderling verschillende afmetingen bepaald zijn, te delen door de bijgehorende lengten van de magnetische wegen, en de windingsspanningen door de betreffende kerndoorsneden.

Op de karakteristiek zijn voor enkele punten het specifiek schijnbaar vermogen P', d.w.z. het schijnbaar vermogen per kernlengte en per kerndoorsnede aangegeven. Dit komt overeen met het schijnbaar vermogen dat 1 cm<sup>3</sup> van de kern opneemt.

#### MAGNETISCH VELD ALS STROOM-SPANNINGSVERSCHIJNSEL

van een bepaalde ijzersoort, b.v. siliciumijzerplaat, bij een bepaalde frequentie, b.v. 50 Hz, onafhankelijk van de afmetingen van de ijzerkern te beschrijven. De specifieke stroomwindingen I' drukken wij uit in ampèrewindingen per cm ijzerlengte of kortweg: A·wdg/cm, en de specifieke windingsspanning U' in volt per winding en per cm<sup>2</sup> ijzerdoorsnede of wel: V/(wdg  $\cdot$  cm<sup>2</sup>); zie fig. 3. Op analoge wijze als bij fig. 2 kunnen wij hier opmerken, dat de voor een bepaald kernmateriaal bij een gegeven frequentie typische karakteristiek I' = f(U') overeenkomt met de stroom-spanningskarakteristiek van een uit dit materiaal bestaande kern met eenheidsafmetingen (ijzerlengte en -doorsnede één) bij een wikkeling van één winding.

Voor het ontwerpen van ijzerkernspoelen voor een bepaalde frequentie zouden wij met de begrippen specifieke stroomwindingen en specifieke windingsspanning kunnen volstaan. Wij komen echter toepassingen van ijzerkernspoelen tegen, waarbij de frequentie verandert, b.v. transductoren voor autodynamo's met sterk varierend toerental. Dan is het zowel voor het ontwerpen als ook voor het inzicht in de verschijnselen van het magnetisme belangrijk te weten, dat de wisselspanning evenredig is met de snelheid van de stroomveranderingen, dus met de frequentie van de wisselstroom en van het magnetisch wisselveld. Bepalen wij dus aan een ijzerkernspoel bij gegeven specifieke stroomwindingen de optredende specifieke windingsspanning bij een bepaalde frequentie, dan wordt deze spanning het dubbele als wij de frequentie van de stroom verdubbelen. Om dit feit tot uitdrukking te brengen, kunnen wij het begrip "specifieke windingsspanning-per-frequentie" vormen, waarmee wij tot het meest algemene begrip ter beschrijving van het magnetisch wisselveld zijn doorgedrongen. De met dit begrip corresponderende grootheid kan worden uitgedrukt in volt per winding, per cm<sup>2</sup> en per hertz, afgekort: V/(wdg  $\cdot$  cm<sup>2</sup>  $\cdot$  Hz).

c. Gelijkstroomvoormagnetisering. Gelijkstroomvoormagnetisering van een ijzerkern kan men verkrijgen door de kern behalve van een wisselstroomwikkeling ook van een gelijkstroomwikkeling te voorzien; dit doet men bij transductoren. De magnetische eigenschappen van de kern worden door de gelijkstroom veranderd, zodat wij voor de wisselstroomwikkeling een andere stroomspanningskarakteristiek verkrijgen. Bij dezelfde wisselspanning wordt meer wisselstroom doorgelaten naarmate de voormagnetisering verhoogd wordt.

Het blijkt, dat ook de gelijkstroomvoormagnetisering bepaald wordt door het aantal stroomwindingen per ijzerlengte. Wij krijgen dus één enkele karakteristiek voor iedere zo bepaalde voormagnetisering, als wij b.v. aan siliciumijzerplaat bij 50 Hz denken. In fig. 4 hebben wij de wisselstroomwindin-



Fig. 4. Specifieke wisselstroomwindingen I' als functie van de specifieke windingsspanning U' bij 50 Hz voor siliciumijzerplaat met gelijkstroomvoormagnetisering. Deze voormagnetisering wordt als specifieke gelijkstroomwindingen  $I_{g'}$  gegeven, d.w.z. de gelijkstroom gereduceerd op één winding en betrokken op de lengte van de magnetische weg voor het magnetische gelijkveld. De specifieke gelijkstroomwindingen zijn in de figuur als parameter gebruikt. Het blijkt, dat een ijzerkernspoel bij gegeven wisselspanning meer wisselstroom doorlaat, als de kern met gelijkstroom wordt voorgemagnetiseerd. De karakteristiek geldt voor het geval, dat de gelijkstroom- en de wisselstroommagnetisering dezelfde richting hebben, en dus niet b.v. loodrecht op elkaar staan.

[I

#### MAGNETISCH VELD ALS STROOM-SPANNINGSVERSCHIJNSEL

1]

gen-per-ijzerlengte uitgezet tegen de windingswisselspanning-per-kerndoorsnede met de gelijkstroomwindingen-per-ijzerlengte als parameter. Dergelijke grafieken hebben wij nodig voor de berekening van transductoren.

d. Luchtspleet; het magnetisch veld in lucht. Wij kunnen in een ijzerkern een luchtspleet volgens een dwarsdoorsnede aanbrengen, zodat voor een stuk van de weglengte het ijzer vervangen wordt door lucht. Hierdoor worden de eigenschappen van de magnetische schakel sterk veranderd. Is nu de luchtspleet kort, d.w.z. de luchtlengte klein ten opzichte van de dwarsafmetingen van de ijzerkern, dan blijft het veld ook in de lucht beperkt tot nagenoeg dezelfde doorsnede als in het ijzer. In dit geval kan men de invloed van de luchtspleet zeer eenvoudig in rekening brengen. De spanning die door een wisselveld opgewekt wordt in een winding die dit veld geheel omvat, is dezelfde, ongeacht of het veld zich in het ijzer of in de lucht bevindt. Voor de overbrugging van een bepaalde weglengte door dit veld zijn echter, bij gelijke doorsnede, in lucht veel meer ampèrewindingen nodig dan in ijzer. Een veld dat bij 50 Hz in een winding met een doorsnede van 1 cm<sup>2</sup> een effectieve wisselspanning van 1 mV doet ontstaan, gebruikt bij deze doorsnede 253,3 wisselampèrewindingen voor de overbrugging van een luchtlengte van 1 cm. In spoelen zonder ijzerkern (luchtspoelen) is de wisselstroom evenredig met de wisselspanning. In een grafiek wordt dus de stroom-spanningskarakteristiek voor luchtspoelen door een rechte lijn weergegeven. Een dergelijke grafiek vinden wij in fig. 5, waar uitgezet zijn de op één winding en eenheidsafmetingen gereduceerde stroom- resp. spanningswaarden, die voor lucht bij 50 Hz gelden.



Fig. 5. Magnetiseringslijn voor lucht bij 50 Hz. Uitgezet is de stroom-spanningskarakteristiek van een luchtspoel met homogeen veld bij 50 Hz, gereduceerd op één winding en eenheidsafmetingen. Een dergelijke spoel kan worden verwezenlijkt door een dichtgewikkelde toroïde waarvan de cirkelvormige hartlijn lang is, vergeleken met de diameter van een winding; de kern dient uit lucht of een ander onmagnetisch materiaal te bestaan. Op de karakteristiek zijn voor enkele punten het specifiek schijnbaar vermogen aangegeven.

#### ALGEMENE GRONDSLAGEN

Voor andere frequenties dan voor 50 Hz geldt het op blz. 9 vermelde, m.a.w. voor het opwekken van 1 mV/(wdg·cm<sup>2</sup>·Hz) in lucht zijn 50  $\times$  253,3 A·wdg/cm = 12,665 kA·wdg/cm nodig. De op dit gegeven berustende grafiek is in fig. 6 weergegeven, waarin dus de op één winding, eenheidsafmetingen en eenheidsfrequentie gereduceerde stroom- resp. spanningswaarden die voor lucht gelden, zijn uitgezet.

Leggen wij nu een wisselspanning aan een ijzerspoel met een luchtspleet,



Fig. 6. Algemene magnetiseringslijn voor lucht. Uitgezet is de wisselstroom-spanningskarakteristiek voor luchtspoelen met homogeen veld, gereduceerd op één winding, eenheidsafmetingen en eenheidsfrequentie. Op de karakteristiek zijn voor enkele punten het schijnbaar vermogen per volume en per frequentie aangegeven.

dan stelt zich een stroom in zodanig, dat het totale bedrag van de stroomwindingen de som is van de voor de ijzerweg en de voor de luchtweg benodigde stroomwindingen. Met behulp van de voor lucht geldende karakteristiek en de voor ijzer zonder voormagnetisering geldende karakteristiek kunnen wij wisselstroomspoelen met luchtspleet berekenen. Deze karakteristieken worden eveneens gebruikt bij de berekening van lektransformatoren, waarbij echter de luchtweg niet in serie met de ijzerweg ligt, maar parallel er aan.

e. Belasting van een secundaire wikkeling. Aan de klemmen van een secundaire wikkeling op een ijzerkern ontstaat een wisselspanning, wanneer de primaire wikkeling met het wisselstroomnet wordt verbonden. Als de spreiding verwaarloosbaar klein is, d.w.z. dat het gehele primaire veld ook door de secundaire wikkeling gaat, zijn de secundaire en de primaire windingsspanning gelijk aan elkaar, als wij van ohmse verliezen in de primaire wikkeling afzien.

#### MAGNETISCH VELD ALS STROOM-SPANNINGSVERSCHIJNSEL

1]

Bij belasting van de secundaire wikkeling gaat een secundaire stroom vloeien, die het wisselveld en daarmee de windingsspanning zou veranderen, ware het niet dat het net deze spanning constant houdt. Om dit te bereiken, voegt het net aan de oorspronkelijke primaire magnetiseringsstroom een stroom toe, waarvan de stroomwindingen gelijk en tegengesteld zijn aan die van de secundaire wikkeling. Deze stroom is dus in eerste instantie onafhankelijk van de magnetische eigenschappen van de ijzerkern.

Wij sluiten hier de beschrijving van het magnetisch veld als stroomspanningsverschijnsel af. Bij de bespreking van de lektransformator zullen wij deze beschrijving nog enigszins uitbreiden.

f. Grafiek van de magnetiseringsstroom voor ijzer zonder en met voormagnetisering, en voor lucht. In fig. 7 hebben wij voor het praktische gebruik alle gegevens samengevat waarvan het principe in de figuren 3, 4 en 5 apart werd toegelicht. De grafiek geldt voor een frequentie van 50 Hz. Wat het ijzer aangaat, zijn de gegevens berekend uit metingen aan ijzerkernen, bestaande uit van weerskanten ingevlochten blikken zonder luchtspleet van siliciumijzer. Als kerndoorsnede is genomen de doorsnede van de gehele kern inclusief de gebruikelijke isolatie tussen de blikken; als lengte van de kern is gerekend de gemiddelde lengte, zie b.v. lij in fig. 12. Er is siliciumijzerplaat met verschillende verliescijfers verkrijgbaar. De magnetiseringskarakteristieken van deze ijzersoorten lopen echter niet sterk uiteen, zodat de krommen van fig. 7 met redelijke benadering voor alle normaal gebruikelijke soorten siliciumijzerplaat kunnen worden gebruikt. Daar in het kernmateriaal en bij het invlechten van de blikken nogal ruime toleranties optreden, heeft het weinig zin, bij magnetiseringskarakteristieken, als in fig. 7, naar extreme nauwkeurigheid te streven.

g. Vergelijking van de onderhavige beschouwingswijze van het magnetisme met de gebruikelijke. Bij de gebruikelijke beschouwingswijze van het magnetisme gaat men meestal uit van de krachten die in constante magnetische velden kunnen optreden. Hierbij past de beschrijving van de magnetische eigenschappen van materialen met behulp van een statische *B-H*-kromme; immers, de inductie *B* en de veldsterkte *H* zijn van oorsprong met behulp van krachten gedefinieerd. Feitelijk worden echter de zogenaamde statische *B-H*krommen van siliciumijzerplaat en ander ferromagnetisch materiaal niet met behulp van krachten en ook niet statisch gemeten. Immers, deze krommen worden afgeleid uit stroom-spanningsgegevens die afkomstig zijn van elektrische metingen. Deze metingen worden uitgevoerd ofwel met behulp van gelijkstroom die in- of uitgeschakeld of gecommuteerd wordt, ofwel door



Fig. 7. Specifieke magnetiseringswisselstroomwindingen I' van siliciumijzerplaat, als functie van de specifieke windingswisselspanning U' bij verschillende specifieke magnetiseringsgelijkstroomwindingen  $I_g'$ . Hiermee zijn bedoeld: de effectieve wisselstroomwindingen per ijzerlengte, de effectieve windingswisselspanning per kerndoorsnede resp. de gelijkstroomwindingen per ijzerlengte, waarbij het gelijkveld dezelfde richting als het wisselveld heeft. De aangegeven spanningsschaal is geldig voor 50 Hz. De krommes zijn bruikbaar voor de normaal gebruikelijke blikken van siliciumijzer; de invloed van de dikte van het blik (0,35 tot 1 mm) en van het verliescijfer (1,3–3,5 W/kg) kan hierbij worden verwaarloosd. Verder zijn uitgezet de specifieke magnetiseringswisselstroomwindingen voor lucht  $I_t'$ (effectieve wisselstroomwindingen per luchtspleetlengte) als functie van U', en de krommen van gelijk schijnbaar specifiek ijzerwisselvermogen P' (vermogen per kernvolume. Als kernvolume is hierbij aangenomen het produkt van kerndoorsnede en ijzerlengte). De grafiek kan voor willekeurige frequenties worden gebruikt, als men op de abscis-as, de specifieke wisselspanning-per-frequentie uitzet. De waarden, aangegeven bij de abscis-as,

dienen dan door 50 te worden gedeeld; de eenheid wordt mV/(wdg·cm<sup>2</sup>·Hz).

het opnemen van hysteresislussen met behulp van in sterkte veranderde wisselstroom. Uit de verkregen statische *B-H*-krommen leidt men nu weer de elektrische wisselstroomwerkingen van het magnetische materiaal af met behulp van de inductiewet, d.w.z. met behulp van het differentiaalquotient dB/dt, en berekent de gezochte effectieve waarden van stromen en spanningen door integratie van sinus- en andere tijdsfuncties.

Bij nadere beschouwing van deze weg blijkt dat de magnetische verschijnselen uitsluitend als veranderingen van elektrische stromen en spanningen gemeten worden, en niet als krachtwerkingen. Verder blijkt dat tussen het begin en het einde van de weg een hier niets ter zake doend gedeelte is ingeschoven, met name de statische *B-H*-kromme.

Onze beschouwingswijze van het magnetisme is niet anders dan een consequente gevolgtrekking uit het vorenstaande. Magnetische verschijnselen worden in eerste instantie opgevat als inductieverschijnselen, d.w.z. als elektrische veranderings- of wisselingsverschijnselen. Dientengevolge baseren wij onze beschouwingen over het magnetisme op proeven met sinusvormige wisselspanningen en de daarbij optredende wisselstromen.

De vervolgens in dit boek toegepaste methode om de stromen en spanningen op één winding te reduceren, en op de lengte resp. de doorsnede van de magnetische weg te betrekken, is sinds lang bekend. Daarentegen wordt de gebruikelijke omweg over de *B-H*-kromme en het differentiëren van de flux naar de tijd vermeden door invoering van het begrip windingsspanningper-frequentie.

Wij veronderstellen dus bij onze beschouwingen over het magnetisme slechts bekendheid met de elektrische begrippen wisselstroom, wisselspanning, frequentie en faseverschil.

Tenslotte nog een praktische opmerking. Meetinstrumenten met gelijkrichtcellen zijn voor metingen van effectieve waarden ongeschikt, als er harmonischen in de te meten wisselstromen of -spanningen aanwezig zijn. Deze harmonischen treden aan ijzerkernspoelen op bij hoge specifieke windingsspanningen en in het geval van regeling door gelijkstroomvoormagnetisering.

### § 5. Het produkt van kern- en vensterdoorsnede, voortkomend uit de elektrische gegevens

Een ijzerkernspoel kan bij gegeven schijnbaar vermogen des te kleiner worden ontworpen naarmate men een hogere belasting van de elektrische en van de magnetische schakel toepast. In het volgende willen wij bespreken, hoever men hierbij onder verschillende omstandigheden kan gaan. Hieruit wordt een eenvoudige conclusie getrokken, die als grondslag voor onze berekeningen zal worden gebruikt.

De maximaal toelaatbare stroomdichtheid in het venster van de ijzerkern, d.w.z. de totale stroomwindingen per vensterdoorsnede, volgt uit het thermische ontwerp (zie hoofdstuk VII); hierbij komt dus een eigenschap van de elektrische schakel tot uiting die niets met magnetisme te maken heeft, namelijk de weerstand. Ter orientatie kan men een waarde in de grootteorde van honderd ampère per cm<sup>2</sup> vensterdoorsnede bij natuurlijke luchtkoeling noemen; bij een voor warmteafvoer gunstige constructie en geforceerde koeling is het mogelijk, belangrijk hoger te gaan.

De maximaal toelaatbare specifieke windingsspanning, d.w.z. de windingsspanning per kerndoorsnede, wordt door verschillende ongewenste verschijnselen bepaald, zoals grote stroomstoten bij het inschakelen, grote magnetiseringsstromen, die al bij kleine netpanningsveranderingen sterk varieren en die grote extra verliezen in de elektrische schakel kunnen veroorzaken, vervorming van de magnetiseringsstroom, verwarming van het ijzer, sterke magnetische krachten, die de kernblikken doen brommen. De gebruikelijke grenswaarden voor siliciumijzerplaat bij 50 Hz liggen om en bij 25 mV/cm<sup>2</sup>. De bovenste grens is vrij scherp; 30 mV/cm<sup>2</sup> moet als zeer hoog beschouwd worden; zie hiertoe het sterk oplopen van de specifieke magnetiseringswisselstroomwindingen in fig. 7, kromme  $I_{g'} = 0$ , bij deze waarde. Een constructeur zal dus in het algemeen gemakkelijker besparingen kunnen verkrijgen door verhoging van de geleiderbelasting dan door verhoging van de ijzerbelasting.

Als nu het vereiste schijnbare vermogen van de spoel gegeven is, is ook het produkt van de windingsspanning en de vensterstroomwindingen bepaald. Vanwege de maximaal toelaatbare waarden van de specifieke windingsspanning en de vensterstroomdichtheid ligt dan eveneens het produkt van de kerndoorsnede en de vensterdoorsnede vast.

De relaties tussen de besproken grootheden kunnen als volgt in formules worden samengevat. Gegeven zijn het schijnbaar vermogen P, de specifieke windingsspanning U' en de vensterstroomdichtheid S. Gevraagd is het produkt van kerndoorsnede  $A_{ij}$  en vensterdoorsnede  $A_v$ . De windingsspanning en de vensterstroomwindingen noemen wij U resp.  $I_v$ . In het eenvoudige geval van een smoorspoel is het produkt van windingsspanning en vensterstroomwindingen gelijk aan het schijnbaar vermogen. Bij een transformator moet men voor de bepaling van de vensterstroomwindingen met zowel de secundaire als de primaire stroom rekening houden, terwijl bij een transductor naast de wisselstroom ook de regelgelijkstroom in aanmerking genomen moet worden.

[I

$$P = U_n I_n = nU \cdot I_v / n = UI_v = A_{ij} U' \cdot A_v S$$

of wel:

$$A_{ij} A_v = \frac{P}{U' S} \, .$$

Op dit produkt  $A_{ij} A_v$  wordt onze constructie gebaseerd.

#### § 6. Het in rekening brengen van verdere eisen

Terwijl het produkt van kerndoorsnede en vensterdoorsnede bij gegeven materiaalbelasting door het vereiste schijnbaar vermogen is vastgelegd, is men binnen redelijke grenzen vrij in het kiezen van de verhouding tussen kern- en vensterdoorsnede. Immers, hetzelfde vermogen kan worden verwerkt met een grotere windingsspanning en met minder stroomwindingen, d.w.z. met een grotere kerndoorsnede en een kleinere vensterdoorsnede, of omgekeerd, zoals wij in § 4a (zie blz. 5 en fig. 2) hebben besproken. De keuze van de genoemde verhouding hangt er nu van af, of wij onze ijzerkernspoel volgens een eis van minimaal volume, minimale massa of minimale prijs willen construeren. De in elk van deze gevallen te volgen richtlijn is eenvoudig. Voor minimaal volume moet men het volume van de wikkeling ongeveer gelijkmaken aan dat van de kern; voor minimale massa dient men de twee massa's en voor minimale prijs de twee prijzen ruwweg aan elkaar gelijk te maken. Dit is als volgt in te zien:

Is van twee veranderlijke getallen of grootheden het produkt constant, dan wordt hun som minimaal, als beide aan elkaar gelijk zijn. Nu is het volume, de massa of de prijs van onze spoel de som van het kerngedeelte en van het wikkelingsgedeelte. Ware bij onze berekening het produkt van kern- en wikkelingsvolume door het vereiste schijnbaar vermogen vastgelegd, dan zou de zojuist genoemde richtlijn exacte resultaten opleveren. Jammer genoeg legt het vereiste schijnbaar vermogen niet het produkt van de volumen vast, maar het produkt van kern- en vensterdoorsnede. Daar echter kern en wikkeling elkaar omvatten als twee schakels van een ketting, wordt de lengte van de hartlijn van de ene schakel in hoofdzaak bepaald door de doorsnede van de andere, en omgekeerd. Aldus is bij constant doorsnedenprodukt ook het volumenprodukt enigszins constant. De fout die wij bij de bepaling van een minimum volgens de bovengenoemde richtlijn maken ten opzichte van het werkelijke minimum, hangt af van de vorm van de kern en wikkeling.

De beschouwde minima zijn niet scherp, d.w.z. men kan betrekkelijk ver van de gevonden verhouding van kerndoorsnede tot vensterdoorsnede afwijken zonder dat volume, massa of prijs het minimum belangrijk overschrij-

17

I]

#### ALGEMENE GRONDSLAGEN

den. Daardoor is het veelal mogelijk, een ijzerkernspoel te construeren die tegelijk twee eisen goed benadert en die dus bij voorbeeld slechts weinig groter is dan de kleinste en weinig meer kost dan de goedkoopste met hetzelfde schijnbaar vermogen en dezelfde materiaalbelasting.

Er zijn echter gevallen waarbij niet naar een minimum, maar naar een ideale grens wordt gestreefd. Een voorbeeld is een transformator met een hoog rendement of een smoorspoel met zeer kleine weerstand. De ideale grenzen zijn dan 100% resp. 0 ohm. De bepaling van het rendement wordt in hoofdstuk VII, § 7, blz. 60 besproken. In het algemeen wordt het rendement hoger resp. de weerstand lager bij vermindering van de materiaalbelasting, d.w.z. vergroting van ijzer- en vensterdoorsnede, en daarmee van het volume van de spoel. Bij de formulering van een dergelijke eis zal men dus bij voorbeeld de verbetering van het rendement tegen de vergroting van het volume, de massa of tegen de verhoging van de prijs moeten afwegen.

# Hoofdstuk II

# DE BEREKENING VAN EEN TRANSFORMATOR

In ons betoog neemt de transformator een bijzondere plaats in. Enerzijds is de berekening hiervan zeer eenvoudig, als men zich tot het principiële beperkt; wij zullen daarom met de berekening van een transformator beginnen. Anderzijds treden de verschijnselen die bij de andere spoeltypen essentieel zijn, ook bij de transformator als bij-effecten op. Deze bij-effecten kunnen het beste na de berekening van de andere spoeltypen behandeld worden.

Bij een transformator bestaan de vensterstroomwindingen uit de primaire en de secundaire stroomwindingen. Als wij de magnetiseringsstroom (nullaststroom) in de primaire wikkeling verwaarlozen, zijn de primaire stroomwindingen gelijk aan de secundaire; zie hoofdstuk I, § 4e. Voor wat betreft de vereiste vensterdoorsnede, zijn dus de totale vensterstroomwindingen gelijk aan het dubbele aantal secundaire stroomwindingen.

De gang van de vereenvoudigde berekening is als volgt: Gegeven zijn de netspanning  $U_1$ , en de door de verbruiker gevraagde secundaire spanning en stroom  $U_2$  resp.  $I_2$ . Wij noemen het onbekende aantal windingen primair  $n_1$  en secundair  $n_2$ , de windingsspanning U en de totale vensterstroomwindingen  $I_v$ .

Bij verwaarlozing van de primaire nullaststroom is:

$$I_v = n_1 I_1 + n_2 I_2 \approx 2 n_2 I_2.$$

Als de primaire en de secundaire wikkeling zo dicht om elkaar worden gewikkeld, dat praktisch het gehele primaire magnetische veld ook door de secundaire wikkeling gaat (d.w.z. de spreiding is te verwaarlozen), is de secundaire windingsspanning gelijk aan de primaire:

$$U = \frac{U_1}{n_1} \approx \frac{U_2}{n_2} \, . *$$

Het te verwerken stroom - spanningsprodukt is dus:

$$P=UI_v=2 U_2 I_2.$$

<sup>\*</sup> Bij deze principiële beschouwing verwaarlozen wij het spanningsverval in de primaire wikkeling.

De windingsspanning is gelijk aan het produkt van specifieke windingsspanning U' en kerndoorsnede  $A_{ij}$ :

$$U = A_{ij} U'.$$

De vensterstroomwindingen zijn gelijk aan het produkt van vensterstroomdichtheid S en vensterdoorsnede  $A_v$ :

$$I_v = A_v S.$$

Het doorsnedenprodukt  $A_{ij} A_v$  dat de afmetingen van een ijzerkernspoel in belangrijke mate bepaalt, wordt dus hier:

$$A_{ij} A_v = \frac{P}{U' S} = \frac{2 U_2 I_2}{U' S}.$$

Betreffende de maximaal toelaatbare specifieke windingsspanning U' zie men de beschouwingen op blz. 16; met betrekking tot de te kiezen vensterstroomdichtheid raadplege men hoofdstuk VII, in het bijzonder § 7, blz. 59.

Willen wij nu b.v. een transformator met een minimumvolume construeren, dan dient het kernvolume ongeveer gelijk te worden aan het wikkelingsvolume, dus:

 $V_{ij} \approx V_w,$ 

waarbij het kernvolume gegeven is door kerndoorsnede maal gemiddelde ijzerlengte, dus  $A_{ij} l_{ij}$ , en het wikkelingsvolume door vensterdoorsnede maal gemiddelde windingslengte, dus  $A_v l_w$ . De ijzerlengte en de vensterdoorsnede worden bepaald door de vorm van het kernblik. De lengte van de wikkeling en de kerndoorsnede hangen ook van de vorm van het kernblik af, maar bovendien nog van de stapelhoogte van de kernblikken.

Voor minimummassa moeten de massa's van kern en wikkeling bij benadering aan elkaar gelijk worden. Men heeft dan als voorwaarde:

$$\gamma_{ij} V_{ij} \approx \gamma_w V_w,$$

waarin  $\gamma_{ij}$  en  $\gamma_w$  de soortelijke massa's van de ijzerkern resp. de wikkeling voorstellen. De soortelijke massa's van ijzer, koper en aluminium zijn resp. 7,8 g/cm<sup>3</sup>, 8,9 g/cm<sup>3</sup> en 2,7 g/cm<sup>3</sup>. De ijzerkern bevat enkele procenten isolerende stof, daarom is  $\gamma_{ij}$  ca. 7,5 g/cm<sup>3</sup>. De wikkeling bevat in het algemeen behalve koper of aluminium nog een belangrijke hoeveelheid isolatiemateriaal en bij niet gecompoundeerde wikkelingen ook lucht; de soortelijke massa van isolatiemateriaal, als katoen en papier, kan op ca. 1 g/cm<sup>3</sup> gesteld worden, die van compound op asfaltbasis op b.v. 1,1 g/cm<sup>3</sup> en die van een gevulde thermohardende polyester op b.v. 1,8 g/cm<sup>3</sup>.  $\gamma_w$  zal dus voor verschillende ontwerpen sterk variëren. Uit berekeningen en ervaring is gebleken, dat men in het algemeen bij koperwikkelingen minimummassa krijgt, als  $A_{ij} \approx A_v$ ; bij aluminiumwikkelingen dient daarentegen  $A_{ij} < A_v$  te zijn.

BEREKENING VAN EEN TRANSFORMATOR

11]

Voor minimumprijs moeten de prijzen van de kern en de wikkeling ruwweg aan elkaar gelijk worden. Als wij de prijzen-per-massa van de gemonteerde kern en de gewikkelde spoel  $p_{ij}$  resp.  $p_w$  noemen, krijgen wij in eerste benadering:

$$p_{ij} \gamma_{ij} V_{ij} \approx p_w \gamma_w V_w.$$

Daar  $p_{ij}$  en  $p_w$  niet alleen van de materiaalprijzen, maar ook van werklonen, machinekosten e.d. afhangen, kunnen wij hier niet veel over zeggen, behalve de algemene opmerking, dat men naar verhouding meer ijzer zal nemen, als men dure draadsoorten voor de wikkeling gebruikt, en omgekeerd.

Opgemerkt mag worden, dat een wikkelingskoker met vierkante doorsnede gemakkelijker gewikkeld kan worden dan een met rechthoekige doorsnede. In verband hiermede kiest men in de praktijk als stapelhoogte van de kernblikken waarden tussen 3/4 en 2 keer de kernbreedte, met een voorkeur voor de waarde 1.

Is men op grond van de bovenstaande overwegingen en berekeningen tot een bepaalde kerndoorsnede (en vensterdoorsnede) gekomen, dan kunnen de windingsspanning U en daaruit het primaire en secundaire aantal windingen  $n_1$  resp.  $n_2$  worden berekend.

# Hoofdstuk III

# DE BEREKENING VAN EEN SMOORSPOEL

Bij de transformator hebben wij de magnetiseringsstroom in eerste instantie kunnen verwaarlozen. Bij de smoorspoel is de stroom uitsluitend magnetiseringsstroom en een functie van de spanning. Deze functie, geldig bij 50 Hz, is voor ijzer door fig. 3 (blz. 8) en voor lucht door fig. 5 (blz. 11) voorgesteld. Uit deze grafieken blijkt, dat bij gegeven specifieke windingsspanning lucht veel meer ampèrewindingen per luchtlengte vraagt dan ijzer per ijzerlengte, d.w.z. in een gegeven luchtvolume kan men veel meer blind vermogen bergen dan in hetzelfde ijzerkernvolume. Daar lucht bovendien lichter is dan ijzer en niets kost, is zij het aangewezen magnetische materiaal voor smoorspoelen. Daarom baseren wij de berekening van een *ijzer*smoorspoel op het *lucht*volume van een luchtspleet, hetgeen enigszins paradoxaal klinkt.

Wij kunnen om praktische redenen de ijzerkern niet missen. Deze vormt namelijk in hoofdzaak een kortsluiting voor het magnetische veld, hetgeen nodig is om de kleine luchtweg met een ijzerweg tot een gesloten magnetische schakel te maken, die door en om de wikkeling heen grijpt. Wegens het gevaar van overbelasting van het ijzer en wegens de warmteontwikkeling van de geleider zijn wij echter, evenals bij de transformator, aan een bepaalde specifieke windingsspanning en vensterstroomdichtheid gebonden, zodat wij uit het gegeven schijnbaar vermogen de kern en de wikkelingsdoorsnede op dezelfde wijze afleiden als bij de transformator, waarbij hier uiteraard de stroom slechts één keer gerekend wordt.

Nadat de afmetingen van de smoorspoel aldus op grond van de toelaatbare belastingen bepaald zijn, moeten wij ervoor zorgen, dat de stroom, die immers volledig magnetiseringsstroom is, zich op de vereiste waarde instelt. Zoals we gezien hebben, wordt dit gevonden in de juiste dimensionering van de luchtspleet. De weglengte van het magnetische veld in de luchtspleet dient zo groot te zijn, dat de stroomwindingen van de smoorspoel gelijk zijn aan de magnetiseringsstroomwindingen die in lucht voor de juiste windingsspanning nodig zijn. Daar echter het ijzer voor de daarin verlopende weg van het magnetische veld ook nog stroomwindingen vergt, wordt de luchtweg dienovereenkomstig korter gemaakt. Hoeveel stroomwindingen voor de ijzerBEREKENING VAN EEN SMOORSPOEL

lengte vereist zijn, wordt met behulp van fig. 3 bepaald. Welke luchtlengte nodig is voor het verwerken van de resterende stroomwindingen, wordt aan de hand van de "luchtlijn" van fig. 5 berekend.

De gang van de berekening is als volgt: Gegeven zijn de spanning  $U_n$  aan en de stroom  $I_n$  door de smoorspoel; dan is het te verwerken schijnbare vermogen:  $P = U_n I_n$ , en het produkt uit windingsspanning U en vensterstroomwindingen  $I_v$ , d.w.z.  $U I_v = P$ . Na vastlegging van de toelaatbare specifieke windingsspanning U' en vensterstroomdichtheid S verkrijgen wij het produkt van kerndoorsnede en vensterdoorsnede:  $A_{ij} A_v = P/(U'S)$ . Om b.v. het minimumvolume te verkrijgen, stellen wij weer het kernvolume bij benadering gelijk aan het wikkelingsvolume, waarna wij een geschikt kernblik en een geschikte stapelhoogte kunnen kiezen met behoud van de waarden van  $A_{ij} A_v$ . De gehele weglengte voor het magnetische veld in het gekozen kernblik zij l. Wij bepalen nu de lengte  $l_l$  van de luchtspleet.

Het ijzer neemt voor zijn rekening  $I_{ij} = I' l_{ij}$ , waarbij  $l_{ij}$  de ijzerlengte is, die wij ongeveer gelijk aan l kunnen stellen; I' volgt uit fig. 3 met behulp van U'. De resterende ampèrewindingen  $I_l$ , die door de luchtspleet moeten worden opgenomen, zijn:

$$I_l = I_v - I_{ij} = I_l l_l.$$

Het bedrag van de specifieke luchtampèrewindingen  $I_l'$  volgt uit de luchtlijn, fig. 5, weer met behulp van de specifieke windingsspanning U'. Dan kan de vereiste luchtspleetlengte worden berekend:

$$l_l = \frac{I_l}{I_l'} \, .$$

Tenslotte volgt het windingstal uit de windingsspanning U:

$$n=\frac{U_n}{U},$$

waarbij U bepaald wordt door

$$U = A_{ij} U'.$$

Bij de vol belaste transformator hebben wij de invloed van de magnetische eigenschappen van de ijzerkern op de vensterstroomwindingen verwaarloosd; immers, deze stroomwindingen worden normaliter in hoofdzaak door de secundaire stroomwindingen bepaald. Bij de smoorspoel hebben wij de voor de ijzerlengte nodige stroomwindingen slechts als correctie behandeld, omdat hierbij de stroomwindingen voornamelijk van de luchtspleet afhangen. Het functioneren van de transductor, die in het volgende hoofdstuk zal worden berekend, berust daarentegen volledig op de magnetische eigenschappen van de ijzerkern.

ш]

# Hoofdstuk IV

# DE BEREKENING VAN EEN TRANSDUCTOR

#### § 1. Algemene gezichtspunten

De magnetische eigenschappen van ijzer worden door gelijkstroomvoormagnetisering veranderd, die van lucht echter niet. Daarom wordt in een transductor, in tegenstelling met een gewone smoorspoel, geen luchtspleet toegepast.

Een transductor bevat in principe een wisselstroom- en een gelijkstroomwikkeling, die op een ijzerkern gewikkeld zijn. Om het optreden van een wisselspanning aan de klemmen van de gelijkstroomwikkeling te vermijden, bestaat de praktische uitvoering van een transductor bij voorkeur uit twee naast elkaar geplaatste, onderling gelijke wisselstroomsmoorspoelen, die nog ruimte in het venster overlaten. Een gemeenschappelijke gelijkstroomwikkeling, die om beide wikkelingen gelegd wordt, omvat beide kernen (zie fig. 8).



Fig. 8. Principeschets van een transductor. Twee gelijke ijzerkernen ij dragen ieder een wisselstroomwikkeling w, welke wikkelingen onderling gelijk zijn. Tevens dragen zij een gemeenschappelijke gelijkstroomwikkeling g. De wisselstroomwikkelingen zijn zo geschakeld dat er geen wisselspanning in de gelijkstroomwikkeling ontstaat. In a en b zijn de doorsneden van resp. de wikkelingen en de kernen getekend.

De wisselstroomspoelen worden zo met elkaar verbonden, vaak in serieschakeling, dat de in de gelijkstroomwikkeling geïnduceerde wisselspanningen elkaar opheffen.

#### IV] BRUIKBARE WERKGEBIED IN DE MAGNETISERINGSGRAFIEK

Omdat bij deze constructie overal in de kern het wisselveld en het regelende gelijkveld tegelijk aanwezig zijn, wordt het ijzer volledig benut. Daardoor verkrijgen wij bij een bepaald schijnbaar vermogen de kleinste transductor met het grootste regelingsgebied. Wij zullen onze beschouwingen tot dit type beperken.

Aan de klemmen van een transductor kunnen, afhankelijk van de schakelingen waarin hij opgenomen wordt, en afhankelijk van de regelgelijkstroom, vele combinaties van wisselspanning en -stroom optreden. In een stroomspanningsdiagram kan men ieder van deze combinaties door een punt voorstellen. Worden bij het regelen verschillende van deze punten doorlopen, dan wordt een lijn verkregen, die wij werklijn zullen noemen. Een dergelijke werklijn geeft dus de eisen weer die aan een bepaalde te ontwerpen transductor gesteld worden.

Wij zullen in § 2 aangeven, hoe deze transductor kan worden ontworpen met behulp van de magnetiseringsgrafiek die voor de specifieke stroomwindingen en de specifieke windingsspanningen geldt, d.w.z. voor de op één winding en de eenheid van lengte resp. doorsnede gereduceerde stroom- en spanningswaarden.

#### § 2. Het bruikbare werkgebied in de magnetiseringsgrafiek

Allereerst bespreken wij, hoe men in de grafiek van fig. 7 (blz. 14) het gebied bepaalt, dat voor ons doel geschikt is. Dit werkgebied is ingesloten door grenzen van verschillend karakter. Naar beneden en ten dele ook naar rechts wordt de uiterste grens gevormd door de karakteristiek voor siliciumijzerplaat zonder voormagnetisering ( $I_{g'} = 0$ ). Naar rechts worden wij bovendien in onze keuze vrij scherp begrensd door het sterke oplopen van deze lijn in de buurt van 30 mV/cm<sup>2</sup>; hierdoor wordt de bereikbare regelingsfaktor klein. Dit is b.v. bij een constante wisselspanning het quotient van de waarden van de wisselstroom in maximaal geregelde toestand ( $I_{g'}$  maximaal) en in ongeregelde toestand ( $I_{g'} = 0$ ).

Rechts onder is verder nog een min of meer onbruikbaar gebied, omdat daar de regeling, d.w.z. de wisselstroom- en spanningsvariatie als functie van de gelijkstroomvariatie, te klein en minder lineair is. Naar boven geeft het verloop der lijnen weinig aanleiding tot moeilijkheden; toch zal de verwarming van de wikkeling, d.i. een eigenschap van de elektrische schakel, de keuze van een hoge waarde van de specifieke wisselstroomwindingen I' verbieden. Aan de linkerkant van de grafiek wordt de keuze weer door een eigenschap van de magnetische schakel beperkt, doordat zich ook hier een gebied van slecht wordende, niet-lineaire regeling bevindt. In dit gebied, en

wel in het bijzonder links onder, is bovendien een onevenredig groot gelijkvermogen voor de regeling vereist.

#### § 3. Het inpassen van een gereduceerde werklijn in het bruikbare werkgebied

Na aldus de grenzen van het bruikbare werkgebied in fig. 7 aangegeven te hebben, gaan wij over tot het inpassen van een rechte werklijn in dit werkgebied. Hierbij gaan wij b.v. uit van een transductor die aan de volgende eenvoudige eisen moet voldoen: Bij de overgang van ongeregelde naar maximaal geregelde toestand dient de wisselstroom door de transductor toe te nemen, terwijl tegelijk de wisselspanning aan zijn klemmen afneemt. Tevens wordt de transductor uitsluitend zo gebruikt, dat zijn werklijn in een wisselstroomspanningsdiagram door een rechte lijn voorgesteld kan worden. Er worden geen bijzondere eisen aan het verband tussen de te regelen wisselstroom of wisselspanning en de regelende gelijkstroom gesteld.

De bepalende gegevens voor een ontwerp dat hieraan voldoet, worden dan als volgt verkregen. Uit de eisen zijn bekend de wisselspanning en de wisselstroom van de transductor zowel in ongeregelde als in maximaal geregelde toestand. Daardoor is de verhouding van de uiterste spanningswaarden en die van de uiterste stroomwaarden bepaald, die vanzelfsprekend ook voor de specifieke windingswisselspanning U' resp. de specifieke magnetiseringswisselstroomwindingen I' van fig. 7 gelden.

Wij stellen ons nu als weergave van de karakteristiek van de te ontwerpen transductor een "gereduceerde werklijn"\* van veranderlijke lengte voor, die wij over de grafiek van fig. 7 kunnen verplaatsen. De lengte van deze lijn en haar positie zijn daardoor bepaald, dat haar eindpunten aan de volgende eisen moeten voldoen: het werkpunt rechts onder vertegenwoordigt de combinatie maximale spanning en minimale stroom, het werkpunt links boven vertegenwoordigt de combinatie minimale spanning en maximale stroom (benevens de maximale regelgelijkstroom); verder moeten de gegeven verhoudingen van maximale tot minimale wisselspanning resp. -stroom bij het verschuiven van de gereduceerde werklijn over de grafiek steeds worden aangehouden. Om kleine transductoren te krijgen trachten wij deze gereduceerde werklijn in het gebied van hoge ijzer- en vensterbelastingen onder te brengen. Wij proberen dus zover in de rechter bovenhoek van fig. 7 te komen, als de gevraagde werklijn en de grenzen van het bruikbare werkgebied dit toelaten. Fig. 9 illustreert een voorbeeld van de manier waarop men hierbij te werk gaat.

<sup>\*</sup> Het invoeren van de uitdrukking "gereduceerd" duidt op de overgang naar specifieke grootheden.


Fig. 9. Voorbeeld van het onderbrengen van een gereduceerde werklijn, die de gevraagde werklijn van een transductor vertegenwoordigt, in de grafiek van fig. 7, waarvan deze figuur een vereenvoudigde afbeelding is. Gevraagd is een maximale regeling van 3 : 1 voor de spanning aan de transductor bij een gelijktijdige regeling van 1 : 3 voor de stroom door de transductor. In de figuur zijn drie mogelijkheden aangegeven om de gereduceerde werklijn te plaatsen : a, b en c. Keuze a levert een kleine transductor op. Deze kan echter bij maximale regeling te warm worden; ook vraagt de regeling daar een onevenredig grote gelijkstroom-variatie. Met keuze c verkrijgen wij een onnodig grote transductor. Keuze b zal vermoedelijk een goed compromis tussen de verschillende gezichtspunten voorstellen.

#### BEREKENING VAN EEN TRANSDUCTOR

In ons voorbeeld hebben wij ons beperkt tot het eenvoudige geval waarbij als werklijn van de te ontwerpen transductor een rechte lijn gevraagd werdt. Nu zijn er allerlei schakelingen denkbaar waarin men de wisselstroom en -spanning met behulp van een transductor zou willen regelen. Bij ieder van deze schakelingen zou dan de werklijn van de gezochte transductor door een andere kromme voorgesteld moeten worden. Daarnaast kunnen in één en dezelfde schakeling de overige schakelelementen, b.v. weerstanden of zelfinducties, in waarde veranderen, terwijl ook de spanning of de stroom van de bron kan variëren.

Het is dus duidelijk dat een transductor niet alleen een bepaalde werklijn kan bestrijken, maar een geheel werkgebied waarin zijn gedrag niet alleen van zijn eigen eigenschappen maar ook van die van de uitwendige schakeling afhangt. Daar wij ons hier bezig houden met het ontwerpen van transductoren, en niet met het beschouwen van schakelingen, dienen wij de eisen die de schakeling aan de transductor stelt, als gegevens te ontvangen.

De bedoelde gegevens kunnen worden samengevat als omhullende van een werkgebied in een stroom-spanningsdiagram, waarbinnen dus alle gewenste werklijnen, d.w.z. alle werkpunten van de gezochte transductor, liggen. Op een soortgelijke wijze als wij een gereduceerde werklijn in fig. 9 hebben ingepast in het bruikbare werkgebied, zullen wij in fig. 11 laten zien, hoe men dit voor een gereduceerd werk*vlak* kan doen.

### § 4. Het inpassen van een gereduceerd werkvlak in het bruikbare werkgebied

Gegeven is de omhullende van het werkgebied van de gezochte transductor in een stroom-spanningsdiagram, b.v. de rechthoeklijn in fig. 10. Wij dienen nu een met deze figuur overeenkomend gereduceerd werkvlak zo goed mogelijk in het bruikbare werkgebied van fig. 7 te passen, zie fig. 11. Voor de



Fig. 10. Voorbeeld van het werkgebied voor een te ontwerpen transductor. In een wisselstroom-spanningsdiagram is in ons voorbeeld door een omhullende rechthoeklijn het gebied afgegrensd waarbinnen alle stroom-spanningscombinaties liggen die de gezochte transductor bij verschillende belastingen en bij verschillende regelingstoestanden te verwerken krijgt. De grootste spanningsverhouding in ons voorbeeld is 1 : 3, de grootste stroomverhouding is 1 : 2,5.

[IV



Fig. 11. Voorbeeld van het inpassen van een gereduceerd werkvlak dat het gevraagde werkgebied volgens fig. 10 van een transductor vertegenwoordigt, in de grafiek van fig. 7, waarvan bovenstaande figuur een vereenvoudigde afbeelding is. Het bedoelde werkgebied heeft een maximale stroomverhouding 1 : 2,5 en een maximale spanningsverhouding 1 : 3. In deze figuur zijn drie mogelijkheden getekend, hoe een daarmee overeenkomend gereduceerd werkvlak geplaatst zou kunnen worden.

#### BEREKENING VAN EEN TRANSDUCTOR

relatie tussen beide figuren geldt de volgende regel: hebben twee willekeurig gekozen punten in het omschreven gebied van fig. 10 een bepaalde stroomverhouding en een bepaalde spanningsverhouding, dan moeten de daarmee corresponderende punten van het in te passen gereduceerd werkvlak in fig. 11 dezelfde verhouding van de specifieke wisselstroomwindingen resp. dezelfde verhouding van de specifieke windingsspanningen hebben.

In fig. 11 zijn drie rechthoeken getekend, die alle in de genoemde zin met het voorgeschreven werkgebied overeenkomen. Wij gaan na, welke van deze drie rechthoeken het beste als grondslag voor de gezochte transductor gekozen kan worden. De grootste rechthoek (rechts boven) zou de kleinste afmetingen leveren, echter zou de daarmee berekende transductor in maximaal geregelde toestand (zie de hoek links boven) wegens de grote stroombelasting van de wisselstroom- en de gelijkstroomwikkeling vermoedelijk te warm worden. Bij de kleine rechthoek links onder zou dit bezwaar niet optreden; de met behulp van dit gereduceerde werkvlak berekende transductor zou daarentegen overdreven groot worden. De middelste rechthoek zal een goed compromis tussen de twee andere gevallen zijn. Ook blijkt de lineariteit van de regeling in de middelste rechthoek enigszins beter dan in de onderste te zijn, d.w.z. als wij langs een bepaalde werklijn door het werkvlak gaan, varieert de afstand tussen twee naburige magnetiseringskrommen minder bij de middelste rechthoek.

Wij willen hieraan nog enige algemene opmerkingen over het inpassen van een gewenste werklijn of een gewenst werkvlak toevoegen. Hebben wij een bepaalde plaats voor het werkvlak in de grafiek fig. 7 gekozen, dan dienen wij aan de hand van de gelijkstroomparameter te controleren of de voor maximale regeling vereiste  $I_{g'}$  (specifieke gelijkstroomwindingen) niet belangrijk groter is dan de bijbehorende I' (specifieke wisselstroomwindingen). Is dit wel het geval, dan kan een ongewenst groot ontwerp ontstaan. Men kan dan beter in fig. 7 een gebied opzoeken waar weliswaar de ijzerbelasting, maar ook de verhouding regelgelijkstroom tot gebruikswisselstroom kleiner is.

In het gebied van de kleinste regelstromen en de hogere ijzerbelasting (rechts onder in fig. 7) is de regeling zwak. Indien dit een bezwaar is, kan men met een kleine voormagnetisering beginnen, b.v. met een gelijkstroom die met 1 à 3 A·wdg/cm overeenkomt.

Om een indruk van de praktisch te verwezenlijken werkgebieden te geven, zij vermeld dat men, bij gelijktijdige regeling van stroom en spanning, voor het produkt van de maximale stroom- en de maximale spanningsverhouding een waarde van ca. 10 moeilijk kan overschrijden. Met deze verhoudingen bedoelen wij quotienten van de maximale en de minimale waarde van de wisselstroom resp. de wisselspanning die bij de desbetreffende transductor kunnen voorkomen. In fig. 10 b.v. is het bedoelde produkt  $(0,5/0,2) \cdot (90/30) = 7,5$ . Voor de extreme gevallen waarin men de stroom wil regelen bij constante spanning, of de spanning bij constante stroom, kan de waarde van ca. 10 niet worden bereikt.

### § 5. De bepaling van de constructieve gegevens

Wij willen nu bespreken, hoe men de constructieve gegevens bepaalt van de transductor waarvoor men de plaats van het gereduceerde werkvlak heeft gekozen. Anders dan bij de berekening van de transformator en de smoorspoel met luchtspleet ligt hier het kernvolume door de magnetische eigenschappen van het ijzer vast, waarbij echter wel de door het doorsnedenprodukt gegeven grenzen in acht genomen moeten worden. Immers, het kernvolume van de transductor, of, nauwkeuriger gezegd, het produkt van kerndoorsnede  $A_{ij}$  en ijzerlengte  $l_{ij}$ , volgt uit de onderlinge vergelijking van een willekeurig punt uit het gegeven werkgebied met het corresponderende punt in het ingepaste gereduceerde werkvlak. Wij beschouwen b.v. het punt B in fig. 10 en het daarmee corresponderende punt B' in fig. 11. Punt B vertegenwoordigt een schijnbaar vermogen, punt B' een specifiek schijnbaar vermogen; het quotient van deze grootheden levert ons het gezochte kernvolume. Dit kernvolume kan verwezenlijkt worden door verschillende combinaties van ijzerlengte en kerndoorsnede, waarbij de bijbehorende transductoren onderling verschillende windingstallen zullen krijgen.

Voor een nadere keuze kunnen wij nu nog uit rendements- of verwarmingsoverwegingen de maximaal toegelaten vensterstroomdichtheid die bij het werkpunt B, respectievelijk B' mag optreden, als bepalende grootheid toevoegen. Bij deze punten hebben wij namelijk te maken met de grootste wisselstroom en de grootste regelgelijkstroom. Dan is het ontwerp al grotendeels bepaald; wij hebben wel nog enige variatiemogelijkheid om de vorm van het kernblik en de stapelhoogte zo te kiezen, dat het voor de juiste regeling benodigde produkt van ijzerlengte en kerndoorsnede behouden blijft.

Kiezen wij echter nu ook nog de vorm van het blik, b.v. het E-I-blik van fig. 12, dan zijn de voor juiste regeling vereiste kernafmetingen en het windingstal vastgelegd. Een en ander moge uit de volgende berekening blijken.

Als in het werkpunt B van fig. 10 de wisselspanning  $U_n$  en de wisselstroom  $I_n$  is, en U' en I' de corresponderende specifieke waarden in het werkpunt B' van fig. 11 zijn, is het kernvolume van de gezochte transductor gegeven door:

$$V_{ij} = A_{ij} l_{ij} = \frac{U_n I_n}{U' I'} = \frac{P}{U' I'} = \frac{U I}{U' I'},$$

als wij P het schijnbaar vermogen van de transductor in het werkpunt B noemen, en U en I de voorlopig nog onbekende windingsspanning resp. wisselstroomwindingen in dit punt.

De te bepalen vensterdoorsnede  $A_v$  moet behalve de wisselstroomwindingen I ook de gelijkstroomwindingen  $I_g$  omvatten. De verhouding van I en



Fig. 12. E-I-blik. Uit het oorspronkelijke blik met de afmetingen 6*a* en 8*a* (zie fig. 12a) worden twee E-vormige en twee I-vormige stukken geponst, aldus twee transformatorblikken opleverend. Het I-stuk met de afmetingen 6*a* en *a* levert het sluitstuk voor het E-stuk met de buitenafmetingen 4*a* en 6*a* (zie fig. 12b). De middenpoot van het E-stuk, waaromheen in het algemeen de wikkeling wordt gelegd, heeft de breedte 2*a*, de ijzerlengte  $l_{ij}$  is 12*a*, terwijl de vensterdoorsnede  $A_v$  gelijk is an 3*a*<sup>2</sup>.

 $I_g$  in het werkpunt *B* is dezelfde als de verhouding van de daarmee corresponderende specifieke waarden *I'* en  $I_{g'}$  in het punt *B'*, die wij in fig. 11 kunnen aflezen. Bepalen wij nu nog met behulp van rendements- of thermische gezichtspunten (zie hoofdstuk VII) de maximaal toegelaten vensterstroomdichtheid *S* voor de wisselstroom en  $S_g$  voor de regelgelijkstroom, dan verkrijgen wij voor de gezochte vensterdoorsnede  $A_v$  de betrekking:

$$A_v = \frac{I}{S} + \frac{I_g}{S_g} = \frac{I}{S} \left( 1 + \frac{I_g'S}{I'S_g} \right).$$

Daar de kerndoorsnede  $A_{ij}$  door de windingsspanning U en door de spe-

[IV

#### BEPALING VAN DE CONSTRUCTIEVE GEGEVENS

cifieke windingsspanning U' van het werkpunt B' bepaald is:  $A_{ij} = U/U'$ , verkrijgen wij voor het doorsnedenprodukt:

$$A_{ij} A_v = \frac{UI}{U'S} \left( 1 + \frac{I_g'S}{I'S_g} \right) = \frac{P}{U'S} \left( 1 + \frac{I_g'S}{I'S_g} \right).$$

Wij kunnen nu nog de vorm van het kernblik kiezen. Bij iedere vorm hoort een zeker verband tussen de ijzerlengte  $l_{ij}$  en de vensterdoorsnede  $A_v$ , dat men kan schrijven als:

$$A_v = c \, l_{ij}^2.$$

De factor c kan voor verschillende blikvormen uit de tekening van het desbetreffende blik worden verkregen. B.v. is voor E-I-blik (zie fig. 12)  $l_y = 12a$ , als a de kleine zijde van de vensterdoorsnede is, verder  $A_v = 3a^2$  en dus:

$$c=\frac{3}{12^2}\approx 0,021.$$

Uit:

$$\frac{A_v}{l_{ij}} = c \ l_{ij} \ \text{en} \ V_{ij} \ = l_{ij} \ A_{ij}$$

volgt de ijzerlengte:

 $l_{ij} = \frac{A_{ij} A_v}{c V_{ij}},$ 

waarmede de afmetingen van de transductor bepaald zijn.

Is het kernblik met de berekende ijzerlengte niet beschikbaar, dan brenge men door variatie van de stapelhoogte, d.w.z.  $A_{ij}$ , het ijzervolume op de juiste waarde, waardoor men in het juiste regelingsgebied blijft. In dit geval moet men dus van de gekozen vensterstroomdichtheden S en  $S_g$  afwijken, als men de gekozen vorm van het kernblik wil aanhouden. Het windingstal moet dan ook met de werkelijke ijzerlengte in overeenstemming worden gebracht. De wisselstroomwindingen in maximaal geregelde toestand (werkpunt B') worden:  $I = l_{ij}I'$  en het windingstal van de wisselstroomwikkeling:

$$n=\frac{I}{I_n}.$$

De gelijkstroomwindingen worden daarbij:

 $I_g = l_{ij} \, I_g'$ 

en het windingstal van de regelwikkeling:

$$n_g = \frac{I_g}{I_{gn}} ,$$

als wij de maximale regelgelijkstroom  $I_{gn}$  noemen.

IV]

Is niet de maximale gelijkstroom, maar de maximale gelijkspanning  $U_{gn}$  gegeven, dan berekenen wij het windingstal van de regelwikkeling op de volgende wijze. Uit de gelijkstroomwindingen  $I_g$  volgt de windingsgelijkspanning  $I_g R_g$ , als de gehele regelwikkeling uit een enkele winding zou bestaan, waarvan de weerstand:

$$R_g = \varrho \, \frac{gl}{f_g \, A_g}$$

is. Hierin is  $\varrho$  de soortelijke weerstand van het geleidermateriaal,  $l_g$  de gemiddelde windingslengte van de regelwikkeling,  $A_g$  dat gedeelte van de vensterdoorsnede dat ter beschikking voor deze wikkeling staat, en  $f_g$  de vulfactor, d.w.z. de verhouding van de som van alle geleiderdoorsneden in de uiteindelijke gelijkstroomwikkeling tot  $A_g$ . Het windingstal volgt dan uit de verhouding van de gegeven gelijkspanning tot de windingsgelijkspanning:

$$n_g = \frac{U_{gn}}{I_g R_g} \, .$$

Voor een uitvoeriger uiteenzetting betreffende de wikkelingsweerstand zie blz. 48.

Voor de praktische uitvoering wordt, zoals op blz. 24 werd uiteengezet, de kern in tweeën gesplitst, waarbij dus iedere helft de halve stapelhoogte krijgt (zie fig. 8). Bij serieschakeling van de beide wisselstroomwikkelingen krijgt ieder het gehele berekende windingstal n; immers, wegens de halvering van de kerndoorsnede krijgt iedere transductorhelft slechts de halve windingsspanning, terwijl de stroom ongewijzigd blijft, daar bij het splitsen van de kern de ijzerlengte niet verandert. Kiest men een parallelschakeling van de twee wisselstroomwikkelingen, dan krijgt ieder het dubbele aantal windingen, dus 2 n.

Wat de constructie van een transductor aangaat, zal men naar een stapelhoogte streven die kleiner dan de breedte van de bewikkelde middenpoot is (zie fig. 8b). Hierdoor wijkt de vorm van de wisselstroomwikkelingen wweliswaar van de gemakkelijk te wikkelen kwadratische vorm af, daarentegen benadert de vorm van de gelijkstroomwikkeling g de kwadratische vorm beter.

### § 6. Vervorming

Zoals wij op blz. 16 al aangeduid hebben, kunnen bij ijzerkernspoelen vervormingen van de sinusvorm van de stroom of de spanning optreden. Deze worden veroorzaakt door de niet-lineariteit van de magnetische eigenschappen van het ijzer, hetgeen door de kromming van de karakteristieken van fig. 7 wordt weerspiegeld. Het ijzer raakt bij hogere belastingen verzadigd:

#### VERVORMING

de magnetiseringsstroom neemt daar sterker toe dan de spanning, waarbij de karakteristieken uiteindelijk naar de steilheid van de luchtlijn streven. (In fig. 7 heeft de luchtlijn om praktische redenen een van de rest afwijkende verticale schaal gekregen). Voor de vorm van de magnetiserende wisselstroom betekent dit, dat zonder voormagnetisatie bij de hogere waarden van de specifieke windingsspanning-per-frequentie, b.v. 0,5 mV/(wdg·cm<sup>2</sup>·Hz), bij een sinusvormig met de tijd verlopende spanning het tijdelijke verloop van de magnetiseringsstroom een spitsere vorm krijgt.

Dit verschijnsel kan men het duidelijkst bij een onbelaste transformator en een niet-geregelde transductor waarnemen. Bij een belaste transformator wordt de vorm van de magnetiseringsstroom door de vorm van de belastingsstroom gemaskeerd, bij een smoorspoel met luchtspleet wordt het verschijnsel door de magnetische lineariteit van de luchtspleet verzwakt.

In een transductor volgens de constructie van fig. 8 wordt bij regeling de magnetische verzadiging van de ene kern door het gelijkveld tijdens de ene helft van de wisselstroomperiode bevorderd en tijdens de andere helft tegengewerkt; voor de andere kern geldt het omgekeerde. De uiteindelijke vorm van de stroom wordt dan door beide kernen samen bepaald. In het algemeen moet men bij de door ons beschouwde transductoren op een niet steeds te verwaarlozen vervorming van de wisselstroom of de wisselspanning rekenen. Door de keuze van serie- of parallelschakeling van de wisselstroomwikkelingen kan men de vervorming en de vereffeningsstromen in de verschillende wikkelingen beïnvloeden.

Als men een transductor construeert waarin de richting van het regelende gelijkveld dwars op die van het wisselveld staat, heeft deze transductor o.a. een kleinere vervorming. Daar deze soort transductoren moeilijk zijn te construeren en relatief groot worden, zullen wij er niet verder op ingaan.

## Hoofdstuk V

# **DE BEREKENING VAN EEN LEKTRANSFORMATOR**

Van een lektransformator zijn de primaire wikkeling en de secundaire wikkeling niet, zoals bij de gewone transformator, om elkaar heen gewikkeld, maar ieder afzonderlijk om de kern geplaatst (zie de schematische tekening van fig. 13).

Bij de gewone transformator gaat het gehele veld door beide wikkelingen, zodat de windingsspanningen in beide wikkelingen aan elkaar gelijk zijn en tevens met constante netspanning bij belasting nagenoeg onveranderd blijven. De belasting heeft alleen invloed op de primaire stroom, die zoveel toeneemt als nodig is om de invloed van de secundaire stroom op het veld op te heffen; zie hoofdstuk I, § 4e, blz. 12.

Bij de *lektransformator* gaat het gehele primaire veld alleen dan door de secundaire wikkeling, als deze niet belast is. In dit geval is dus de secundaire windingsspanning gelijk aan de primaire (fig. 13a).

In het geval van belasting daarentegen gaat een gedeelte van het primaire veld tengevolge van de tegenwerking van de secundaire stroomwindingen niet meer door de secundaire kern, maar door de luchtruimte tussen de twee jukken. Wegens dit "lek" voor het veld spreekt men van "lektransformator". Door het secundaire kernstuk gaat dus slechts het resterende gedeelte van het primaire veld, zodat de secundaire windingsspanning bij belasting kleiner wordt dan de primaire (fig. 13b).

Vergroten wij de belasting, dan verplaatst zich een steeds groter wordend gedeelte van het primaire veld naar de luchtruimte, waarbij het veld in de secundaire wikkeling en daarmee de secundaire windingsspanning steeds kleiner worden. Bij kortsluiting van de secundaire wikkeling gaat het gehele primaire veld door de luchtruimte, en zijn het veld in de secundaire wikkeling en de secundaire windingsspanning praktisch nul geworden (fig. 13c).

Wij willen nu nader ingaan op de verdeling van het primaire veld, d.w.z. de primaire windingsspanning, over het secundaire kernstuk en de luchtweg, zowel bij inductieve als bij weerstandsbelasting.

Eerst beschouwen wij de lektransformator met inductieve belasting, omdat de behandeling hiervan op eenvoudige wijze aansluit bij die van de smoor-



Fig. 13. Schematische voorstelling van een lektransformator met de primaire windingsspanning  $U_1$  in verschillende bedrijfstoestanden.

a) Secundair open: de secundaire windingsspanning  $U_{2o}$  is nagenoeg gelijk aan de primaire windingsspanning, de primaire stroomwindingen  $I_{1o}$  zijn wegens hun evenredigheid met de magnetische weerstand van de ijzerkern hier klein.

b) Secundair belast door een spoel: wegens de tegenwerking van de secundaire stroomwindingen gaat slechts een gedeelte van het primaire veld door de secundaire wikkeling, terwijl het resterende gedeelte zich door de luchtruimte sluit. Dientengevolge is de secundaire windingsspanning kleiner dan de primaire windingsspanning.

c) Secundair kortgesloten: de secundaire kortsluitstroomwindingen  $I_{2k}$  zijn vrijwel gelijk aan de primaire stroomwindingen  $I_{1k}$ ; deze zijn wegens hun evenredigheid met de magnetische weerstand van de luchtweg hier groot.

d) Secundair kortgesloten, luchtweg voor een groot deel door ijzer overbrugd:  $I_{2k}^* \approx I_{1k}^*$  is nu belangrijk kleiner dan bij c, daar de magnetische weerstand van het circuit veel kleiner is, en wel ongeveer gelijk aan die van de resterende luchtspleet.

spoel met luchtspleet. Immers, de in beide gevallen optredende stromen hebben een fazeverschuiving van 90° t.o.v. de bijbehorende spanningen.

De lektransformator met onbelaste secondaire wikkeling (fig. 13a) gedraagt zich als een smoorspoel zonder luchtspleet. Als de belasting van de ijzerkern ten gevolge van de primaire netspanning voldoende onder de verzadiging blijft, is de windingsspanning op alle plaatsen van de kern gelijk aan de primaire windingsspanning; er loopt een kleine primaire stroom, die de stroomwindingen voor de weg van het veld door de ijzerkern levert.

Vervolgens verwijderen wij de secundaire wikkeling van de lektransfor-



Fig. 14. Schematische voorstelling van een lektransformator. De figuren a, b en c stellen drie equivalente toestanden voor, waarbij zowel de primaire windingsspanning  $U_1$  als de primaire stroom  $I_1$  dezelfde zijn. De ijzerstroomwindingen zijn hierbij verwaarloosd.

a) De secundaire kern bevat een relatief lange luchtspleet, waardoor een verdeling van het primaire veld over deze luchtspleet en de luchtweg tussen de jukken optreedt.

b) Bij gesloten secundaire kern wordt dezelfde veldverdeling als bij a verkregen door een geschikte inductieve belasting van de secundaire wikkeling. Dan is de secundaire stroom gelijk aan  $I_1$ . De som van de secundaire windingsspanning  $U_2$  en de windingsspanning van de luchtweg is gelijk aan  $U_1$ , zoals door het veldlijnenbeeld is aangegeven.

c) Dezelfde luchtwindingsspanning als bij a en b wordt verkregen met een weerstandsbelasting die dezelfde secundaire stroom als bij b opneemt. Hier is de *vectoriële* som van de (nu grotere) secundaire windingsspanning  $U_2^*$  en de luchtwindingsspanning gelijk aan  $U_1$ . Het fazeverschil tussen  $I_1$  en  $U_1$  is bij c kleiner dan 90°.

38

а

b

C

mator en brengen in het secundaire kernstuk een vrij lange luchtspleet aan; zie fig. 14a. Dientengevolge neemt de primaire stroom sterk toe, terwijl zijn faze, als wij van verliezen afzien, 90° achter blijft ten opzichte van de primaire spanning. Als wij de nullaststroomwindingen (de ijzerstroomwindingen) verwaarlozen, kunnen wij zeggen, dat de primaire stroomwindingen worden gebruikt voor de weg van het veld door de lucht. De zelfde gedachte kan men naar analogie van begrippen die in elektrische stroomkringen toegepast worden, ook als volgt formuleren: om een veld van een bepaalde windingsspanning door de "magnetische weerstand" van de luchtspleet te drijven, is de "magnetische spanning" van een zeker aantal stroomwindingen nodig.

In de secundaire kern van fig. 14a is een *lange* luchtspleet aangebracht, die een naar verhouding grote magnetische weerstand heeft. Immers, de magnetische weerstand van een luchtweg is evenredig aan zijn lengte en omgekeerd evenredig aan zijn doorsnede, zoals uit de beschouwingen over het magnetisch veld in lucht (I, § 4, d, ) duidelijk zal zijn. Hierdoor wordt de luchtweg tussen de jukken, die parallel ligt aan de luchtspleet in de secundaire kern, werkzaam. Het primaire veld splitst zich en verdeelt zich over de beide luchtwegen. De verdeling geschiedt omgekeerd evenredig aan de magnetische weerstanden van beide wegen. In de sterk gestileerde fig. 14a is de verdeling van het primaire veld over de twee luchtwegen schematisch door de verdeling van veldlijnen aangeduid.

Wij kunnen nog een tweede gedachte naar voren brengen die later van nut zal blijken te zijn. Daar het ijzer vrijwel geen magnetische weerstand bezit, is de magnetische spanning tussen de uiteinden van de luchtspleet in de secundaire kern gelijk aan die tussen de jukken; beide magnetische spanningen zijn uiteraard gelijk aan de primaire stroomwindingen, als wij de ijzerstroomwindingen verwaarlozen.

Nu vervangen wij de luchtspleet in de secundaire kern door een secundaire wikkeling die met een spoel is belast; zie fig. 14b. De verliezen in wikkeling en spoel zijn verwaarloosbaar klein. De impedantie van de spoel is zo gekozen, dat de veldverdeling dezelfde wordt als bij fig. 14a, hetgeen gecontroleerd kan worden door de secundaire windingsspanning en de luchtwindingsspanning van het luchtveld tussen de jukken te meten\*. Deze veldverdeling wordt bereikt, als de secundaire stroomwindingen door hun tegenwerking aan de jukken dezelfde magnetische spanning geven als de luchtspleet in de secundaire kern van fig. 14a. Hiertoe moeten de secundaire stroomwindingen van fig. 14b gelijk worden aan de primaire stroomwindingen van fig. 14a;

<sup>\*</sup> De luchtwindingsspanning kan men meten aan een open winding die het luchtveld omvat.

de primaire stroomwindingen van fig. 14b worden dan uiteraard ook weer dezelfde als bij fig. 14a. De som van de secundaire windingsspanning en de luchtwindingsspanning is gelijk aan de primaire windingsspanning. De stromen zijn 90° uit faze ten opzichte van de spanningen.

Tenslotte vervangen wij de inductieve belasting van de lektransformator door een weerstandsbelasting, waardoor dus secundaire windingsspanning en secundaire stroom in faze komen; zie fig. 14c. De waarde van de weerstand wordt zo gekozen, dat het luchtveld hetzelfde wordt als in fig. 14a en b. Daartoe moeten de jukken dezelfde magnetische spanning krijgen als bij a en b, terwijl ook de faze van deze magnetische spanning ten opzichte van de luchtwindingsspanning dezelfde als bij a en b moet zijn. Dit kan alleen tot stand komen als de secundaire en de primaire stroomwindingen dezelfde zijn als in fig. 14b, terwijl deze stromen 90° uit faze zijn ten opzichte van de luchtwindingsspanning.

Het verschil tussen fig. 14b en c komt daarin tot uitdrukking, dat de secundaire windingsspanning 90° uit faze moet zijn ten opzichte van de luchtwindingsspanning. Dientengevolge geschiedt de splitsing van het primaire veld in luchtveld en secundair veld zodanig, dat de *vectoriële* som van de luchtwindingsspanning  $U_l$  en de secundaire windingsspanning  $U_2^*$  gelijk is aan de primaire windingsspanning  $U_1$ ; zie fig. 15. Tussen de primaire stroom en  $U_1$  bestaat een fazeverschil, dat uiteraard kleiner is dan 90°.

Met dit verworven inzicht omtrent de spanning en de stroom zijn wij in staat, de stroom-spanningskarakteristiek van een lektransformator te berekenen en deze aan bepaalde eisen aan te passen. Ter illustratie hiervan geven wij een sterk geschematiseerd voorbeeld. Gevraagd wordt de karakteristiek van de secundaire stroomwindingen en de windingsspanning van een lektransformator met weerstandsbelasting (zie fig. 14c). De primaire windingsspanning  $U_1$  is gegeven; verder zijn bekend de kerndoorsnede  $A_{ij}$ , de luchtweg  $l_i$  tussen de jukken en de luchtdoorsnede  $A_i$  in het venster loodrecht op  $l_i$ . Wij verwaarlozen de magnetiseringsstroom voor het ijzer. Terwille van de overzichtelijkheid nemen wij aan, dat het bij belasting optredende luchtveld alleen in de vensterruimte van het ene juk naar het andere loopt, en wel gelijkmatig verdeeld parallel met de richting van  $l_i$ . In werkelijkheid gaat het veld ook door de rest van de luchtruimte van het ene juk naar het andere.

Bij verschillende weerstandsbelastingen kan het verband tussen de primaire, de secundaire en de luchtwindingsspanning met behulp van een bekende meetkundige constructie worden afgeleid uit de rechthoekige driehoek volgens fig. 15. De primaire windingsspanning  $U_1$  is als basis gekozen, de verschillende belastingen worden afgebeeld door de rechte tophoek te verschuiven langs een halve cirkel met  $U_1$  als middellijn.  $U_2^* = U_1$  is nullast,  $U_l = U_1$  is kortsluiting.

De secundaire stroomwindingen worden als volgt uit  $U_l$  afgeleid. Voor de specifieke luchtwindingsspanning  $U_l' = U_l/A_l$  zoeken wij op de luchtlijn in fig. 5 of 7 de bijbehorende specifieke stroomwindingen  $I_l'$  op. De secundaire stroomwindingen  $I_2$  zijn dan gelijk aan  $I_l' l_l$ . De maximaal bereikbare secundaire stroomwindingen, die bij kortsluiting van de secundaire wikkeling worden verkregen, zijn gegeven door de stroomwindingen die nodig zijn om het gehele primaire veld door de luchtweg te drijven. Hierbij is dus de luchtwindingsspanning gelijk aan de primaire windingsspanning, terwijl de secundaire windingsspanning nul is.

Wij zien, dat de secundaire kortsluitstroomwindingen evenredig zijn met de lengte van de luchtweg en omgekeerd evenredig met de luchtdoorsnede. Als men een grote kortsluitstroom wil bereiken, zal men er dus naar streven,



Fig. 15. Spanningsdiagram van een lektransformator met weerstandsbelasting. Afhankelijk van de grootte van de belasting verdeelt het primaire veld zich over het secundaire kernstuk en de luchtweg.

Het fazeverschil tussen het luchtveld en het veld door de secundaire wikkeling, en dus ook het fazeverschil tussen de luchtwindingsspanning  $U_t$  en de secundaire windingsspanning  $U_2$ , is 90°. De vectoriële som van  $U_t$  en  $U_2^*$  is gelijk aan de primaire windingsspanning  $U_1$ . Bij verandering van de secundaire belastingsweerstand van  $\infty$  naar 0 beweegt het verbindingspunt van  $U_2^*$  en  $U_t$  zich op een halve cirkel met  $U_1$  als middellijn, en wel van  $U_2^* = U_1$  naar  $U_2^* = 0$ .

Het verloop van de secundaire stroomwindingen  $I_2$  kan worden gevonden uit het verloop van  $U_l$  met behulp van de luchtlijn in fig. 5, 6 en 7, en de afmetingen van de luchtweg tussen de twee jukken van de ijzerkern:  $I_2 = U_l \cdot (I_l'/U') \cdot l_l/A_l$ . Bij 50 Hz is  $I_l'/U' =$ 253 A · cm · wdg<sup>2</sup>/mV;  $l_l$  is de gemiddelde lengte en  $A_l$  de gemiddelde doorsnede van het veld in de lucht.

de luchtweg lang en de luchtdoorsnede klein te houden. In analogie met de stroom in geleiders kan men zeggen, dat men bij gegeven veld de magnetische weerstand van de luchtweg groot moet maken om tussen de uiteinden van deze weg een grote magnetische spanning, d.w.z. stroomwindingen, te krijgen.

Zoals eerder is gezegd, loopt het veld niet alleen door de vensterruimte van het ene juk naar het andere, maar ook door de omgevende ruimte. Daardoor wordt de magnetische weerstand tussen de jukken tegelijk met de

kortsluitstroomwindingen in werkelijkheid kleiner dan wij met onze vereenvoudigde onderstellingen berekend hebben.

Men kan de karakteristiek van een lektransformator beïnvloeden door de luchtweg meer of minder met ijzer te overbruggen (zie fig. 13d). Hierdoor wordt de magnetische weerstand van de luchtweg tegelijk met de secundaire kortsluitstroomwindingen verkleind. De nieuwe karakteristiek kan in het geval van weerstandsbelasting weer met behulp van fig. 15 uit de nu geldende waarde van de kortsluitstroomwindingen  $I_{2k}$  worden afgeleid. Deze kortsluitstroomwindingen ( $U_2^* = 0$ ;  $U_l = U_1$ ) worden bepaald op dezelfde wijze als op blz. 41, maar nu worden voor de luchtdoorsnede  $A_l$  en de luchtlengte  $l_l$  de waarden genomen die na gedeeltelijke overbrugging nog overblijven.

Men kan de kortsluitstroom ook regelen door de magnetische weerstand van de secundaire kern te wijzigen, waarop wij echter niet nader ingaan.

# Hoofdstuk VI

# NABESCHOUWING OVER HET ELEKTROMAGNETISCH GEDEELTE

In de aanhef van het hoofdstuk II over de berekening van een transformator werd gezegd, dat de verschijnselen die bij de andere behandelde spoeltypen essentieel zijn, bij de transformator als bij-effecten optreden. Deze bewering kunnen wij nu staven.

Een secundair niet belaste transformator neemt, als wij van verliezen afzien, een magnetiseringsstroom voor de magnetische schakel op die 90° in fase achter is op de netspanning. In deze toestand kan dus de transformator opgevat worden als een smoorspoel, die op de netspanning is aangesloten en waarvan de stroom berekend kan worden als van een smoorspoel met een ijzerkern zonder luchtspleet. In een vervangschema wordt met deze eigenschap van een werkelijke transformator rekening gehouden door parallel aan de primaire klemmen van een ideale transformator een smoorspoel te tekenen.

Aan een lektransformator zakt de secundaire windingsspanning bij belasting, terwijl de primaire windingsspanning met de constante netspanning constant blijft, als wij van verliezen afzien. Een gewone transformator vertoont eveneens dit verschijnsel – hoewel in belangrijk mindere mate – omdat ook hier een gedeelte van het primaire veld zich kan sluiten langs een weg die niet door de secundaire wikkeling gaat. Bij een ideale transformator daarentegen zou de secundaire windingsspanning altijd gelijk zijn aan de primaire windingsspanning. De ongewenste overeenkomst van de transformator met de lektransformator brengt men in een vervangschema tot uitdrukking, door in serie met een ideale transformator een "spreidings"-zelfinductie te tekenen.

De gelijkstroomvoormagnetisering van de ijzerkern die wij bij een transductor voor regeldoeleinden toepassen, treedt eveneens aan de transformator van een enkelfasige gelijkrichter op. Immers, de gelijkstroom van de gelijkrichter vloeit ook door de secundaire wikkeling van de transformator. De hier ongewenste voormagnetisering is van dezelfde aard als de verschijnselen die in één helft van een transductor bij het regelen optreden. De inzichten opgedaan bij de transductor komen dus ook hier van pas.

#### 44 NABESCHOUWING OVER HET ELEKTROMAGNETISCH GEDEELTE

Tot besluit van het elektromagnetisch gedeelte van dit boek willen wij terugzien op de principes die wij bij de berekening van de magnetische schakel toegepast hebben. Het eerst beschouwen wij het gedrag van spanning en stroom bij de overgang van de elektrische schakel naar de magnetische schakel, waarbij wij eenvoudigheidshalve een elektrische schakel van één winding onderstellen (zie fig. 16). Wij verwaarlozen verliezen in de geleider en in de ijzerkern.





Fig. 16. Gedrag van spanning en stroom bij de overgang van de elektrische naar de magnetische schakel. Spanning U en stroom I van een elektrische schakel van één winding worden als windingsspanning resp. stroomwindingen van dezelfde grootte in de magnetische schakel teruggevonden. In de magnetische schakel verdeelt zich de windingsspanning over de doorsnede, in de elektrische schakel de spanning daarentegen over de lengte; de stroomwindingen verdelen zich over de lengte van de magnetische schakel, de stroom in de elektrische schakel daarentegen verdeelt zich over de doorsnede.

In dit geval worden spanning en stroom van de elektrische schakel in dezelfde grootte in de magnetische schakel terug gevonden. Eén volt van de elektrische schakel wekt een veld met een windingsspanning van één voltper-winding in de magnetische schakel op; één ampère van de elektrische schakel geeft stroomwindingen van één ampèrewinding aan het veld in de magnetische schakel.

In de verhouding van spanning en stroom tot de afmetingen van beide schakels treedt echter een opvallende transformatie op. Bij de elektrische schakel verdeelt zich de spanning over de lengte van de schakel, en de stroom over de doorsnede. Bij de magnetische schakel daarentegen wordt de windingsspanning gevonden door de gehele doorsnede van deze schakel met een winding te omvatten; men krijgt minder spanning als men slechts een gedeelte van de doorsnede omsluit. Men kan dus zeggen, dat bij de magnetische schakel de windingsspanning zich over de doorsnede verdeelt. De stroomwindingen worden voor de overwinning van de lengte van de mag-

[VI

## VI] NABESCHOUWING OVER HET ELEKTROMAGNETISCH GEDEELTE

netische schakel gebruikt. Men kan dus zeggen, dat bij de magnetische schakel de stroomwindingen zich over de lengte verdelen.

Vervolgens willen wij erop wijzen, dat soortgelijke wetten als in elektrische netwerken voor stroom en spanning gelden, na transformatie ook in een magnetisch circuit toegepast kunnen worden. In het elektrische geval geldt, dat de stroom zich sluit en dat zijn waarde ongeacht alle vertakkingen behouden blijft. Dit feit wordt ook als volgt geformuleerd: Bij een vertakking is de, eventueel vectoriële, som van de afvloeiende stromen gelijk aan de som van de toegevoerde stroom.

In het magnetisch circuit kunnen wij eveneens zeggen, dat het veld zich sluit. Hier geldt bij vertakkingen voor de windingsspanning hetzelfde als in het elektrisch circuit voor de stroom. Wekken wij met behulp van een wisselspanning in een wikkeling een magnetisch veld op van een bepaalde windingsspanning, dan sluit zich dit veld buiten de wikkeling, waarbij in het geval van vertakkingen de (eventueel vectoriële) som van de windingsspanning in de takken gelijk aan de windingsspanning van het oorspronkelijke veld is. Van deze stelling hebben wij gebruik gemaakt bij de figuren 13, 14 en 15.

Als wij in een elektrisch netwerk de loop van de stroom volgen, komen wij spanningsverval en mogelijkerwijs ook tegenspanningen tegen. De (vectoriële) som van het totale spanningsverval en de tegenspanningen is voor een volledige omloop gelijk aan de spanning van de bron. Bij de magnetische schakel geldt hetzelfde principe, maar nu voor de stroomwindingen. De door de bron geleverde stroomwindingen zijn gelijk aan de (vectoriële) som van de voor de ijzer- of de luchtweg benodigde stroomwindingen en de eventuele opgewekte tegenstroomwindingen. Deze stelling hebben wij bij alle stroomberekeningen toegepast.

Tenslotte willen wij nog vermelden, dat men elektrische begrippen, zoals spanning en weerstand, na transformatie ook voor magnetische circuits kan toepassen. Bij de bespreking van de lektransformator hebben wij al voor de stroomwindingen gebruikt de naam "magnetische spanning", die dus in ampèrewindingen wordt uitgedrukt. Als men nu constateert, dat een veld van U volt-per-winding een magnetische spanning van I ampèrewindingen nodig heeft om een bepaalde magnetische weg te doorlopen, dan kan men aan deze weg een "magnetische weerstand" van I/U ampèrewindingen per volt-per-winding of kortweg  $A_{\sim} \cdot wdg^2/V_{\sim}$  toekennen. De "wdg<sup>2</sup>" bij de eenheid wijzen erop, dat een spoel die, bij gelijkblijvende magnetische schakel, van b.v. het dubbele aantal windingen wordt voorzien, bij de dubbele spanning slechts de halve stroom opneemt.

De magnetische weerstand is, bij homogene veldverdeling, evenredig met

de lengte en omgekeerd evenredig met de doorsnede van de magnetische weg, en verder omgekeerd evenredig met de frequentie. Brengt men de magnetische weerstand in relatie tot de afmetingen van de magnetische weg door hem door de lengte te delen en hem met de doorsnede te vermenigvuldigen, dan vormt men het begrip "soortelijke magnetische weerstand". Volgens deze gedachtengang heeft lucht een soortelijke magnetische weerstand van  $253,3 \times 10^3 \text{ A} \cdot \text{wdg}^2 \cdot \text{cm}^2$  doorsnede/(V · cm lengte) bij 50 Hz, en 12,665  $\times 10^6 \text{ A} \cdot \text{wdg}^2 \cdot \text{cm/V}$  bij 1 Hz (vergelijke: I, § 4d en fig. 5 en 6).

Omgekeerd kan men in het geval van homogene veldverdeling de magnetische weerstand van een bepaalde magnetische weg berekenen door de soortelijke magnetische weerstand met de lengte van de weg te vermenigvuldigen en door zijn doorsnede te delen.

[VI

## Hoofdstuk VII

# HET THERMISCH ONTWERP

## § 1. Inleiding

Tijdens het bedrijf van de onderhavige ijzerkernspoelen treden in de elektrische schakel geleiderverliezen en in de magnetische schakel ijzerverliezen op. Door deze verliezen wordt zowel de warmte-ontwikkeling als het rendement bepaald. De warmte-ontwikkeling leidt tot temperatuurverhoging van de kern en van de wikkeling, waarvan het toelaatbare maximum nog nader vastgelegd kan worden. Bij de behandeling van het thermisch ontwerp zullen gezichtspunten gegeven worden voor het beperken, verdelen en afvoeren van de verlieswarmte, om de temperatuur binnen de gestelde grenzen te houden.

In het streven naar zo klein mogelijke afmetingen wordt in sommige gevallen de grens niet bepaald door de temperatuurverhoging, maar door de verslechtering van het rendement. Dit is in het algemeen het geval bij relatief kleine ijzerkernspoelen, waarbij de verhouding van de koelende oppervlakte tot de verliezen betrekkelijk groot is.

### § 2. Specifieke geleiderverliezen

Het specifieke geleiderverliesvermogen  $P_{g'}$  (vermogen per wikkelingsvolume) is recht evenredig met de soortelijke weerstand  $\varrho$  van het geleidermateriaal en met het kwadraat van de vensterstroomdichtheid *S*, en omgekeerd evenredig met de vulfactor *f* van de wikkeling (doorsnede van alle geleiders samen gedeeld door vensterdoorsnede). In formule:

$$P_g = \frac{\varrho}{f} S^2$$

 $P_{g} \dots (W/cm^{3}); \varrho \dots (\Omega \cdot cm \text{ of } \Omega \cdot cm/wdg^{2}); f \text{ getal} < 1;$  $S \dots (A \cdot wdg/cm^{2}).$ 

Dit is als volgt in te zien. Het verliesvermogen van een geleider met de weerstand R waardoor de stroom I vloeit, is  $P = R I^2$ . De weerstand van een geleider met de lengte l, de doorsnede A en de soortelijke weerstand  $\varrho$ 

is:  $R = \rho l/A$ . Voor de warmteontwikkeling in een geleidende kubus doet het er niet toe, of de doorsnede een geheel is, waardoor de gehele stroom vloeit, of dat deze doorsnede onderverdeeld is in n draaddoorsneden, waarbij door ieder 1/n van de gehele stroom vloeit. Wij kunnen dus zeggen, dat door de doorsnede van iedere eenheidskubus, d.i. een kubus met een ribbe van 1 cm, van de wikkeling met de vensterstroomdichtheid S een stroom vloeit met de waarde van S. Bestond nu de eenheidskubus geheel uit geleidend materiaal met de soortelijke weerstand  $\rho$ , dan zou zijn weerstand de waarde van  $\rho$  hebben; daar echter zijn geleidende doorsnede slechts f cm<sup>2</sup> is, krijgt zijn weerstand de waarde van  $\rho/f$ , waarmede de bovenvermelde formule verklaard is. Wij willen nog even ingaan op de samenhang tussen de gehele weerstand  $R_n$  van de wikkeling van een ijzerkernspoel, de soortelijke weerstand  $\rho$  van het geleidermateriaal, het windingstal n en de vulfactor f. Stellen wij ons voor, dat de wikkeling van een gegeven kern bestaat uit een enkele winding welke de vensterdoorsnede  $A_v$  volledig vult, dan is de weerstand van deze winding  $R = \rho l_w / A_v$ , waarin  $l_w$  de gemiddelde lengte van de wikkeling is. Beslaat de geleiderdoorsnede van deze ene winding slechts een gedeelte van de vensterdoorsnede, namelijk  $f A_v$ , dan wordt  $R = \rho l_w / f A_v$ . Laten wij nu deze wikkeling uit n in serie geschakelde windingen bestaan in plaats van uit één winding, dan neemt de weerstand met een factor  $n^2$  toe; immers, de gemiddelde draadlengte wordt het n-voudige, en de draaddoorsnede het n-de gedeelte van de oorspronkelijke. Wij krijgen dus nu:

$$R_n = n^2 \frac{\varrho \, l_w}{f \, A_v}$$

 $R \dots (\Omega); n \dots (wdg); \varrho \dots (\Omega \cdot cm/wdg^2); l \dots (cm); A \dots (cm^2).$ 

Men zal begrijpen, waarom wij hier in onze beschouwingen aan de soortelijke weerstand  $\varrho$  niet de gebruikelijke eenheid  $\Omega \cdot \text{cm}^2/\text{cm} = \Omega \cdot \text{cm}$  geven, maar  $\Omega \cdot \text{cm}/\text{wdg}^2$ ; een eenheidsvolume geleidermateriaal draagt namelijk het  $n^2$ voudige tot de weerstand bij als zijn doorsnede uit *n* van elkaar geïsoleerde delen bestaat die de stroom achter elkaar moet doorlopen.

De soortelijke weerstand hangt behalve van het materiaal ook af van de temperatuur. Men kan deze temperatuurafhankelijkheid met behulp van een gemiddelde temperatuurcoefficient aangeven:

$$\varrho = \varrho_0 \left( 1 + a \vartheta \right),$$

waarbij  $\varrho_0$  de soortelijke weerstand bij 0 °C is. Ter orientatie mogen de volgende gegevens dienen. Koper:  $\varrho_0 \approx 1.6 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ ; aluminium:  $\varrho_0 \approx 2.7 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ ;  $\alpha$  (tussen 0° en 100 °C)  $\approx 1/240$  per °C.

[VII

## § 3. Specifieke ijzerverliezen

Het specifieke ijzerverliesvermogen  $P_{ij}$  (vermogen per kernvolume) hangt af van de eigenschappen van het kernmateriaal en de frequentie, en loopt op met de specifieke windingsspanning U'. Bij een kern uit de voor ijzerkernspoelen gebruikelijke siliciumijzerplaat van 0,5 mm dikte komen bij 50 Hz ongeveer de volgende waarden voor:

U'	20	25	30	$\frac{mV}{wdg \cdot cm^2}$
P <sub>ij</sub>	10-30	15–45	25–75	$\frac{\mathrm{mW}}{\mathrm{cm}^3}$ ,
dus gemiddeld ca.	20	30	50	$\frac{\mathrm{mW}}{\mathrm{cm}^3}$ .

Uit de tabel blijkt, dat het specifieke ijzerverliesvermogen bij 50 Hz bij benadering evenredig is met het kwadraat van de specifieke windingsspanning, althans in het meestal gebruikte gebied. Bij een ijzerkernspoel zal dus ook het in de ijzerkern gedissipeerde vermogen, ongeveer met het kwadraat van de spanning  $U_n$  aan de spoel variëren. Dientengevolge is het mogelijk als vervangschema van een ijzerkernspoel met ijzerverliezen te kiezen een overigens gelijke ijze**r**kernspoel zonder verliezen met ermee parallel een vrijwel constante geleiding  $G_n$ . Het in  $G_n$  gedissipeerde vermogen  $G_n U_n^2$  representeert dan de ijzerverliezen.

Wij kunnen nu een soortelijke ijzerverliesfactor  $\gamma$  definieren, die hier een analoge rol vervult als de soortelijke weerstand  $\varrho$  bij de geleiderverliezen. Deze factor moet dus in waarde gelijk zijn aan de geleiding die men met een verliesvrij gedachte ijzerkernspoel ter vertegenwoordiging van de ijzerverliezen parallel zou moeten schakelen, als deze spoel één winding en een kern met eenheidsdoorsnede en eenheidslengte zou hebben. Leggen wij nu een wisselspanning aan deze eenheidsspoel, dan is de waarde van de specifieke windingsspanning U' uiteraard gelijk aan deze spanning, terwijl ook de waarde van het specifieke ijzerverliesvermogen  $P_{y'}$  gelijk is aan het ijzerverliesvermogen van de genoemde eenheidsspoel. Wij kunnen dus in principe aan deze spoel de waarde van  $\gamma$  voor het betreffende kernmateriaal bepalen:

$$P_{ij} = \gamma \ U'^2$$

 $P' \dots (W/cm^3); \gamma \dots (S \cdot cm \cdot wdg^2); U' \dots (V/(wdg \cdot cm^2)).$ 

Wij beschouwen nu de samenhang tussen de vervanggeleiding  $G_n$  en de factor  $\gamma$  voor andere spoelen, waarbij wij steeds de specifieke windingsspanning U' voor de kern constant houden. Gaan wij het windingstal bij eenheids-

HET THERMISCH ONTWERP

afmetingen op n brengen, dan blijft het ijzerverliesvermogen bij gelijke U' hetzelfde, de spanning  $U_n$  krijgt echter de n-voudige waarde van U', d.w.z.  $G_n$  moet omgekeerd evenredig met  $n^2$  veranderen, om bij deze  $U_n$  hetzelfde ijzerverliesvermogen als bij de eenheidsspoel te representeren.

Gaan wij terug tot één winding en maken wij de ijzerlengte b.v. tweemaal zo groot, dan worden bij gelijke spanning de magnetiseringsstroom, de verliescomponent hiervan en daarmee de ijzerverliezen verdubbeld. Om dit juist weer te geven, dient dus de geleiding  $G_n$  evenredig met de ijzerlengte gesteld te worden.

Bij één winding, ijzerlengte één, constant gehouden specifieke windingswisselspanning, maar b.v. verdubbelde ijzerdoorsnede, hebben wij aan de klemmen de dubbele wisselspanning, vergeleken met die aan de eenheidsspoel, terwijl de magnetiseringsstroom en zijn verliescomponent hetzelfde zijn gebleven. De ijzerverliezen zijn dus het dubbele geworden. Om deze dubbele verliezen bij dubbele spanning juist weer te geven, moet  $G_n$  omgekeerd evenredig met de ijzerdoorsnede gesteld worden.

Samenvattend krijgen wij dus:

$$G_n = \frac{1}{n^2} \gamma \frac{l_{ij}}{A_{ii}}$$

 $G \dots$  (S);  $n \dots$  (wdg);  $\gamma \dots$  (S · cm · wdg<sup>2</sup>);  $l \dots$  (cm);  $A \dots$  (cm<sup>2</sup>).

Als wij deze formule beschouwen, is er een opvallend verschil met de bij weerstandsmateriaal geldende samenhang tussen geleiding, soortelijke geleiding en de afmetingen:  $G = \gamma A/l$ , gezien het feit, dat het verband tussen  $G_n$  en de afmetingen van de kern het reciproke is van het hier geldende. Dit berust daarop, dat wij bij de bovenste formule met een transformatie van magnetische verschijnselen in hun elektrische verschijningsvorm te maken hebben. Immers, bij magnetische verschijnselen is de in de windingen optredende elektrische spanning gekoppeld aan de ijzerdoorsnede, en de magnetiseringsstroom gekoppeld aan de ijzerlengte.

Uit de tabel van blz. 49 volgen de volgende globale waarden voor de soortelijke ijzerverliesfactor  $\gamma$  voor het gebruikelijke gebied van 20 — 30 mV/(wdg  $\cdot$  cm<sup>2</sup>) van de specifieke windingswisselspanning U' bij 50 Hz: minimum 30, maximum 75, gemiddeld ca. 50 S  $\cdot$  cm  $\cdot$  wdg<sup>2</sup>.

## § 4. Lineaire afmetingen, verliezen, rendement, temperatuur

Zoals wij in I § 5 gezien hebben, is het schijnbaar vermogen (stroomwindingen maal windingsspanning) dat een ijzerkernspoel bij gegeven venster-

[VII

### AFMETINGEN, VERLIEZEN, RENDEMENT, TEMPERATUUR

VII]

stroomdichtheid en specifieke windingsspanning verwerkt, evenredig met het produkt van kerndoorsnede en vensterdoorsnede, d.w.z. evenredig met de vierde macht van de lineaire afmetingen. Daar het volume van de ijzerkernspoel slechts met de derde macht van de lineaire afmetingen toeneemt, is dus, bij constante specifieke belastingen, het per volume te verwerken vermogen evenredig met de lineaire afmetingen.

Het verliesvermogen per volume blijft daarentegen constant als wij aannemen, dat de specifieke ijzer- en geleiderverliezen, en de vulfactor van de wikkeling niet veranderen. De verhouding van het verliesvermogen tot het te verwerken vermogen is dus omgekeerd evenredig met de lineaire afmetingen, d.w.z. bij grotere spoelen wordt het rendement beter.

Deze onderstelling dat de specifieke geleiderverliezen niet veranderen, is juist, als de temperatuur van de grotere spoelen dezelfde is als die van de kleinere. Om dit te bereiken, moet men echter de grotere spoelen intensiever koelen. Immers, de temperatuurstijging wordt bepaald door het verliesvermogen per koelende oppervlakte. De oppervlakte neemt nu slechts met de tweede macht van de lineaire afmetingen toe, het verliesvermogen daarentegen met het volume.

Wat gebeurt er met de grotere spoelen, als wij voor alle spoelen dezelfde koelwijze aanhouden? De temperatuurstijging van grotere ijzerkernspoelen zou evenredig met de lineaire afmetingen toenemen, als de soortelijke weerstand van het geleidermateriaal onafhankelijk van de temperatuur was. Daar de soortelijke weerstand echter met de temperatuur toeneemt, loopt in werkelijkheid de temperatuurstijging meer dan evenredig met de lineaire afmetingen op, terwijl het verliespercentage iets minder afneemt dan omgekeerd evenredig met de lineaire afmetingen.

De vorenstaande gezichtspunten zijn geformuleerd voor het geval, dat men bij een reeks van ijzerkernspoelen van gelijke vorm en gegeven vensterstroomdichtheid, specifieke windingsspanning en vulfactor met toenemende grootte niet door de temperatuurstijging wordt begrensd.

Nu kan men ook vragen, hoe men de belastbaarheid als functie van de lineaire afmetingen moet laten afnemen als men bij dezelfde koelwijze dezelfde temperatuurstijging bij alle spoelen van dezelfde reeks wenst te bereiken. Hiervoor mag het verliesvermogen slechts evenredig met de koelende oppervlakte toenemen. Dit kan bijvoorbeeld bereikt worden door zowel de specifieke ijzerverliezen als ook de specifieke geleiderverliezen omgekeerd evenredig met de lineaire afmetingen te laten verlopen. Nu zijn de specifieke geleiderverliezen, zoals wij in § 2 gezien hebben, evenredig met het kwadraat van de vensterstroomdichtheid S. De specifieke ijzerverliezen kunnen bij 50 Hz eveneens in eerste benadering evenredig met het kwadraat van de speci-

HET THERMISCH ONTWERP

fieke windingsspanning U' gesteld worden (zie § 3). In ons voorbeeld moeten wij dus S en U' omgekeerd evenredig met de wortel van de lineaire afmetingen laten verlopen.

Voor dit vereenvoudigde voorbeeld willen wij het te verwerken schijnbaar vermogen en het rendement als functie van de lineaire afmetingen schetsen. Het schijnbaar vermogen P is gelijk aan het produkt van kerndoorsnede  $A_{ij}$ , vensterdoorsnede  $A_v$ , specifieke windingsspanning U' en specifieke vensterstroomdichtheid S. Het produkt  $A_{ij} A_v$  verloopt evenredig met de vierde macht van de lineaire afmetingen, het produkt U' S omgekeerd evenredig met de eerste macht, het vermogen P dus evenredig met de derde macht, d.w.z. met het volume. Het per volume te verwerken schijnbaar vermogen P blijft dus constant. Daar wij ervoor zorgen, dat het verliesvermogen  $P_v$ slechts evenredig is met de oppervlakte, wordt dus weer het rendement bij grotere spoelen beter, daar het verliespercentage  $P_v/P$  omgekeerd evenredig met de lineaire afmetingen verloopt.

De berekening van de verliezen, in het bijzonder de ijzerverliezen, is dikwijls niet erg nauwkeurig. Bij een gerede transformator kan men de ijzerverliezen afzonderlijk door een openspanningsproef meten, en de geleiderverliezen afzonderlijk door een kortsluitstroomproef. (Openspanningsproef: het primaire verbruik meten bij primaire nominale spanning, en onbelaste secundaire wikkeling. Kortsluitstroomproef: het primaire verbruik meten bij secundaire kortsluiting. De secundaire stroom wordt door verlaging van de primaire spanning op de nominale waarde ingesteld.)

Na dit overzicht over de samenhang tussen de verliezen en de temperatuur willen wij in de volgende paragraaf nader ingaan op de andere verschijnselen die bij het thermisch gedrag van ijzerkernspoelen een rol spelen.

### § 5. Temperatuurstijging, warmtecapaciteit, warmtegeleiding, warmtesprong

De warmtetoestand van een ijzerkernspoel doorloopt tussen het inschakelen en de stationaire toestand drie in elkaar overgaande stadia.

Het eerste stadium direct na het inschakelen is daardoor gekenmerkt, dat in ieder deel van de ijzerkernspoel het actieve materiaal door het ter plaatse opgewekte verliesvermogen verwarmd wordt. In ieder deel zal dus de temperatuur op gaan lopen met een snelheid die bepaald is door de specifieke verliezen (verliesvermogen per volume) ter plaatse en de soortelijke warmte van het actieve materiaal (warmtehoeveelheid per volume en per graad).

In het tweede stadium lopen binnen de ijzerkernspoel warmtegolven van de actieve delen met de hogere temperatuur naar de nog niet verwarmde passieve delen en naar de minder verwarmde actieve delen. Als passief deel

dient in hoofdzaak het isolatiemateriaal in aanmerking genomen te worden. Hierbij komen behalve de bij het eerste stadium genoemde factoren nog in het geding de soortelijke warmtegeleiding van de verschillende actieve en passieve materialen (vermogen maal weglengte per graad temperatuurverschil en per doorsnede van de weg in het desbetreffende materiaal) en verder de soortelijke warmtecapaciteit van de passieve materialen op de verschillende plaatsen. Bereiken de warmtegolven het oppervlak van de kern of de wikkeling, dan wordt door convectie warmte aan het koelmiddel (b.v. lucht of olie) afgegeven, waarbij dus de convectiefactor (vermogen per graad temperatuursprong en per oppervlakte) een rol gaat spelen. Is het koelmiddel lucht en heeft het desbetreffende gedeelte van het oppervlak een belangrijk hogere temperatuur dan de omgeving, dan vindt een zekere warmte-afgifte door straling plaats. Eveneens kan nog een zeker gedeelte van de warmte door middel van geleiding via constructiedelen weggevoerd worden.

Het derde stadium, de stationaire toestand, treedt in, wanneer ieder deel van de ijzerkernspoel een temperatuur verkregen heeft die niet meer verandert, zolang de belasting en de uitwendige omstandigheden gelijk blijven. Er is in dit stadium een evenwicht bereikt waarbij het opgewekte verliesvermogen gelijk is aan de afgevoerde warmte. De warmtecapaciteit van de verschillende materialen heeft geen invloed meer; van belang zijn alleen nog het plaatselijke verliesvermogen, verder de warmtegeleiding van de verschillende materialen langs de wegen die de warmtestromen volgen, en de convectie (eventueel nog de straling van het oppervlak en de warmtegeleiding door constructiedelen).

Wij zien, dat het eerste en het derde stadium vrij eenvoudige grensgevallen zijn, terwijl het overgangsstadium tussen beide als een combinatie van deze grensgevallen kan worden opgevat. Streng genomen duurt het eerste stadium, d.w.z. het plaatselijk verwarmen van het actieve materiaal zonder warmteafgifte, slechts een ogenblik, terwijl het derde stadium, de stationaire toestand, pas na oneindig lange tijd bereikt wordt. Wij zouden dus in de praktijk altijd met het tweede stadium te maken hebben. Toch kunnen wij globaal zeggen, dat na het inschakelen van ijzerkernspoelen, afhankelijk van hun afmetingen, het eerste stadium gedurende enkele minuten op de voorgrond treedt, terwijl de stationaire toestand bereikt wordt na een tijdsverloop, dat ligt tussen delen van een uur en enkele uren.

Behalve na het inschakelen kunnen ook tijdens het bedrijf toestanden optreden die sterk het karakter van het eerste of het tweede stadium hebben. Bij voorbeeld hebben wij langere tijd met het tweede stadium te maken, als een ijzerkernspoel intermitterend werkt. Een ander voorbeeld is de kortstondige kortsluiting van een transformator. De gegevens die het verloop van HET THERMISCH ONTWERP

het eerste stadium bepalen, zijn namelijk eveneens bepalend voor het temperatuurverloop, als een ijzerkernspoel een sterke overbelasting te verduren krijgt van zo korte duur, dat er van voortplanting en afvoer van warmte nog nauwelijks sprake is.

In een dergelijk geval kunnen wij vrij gemakkelijk berekenen, hoe groot de temperatuurstijging  $\triangle \vartheta$  van een bepaald deel van het geleidermateriaal is, als er in een kortstondige warmteimpuls (verliesvermogen maal tijd:  $P_g t$ of  $\int P_g dt$ ) vrij komt. De temperatuurstijging van een bepaald gedeelte  $V_g$ van het geleidervolume is gegeven door:

$$\triangle \vartheta = \frac{P_g t}{c_g V_g} = \frac{P_g t}{c_g f V} = \frac{P_g t}{c_g f}$$

 $\vartheta \dots (^{\circ}C)$ :  $P \dots (W)$ ;  $t \dots (s)$ ;  $c \dots (J/(cm^3 \cdot ^{\circ}C))$ ;  $V \dots (cm^3)$ ; f getal;  $P' \dots (W/cm^3)$ .

Hierin betekent de index g: geleider, f is de vulfactor van de wikkeling ter plaatse, waarmede dus  $V_g = f V$  is, als V het beschouwde deel van het wikkelingsvolume betekent.  $c_g$  is de soortelijke warmte (per volume) van het geleidermateriaal, terwijl  $P_g'$  het verliesvermogen per wikkelingsvolume in het beschouwde wikkelingsgedeelte is. Als wij  $P_g'$  in de plaatselijke vensterstroomdichtheid S en de soortelijke weerstand  $\varrho$  van het geleidermateriaal uitdrukken (zie blz. 47), verkrijgen wij voor de temperatuurstijging:

$$\bigtriangleup \vartheta = \frac{\varrho S^2 t}{c_g f^2} \,.$$

Hiermee kunnen wij voor een kritiek gedeelte van de wikkeling, waar dus de plaatselijke vensterstroomdichtheid groot en de plaatselijke vulfactor klein zijn, berekenen hoe lang een kortsluiting mag duren, voordat de temperatuurstijging zo groot wordt, dat bij voorbeeld de isolatie van de geleiders in gevaar komt. Het is duidelijk, dat een grote waarde van de vulfactor f zeer gunstig is.

Voor de temperatuurstijging tijdens het eerste en het tweede stadium zijn, zoals wij besproken hebben, belangrijk de soortelijke warmte van het geleider- en kernmateriaal, resp. het isolatiemateriaal. Het is veelal gebruikelijk, onder soortelijke warmte te verstaan de warmtecapaciteit, betrokken op de *massa* van het betreffende materiaal. Bij onze berekeningen is het echter handiger, de warmtecapaciteit op het *volume* te betrekken. Het voordeel van de zo gedefinieerde soortelijke warmte is, dat de waarden van de voor ons belangrijke materialen onderling niet sterk verschillen (zie de tabel aan het einde van deze paragraaf).

De voortplanting van de warmte die in het tweede en het derde stadium

[VII

een belangrijke rol speelt, wordt bepaald door de soortelijke warmtegeleiding  $\lambda$  van de verschillende materialen die de warmte op haar weg naar koudere plaatsen ontmoet. Een stuk materiaal met de lengte *l* en de doorsnede *A* heeft de warmtegeleiding

$$G_w = \lambda \frac{A}{l}.$$

Bestaat er een temperatuurverschil  $\triangle \vartheta$  tussen begin en einde van de genoemde lengte *l*, dan vloeit door het bedoelde stuk materiaal warmte, waarvan het vermogen *P* wordt gegeven door

$$\triangle \vartheta = \frac{P}{G_w}$$

 $G_w \dots (W/^{\circ}C); \ \lambda \dots (W/(cm \cdot {^{\circ}C})); \ A \dots (cm^2); \ l \dots (cm); \ \vartheta \dots ({^{\circ}C}); \ P \dots (W).$ 

Zoals gezegd lopen tijdens het tweede stadium door de ijzerkernspoel warmtegolven, die temperatuurvereffening tussen de plaatsen van verschillende temperaturen bewerken. De snelheid waarmee de temperatuurvereffening plaats heeft, is direct evenredig met de soortelijke warmtegeleiding  $\lambda$  en omgekeerd evenredig met de soortelijke warmtecapaciteit *c* van het materiaal waarin de warmtegolf loopt. Verder hangt deze snelheid nog af van de plaatselijke verschillen van temperatuurverval. Dit is gemakkelijk in te zien voor het eenvoudige geval van een vlakke warmtegolf, die zich in een homogeen materiaal voortplant. Bij een constant temperatuurverval in de richting van voortplanting hebben wij een stationaire warmtestroom; is echter het temperatuurverval in deze richting niet constant, dan stroomt aan de ene kant van een volume-element meer of minder warmte naar binnen dan aan de andere kant eruit stroomt, waardoor dus de temperatuur van dit volumeelement toe- resp. afneemt.

In het derde stadium, de stationaire toestand, wordt het gehele verliesvermogen  $P_v$  in de vorm van warmte naar buiten afgevoerd, waarbij de warmte in hoofdzaak via het oppervlak aan het koelmiddel (lucht of transformatorolie) wordt afgegeven. Als men ervoor zorgt, dat het koelmiddel vrij kan circuleren, hebben wij in het geval van koeling door lucht of een ander gas nauwelijks met warmtegeleiding te maken, maar in hoofdzaak met de warmte-afvoer door middel van convectie. Bij koeling door olie of een andere vloeistof treden zowel convectie als geleiding op.

In het eenvoudigste geval rekent men bij natuurlijke luchtkoeling met een gemiddelde temperatuursprong  $\triangle \vartheta$  tussen het oppervlak van de ijzerkernspoel en de omgevende lucht. Het afgevoerde vermogen is dan bij benadering

VII]

#### HET THERMISCH ONTWERP

evenredig met de temperatuursprong en met de koelende oppervlakte. Voor globale berekeningen kan men als koelende oppervlakte A nemen tweemaal de som van de oppervlakten van de drie projecties, terwijl als warmte-over-gangscoefficient  $\alpha$  genomen kan worden ca. 1 mW/(cm<sup>2</sup> · °C). In formule uitgedrukt, wordt de genoemde temperatuursprong:

$$\triangle \vartheta = \frac{P_v}{A a}$$

 $\vartheta \ldots (^{\circ}C); P \ldots (W); A \ldots (cm^2); \alpha \ldots (W/(cm^2 \cdot ^{\circ}C)).$ 

In het geïdealiseerde grensgeval waarin de temperatuurverschillen in wikkeling en kern verwaarloosbaar klein zijn ten opzichte van de temperatuursprong  $\triangle \vartheta$ , stelt men de temperatuur van de ijzerkernspoel gelijk aan de som van temperatuursprong en omgevingstemperatuur. De eerstgenoemde temperatuur mag uiteraard de toegelaten grenstemperatuur niet overschrijden. Wordt olie als koelmiddel gebruikt, dan verkrijgen wij twee temperatuursprongen, namelijk tussen de ijzerkernspoel en de olie, en tussen de oliebak en de lucht.

Voor meer nauwkeurige berekeningen dienen verschillende factoren in aanmerking genomen te worden, waarvan wij er enige zullen noemen, zonder er dieper op in te gaan. Door verschil in specifieke verliezen en koelende oppervlakte kunnen de temperaturen van kern en wikkeling van elkaar afwijken, waardoor b.v. warmteafvoer van de wikkeling via de kern optreedt. Bij intensieve geforceerde koeling van het oppervlak van de ijzerkernspoel kan behalve de besproken temperatuursprong ook het temperatuurverval binnen de wikkeling of de kern belangrijk worden. De berekening van dit temperatuurverval wordt gecompliceerd door het feit, dat de warmte-opwekking door het verliesvermogen niet in een punt of een vlak is geconcentreerd, maar over het wikkelings- resp. kernvolume is verdeeld, en verder door het feit dat de warmte op haar weg materialen met verschillende warmtegeleiding ontmoet. Grote temperatuurverschillen tussen de verschillende delen van een ijzerkernspoel roepen mechanische spanningen op, die onder ongunstige omstandigheden beschadigingen van de isolatie kunnen veroorzaken.

Ingesloten lucht die niet kan circuleren, heeft een zeer kleine warmtegeleiding. Het verdient daarom aanbeveling, bij ijzerkernspoelen ter verbetering van de warmtegeleiding de lucht die in de wikkeling, de kern en hiertussen is ingesloten, te verdringen. Voor dit doel worden verschillende methoden toegepast, zoals ingieten, compounderen of het plaatsen in olie. Daarbij moet het achterblijven van luchtbelletjes vermeden worden. Hierin is namelijk de elektrische veldsterkte groter dan in de isolatie, zodat ionisatie van de lucht kan optreden, met het gevolg van glimontlading en isolatiedoorslag.

Bij de overgang van een laag van de wikkeling naar de volgende is het bij ronde draden voor de bepaling van de warmtegeleiding belangrijk, of de draden van de ene laag die van de andere laag kruisen, of dat ze door een bijzondere wikkelmethode over de gehele lengte elkaar raken. Het aanbrengen van isolatiepapier tussen de lagen verslechtert de warmtegeleiding.

Er zij opgemerkt, dat bij de gebruikelijke transformatorconstructie met natuurlijke oppervlaktekoeling de warmteafvoer vrij ongunstig is. Als men meer aandacht aan een intensieve koeling besteedt, b.v. door geforceerde luchtkoeling en toepassing van luchtkanalen in de transformator, zijn er mogelijkheden voor belangrijke vermindering van volume en materiaal. Door een intensieve koeling kan men bij een gegeven ontwerp de verliezen verminderen door de lagere temperatuur van de wikkeling.

Hieronder volgt een tabel, waarin globale waarden zijn verzameld van de soortelijke warmtecapaciteit c (per volume) en van de soortelijke warmtegeleiding  $\lambda$  van verschillende bij ijzerkernspoelen gebruikte materialen. Met deze waarden kan men bij benadering de te verwachten temperaturen bepalen. Voor meer nauwkeurige gegevens raadplege men de literatuur, die zich peciaal met dit gebied bezig houdt\*.

	koper	aluminium	silicium- ijzerplaat	compound op asfalt- basis	polyester, gevuld, thermo- hardend	transfor- matorolie	
		26	1.0	2.5	1.0	J	
С	3,4	2,4	3,6	1,9	2,5	1,8	cm <sup>3</sup> · °C
2	2 40	2,1	0,4**	3,5 $ imes$ 10 <sup>-3</sup>	2,6 $ imes$ 10 <sup>-3</sup>	1,4 × 10 <sup>-3</sup>	w
λ 4,0	4,0						cm · °C

soortelijke warmte (per volume) c en soortelijke warmtegeleiding  $\lambda$  van enkele materialen

\*\* Door de isolatie wordt  $\lambda$  loodrecht op het vlak van de blikken kleiner.

### § 6. De keuze van de grenstemperatuur

De keuze van de toegelaten grenstemperatuur, waarop wij het thermische ontwerp grondvesten, kan vanuit drie verschillende gezichtspunten geschie-

\* B.v.: W. Oburger, Die Isolierstoffe der Elektrotechnik, Springer-Verlag, Wien 1957.

VII]

den. Men dient voor ieder ontwerp na te gaan, welk gezichtspunt beslissend is.

De eerste wijze voor de bepaling van een grenstemperatuur heeft betrekking op het niet-aktieve materiaal, zoals de isolatie van de geleiders, en vaste of vloeibare vulmiddelen, die de lucht uit de ijzerkernspoel moeten verdringen. De meeste van deze stoffen hebben een temperatuurgrens, waarboven zij onbruikbaar worden. Dit onbruikbaar worden kan snel optreden, zoals bij het verbranden van de isolatie, het kan ook de vorm van langzame veranderingen aannemen, waarvan de schadelijke uitwerking pas na verloop van langere tijd merkbaar wordt; vulmiddelen als compound kunnen door bovenmatige verwarming verweken.

Het tweede gezichtspunt heeft betrekking op de toename van de verliezen in het geleidermateriaal tengevolge van temperatuurstijging (zie § 2). Wegens de eis van een bepaald rendement kan een grenstemperatuur gewenst zijn die lager ligt dan de grenstemperatuur die door de warmtegevoeligheid van de niet-actieve materialen bepaald wordt.

Het derde gezichtspunt betreft de magnetische eigenschappen van de ijzerkern. Tussen kamertemperatuur en ca. 200 °C heeft de verandering van de magnetische eigenschappen van silicium-ijzerplaat weinig te betekenen. Bij hogere temperaturen verschuift de plaats waar de magnetiseringsstroom sterk begint op te lopen naar lagere specifieke windingsspanningen dan ca. 30 mV/cm<sup>2</sup> bij 50 Hz (vergelijk fig. 3).

Tenslotte zij opgemerkt, dat er uiteraard ontwerpen van ijzerkernspoelen zijn die, bij voorbeeld wegens een hoge rendementseis, een zo kleine temperatuurstijging vertonen, dat geen van de drie genoemde grenstemperaturen wordt bereikt.

Om een indruk te geven van toelaatbare grenstemperaturen volgens het eerste gezichtspunt, warmtevastheid van niet-actieve materialen, zij vermeld dat veel gebruikte isolatiematerialen, zoals katoen, natuurzijde, papier, de isolatielaag van geëmailleerd draad, compound op asfaltbasis en transformatorolie, temperaturen van minder dan 100°C kunnen verdragen. Behalve de genoemde voorbeelden bestaan er nog vele isolatiematerialen, waarvan verscheidene met belangrijk hogere grenstemperaturen, zoals glasvezels en de oxydelaag van geëloxeerd aluminium. Men raadplege hiertoe de literatuur, b.v. het op blz. 57 genoemde boek van Oburger en de desbetreffende voorschriften van de normalisatielichamen, zoals de I.E.C. (International Electrical Commission) of de V.D.E. (Verein Deutscher Elektrotechniker).

#### VII] VENSTERSTROOMDICHTHEID, SPECIFIEKE WINDINGSSPANNING

## § 7. De bepaling van de toelaatbare vensterstroomdichtheid en specifieke windingsspanning uit de grenstemperatuur of uit het rendement

De vensterstroomdichtheid en de specifieke windingsspanning van een ijzerkernspoel dienen zo gekozen te worden, dat nergens de toegelaten grenstemperatuur van de materialen wordt overschreden. In vele gevallen is de bovenste grens voor de specifieke windingsspanning echter niet door thermische, maar door andere gezichtspunten gegeven (zie blz. 16). Het specifieke ijzerverliesvermogen  $P_{ij}$  is dan vastgelegd, waardoor de verdere berekening eenvoudig wordt.

Beschouwen wij nu ijzerkernspoelen van een bepaalde vorm, b.v. spoelen met een kern van kwadratische doorsnede, samengesteld uit de E-I-blikken van fig. 12, dan zijn ijzervolume, wikkelingsvolume en koelende oppervlakte, uitgedrukt in de *a*-maat van het genoemde blik, bekend. Uit de koelende oppervlakte volgt het gehele verliesvermogen  $P_v$  dat de spoel thermisch kan verwerken; de gezochte vensterstroomdichtheid S volgt dan uit het toelaatbare geleiderverliesvermogen  $P_g$ , dat het verschil is tussen het gehele en het ijzerverliesvermogen  $P_{ij}$ .

Wij zullen een voorbeeld geven van een berekening die gebaseerd is op de vereenvoudigde onderstellingen die al op blz. 56 genoemd werden: temperatuurverval binnen de spoel verwaarloosbaar klein; koelende oppervlakte twee keer de som van de drie projecties.

Bij een E-I-kern met kwadratische doorsnede is de koelende oppervlakte  $A = 132 a^2$ , het ijzervolume  $V_{ij} = 48 a^3$  en het wikkelingsvolume  $V_w = 36 a^3$ . Als grenstemperatuur voor een conservatief ontwerp kiezen wij 90 °C, waaruit met een hoogste omgevingstemperatuur van 35 °C een toelaatbare temperatuurstijging  $\Delta \vartheta = 55$  °C volgt. De warmte-overgangscoefficient tussen de koelende oppervlakte van de spoel en de lucht stellen wij bij natuurlijke luchtkoeling:  $a = 1 \text{ mW/(cm}^2 \cdot \text{°C})$ . De soortelijke ijzerverliesfactor is bij 50 Hz gemiddeld:  $\gamma = 50 \text{ S} \cdot \text{cm} \cdot \text{wdg}^2$ , terwijl de soortelijke weerstand van koper bij 90° is:  $\varrho_{90} = 2,2 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm/wdg}^2$ . We nemen verder voor dit rekenvoorbeeld aan, dat de wikkelingsvulfactor f = 0,25 en de *a*-maat van het E-I-blik a = 1 cm is, en dat wij de specifieke windingsspanning U' = 28 mV/(wdg \cdot \text{cm}^2) kiezen.

Het gehele toelaatbare verliesvermogen is:

$$P_{v} = \triangle \vartheta \cdot a \cdot A = \triangle \vartheta \cdot a \cdot 132a^{2} =$$
  
= 55 × 1 × 10<sup>-3</sup> × 132 × 1<sup>2</sup> °C ·  $\frac{W}{cm^{2} \cdot c}$  · cm<sup>2</sup> = 7,3 W.

Als ijzerverliesvermogen krijgen wij:

$$P_{ij} = P_{ij}' V_{ij} = \gamma U'^2 V_{ij} = \gamma U'^2 \cdot 48a^3 =$$
  
50 × 28<sup>2</sup> × 10<sup>-6</sup> × 48 × 1<sup>3</sup> S · cm · wdg<sup>2</sup> ·  $\frac{V^2}{wdg^2 \cdot cm^4}$  cm<sup>3</sup> = 1,9 W.

Het toelaatbare geleiderverliesvermogen is dan:

$$P_g = P_v - P_{ij} = 5.4 \,\mathrm{W}.$$

Daar  $P_g$  anderzijds in de vensterstroomdichtheid uitgedrukt kan worden:

$$P_g = P_g' V_w = \frac{\varrho}{f} S^2 V_w = \frac{\varrho}{f} \cdot S^2 \cdot 36a^3,$$

krijgen wij:

$$S^2=5,4 imesrac{0,25 imes10^6}{2,2 imes36 imes1^3}~~\mathrm{W}\cdotrac{\mathrm{wdg}^2}{\Omega\cdot\mathrm{cm}\cdot\mathrm{cm}^3}$$
 ,

waaruit volgt:

$$S = 130 \, \frac{\mathrm{A} \cdot \mathrm{wdg}}{\mathrm{cm}^2} \, .$$

Een andere weg moeten wij volgen als de vensterstroomdichtheid en de specifieke windingsspanning niet door de grenstemperatuur maar door het rendement ofwel het verliespercentage bepaald worden. Bij deze berekening moeten wij dus het quotient van verliesvermogen en nuttig vermogen vormen; dit quotient mag dan ten hoogste gelijk zijn aan het verliespercentage dat met het gevraagde rendement overeenkomt. In onze beschouwing verstaan wij onder nuttig vermogen eenvoudigheidshalve het produkt van windingsspanning en stroomwindingen (zie blz. 17), dus

$$P = A_{ij} U' \cdot A_v S.$$

Dit vermogen P is bij een smoorspoel in hoofdzaak blind vermogen, terwijl het bij een transformator met weerstandsbelasting bij benadering het dubbele van het secundair verbruikte vermogen bedraagt (zie blz. 19 en blz. 63, § 7 laatste alinea).

Zoals men weet, bestaat het verliesvermogen  $P_v$  uit ijzerverliezen en geleiderverliezen, d.w.z.

$$P_v = \gamma U'^2 V_{ij} + rac{arrho}{f} S^2 V_w$$
 .

Kiezen wij een bepaalde vorm voor de ijzerkernspoel, dan krijgen de genoemde doorsneden en volumen een vaste onderlinge verhouding. Zo zijn b.v. bij een kwadratische kern van E-I-blikken (zie fig. 12), uitgedrukt in de *a*-maat:  $A_{ij} A_v = 12 a^4$ ,  $V_{ij} = 48 a^3$  en  $V_w = 36 a^3$ .

Nemen wij nu een bepaalde vorm en grootte van de gezochte ijzerkernspoel

## VII] VENSTERSTROOMDICHTHEID, SPECIFIEKE WINDINGSSPANNING

aan, dan blijkt dat wij hierbij in eerste benadering het maximale rendement verkrijgen, als wij door geschikte keuze van de specifieke windingsspanning U' en de specifieke vensterstroomdichtheid S de ijzerverliezen gelijk aan de koperverliezen maken. Immers, in de uitdrukking

$$\frac{P_v}{P} = \frac{\gamma V_{ij} U'^2 + (\varrho/f) V_w S^2}{A_{ij} A_v \cdot U' S}$$

is de noemer bij gegeven nuttig vermogen P constant; de termen in de teller hebben factoren die wij globaal als constant beschouwen, terwijl de ene term van  $U'^2$  en de andere term van  $S^2$  afhangt. Daar nu het produkt van U' en S (en dus ook het produkt van de termen van de teller) gegeven is, wordt de som in de teller een minimum als de twee termen aan elkaar gelijk zijn (immers, de som van twee getallen waarvan het produkt een vaste gegeven waarde heeft, wordt een minimum als de twee getallen aan elkaar gelijk zijn).

Als voorbeeld van de bepaling van de vensterstroomdichtheid S en de specifieke windingsspanning U' op grond van rendementsoverwegingen nemen wij het volgende geïdealiseerde grensgeval. Ondersteld wordt, dat het ontwerp door de eis van het rendement bepaald wordt, en niet door de grenstemperatuur of een te grote magnetiseringsstroom begrensd is. Wij nemen verder aan, dat wij een kwadratische kern uit E-I-blik gekozen hebben, en dat de soortelijke ijzerverliesfactor  $\gamma$ , de soortelijke weerstand  $\varrho$  en de vulfactor f als nagenoeg constant beschouwd kunnen worden. Gegeven zijn het nuttig vermogen P en het verliespercentage  $P_v/P$ ; gevraagd zijn de a-maat van het E-I-blik, de specifieke windingsspanning U' en de venster-stroomdichtheid S.

Als wij de afmetingen, uitgedrukt in de *a*-maat van het E-I-blik in de formule voor het verliespercentage zetten, verkrijgen wij

$$\frac{P_v}{P} = \frac{1}{a} \frac{4\gamma \ U'^2 + 3 \left(\frac{\varrho}{f}\right)S^2}{U'S} = \frac{1}{a} \left(4\gamma \ \frac{U'}{S} + 3 \ \frac{\varrho}{f} \ \frac{S}{U'}\right),$$

waaruit door gelijkstellen van de twee termen tussen haakjes (ijzerverliezen = geleiderverliezen) volgt:

$$\frac{U'}{S} = \sqrt{\frac{3\varrho}{4 \gamma f}}$$

en

$$\frac{P_v}{P} = \frac{1}{a} 4 \sqrt{3 \gamma \frac{\varrho}{f}} \cdot$$

In dit geïdealiseerde geval hangt het rendement dus alleen van de *a*-maat af en niet van de keuze van de specifieke windingsspanning en de vensterstroom-

HET THERMISCH ONTWERP

dichtheid. Dit is gemakkelijk in te zien; immers, bij onze onderstellingen nemen het verliesvermogen en het nuttige vermogen met dezelfde macht van U' en S toe.

Met de zo bepaalde *a*-maat verkrijgen wij als het laatste noodzakelijke gegeven het produkt van U' en S:

$$P = A_{ij} A_v \cdot U' S = 12 a^4 U' S.$$

Wij illustreren deze berekening met een getallenvoorbeeld. Gegeven: P = 100 VA;  $P_v/P = 0,1$ . Ondersteld:  $\gamma = 50 \text{ S} \cdot \text{cm} \cdot \text{wdg}^2$ ;  $\vartheta = 90^\circ$ , zodat voor koper  $\varrho = 2,2 \Omega \cdot \text{cm/wdg}^2$ ; f = 0,25. Gekozen: kwadratische kern van E-I-blik, dus  $A_{ij} A_v = 12 a^4$ ,  $V_{ij} = 48 a^3$ ;  $V_w = 36 a^3$ . Gevraagd: a; U'; S.

$$a = 4 \times 100 \sqrt{\frac{3 \times 50 \times 2,2}{10^6 \times 0,25}} \sqrt{S \cdot cm \cdot wdg^2 \cdot \Omega \cdot cm/wdg^2} = 1,46 \text{ cm};$$

$$U' S = \frac{100}{12 \times 1,46^4} \frac{V \cdot A}{cm^4} = 1,83 \frac{V \cdot A}{cm^4};$$

$$\frac{U'}{S} = \sqrt{\frac{3 \times 2,2}{4 \times 10^6 \times 50 \times 0,25}} \sqrt{\frac{\Omega \cdot cm}{wdg^2 \cdot S \cdot cm \cdot wdg^2}} = 3,64 \times 10^{-4} \frac{V}{A \cdot wdg^2};$$

$$U'^2 = 1,83 \times 3,64 \times 10^{-4} \frac{V \cdot A \cdot V}{cm^4 \cdot A \cdot wdg^2},$$

$$U' = 26 \frac{mV}{wdg \cdot cm^2};$$

$$S^2 = \frac{1,83 \times 10^4}{3,64} \frac{V \cdot A \cdot A \cdot wdg^2}{cm^4 \cdot V},$$

$$S = 71 \frac{A \cdot wdg}{cm^2}.$$

Tenslotte willen wij de lezer waarschuwen, dat hij zich door de gegeven gesimplificeerde rekenvoorbeelden niet laat weerhouden, om over de werkelijke situatie met haar verschillende aspecten na te denken. Zo zal bij voorbeeld bij grotere ijzerkernspoelen het rendement meestal zo groot zijn, dat het geen zin heeft, de ijzerverliezen gelijk aan de geleiderverliezen te maken en daardoor een in andere opzichten ongunstig ontwerp te krijgen. Ook trekke men geen te ver gaande conclusies uit de in een zeker gebied redelijke onderstelling, dat de ijzer- en de geleiderverliezen evenredig met het kwadraat van de spanning resp. de stroom variëren. Bij hoge geleiderbelasting zullen de weerstandsverliezen meer dan kwadratisch met de stroom toenemen t.g.v. de weerstandsverhoging door temperatuurstijding; ook kunnen bij een trans-
SLOTBESCHOUWING

formator met een hoge spanningsbelasting van het ijzer wegens de grote magnetiseringsstroom in de primaire wikkeling, de geleiderverliezen afhankelijk worden van de specifieke windingsspanning.

Voor nauwkeurigere berekeningen van de ijzerverliezen kan men niet volstaan met de gemiddelde waarde van de soortelijke ijzerverliesfactor die wij voor 50 Hz hebben aangenomen. Men dient die waarde van de soortelijke ijzerverliesfactor te nemen, die voor het betreffende kernmateriaal in de gebruikte plaatdikte bij de juiste frequentie en de gekozen specifieke windingsspanning geldt.

Zijn de transformatorverliezen in dezelfde orde van grootte als het secundaire vermogen, zoals dat vooral bij kleine transformatoren het geval kan zijn, dan moet men bij de bepaling van het primaire vermogen rekening met deze verliezen houden; het primaire vermogen kan dan belangrijk groter zijn dan het secundaire.

## § 8. Slotbeschouwing

De gebruiker van een ijzerkernspoel interesseert zich in hoofdzaak voor de aan de aansluitklemmen merkbare elektrische eigenschappen. Voor de ontwerper zijn er echter drie aspecten: het elektrische, het magnetische en het thermische. Terwijl de elektrische schakel van een ijzerkernspoel in het algemeen gemakkelijk begrepen wordt, is het gevoel voor de gedragingen van de magnetische schakel meestal minder goed ontwikkeld. Wij hopen door onze voorstellingswijze het begrip voor deze gedragingen verbeterd, althans voor de ontwerper gemakkelijker hanteerbaar gemaakt te hebben.

De ontwerper is geneigd het thermische ontwerp als noodzakelijk kwaad te beschouwen, dat weinig inspirerends oplevert, daar het met de eigenlijke functie van de ijzerkernspoelen niets uit te staan heeft. Nu is juist hier nog ruimschoots plaats voor initiatieven om tot kleinere spoelen te komen. Men kan hier zoeken in de richting van nieuwe isolatiematerialen, die hogere temperaturen kunnen verdragen of een grotere warmtegeleiding hebben dan de gebruikelijke, en in de richting van constructies met verbeterde warmteafvoer.

Verder kan men proberen de vulfactor te vergroten, waardoor de geleiderverliezen kleiner worden. Voert men nu de vensterstroomdichtheid op tot men weer dezelfde verliezen en dezelfde temperatuurstijging heeft, dan zal het nuttig vermogen evenredig met de wortel uit de vulfactor toenemen; tegelijk is echter ook het verliespercentage omgekeerd evenredig met deze wortel verminderd. In gevallen waar niet de temperatuur, maar het rendement beslissend is, kan men dus van een ontwerp van gegeven grootte het nuttig vermogen evenredig met de vulfactor opvoeren.

VII]

#### HET THERMISCH ONTWERP

Gebruikt men de verbetering van de vulfactor echter om bij constant nuttig vermogen de spoel kleiner te maken, dan wordt de verhouding van koelende oppervlakte tot verlies opleverend volume gunstiger. Daarnaast wordt door vergroting van de vulfactor in een gegeven spoel de warmtegeleiding beter en de in het eerste stadium van het opwarmen werkzame warmtecapaciteit groter.

Een voorbeeld van beide verbeteringen is de toepassing van geëloxeerd aluminiumband als geleider. Hiermee kan men een grote vulfactor verkrijgen; men heeft bovendien een isolatiemateriaal, dat tegen hoge temperaturen bestand is.

Tenslotte kan men pogen de koeling te verbeteren, hetzij door de afvoer van warmte via constructiedelen te vergroten, hetzij door b.v. geforceerde luchtkoeling toe te passen. Daar ontwerpers van ijzerkernspoelen zich veelal minder intensief met de verschijnselen betreffende warmte-afgifte aan lucht vertrouwd hebben gemaakt, zullen wellicht op dit gebied nog verbeteringen verkregen kunnen worden. Bijzonder frappante besparingen op het volume zijn bij grotere spoelen mogelijk, als men bewust een zekere verslechtering van het hierbij van nature verkregen hoge rendement toelaat.

## Aanhangsel

# THEORETISCHE EN PRAKTISCHE WENKEN

## § 1. Omrekening van $B_{max}$ in specifieke windingsspanning

Het is elders gebruikelijk de magnetische belasting van een ijzerkern aan te duiden door de maximale momentele waarde  $B_{max}$  van de magnetische inductie. Wij willen afleiden, hoe men een gegeven waarde van  $B_{max}$  omrekent in de bij ons gebruikte (effectieve) specifieke windingsspanning-per-frequentie. De magnetische inductie kan worden uitgedrukt in tesla (T) of wel  $V \cdot s/m^2$  (1 T = 10 000 gauss). Neemt van een magnetisch veld de *B* eenparig met 1 tesla per seconde toe, dan wordt in een loodrecht op de veldrichting geplaatste vlakke winding met een omvatte oppervlakte van 1 m<sup>2</sup> een gelijkspanning van 1 V geïnduceerd (zie fig. 17).



Fig. 17. Een eenparig met de tijd t toenemende magnetische inductie B induceert in een winding een constante gelijkspanning U. In ons voorbeeld neemt B per seconde met 1 tesla  $(T) = 1 \text{ V} \cdot \text{s/m}^2 = 10\ 000$  gauss toe en induceert 1 V in een vlakke winding, die loodrecht op de veldrichting staat en 1 m<sup>2</sup> van het magnetische veld omvat.

Laten wij nu *B* sinusvormig met de tijd veranderen en wel zo, dat 1 periode in  $2\pi$  seconden wordt doorlopen, terwijl de amplitude 1 tesla is (zie fig. 18), dan blijkt de maximale verandering van de *B*, die bij de nuldoorgangen optreedt, ook 1 T/s te zijn. Dit zullen wij straks laten zien. In fig. 18 verandert *B* bij t = 0 met 1 T/s en induceert op dat moment dezelfde spanning als in fig. 17, zijnde 1 volt per omvatte m<sup>2</sup>. Dit is de topwaarde van de specifieke wisselspanning, die door een  $B_{max}$  van 1 T en de frequentie van  $1/2\pi$  Hz wordt opgewekt. Rekenen wij dit gegeven om voor de effectieve spannings-



Fig. 18. De maximale verandering van een sinusvormig met de tijd verlopende magnetische inductie *B* treedt op bij de nul-doorgangen. Deze verandering is 1 tesla per seconde, als de amplitude van de *B* 1 tesla (T) bedraagt en één periode  $2\pi$  seconden duurt.

waarde, 1 cm<sup>2</sup> en 1 Hz, dan verkrijgen wij een specifieke windingsspanningper-frequentie van  $2\pi \times 1000/(\sqrt{2} \times 10\ 000)$  of wel

$$0,444 \quad \frac{mV \sim}{wdg \cdot cm^2 \cdot Hz}$$

Bij  $B_{\text{max}} = 1$  T en f = 50 Hz hebben wij dus een specifieke windingsspanning

$$U' = 22,2 \frac{\mathrm{mV} \sim}{\mathrm{wdg} \cdot \mathrm{cm}^2}.$$

Wij wilden nog laten zien, dat de *B*-verandering in het nulpunt van fig. 18 even steil verloopt als in fig. 17. Op de omtrek van een cirkel met straal één



Fig. 19. Het eindpunt van een roterende straal van de cirkel met straal r = 1 heeft de snelheid v = 1. Eén omwenteling wordt volbracht in de tijd  $2\pi$ . Bij de nuldoorgangen verandert de lengte van de met *B* aangeduide loodlijn momenteel eveneens met 1.

beweegt zich het eindpunt van een roterende straal met de snelheid v = 1en maakt dus één omwenteling in de tijd  $2\pi$ . Bij de nuldoorgang nu is de verandering van de bijbehorende B numeriek evengroot als v, en wel 1 tesla per seconde (zie fig. 19).

## § 2. De impedantie van een smoorspoel. Het begrip specifieke impedantie

Het *schijnbaar vermogen* van een smoorspoel met gesloten ijzerkern bij 50 Hz wordt verkregen uit het produkt van twee *produkten*, met name het produkt van specifieke windingsspanning en specifieke stroomwindingen, dus een op de volume-eenheid betrokken vermogen, en het produkt van ijzerdoorsnede en ijzerlengte, dus het ijzervolume.

De *impedantie* van een smoorspoel wordt bij één winding verkregen uit het produkt van twee *quotienten*, met name het quotient van ijzerdoorsnede en ijzerlengte, en het quotient van specifieke windingsspanning en specifieke stroomwindingen. Dit laatste quotient U'/I' is dus een impedantie betrokken op de eenheid van ijzerdoorsnede resp. -lengte. Wij geven daarom dit quotient de naam: "specifieke impedantie". Deze specifieke impedantie is een karakteristiek gegeven voor het betreffende ijzer en kan voor iedere gekozen spanningsbelasting van het ijzer uit de magnetiseringskromme bepaald worden, zie b.v. fig. 3 (blz. 8).

Aan de hand van deze overwegingen kunnen wij de impedantie van de bovenbedoelde smoorspoel als volgt berekenen:

$$\frac{U_n}{I_n} = n^2 \frac{U}{I} = n^2 \frac{U'}{I'} \frac{A_{ij}}{I_{ij}}.$$

De elders gebruikelijke rekenwijze gaat via de begrippen radiaalfrequentie  $\omega = 2\pi f$ , zelfinductie *L*, relatieve permeabiliteit van het ijzer  $\mu_r$  en inductieconstante  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-9}$  H/cm:

$$\frac{U_n}{I_n} = \omega L = \omega n^2 \mu_r \mu_0 \frac{A_{ij}}{l_{ij}}.$$

Het blijkt, dat ons begrip "specifieke impedantie" met de relatieve permeabiliteit en de inductieconstante als volgt samenhangt:

$$\frac{U'}{I'} = \omega \ \mu_r \ \mu_0.$$

Het begrip specifieke impedantie is uiteraard niet beperkt tot ijzer, maar kan evengoed worden gebruikt voor lucht. De specifieke impedantie van lucht bij 50 Hz kan uit de luchtlijn van fig. 5 of de op blz. 11 vermelde getallen worden bepaald, en is:

$$\frac{U'}{I'_l} = \frac{1}{2,533 \times 10^5} \frac{\mathrm{V} \cdot \mathrm{cm}}{\mathrm{A} \cdot \mathrm{cm}^2 \cdot \mathrm{wdg}^2} \,.$$

Bij een smoorspoel met een luchtspleet van de lengte  $l_l$  hebben wij dus met twee specifieke impedanties te maken, die in overeenstemming met de verschillende afmetingen van ijzer en lucht de impedantie van de smoorspoel bepalen. Deze impedantie is gegeven door (zie blz. 23):

$$\frac{U_n}{I_n} = n^2 \frac{U}{I} = \frac{U'A_{ij}}{I' \cdot l_{ij} + I'_l \cdot l_l} = \frac{1}{\frac{I'}{U'} \frac{l_{ij}}{A_{ij}} + \frac{I_l'}{U'} \frac{l_l}{A_{ij}}}.$$

In aansluiting op het begrip specifieke windingsspanning-per-frequentie (zie blz. 9) kunnen wij het begrip "specifieke impedantie-per-frequentie" vormen. Voor lucht (en de ledige ruimte) is de waarde van deze grootheid (zie fig. 6 en blz. 12):

$$\frac{U'}{I'_i f} = \frac{1}{12,665 \times 10^6} \frac{\mathbf{V} \cdot \mathbf{cm}}{\mathbf{A} \cdot \mathbf{cm}^2 \cdot \mathbf{wdg}^2 \cdot \mathbf{Hz}}.$$

De samenhang van deze grootheid met de boven vermelde inductieconstante is:

$$\frac{U'}{I'_l f} = 2\pi \ \mu_0 = \frac{8\pi^2}{10^9} \ \frac{\mathrm{H}}{\mathrm{cm} \cdot \mathrm{wdg}^2} \,.$$

Deze merkwaardige factoren, die met  $\pi$  samenhangen, komen voort uit het feit, dat de volt en ampère oorspronkelijk werden gedefinieerd in aansluiting aan oudere eenhedenstelsels.

## § 3. Berekening van de verlieshoek van een smoorspoel

Een smoorspoel met geleider- en ijzerverliezen kan schematisch worden weergegeven door een verliesvrije spoel met spanning  $U_n$  en stroom  $I_n$ , waarbij een serieweerstand  $R_n$  als oorzaak van de geleiderverliezen wordt beschouwd en een parallelgeleiding  $G_n$  als oorzaak van de ijzerverliezen (zie



Fig. 20. Schematische voorstelling van een smoorspoel met geleider- en ijzerverliezen. De geleiderverliezen worden vertegenwoordigd door de weerstand  $R_n$  in serie met een verliesvrije spoel, en de ijzerverliezen door een geleiding  $G_n$  parallel aan deze spoel. Spanning  $U_n$  en stroom  $I_n$  van de verliesvrije spoel hebben een onderlinge fazeverschuiving van 90°. Bij betrekkelijk kleine verliezen zijn de klemspanning en de klemstroom nagenoeg gelijk aan  $U_n$  resp.  $I_n$ , terwijl de fazehoek een zekere verlieshoek minder is dan 90°.



Fig. 21. Vectordiagram bij fig. 20. Door de verliesspanning  $U_r = R_n I_n$  en de verliesstroom  $I_g = G_n U_n$  krijgen de klemspanning en -stroom een onderlinge fazehoek  $\varphi$ , die  $\delta = \delta_1 + \delta_2$  kleiner is dan 90°.

fig. 20). Uit het vectordiagram fig. 21 blijkt, dat de geleiderverliezen een verlieshoek

$$\delta_1 \approx \operatorname{tg} \delta_1 = \frac{U_r}{U_n} = \frac{I_n}{U_n} R_n$$

doen ontstaan. De ijzerverliezen veroorzaken een verlieshoek

$$\delta_2 \approx \operatorname{tg} \delta_2 = \frac{I_g}{I_n} = \frac{U_n}{I_n} G_n.$$

Hierbij is verondersteld, dat de verliezen naar verhouding klein zijn:  $U_r \ll U_n$ ;  $I_g \ll I_n$ , waardoor  $\delta \approx \text{tg } \delta$ , terwijl bovendien  $U_n$  en  $I_n$  vrijwel gelijk zijn aan de klemspanning resp. klemstroom.

Wij kunnen nu in de uitdrukking voor  $\delta$  de impedantie  $U_n/I_n$  via de windingsspanning U en de stroomwindingen I terugvoeren op de specifieke impedantie U'/I', die door de magnetiseringskromme van het ijzer is gegeven.

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 = \frac{1}{n^2} \frac{I}{U} R_n + n^2 \frac{U}{I} G_n = \frac{1}{n^2} \frac{I'}{U'} \frac{l_{ij}}{A_{ij}} R_n + n^2 \frac{U'}{I'} \frac{A_{ij}}{l_{ij}} G_n.$$

Bovendien kunnen ook de serieweerstand  $R_n$  en de parallelgeleiding  $G_n$ worden teruggebracht tot de soortelijke weerstand  $\varrho$  van het geleidermateriaal resp. de soortelijke ijzerverliesfactor  $\gamma$  (zie blz. 48 en 50), zodat wij uiteindelijk voor een smoorspoel met gesloten ijzerkern zonder luchtspleet krijgen:

$$\delta = rac{I'}{U'} rac{arrho}{f} rac{l_w \, l_{ij}}{A_v \, A_{ij}} + rac{U'}{I'} \gamma.$$

Het gedeelte van  $\delta$  dat aan het ijzer te wijten is, hangt niet van de afmetingen van de ijzerkern af, maar slechts van de specifieke impedantie en de soortelijke verliesfactor, die het ijzer bij de betreffende frequentie en specifieke windingsspanning heeft.

Bevat de ijzerkern van de smoorspoel nog een luchtspleet met de kleine lengte  $l_l$  en met dezelfde doorsnede als de ijzerkern, dan beschouwen wij deze smoorspoel als te zijn ontstaan uit de boven besproken smoorspoel door de luchtspleet aan te brengen. Daar de luchtspleet in serie met de ijzerweg staat, wordt, bij dezelfde spanning  $U_n$ , de stroom groter, en wel het bedrag dat voor de luchtweg vereist is. De stroom wordt dus:

$$I_n = \frac{I}{n} = \frac{1}{n} (I' l_{ij} + I_l' l_l).$$

De geleiderverliezen nemen, bij gelijkblijvende  $R_n$ , door de vergroting van de stroom toe. Wij nemen aan, dat de ijzerverliezen  $G_n U_n^2$  dezelfde blijven, omdat de specifieke windingsspanning U' van het ijzer niet gewijzigd is, dus blijft ook  $G_n$  onveranderd. De impedantie van de smoorspoel wordt ten gevolge van de vergroting van de magnetische weerstand van het magnetische circuit kleiner, zoals ook blijkt uit het groter worden van  $I_n$ . Wij krijgen dus nu voor de verlieshoek:

$$\delta = \frac{1}{n^2} \frac{I' l_{ij} + I_l' l_l}{U' A_{ij}} R_n + n^2 \frac{U' A_{ij}}{I' l_{ij} + I_l' l_l} G_n =$$
  
=  $\frac{\varrho}{f} \frac{l_w}{A_v} \left( \frac{I'}{U'} \frac{l_{ij}}{A_{ij}} + \frac{I_l'}{U'} \frac{l_l}{A_{ij}} \right) + \gamma \frac{1}{\frac{I'}{U'} + \frac{I_l'}{U'} \frac{l_l}{l_{ij}}}.$ 

Er zij nog op gewezen, dat  $\delta$  ook gevonden kan worden uit het quotient van verliesvermogen en blind vermogen  $P_v/P$ , zoals wij dit op blz. 61 bij de rendementsbeschouwingen hebben gebruikt. Immers,

$$\delta = \frac{I_n}{U_n} R_n + \frac{U_n}{I_n} G_n = \frac{I_n^2 R_n + U_n^2 G_n}{U_n I_n} = \frac{P_v}{P}.$$

## § 4. Primaire nullastimpedantie, spreiding en vervorming bij de transformator

Bij gegeven netspanning  $U_n$  en gekozen specifieke windingsspanning U' heeft men nog de keuze uit verschillende combinaties van ijzerdoorsnede  $A_{ij}$  en windingstal *n*, waarbij:  $U_n = nU = n A_{ij} U'$ , dus

$$n A_{ij} = \frac{U_n}{U'} = \text{const.}$$

De combinatie van grotere n met kleinere  $A_{ij}$  levert dan, bij gelijkblijvende

#### PRIMAIRE NULLASTIMPEDANTIE

ijzerlengte  $l_{ij}$ , een grotere primaire nullastimpedantie  $U_n/I_n$  op. Immers,

$$I_n=\frac{I}{n}=\frac{I'l_{ij}}{n},$$

dus

$$\frac{U_n}{I_n} = \frac{n A_{ij}}{l_{ij}} \frac{U'}{I'} n,$$

of wel evenredig met n, daar U'/I' vastligt door de magnetiseringskromme van het ijzer. Een constructie met kleine ijzerdoorsnede en groot windingstal zal echter een grotere weerstand van de wikkelingen en, bij normale wikkelwijze, een grotere spreiding hebben.

De onderlinge *spreiding* van de primaire en de secundaire wikkeling neemt toe met hun afstand, zoals wij bij de lektransformator hebben gezien. Bijzonder klein wordt de spreiding, als wij zowel de primaire als ook de secundaire wikkeling splitsen en op hetzelfde kernstuk door elkaar wikkelen, b.v. afwisselend een laag primaire windingen en een laag secundaire windingen.

Bij regeltransformatoren volgens fig. 22a met een variabele aftakking op



Fig. 22. Regeltransformator met variabele aftakking op de secondaire wikkeling. a) Normale uitvoering. b) Uitvoering met een primaire wikkeling die uit drie onderling gelijke, parallel geschakelde secties bestaat; hierdoor wordt de constantheid van de windingsspanning belangrijk verhoogd.

de secundaire wikkeling kan toch spreiding optreden, niettegenstaande het feit, dat de secundaire wikkeling op dezelfde kern dicht om de primaire wikkeling is gewikkeld. Immers, bij belasting van de aftakking zal de windingsspanning in het kernstuk binnen het belaste deel van de secundaire wikkeling zakken, doordat een gedeelte van het veld uit het onbelaste deel zich, buiten het belaste stuk om, via de lucht en de andere kern sluit. Een hierop lijkende sluiting van het magnetische veld bij belasting zijn wij al bij de lektransformator tegengekomen.

Deze vorm van spreiding kan belangrijk worden verminderd door de primaire wikkeling te splitsen in twee of meer onderling gelijke secties, die *parallel* geschakeld worden; zie fig. 22b. Elke sectie krijgt het oorspronkelijke aantal windingen, waarbij de doorsnede van de geleider kleiner gekozen kan worden. Door deze constructie wordt de windingsspanning langs de kern ook bij belasting van de aftakking veel beter constant gehouden.

Bij een sinusvormige netspanning treedt meer *vervorming* van de magnetiseringsstroom op, naarmate de ijzerkern hogere specifieke windingsspanningen te verwerken krijgt. Deze vervorming heeft slechts dan invloed op de vorm van de secundaire spanning, als aan de primaire kant vervormd spanningsverval over de weerstand van de primaire wikkeling en de spreidingsimpedantie optreedt. Om vervorming van de secundaire spanning te voorkomen, kan men dus naast het verlagen van de ijzerbelasting ook trachten de spreiding en de primaire weerstand te verminderen.



Fig. 23. Regeling van een lektransformator door middel van een ijzerlichaam dat de lengte van de luchtweg geheel overbrugt, terwijl zijn doorsnede belangrijk kleiner is dan de doorsnede van de kern. Hierbij kan een aanmerkelijke vervorming van de magnetiseringsstroom optreden, daar in het regelingsstuk door samendringen van een groot gedeelte van het magnetische veld de specifieke windingsspanning betrekkelijk groot wordt.

Bij de regeling van een lektransformator, ontstaat een aanmerkelijke vervorming van de magnetiseringsstroom, als men het regelende ijzerlichaam de gehele lengte van de luchtweg laat overbruggen, terwijl zijn doorsnede belangrijk kleiner is dan de doorsnede van de kern, zodat er verzadiging optreedt; men vergelijke fig. 23 met fig. 13d, waarbij de resterende luchtweg in serie ligt met het regelende ijzerlichaam, waardoor vervorming wordt vermeden.

Bij de regeling volgens fig. 23 verdeelt zich de primaire windingsspanning over de doorsnede van de luchtweg en die van het ijzerlichaam in verhouding van de reciproke magnetische weerstand, zodat de ijzerdoorsnede betrekkelijk veel windingsspanning te verwerken krijgt.

## § 5. Nauwkeuriger bepaling van de magnetische weerstand van de luchtweg bij de lektransformator

Bij de berekening van de kortsluitstroom van de lektransformator werd het begrip "magnetische weerstand van de luchtweg" ingevoerd (blz. 41). Hieronder wordt verstaan het quotient van stroomwindingen en windingsspanning, als deze stroomwindingen nodig zijn om een veld van deze windingsspanning de bedoelde luchtweg te doen doorlopen. Bij een homogeen veld is de magnetische weerstand van een luchtweg met lengte  $l_l$  en doorsnede  $A_l$ gelijk aan het produkt van een quotient van elektrische grootheden en een afmetingsquotient:  $(I_l'/U') \cdot (l_l/A_l)$ . Voor de waarde van de "specifieke impedantie" van lucht  $U'/I_l'$  zie blz. 67. Bij de bovengenoemde berekening is voor het veld in de lucht van fig. 13c eenvoudigheidshalve een verdeling aangenomen die in fig. 24 is geschetst.



Fig. 24. Schematische voorstelling van het luchtveld in een lektransformator, waarvan de secundaire wikkeling is kortgesloten. Het verloop van de veldlijnen door het ijzer en de wikkeling is eenvoudigheidshalve niet getekend. Volgens dit sterk vereenvoudigde veldbeeld zou de magnetische weerstand van de luchtweg evenredig met  $l_l/A_l$  zijn.

Een hierop gebaseerde berekening levert, zoals al vroeger was opgemerkt, een te grote magnetische weerstand op. Immers, de specifieke windingsspanning ofwel velddichtheid U' in de binnenruimte tussen de jukken is kleiner dan aangenomen, omdat een gedeelte van het veld b.v. tussen de zij- en de buitenvlakken van de jukken loopt en dus de gehele windingsspanning U zich over een grotere effectieve luchtdoorsnede  $A_l$  eff verdeelt. Een kleinere velddichtheid langs de afstand  $l_l$  betekent echter ook minder (gemiddelde) specifieke stroomwindingen I' langs  $l_l$  en dus minder stroomwindingen I voor de weg van het veld U van het ene juk naar het andere.

In fig. 25 is de verhouding van de effectieve luchtdoorsnede tot de in fig. 24 aangegeven luchtdoorsnede,  $A_l \,_{eff}/A_l$ , als functie van de verhouding van de jukafstand tot de ribben van de jukdoorsnede,  $l_l/s$ , getekend. Deze kromme is experimenteel verkregen door elektrische metingen aan een analoge



Fig. 25. Verhouding van de effectieve luchtdoorsnede  $A_l$  eff tot de in fig. 24 aangegeven luchtdoorsnede  $A_l$  als functie van de verhouding van de jukafstand tot de ribben van de vierkante jukdoorsnede. Bij de toepassing van deze correctiefactor  $A_l$  eff/ $A_l$  wordt slechts de vergroting van de luchtdoorsnede in vlakken parallel aan het tekenvlak van fig. 24b in rekening gebracht.

opstelling, en wel door de onderlinge capaciteit van twee lange vierkante metalen staven te meten.

Hierbij zij opgemerkt, dat de in fig. 25 vervatte correctiefactor slechts dat deel van het veld in rekening brengt dat tussen de zij- en de buitenvlakken van de jukken loopt, en wel in vlakken parallel aan het tekenvlak van fig. 24b. Het deel van het veld dat tussen de uiteinden van de jukken om de wikkelingen heen loopt, is dus verwaarloosd.

### § 6. Effectieve lengte van de luchtspleet bij een smoorspoel

Bij de berekening van de smoorspoel werd eenvoudigheidshalve aangenomen, dat de dwarsdoorsnede van het magnetisch veld in de luchtspleet gelijk is aan de ijzerdoorsnede. Dit is voor luchtspleten die zeer kort zijn ten opzichte

74

van de dwarsafmetingen, nagenoeg juist. Wordt de luchtspleet echter langer gemaakt, dan wordt het veld breder door de kromming van het randveld,



Fig. 26. Effectieve lengte h van een luchtspleet als functie van de werkelijke lengte bij een E-I-kern met vierkante doorsnede. De luchtspleet wordt verkregen door het I-stuk op een zekere afstand van het E-stuk te plaatsen. Daar het magnetische veld op zijn weg van het middelste kernstuk via het I-stuk naar de buitenste kernstukken deze afstand twee keer moet overbruggen, is de lengte van de luchtspleet twee keer deze afstand. De kromme nadert tot een grens, die bereikt wordt als het I-stuk helemaal is verwijderd.

waardoor de gemiddelde doorsnede van de luchtweg groter en de magnetische weerstand, dus de benodigde stroomwindingen, kleiner wordt dan volgens onze veronderstelling. Dit kan men formeel in rekening brengen door bij gegeven ijzerdoorsnede  $A_{ij}$  de luchtdoorsnede hieraan gelijk te stellen, echter de effectieve lengte  $l_l$  van de luchtspleet korter aan te nemen dan de werkelijke. In fig. 26 is voor een E-I-kern (zie fig. 12) met vierkante kerndoorsnede globaal de effectieve lengte van de luchtspleet als functie van de werkelijke lengte uitgezet. Deze kromme is verkregen door metingen aan een smoorspoel met variabele luchtspleet. Zij streeft naar een eindwaarde, waarbij het gehele veld van het middenstuk van de E naar de buitenstukken gaat, terwijl het I-lichaam is verwijderd. Verder zij opgemerkt, dat hier in tegenstelling met § 5 de gehele correctie in rekening is gebracht.

# § 7. Het toenemen van de temperatuur van een koperdraad na het inschakelen van de stroom

Op blz. 54 hebben wij afgeleid, hoe de temperatuur van de geleider in een wikkeling toeneemt bij een zo kortstondige belasting, dat voortplanting en

afvoer van warmte verwaarloosd kan worden. Als een numeriek voorbeeld willen wij aangeven, hoeveel graden per seconde de temperatuur van een koperdraad van 1 mm<sup>2</sup> doorsnede bij een stroom van 1 A onder de genoemde verwaarlozingen oploopt.

Omdat de vulfactor f hier 1 is, hebben wij:

$$\frac{\bigtriangleup \vartheta}{t} = \frac{\varrho S^2}{c}.$$

In ons geval is de soortelijke weerstand, als wij kamertemperatuur aannemen (zie blz. 48):

$$arrho=$$
 1,8  $imes$  10<sup>-6</sup>  $\Omega$  · cm = 18  $imes$  10<sup>-6</sup>  $rac{\mathrm{V}}{\mathrm{A}}$  · mm.

Verder is de stroomdichtheid:

$$S = 1 \text{ A/mm}^2$$

en de soortelijke warmte van koper (zie blz. 57):

$$c = 3.4 \frac{J}{\text{cm}^3 \cdot {}^\circ\text{C}} = 3.4 \times 10^{-3} \frac{\text{V} \cdot \text{A} \cdot \text{s}}{\text{mm}^3 \cdot {}^\circ\text{C}},$$

dus

$$\frac{\bigtriangleup \vartheta}{t} = \frac{18 \times 1 \times 10^3}{10^6 \times 3.4} \frac{\mathrm{V} \cdot \mathrm{mm} \cdot \mathrm{A}^2 \cdot \mathrm{mm}^3 \cdot \mathrm{^\circ C}}{\mathrm{A} \cdot \mathrm{mm}^4 \cdot \mathrm{V} \cdot \mathrm{A} \cdot \mathrm{s}} = 0,005 \ \mathrm{^\circ C/s}.$$

Men lette er op, dat bij het warm worden de soortelijke weerstand van koper toeneemt, waardoor de temperatuurstijging sneller plaats heeft.

# ALFABETISCH REGISTER

Aftakking71aluminiumband, geëloxeerd64ampèrewinding (A·wdg)5analogie, elektrisch-magnetische74autodynamo9	—, radiaal gauss (Gs) gedachtenexperi geleider, elektris
B-H-kromme       13, 15 $B_{max}$ 65         B-verandering       66, 67         belastbaarheid       51         belastbaarheid       51         belastbaarheid       51         belastbaarheid       66         -, igleider       16         -, ijzer       16         -, inductieve       36, 37, 38, 40         - v. d. magnetische schakel       15, 16         -, materiaal-       3, 18         - v. d. secundaire wikkeling       1, 2         -, weerstands-       36, 37, 38, 40         belastingskarakteristiek       2, 3         blik, dikte v. h.       14         bronspanning       45	<ul> <li>, magnetische</li> <li>verliezen .</li> <li>verliezen, sp geleiding</li> <li>, soortelijke .</li> <li>, vervang- gelijkrichter, enl gelijkstroom</li> <li>windingen .</li> <li>wikkeling .</li> <li>variatie</li> <li>glimontlading .</li> <li>grenstemperatut grenswaarde v. owindingsspann</li> </ul>
Commuteren	Harmonischen. hysteresislus.
Differentiaalquotient         15           differentiëren         15           doorslag, isolatie-         57           doorsnedenprodukt         17, 20, 31, 33           dynamo, auto-         9	<ul> <li>doorsnede.</li> <li>kern</li> <li>lengte</li> <li>lichaam, reg</li> <li>verliesfactor</li> <li>soortelijke .</li> </ul>
Effectieve waarde       2, 15         E-I-blik       32, 60         E-I-kern       59, 61, 75         eenheidsafmetingen       49         — cirkel       66, 68         — frequentie       9, 12, 46, 66, 68         — kubus       49         — spoel       49         VI       49	<ul> <li>verliezen .</li> <li>verliezen , sp impedantie .</li> <li>-per-frequen</li> <li>, primaire nul</li> <li>, specifieke .</li> <li>, specifieke , va impuls, warmte- inductie .</li> <li>- constante .</li> </ul>
Faze       2         hoek       1         - verschil       15, 38, 40, 41         flux       15         frequentie       14, 8, 9, 15, 65        , eenheids-       9, 12, 46, 66, 68	<ul> <li>verschijnsel</li> <li>wet</li> <li>inpassen</li> <li>inschakelen</li> <li>inschakel</li> <li>stroomstoot</li> <li>toestand</li> </ul>

gauss (Gs)								65
gedachtenexperiment.								VI
geleider, elektrische .								4
-, magnetische								4
– verliezen								47
<ul> <li>verliezen, specifieke</li> </ul>							47,	51
geleiding							49,5	50
-, soortelijke								50
-, vervang							49,	50
gelijkrichter, enkelfazig	e							43
gelijkstroom								
— windingen								9
— wikkeling								24
– variatie							25,	27
glimontlading								57
grenstemperatuur					57		58,	59
grenswaarde v. d. speci	fie	ke						
windingsspanning .								16
5-1 5								
Harmonischen								15
nysteresislus.								15
Uzer								
doorsnede							_	0
							. 7	. 8
- kern	:	:	:	:	· 1	•	.7 4.6	, 8
— kern	7	. 8	. 2		1 23	, '	.7 4,6 31.	, 8 , 7 33
<ul> <li>kern</li></ul>	7	, 8	, 2	.0,	1 23	, ,	.7 4,6 31,	, 8 , 7 33 72
<ul> <li>doorsiede</li> <li>kern</li> <li>lengte</li> <li>lichaam, regelend</li> <li>verliesfactor.</li> </ul>	7	, 8	, 2		23		.7 4,6 31,	, 8 , 7 33 72
<ul> <li>doorstiede</li> <li>kern</li> <li>lengte</li> <li>lichaam, regelend</li> <li>verliesfactor,</li> <li>soortelijke</li> </ul>	7	, 8 49	. 2		23 59	· · ·	.7 4,6 31,	, 8 , 7 33 72 69
<ul> <li>doorshede</li> <li>kern</li> <li>lengte</li> <li>lichaam, regelend</li> <li>verliesfactor,</li> <li>soortelijke</li> <li>verliezen</li> </ul>		, 8 , 8 , 49	, 2	0,	23 59	•	.7 4,6 31, 63, 47	, 8 , 7 33 72 69 49
kern	7	, 8 , 8 , 49	, 2 , 5	0,	23 59	· , · , · , · , · , · , · , · , · , · ,	.7 4,6 31, 63, 47,	, 8 , 7 33 72 69 49 51
<ul> <li>kern</li> <li>lengte</li> <li>lichaam, regelend</li> <li>verliesfactor,</li> <li>soortelijke</li> <li>verliezen</li> <li>verliezen, specifieke</li> <li>impedantie</li> </ul>	7	, 8 49	, 2 , 5	0,	23 59	· · · · · ·	.7 4,6 31, 63, 47,	, 8 , 7 33 72 69 49 51 70
<ul> <li>kern</li> <li>lengte</li> <li>lichaam, regelend</li> <li>verliesfactor,</li> <li>soortelijke</li> <li>verliezen</li> <li>verliezen, specifieke</li> <li>impedantie</li> <li>per-frequentie</li> </ul>	7	, 8 , 8 , 49	, 2 , 5	0,	23 59	· · · · · ·	.7 4,6 31, 63, 47, 67,	, 8 , 7 33 72 69 49 51 70 68
<ul> <li>kern</li> <li>lengte</li> <li>lichaam, regelend</li> <li>verliesfactor,</li> <li>soortelijke</li> <li>verliezen</li> <li>verliezen, specifieke</li> <li>impedantie</li> <li>per-frequentie</li> <li>primaire pullast.</li> </ul>		, 8 49.	, 2 , 5	0,	1 23 59	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	.74,6 31, 63, 47, 67,	, 8 , 7 33 72 69 49 51 70 68 71
kern	· · 7 ·	, 8 49	, 2 , 5	· .0,	1 23 59	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· 7 4, 6 31, · 63, 47, · 67, ·	, 8 , 7 33 72 69 49 51 70 68 71 69
<ul> <li>kern</li> <li>kern</li> <li>lengte</li> <li>lichaam, regelend</li> <li>verliesfactor,</li> <li>soortelijke</li> <li>verliezen, specifieke</li> <li>impedantie</li> <li> per-frequentie</li> <li>- primaire nullast-</li> <li>- specifieke</li> <li>specifieke</li> <li>- specifieke</li> <li>- specifieke</li> <li>- specifieke</li> <li></li></ul>	·	, 8 , 8	, 2 , 5		1 23 59	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· 7 4, 6 31, · 63, 47, · 67, ·	, 8 , 7 33 72 69 49 51 70 68 71 69 73
<ul> <li>kern</li> <li>kern</li> <li>lengte</li> <li>lichaam, regelend</li> <li>verliesfactor,</li> <li>soortelijke</li> <li>verliezen, specifieke</li> <li>mpedantie</li> <li>-per-frequentie</li> <li>, specifieke</li> <l< td=""><td></td><td>, 8 , 8</td><td>, 2 , 5</td><td></td><td>1 23 59</td><td>· , ·</td><td>. 7 4, 6 31, 63, 47, 67,</td><td>, 8 , 7 33 72 69 49 51 70 68 71 69 73 54</td></l<></ul>		, 8 , 8	, 2 , 5		1 23 59	· , ·	. 7 4, 6 31, 63, 47, 67,	, 8 , 7 33 72 69 49 51 70 68 71 69 73 54
<ul> <li>kern</li> <li>lengte</li> <li>lichaam, regelend</li> <li>verliesfactor,</li> <li>soortelijke</li> <li>verliezen, specifieke</li> <li>mpedantie</li> <li>- verliezen, specifieke</li> <li>mpedantie</li> <li>- per-frequentie</li> <li>- specifieke</li> <li>- specifieke, van luch</li> <li>impuls, warmte-</li> <li>- inductie</li> </ul>		, 8 , 8	, 2 , 5	· · · · · · · · · ·	1 23 59	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	.74,6 31, 63, 47, 67,	, 8 , 7 33 72 69 49 51 70 68 71 69 73 54
<ul> <li>kern</li> <li>lengte</li> <li>lichaam, regelend</li> <li>verliesfactor,</li> <li>soortelijke</li> <li>verliezen, specifieke</li> <li>impedantie</li> <li>- per-frequentie</li> <li>, specifieke</li> <li>, specifieke, van luch</li> <li>impuls, warmte-</li> <li>aconstanta</li> </ul>		, 8 , 8	, 2 , 5	· . 0, · . ·	23 59		· 7 4, 6 31, · 63, 47, · 67, · 67, ·	, 8 , 7 33 72 69 49 51 70 68 71 69 73 54 13
<ul> <li>kern</li> <li>kern</li> <li>lengte</li> <li>lichaam, regelend</li> <li>verliesfactor,</li> <li>soortelijke</li> <li>verliezen, specifieke</li> <li>mpedantie</li> <li>-per-frequentie</li> <li>, specifieke</li> <l< td=""><td></td><td>49</td><td>, 2</td><td>·</td><td>1 23 59</td><td></td><td>· 7 4, 6 31, · 63, 47, · 67, · 67, ·</td><td>, 8 , 7 33 72 69 49 51 70 68 71 69 73 54 13 68</td></l<></ul>		49	, 2	·	1 23 59		· 7 4, 6 31, · 63, 47, · 67, · 67, ·	, 8 , 7 33 72 69 49 51 70 68 71 69 73 54 13 68
<ul> <li>kern</li> <li>kern</li> <li>lengte</li> <li>lichaam, regelend</li> <li>verliesfactor,</li> <li>soortelijke</li> <li>verliezen,</li> <li>verliezen,</li> <li>specifieke</li> <li>specifieke</li> <li>specifieke</li> <li>specifieke,</li> <li>varmte</li> <li>constante</li> <li>verschijnsel</li> <li>wat</li> </ul>	·	49	, 2	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	. 1 23 59		· 7 4, 6 31, · 63, 47, · 67, · 67, · 67, ·	, 8 , 7 33 72 69 49 51 70 68 71 69 73 54 13 68 15
<ul> <li>kern</li> <li>kern</li> <li>lengte</li> <li>lichaam, regelend</li> <li>verliesfactor,</li> <li>soortelijke</li> <li>verliezen, specifieke</li> <li>impedantie</li> <li>-per-frequentie</li> <li>, primaire nullast-</li> <li>, specifieke</li> <li>, specifieke</li> <li>, specifieke</li> <li>inductie</li> <li>constante</li> <li>verschijnsel</li> <li>wet</li> <li>waasen</li> </ul>		, 8 49	, 2	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· 1 23 · 59 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		· 7 4, 6 31, · 63, 47, · 67, · 67, · 67, ·	, 8 , 7 33 72 69 51 70 68 71 69 73 54 13 68 15 15
<ul> <li>kern</li> <li>lengte</li> <li>lichaam, regelend</li> <li>verliesfactor,</li> <li>soortelijke</li> <li>verliezen, specifieke</li> <li>werliezen, specifieke</li> <li>per-frequentie</li> <li>, specifieke</li> <li>,</li></ul>		49	, 2	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	1 23 59	• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	· 7 4, 6 31, · 63, 47, · 67, · 67, · 28,	, 8 , 7 33 72 69 49 51 70 68 71 69 73 54 13 68 15 15 30 76
<ul> <li>kern</li> <li>lengte</li> <li>lichaam, regelend</li> <li>verliesfactor,</li> <li>soortelijke</li> <li>verliezen, specifieke</li> <li>mpedantie</li> <li>-per-frequentie</li> <li>, specifieke</li> <li>, specifieke</li> <li>, specifieke</li> <li>anductie</li> <li>constante</li> <li>verschijnsel</li> <li>wet</li> <li>inschakelen</li> <li>inschakelen</li> </ul>		, 8 49	, 2	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	1 23 59		· 7 4, 6 31, · 63, 47, · 67, · 67, · 28, ·	, 8 , 7 33 72 69 49 51 70 68 71 69 73 54 13 68 15 15 30 76
<ul> <li>kern</li> <li>kern</li> <li>lengte</li> <li>lichaam, regelend</li> <li>verliesfactor,</li> <li>soortelijke</li> <li>verliezen, specifieke</li> <li>impedantie</li> <li>-per-frequentie</li> <li>specifieke</li> <li>specifieke</li> <li>specifieke</li> <li>constante</li> <li>verschijnsel</li> <li>wet</li> <li>wet</li> <li>inschakelen</li> <li>attoomation</li> </ul>		, 8 49	, 2	· · · 0, · · · · · · · · · · · · · · · ·	. 1 23 59		· 7 4, 6 31, · 63, 47, · 67, · 67, · 67, · 28, ·	, 8 , 7 33 72 69 49 51 70 68 71 69 73 54 13 68 15 30 76
<ul> <li>kern</li> <li>lengte</li> <li>lengte</li> <li>lichaam, regelend</li> <li>verliesfactor,</li> <li>soortelijke</li> <li>verliezen, specifieke</li> <li>impedantie</li> <li>-per-frequentie</li> <li>specifieke</li> <li>specifieke</li> <li>specifieke</li> <li>constante</li> <li>constante</li> <li>verschijnsel</li> <li>wet</li> <li>inschakelen</li> <li>stroomstoot</li> <li>toomstoot</li> </ul>		, 8 , 9	, 2	· · · 0, · · · · · · · · · · · · · · · ·	· 1 23 · 59 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· 7 4, 6 31, · 63, 47, · 67, · 67, ·	, 8 , 7 33 72 69 49 51 70 68 71 69 73 54 13 68 15 15 30 76 16

67

## ALFABETISCH REGISTER

integreren15intermitterend bedrijf53ionisatie56isolatiedoorslag57	
Juk	
Karakteristiek 9	
-, stroom-spannings 5, 6, 7, 9	
-, stroom-spannings-, gereduceerde	
6, 8, 10	
-, stroom-spanningskarakteristiek	
voor lucht, gereduceerde	
- : stroomwindingen - windings-	
spanning	
cifieke windingssnanning	
kern 17	
- blik	
— blik, vorm v. h	
— doorsnede	
— volume	
ketting	
—, elektrisch-magnetische 4	
koelende oppervlakte . 47, 51, 56, 59, 64	
koeling	
-, lucht- $$ 16, 55, 64	
—, olie	
koelmiddel	
kortsluiting, kortstondige 53, 54	
- v. d. secundaire wikkeling . 36, 37, 40	
kortsluitstroomnoof 52	
kracht 13	
- magnetische 16	
kromming v. d. karakteristiek	
Lek	
lektransformator 2, 3, 12, 36, 43	
—, regeling v. d	
lineariteit 3	
lucht als magnetisch materiaal 22, 24	
-, specifieke impedantie van 73	
-, specifieke wisselstroomwindingen	
hallotica 56	
- belletjes	
- doorshede, enecueve	
- liin 11 14 23 35	
- spleet 1. 4. 11. 22. 38. 68. 70	
- spleetlengte, effectieve	
— spoel	
— volume	
- weg	
- weg, magnetische weerstand v. d. 73	
— windingsspanning	
Magnetische spanning 39, 40, 45	
magnetische weerstand 39, 41, 45	
—, ijzer	

—, lucht	37
—, luchtweg	73
-, regeling v. d.	
-, soortelijke	46
magnetiserings	10.1 14
<ul> <li>gelijkstroomwindi</li> </ul>	ngen, specifieke 14
- genjkstroomwindi	ngen voor lucht,
specifieke	
- IIJII VOOI IUCIIL .	
- fichting	1 13 16 22 35 58
- suboli	1, 15, 10, 22, 55, 50
- wisselstroomwindi	ingen voor lucht
- wisseistroomwind	
magnetisme	13 15
magnetistile	
soortelijke	20
meetinstrument met g	eliikrichtcel 15
minimum	
Net	
- frequentie	1
- spanningsverander	ring
niet-lineariteit	2, 3, 34
nuldoorgang	66
nullast	40
Omhullende	
omloop	45
open spanning	
openspanningsproef .	52
Parallelgeleiding	68, 69
parallelschakeling	34, 35, 71, 72
periode	66
permeabiliteit	67
prijs	17
D 11 10	(7
Radiaalfrequentie	67
regelgelijkspanning .	
— gelijkstroom	
— stroom	
- transformator	2 22 24
- wikkening	
v d magnetische v	37 42
- v. u. magnetische	weerstand 57, 42
regelingsfactor	25 31
gebied	
rendement 18.	31, 47, 51, 58, 60, 63
— maximaal	61
,	
Schakel	17
-, elektrische	. 4, 16, 25, 44, 63
-, magnetische	4, 5, 11, 22, 44, 63
schakels, stroom- en	spanningsverde-
ling over de	44
serieschakeling	5, 24, 34, 35
— weerstand	68, 69
siliciumijzerplaat	4, 8, 13, 14

sinusfunctie 15	-, homogeen
smoorspoel 1, 3, 22, 36, 38, 43, 60, 68	- in lucht
spanning, magnetische 39, 40, 45	-, wissel 5, 14, 25
—, geïnduceerde 65	—, magnetisch wissel 5
spanningsdriehoek, rechthoekige . 40, 41	— dichtheid
— verhouding	- grootheden VI
— verval 45	— lijnen
spoel 1	- richting
-, verliesvrije	- sterkte 13
spreiding	- sterkte, elektrische 56
spreidingsimpedantie	- verdeling 36 38 39
— zelfinductie 43	- verdeling homogene 45
stapelhoogte 20 31 33 34	venster
stationaire toestand 52 53	- doorsnede 20
straling 53	- ruimte 40
stroom	- stroomdichtheid 16 60 62
dichtheid_venster 16 60 62	stroomwindingen
verandering	vereffeningestroom
verhauding	
	vernes
- vorm	- cijier
stroomwindingen 5, 7, 8, 45	— factor, soortelijke ijzer-
—, gelijk- per ijzerlengte 9	49, 50, 59, 63 69
-, 1jzer	- hoek
$-$ , nullast- $\ldots$ 39	— percentage
—, specifieke	— vermogen 47, 49, 60
—, specifieke gelijk- $\dots$ $\dots$ $\dots$ $\dots$ $\dots$ $\dots$ $\dots$ 10	— vermogen, specifiek 47, 49
—, specifieke wissel	— vrije spoel
-, specifieke wissel- voor lucht 11, 12, 14	— warmte 47
—, venster	verliezen
stroom-spannings-	—, ohmse
— diagram	-, geleider 47, 62, 63, 70
— karakteristiek	-, ijzer 47, 49, 62, 70
— produkt	—, specifieke geleider
— verdeling over de schakels 44	—, specifieke ijzer
- verhouding	-, transformator-,
	— weerstands- 62
Tegenspanning 45	vermogen
temperatuur	— per kernvolume
- grens- 57 58 59	— blind 2 3 22
— coëfficient 48	elektrisch 3
- sprong 55 56	_ gelijk_ 26
- stilging 51 52 54 59 76	- magnetisch 3
vereffening	- per frequentie specifiek schiinbaar 12
verboging 47	reactief 2
- verschilt	-, schijhodar
- verval	-, specifiek ijzerwissel
tesia(1)	-, specifiek schijnbaar 8, 11, 31
toerental	$-$ , wissel- $\ldots$ $4$
topwaarde 65	vertakking 45
transductor 2, 3, 9, 23, 24, 43	vervorming
transformator 1, 3, 19, 22, 36, 43, 60	verwarming
—, ideale 43	— v. d. wikkeling
—, regel	verzadiging
— blik 8	voltampère 2
toroïde 11	volt-per-winding 5
	realter and a long 65
var 2	vonseconde/m <sup>2</sup>
	volume
vectoriële som	volume
vectoriële som	volume

## ALFABETISCH REGISTER

voormagnetiseren 2	—, gereduceerde
voormagnetisering, gelijkstroom-	werkpunt
4, 9, 10, 24, 43	werkvlak
vulfactor 47. 48, 51, 54, 59, 63	—, gereduceerd
	winding
Warmte	windingslengte
-, soortelijke	windingsspanning 5, 6, 7, 8, 45
- afgifte aan lucht	—, lucht
- capaciteit	- per frequentie, specifieke 9, 12
— geleiding	— specifieke
- geleiding van lucht	windingstal 4, 5, 23, 31, 33, 34, 48, 71, 72
- geleiding soorteliike 53 55 57	windingswisselspanning specifieke 14
- golf 52 53 55	wikkeling 1
impuls 54	- secundaire 12
- ontwikkeling 47	- aluminium-
- Olitwikkeling	-, aluminium
— Opwerkning	-, Koper
- overgangscoefficient	wikkelingskoker, vorm v. d 21, 34
- stroom	— lengte
weerstand 6, 16, 18, 34, 47, 71	wisselspanning
- v. d. primaire wikkeling	-, geinduceerde
-, soortelijke	— per frequentie
$-$ , wikkelings- $\ldots$ $\ldots$ $48$	wisselstroom
weerstandsverhoging door	
temperatuurstijging 62	Zelfinductie
werkgebied	—, spreidings 43
werklijn	$\pi$

80