Publikacja ze zbiorów Biblioteki Głównej AGH w Krakowie

Digitalizacja dorobku naukowo-badawczego Profesorów AG w Krakowie w l. 1919-1945
projekt dofinansowany w ramach programu Ministra Edukacji i Nauki „Społeczna Odpowiedzialność Nauki"
moduł: Wsparcie dla bibliotek naukowych

Biblioteka Główna AGH w Krakowie

01.11.2022 - 31.07.2024
SONB/SP/548765/2022

Ministerstwo Edukacji i Nauki

TERMIN ZWROTU
30Listop 1961
Styczeń 1962
13 GRU 1975

WYDAWNICTWA NAUKOWEGO KOŁA GÓRNIKÓW STUDENTÓW AKADEMII GÓRNICZEJ
Nr. 1 W KRAKOWIE Nr. 1

Zakład Elektrotechniki
Akademii Górniczej
w Krakowie

Objaśnienia do ćwiczeń

w Laboratorium
Zakładu Elektrotechniki Akademii Górniczej
w Krakowie

Wydanie II

Nakładem Sekcji Wydawniczej
Stowarzyszenia Studentów Akademii Górniczej w Krakowie
1938

WYDAWNICTWA NAUKOWEGO KOŁA GÓRNIKÓW STUDENTÓW AKADEMII GÓRNICZEJ
Nr.1. w Krakowie Nr.1

Zakład Elektrotechniki
Akademii Górniczej
w Krakowie

OBJAŚNIENIA DO ĆWICZEŃ

w Laboratorium

Zakładu Elektrotechniki
Akademii Górniczej
w Krakowie

Wydanie II

Nakładem
Sekcji Wydawniczej Stowarzyszenia Studentów Akademii Górniczej
w Krakowie
1938



~~3726~~

~~III. 15 877.~~

III 42085



N2B 12990

Odbito w Zakładzie Litograficznym Stowarzyszenia Studentów Akademii Górniczej
w Krakowie - Aleja Mickiewicza 30.

Spis rzeczy

Spis ćwiczeń obowiązujących w Laboratorium Zakładu Elektrotechniki str.IV.

Ważniejsze omyłki . . . . . " VII.

Znakownictwo elektrotechniczne . . . . . " IX.

Symbole graficzne urządzeń elektrycznych prądu silnego . . . . . " XII.

Ćwiczenia serii pierwszej

Ćwiczenie 1 i 3 . . . . . " 3.
" 2 . . . . . " 8.
" 7 . . . . . " 11.
" 32 . . . . . " 14.
" 37 . . . . . " 16.
" 52 . . . . . " 19.

Ćwiczenia serii drugiej

Ćwiczenie 4 i 12 . . . . . " 22.
" 6 . . . . . " 29.
" 13 . . . . . " 30.
" 15 i 17 . . . . . " 32.
" 20 i 21 . . . . . " 36.
" 22 . . . . . " 38.
" 23 i 24 . . . . . " 41.
" 26 . . . . . " 45.

Ćwiczenia serii trzeciej

Ćwiczenie 27a . . . . . " 49.
" 29 i 30 . . . . . " 52.
" 57 . . . . . " 53.
" 60 . . . . . " 58.
" 54 . . . . . " 61.
" 59 . . . . . " 64.
" 71 . . . . . " 69.
" 74 . . . . . " 73.

Ćwiczenia serii czwartej

Ćwiczenie 27 . . . . . " 74.
" 66 . . . . . " 76.
" 69 . . . . . " 85.
" 31 . . . . . " 93.
" 82 . . . . . " 100.
" 95 . . . . . " 107.

Dodatek

Pomiar mocy prądu trójfazowego metodą dwóch watomierzy . . . . . " 121.
Indukcyjny regulator trójfazowy . . . . . " 126.

Spis ćwiczeń obowiązujących w Laboratorium Zakładu Elektrotechniki Akademii Górniczej

Nr.	Tytuł	str.
1.	Pomiar napięcia technicznymi instrumentami różnego systemu i cechowanie tychże.	3.
2.	Pomiar siły elektromotorycznej /SEM/ metodą Poggendorffa i Boschy	8.
3.	Pomiar natężenia technicznymi instrumentami różnego systemu i cechowanie tychże.	3.
4.	Pomiar ilości elektryczności amperogodzinomierzem i cechowanie tegoż	22.
6.	Pomiar oporności z pomiarów natężenia i napięcia prądu.	29.
7.	Pomiar oporności metodą mostu Wheatstone'a	11.
12.	Pomiar pracy elektrycznej watogodzinomierzem i cechowanie tegoż	22.
13.	Wyznaczenie sprawności grzejnika elektrycznego.	30.
15.	Pomiar średniego natężenia światła /w poziomie/ żarówek metalowych i węglowych przy nominalnym napięciu.	32.
17.	Badanie natężenia światła żarówek metalowych i węglowych przy zmiennym napięciu.	32.
20.	Zdjęcie charakterystyki magnetycznej generatora /biegu luzem/.	36.
21.	Generator z obcym wzbudzeniem: zdjęcie charakterystyki napięciowej /zewnętrznej/ i krzywej regulacji.	36
22.	Generator z obcym wzbudzeniem: zdjęcie charakterystyki napięciowej /zewnętrznej/ i wypośrodkowanie wpływu spadku napięcia w oporach wewnętrznych oraz reakcji twornika	38.
23.	Generator upustowy /bocznikowy/: zdjęcie charakterystyki napięciowej /zewnętrznej/ i krzywej regulacji.	41.
24.	Generator ze wzbudzeniem compound: zdjęcie charakterystyki napięciowej /zewnętrznej/.	41.
26.	Hamowanie mechaniczne motoru upustowego. Hamowanie elektryczne. Zmiana kierunku obrotów.	45.
27.	Hamowanie mechaniczne motoru szeregowego.	74.
27a.	Wyznaczenie sprawności motoru compound metodą bezpośrednią /w zakresie ćwiczenia 26/.	49.
29.	Zdjęcie charakterystyki magnetycznej /biegu luzem/ generatora jednofazowego.	52.
30.	Zdjęcie charakterystyki napięciowej /zewnętrznej/ i krzywej regulacji generatora jednofazowego przy obciążeniu bezindukcyjnym.	52.
31.	Badanie transformatora jednofazowego przy obciążeniu bezindukcyjnym.	93.
32.	Pomiar małych oporności metodą mostku Thomsona oraz pomiary oporności właściwych różnych metali.	14.
37.	Pomiar izolacji przewodów i wyznaczenie miejsca błędu.	16.
52.	Pomiar indukcyjności wzajemnej metodą porównawczą.	19.
54.	Pomiar mocy elektrycznej watomierzem i cechowanie tegoż.	61
57.	Badanie obwodu prądu zmiennego z samoindukcją bez żelaza oraz obwodu zawierającego dwie impedancje w łączeniu szeregowym lub równoległym	53.
59.	Badanie obwodu zawierającego impedancję i pojemność w łączeniu szeregowym; wyrównanie przesunięcia fazy pojemnością.	64.
60.	Zdjęcie statycznej /biegu luzem/ i dynamicznej /obciążenia/ charakterystyki magnetycznej generatora oraz konstrukcja charakterystyki napięciowej /zewnętrznej/ i krzywej regulacji.	58.

Nr. T y t u ł str.

66. Wyznaczenie sprawności dynamomaszyny metodą pomiaru poszczególnych strat. . . . . 76.
69. Badanie nagrzania dynamomaszyny. . . . . 85.
71. Badanie motoru w łączni Leonarda. . . . . .69.
74. Badanie motorgeneratora. . . . . 73.
82. Zdjęcie charakterystyki napięciowej i krzywej regulacji generatora trójfazowego, łączonego gwiazdę i trójkąt przy obciążeniu bezindukcyjnym. . . . . 100.
95. Badanie motoru asynchronicznego. . . . . .107.

---oooOooo---

D o s t r z e ż o n e o m y ł k i

str.	wiersz od:	z a m i a s t:	m a b y ć:
6	7 od dołu	byłony	byłoby
17	1 od góry	$R_x = R_v \cdot / \frac{1}{2} - 1/$	$R_x = R_v \cdot / \frac{\alpha_1}{\alpha_2} - 1/$
18	rys od dołu	linia wymiarowa l_4 wychodzi z punktu, który należy oznaczyć lx, a kończy się w punkcie uziemienia.	
19	20 od góry	zatym: $\frac{dO}{dI_1} = \ldots$	zatym: $\frac{d\bar{\Phi}}{dI_1} = \ldots$
20	rysunek	na rysunku należy wszystkie linie str. magn.opatrzyć strzałkami od prawej ku lewej, a pola zwojów zakreskować.	
24	17 od góry	O_{tw} ciek magnetyczny	$\bar{\Phi}_{tw}$ ciek magnetyczny
24	22 " "	zaś O_{tw}	zaś $\bar{\Phi}_{tw}$
25	11 " dołu	n = c_3.U.....2/	n = $\sim c_3$.U.....2/
26	16 od dołu	jestto	jest to /wszędzie poprawić/
27	19 " góry	d/ W czysie	d/ W czasie
29	19 " dołu	gdy i_w I,	gdy $i_w \leq$ I,
33	25 " góry	kąt bryłowy $_1$	kąt bryłowy ω_1
46	9 " "	$P_{odd} = M_d$. kgm/sek	$P_{odd} = M_d.\omega$ kgm/sek
46	8 " dołu	ma być: U.I = {E + I_{tw}/R_{tw} + R_{bp}/ + U_{szcz}}.I_{tw} + U.i_m =	
46	6 " "	we wzór na $_{el}$	we wzór na η_{el}
50	3 " "	gdzie O_{tw} = const	gdzie $O_{tw} = \sim$ const.
61	14 " góry	obciążenie bezindukcyjne	obciążenie indukcyjne
61	17 " dołu	wzór: $\frac{U_{max} \cdot I_{max}}{T.} \frac{.T}{2} \cos\varphi$	$\frac{U_{max} \cdot I_{max}}{T.} \frac{\omega . T}{2} \cos\varphi$
64	13 " dołu	wówczas P = U.I	wówczas P ≠ U.I
65	10 " góry	i cos =	i $\cos\varphi$ =
65	10 " dołu	$= \frac{U^2.R}{\sqrt{R^2 + /L.\omega/^2}}$	$= \frac{U^2.R}{R^2 + /L.\omega/^2}$
66	18 " góry	$I = \frac{U}{R^2 + /L.\omega/^2}$	$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + /L.\omega/^2}}$
66	20 " "	$\cos\varphi = \frac{R}{R^2 + /L.\omega/^2}$	$\cos\varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + /L.\omega/^2}}$
66	11 " dołu	wzór: w mianowniku ma być:	/L.ω - ..../² /wpisać
66	2 " dołu	w nawiasie wpisać ; ma być	/L.ω - ...
67	10 " "	kąta przy	kąta φ przy
69	11 " "	wżywu	wpływu
70	28 " "	Prze	Przez
72	23 " góry	M. .9,81 = P w watach	M.ω.9,81 = P w watach
72	9 " dołu	wstawić kreskę ułamkową po stronie prawej	
75	14 od góry	P_{odd} = M. . kgm/sek	P_{odd} = M.ω kgm/sek
80	18 " "	ma być: pj = I_{otw}.{U - I_{otw}./R_{tw} + R_{bp}/ - uszcz}	
81	9 " "	msleć	maleć

str.	wiersz od	z a m i a s t	m a b y ć
82	rysunek	Z punktu A i B należy poprowadzić do koła M grube linie.	
85	" prawy	Linię między amperomierzem a wyłącznikiem skreślić.	
86	wzór	$t =$	$\Delta t =$
87	"	$t =$	$\Delta t =$
89	13 od góry	wzór: $t = ...$	$\Delta t = ...$
89	15 " "	" $t = ...$	$\Delta t = ...$
95	20 od góry	$\cos \varphi_1 = \cos \varphi_2$	$\cos \varphi_1 \approx \cos \varphi_2$
109	1 od góry	$P = M. .9,81$	$P = M.\omega.9,81$
109	3 " "	$= M \frac{.n_d}{30} =$	$= M \frac{\pi . n_d}{30} =$
113	18 " "	w mianowniku ma być	$\sqrt{R_2^2 + /S.\omega_{26}/^2}$
121	rys. prawy:	dolny watomierz ma być połączony tak, jak dolny na rysunku lewym.	

ZNAKOWNICTWO ELEKTROTECHNICZNE

I. Wielkości i jednostki

Wielkość	Znak wielkości	Jednostka praktyczna	Znak
Długość	l /L/	centymetr	cm
Masa	m /M/	gram	g
Czas	t /T/	sekunda minuta godzina	sek min h
Wielkości geometryczne mechaniczne i cieplne			
Kąt Kąt przesunięcia faz	α, β, γ φ		
Promień Średnica	r d		
Powierzchnia Pole Przekrój	s s s, q	metr kwadratowy	m^2
Objętość	V	metr sześcienny	m^3
Prędkość Prędkość kątowa Przyspieszenie Przyspieszenie ziemskie	v ω a g		
Liczba obrotów na jednostkę czasu Okres Częstotliwość	n T f /ν/		
Siła Moment siły	F M	kilogram siły	kg
Praca Energia	A W	kilogramometr	kgm
Moc	P	kilowat Koń mechaniczny	kW kM
Sprawność	η		

W i e l k o ś ć	Znak wielkości	Jednostka praktyczna	Znak
Temperatura /w/g skali Celsiusza/	t /ϑ/	stopień	o
Temperatura bezwzględna	T /Θ/		
Ilość ciepła	Q	kaloria kilogramowa	kcal
		kaloria gramowa	cal
Strumień świetlny	F^o	lumen	lum.
Swiatłość	I^o	świeca międzynarodowa	św.
Jasność	E^o	luks	luks
Jaskrawość	B^o		św/cm^2
Ładunek elektryczny masa elektryczna ilość elektryczności	Q	kulomb	C
		amperogodzina	Ah
Natężenie pola elektr.	F		
Indukcja elektryczna	D		
Przesunięcie elektryczne	D		
Strumień indukcji elektr.	Ψ		
Stała dielektryczna	ε		
Natężenie pola magnetyczn.	H		
Indukcja pola magnetyczn.	B		
Strumień indukcji magn.	Φ		
Przemikliwość magnetyczna	μ		
Natężenie prądu	I	amper	A
Potencjał względem ziemi	V	wolt	V
Różnica potencjałów /napięcie/	V /U/	kilowolt	kV
Siła elektromotoryczna	E		
Praca elektryczna	A	dżaul, żul	J
		watogodzina	Wh
		kilowatogodzina	kWh
Moc elektryczna	P	wat	W
		kilowat	kW
		woltamper	VA
Oporność	R	om	Ω
Oporność właściwa	ρ	megom	MΩ
Spółczynnik cieplny oporności	α		
Przewodność	G		
Przewodność właściwa	γ, k		
Pojemność	C	farad	F
		mikrofarad	μF
Indukcyjność własna	L	henr	H
Indukcyjność wzajemna	M	milihenr	mH

W i e l k o ś ć	Znak wielkości	Jednostka praktyczna	Znak
Siła magnetomotoryczna	/E/, /N/		
Oporność magnetyczna	S /R/		
Spółczynnik rozproszenia	σ		
Przekładnia transformatora	ϑ		
Liczba zwojów	z		
Liczba par biegunów	p		
Spółczynnik mocy			
Prąd mocny			
Prąd bezmocny			
Napięcie mocne			
Napięcie bezmocne			
Moc pozorna			
Moc rzeczywista			
Moc urojona			
Oporność rzeczywista	R		
Oporność urojona	X		
Oporność pozorna	Z		
Oporność indukcyjna	X_L		
Oporność pojemnościowa	X_C		
Przewodność rzeczywista	G		

---oooOooo---

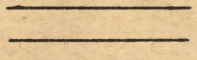
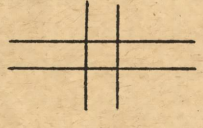
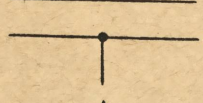
II. Symbole graficzne urządzeń elektrycznych prądu silnego

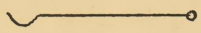
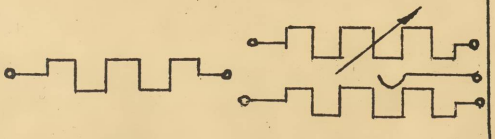
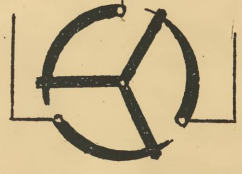
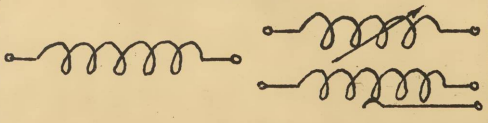
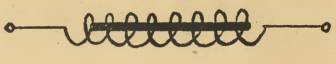
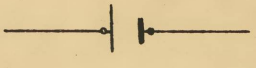
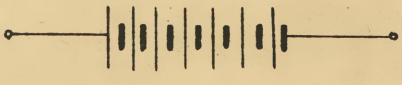
1. Symbole ogólne rodzajów prądu i sposobów połączeń.

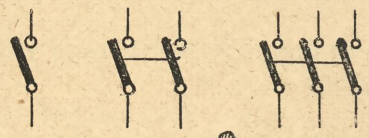
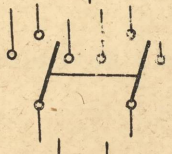
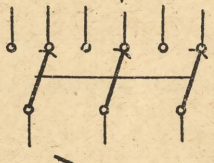
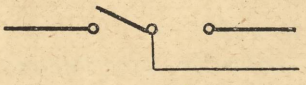
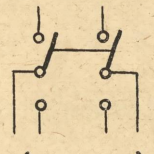
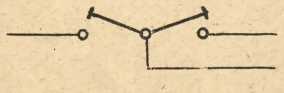
L.p.	Symbol	Nazwa
1		Prąd stały
2		Prąd zmienny w ogóle
3		Prąd zmienny jednofazowy
4		Prąd zmienny trójfazowy
5		Połączenie trójfazowe w trójkąt
6		Połączenie trójfazowe w gwiazdę
7		Połączenie trójfazowe w gwiazdę z przewodem zerowym

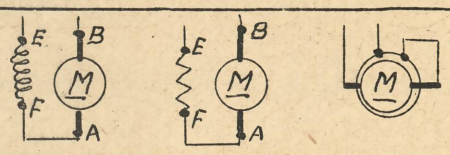
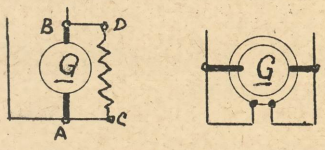
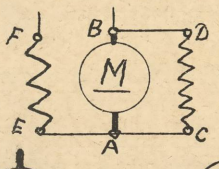
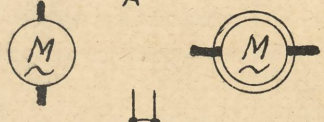
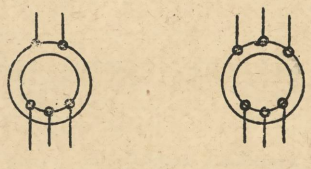
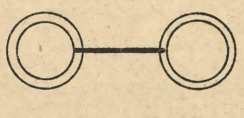
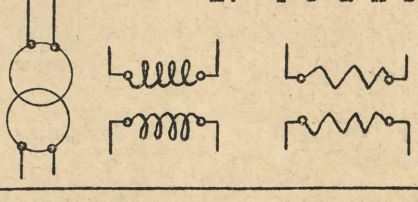
2. Symbole schematów urządzeń elektrycznych.

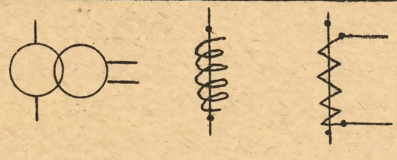
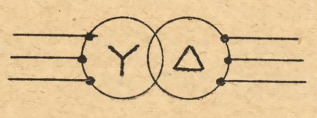
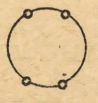
A. Części obwodu.

8		Tor dwuprzewodowy /grubość linij może być różna, zależnie od ważności toru/
9		Tory krzyżujące się, nie połączone elektrycznie /przykład: dwa krzyżujące się tory dwuprzewodowe/
10		Tory krzyżujące się, połączone elektrycznie /przykład: dwa krzyżujące się tory jednoprzewodowe/
11		Odgałęzienie /przykład: tor jednoprzewodowy, odgałęziony od toru dwuprzewodowego/.
12		Uziemienie, symbol ogólny.
13		Zacisk, styk rozłączny
14		Zacisk, styk stały
15		Zmienność /sposób regulacji dowolny/, symbol ogólny

L.p.	Symbol	Nazwa
16		Styk ruchomy
17		Opornik indukcyjny, albo bezindukcyjny, symbol ogólny.
18		Opornik o zmiennej oporności /regulowany w dowolny sposób/.
19		Opornik regulowany przy pomocy styku ruchomego
20		Opornik praktycznie bezindukcyjny
21		Opornik korbowy a/ przerwowy b/ bezprzerwowy.
22		Opornik korbowy z zaciskiem zwierającym
23		Rozrusznik dla motorów trójfazowych
24		Cewka bez żelaza /indukcyjność/
25		Cewka z żelazem
26		Kondenzator /pojemność/
27		Lampa dowolnego rodzaju
	B. Ogniwa, akumulatory	
28		Ogniwo galwaniczne, lub akumulator.
29		Bateria ogniw galwanicznych, lub akumulatorów.

L.p.	Symbol	Nazwa
	C. Łączniki, bezpieczniki	
30		Wyłączniki ręczne, jedno-, dwu- i trójbiegunowe.
31		Łącznik jednobiegunowy przyciskowy.
32		Przełącznik ręczny pokrętny, przerwowy, dwuobwodowy, symbol ogólny.
33		Przełącznik ręczny pokętny, przerwowy; /przykład: dwubiegunowy, trójobwodowy/.
34		Przełącznik ręczny pokrętny, bezprzerwowy, dwuobwodowy, symbol ogólny.
35		Przełącznik ręczny pokrętny bezprzerwowy /przykład: trójbiegunowy, dwuobwodowy/.
36		Przełącznik ręczny przęrzutowy, przerwowy, symbol ogólny.
37		Przełącznik ręczny przerzutowy, przerwowy /przykład: dwubiegunowy/.
38		Przełącznik ręczny przerzutowy, bezprzerwowy, symbol ogólny.
39		Przełącznik dwubiegunowy, czteroobwodowy /do woltomierzy/.
40		Bezpiecznik topikowy, symbol ogólny.
	D. Maszyny wirujące.	
41		Maszyna wirująca, symbol ogólny maszyn pracujących jako prądnice.
42		Maszyna wirująca, symbol ogólny maszyn, pracujących jako silniki
43		Silnik /M/ prądu stałego, symbol ogólny.

L.p.	S y m b o l	N a z w a
44		Silnik prądu stałego ze wzbudzeniem głównikowym /szeregowym/.
45		Prądnica prądu stałego, ze wzbudzeniem bocznikowym /upustowym/
46		Silnik /M/ prądu stałego, ze wzbudzeniem bocznikowym głównikowym /compound/
47		Silnik prądu zmiennego komutatorowy.
48		Silnik /M/ prądu zmiennego, synchroniczny, jednofazowy.
49		Prądnica /G/ prądu zmiennego, synchroniczna, trójfazowa.
50		Silnik /M/ prądu zmiennego synchroniczny, trójfazowy, połączony w gwiazdę z przewodem zerowym.
51		Silnik asynchroniczny, jednofazowy, względnie trójfazowy, z wirnikiem zwartym.
52		Silnik asynchroniczny jednofazowy, względnie trójfazowy z pierścieniami.
53.		Zespół maszynowy, symbol ogólny /silnik - prądnica i t.p./.
	E. T r a n s f o r m a t o r y	
54		Transformator jednofazowy.

L.p.	S y m b o l	N a z w a
55		Transformatorek miernikowy prądowy.
56		Transformator trójfazowy, połączenie gwiazda - trójkąt.
	F. P r z y r z ą d y p o m i a r o w e.	
57		Wskaźnik lub miernik, symbol ogólny.
58		Woltomierz.
59		Amperomierz.
60		Watomierz.
61		Fazomierz.
62		Częstościomierz.
63		Omomierz.
64.		Wskaźnik synchronizmu.
65		Przyrząd piszący, symbol ogólny.
66		Licznik, symbol ogólny.
67		Licznik amperogodzin, symbol ogólny.
68		Licznik watogodzin, symbol ogólny.
69		Licznik watogodzin, przykład: trójfazowy, dwuprzewodowy.

O B J A Ś N I E N I A D O Ć W I C Z E Ń

w L a b o r a t o r i u m

Z a k ł a d u E l e k t r o t e c h n i k i

Akademii Górniczej w Krakowie

Ćwiczenie 1 i 3[x]/

Pomiar napięcia /natężenia/ technicznymi instrumentami różnego systemu i cechowanie tyczę

INSTRUMENTY POMIAROWE. Do pomiaru wielkości elektrycznych /ampery, wolty, waty, cosφ i.t.d./ wykorzystano głównie własności prądu, a w pewnych wypadkach także własności elektryczności statycznej. Rozróżniamy następujące zasadnicze typy instrumentów:

1/ Instrumenty systemu Deprez d'Arsonwal'a /Drehspulinstrumente/. W tym instrumencie mamy cewkę umieszczoną w polu silnego magnesu trwałego; gdy prąd przepływa przez cewkę, następuje wychylenie, proporcjonalne do wielkości przepływającego prądu. Jest ono proporcjonalne z tego powodu, że wychylenie zależy od działających na siebie pól magnetycznych, a pole magnesu jest wedle założenia stałe. Ponieważ pole magnesu ma stały kierunek, dlatego instrument taki nadaje się tylko do prądu stałego, gdyż przy prądzie zmiennym otrzymalibyśmy tylko drganie wskazówki, bo otrzymywałaby ona impulsy w przeciwnych kierunkach co 1/100 sekundy /gdy $\nu = 50$/. Po wbudowaniu odpowiednich prostowników używa się ich także do prądu zmiennego. Według tego systemu budowane są amperomierze i woltomierze.

2/ Instrumenty elektromagnetyczne. Tutaj prąd przepływający przez cewkę powoduje wciąganie ruchomego wałka /blaszki/ żelaznego, względnie odpychanie stałego i ruchomego kawałka żelaza. Tu wychylenia nie są proporcjonalne do przepływającego prądu, bo zwiększenie prądu powoduje z jednej strony wzrost pola, a z drugiej strony wzrost namagnesowania żelaza, więc siła wciągania rośnie z kwadratem prądu /dtto przy odpychaniu/, dlatego podziałka jest nierównomierna, podczas gdy u poprzednich była równomierna. Instrumenty elektromagnetyczne nadają się tak na prąd stały jak i zmienny, bo przy zmiennym prądzie następuje równoczesna zmiana biegunowości, czyli kierunek działania nie ulega zmianie. Także według tego systemu buduje się amperomierze i woltomierze.

3/ Instrumenty elektrodynamiczne. Prąd przepływa tutaj przez dwie cewki, z których jedna jest stała, a druga ruchoma; prądy przepływające przez te cewki wytwarzają pola, które działając na

---

x/. Numeracja ćwiczeń według "Program ćwiczeń laboratoryjnych w Zakładzie Elektrotechniki Akademii Górniczej w Krakowie".

siebie, powodują wychylenie cewki ruchomej. Gdy mamy tego typu woltomierz, lub amperomierz, to wychylenia są proporcjonalne do kwadratu prądu /więc podziałka nierównomierna/, bo przez obie cewki przepływa ten sam prąd. Inaczej jest przy watomierzu i fazomierzu, gdyż inny prąd płynie przez jedną cewkę, a inny przez drugą. Przy watomierzu np. przez cewkę stałą płynie prąd o danym natężeniu, a przez ruchomą prąd uwarunkowany danym napięciem. Ponieważ moc jest proporcjonalna do iloczynu: U.I /przy prądzie stały wprost równa się: U.I/, a widzimy, że prądy, a więc i pola tymi prądami wytworzone są właśnie zależne od danego napięcia i natężenia, więc wychylenia są wprost proporcjonalne do mocy, t.j. podziałka jest równomierna. Nadają się te instrumenty tak do prądu stałego, jak i zmiennego.

4/ I n s t r u m e n t y c i e p l n e. Prąd przepływający przez drut rozgrzewa go, a rozgrzanie powoduje jego wydłużenie; wielkość tego wydłużenia podaje nam wychylenie wskazówki. To wychylenie nie jest proporcjonalne do prądu /więc podziałka nierównomierna/, bo ilość ciepła wytwarzanego w tych warunkach jest proporcjonalna do kwadratu prądu. Buduje się na tej zasadzie amperomierze i woltomierze, które nadają się tak na prąd stały jak i zmienny.

5/ a/. I n s t r u m e n t y F e r r a r i s'a. W instrumentach tych wykorzystano tę okoliczność, że w tarczy lub bębnie z miedzi, lub aluminium, znajdujących się w polu wirującym /Drehfeld/ powstają prądy wirowe, a w konsekwencji mamy wychylenie tej tarczy, czy bębna.

b/. I n s t r u m e n t y i n d u k c y j n e. Tu mamy wychylenie ruchomej cewki, znajdującej się w polu cewki stałej przez którą przepływa prąd.

Oba te typy instrumentów nadają się tylko do prądu zmiennego. Woltomierze i amperomierze mają podziałkę nierównomierną, a watomierze równomierną /podobnie jak u elektrodynamicznych/.

6/ I n s t r u m e n t y e l e k t r o s t a t y c z n e. Przy budowie tego typu instrumentów wykorzystano działanie na siebie ciał naładowanych elektrycznością. Buduje się na tej zasadzie woltomierze, a przy wysokich napięciach także watomierze /do małych mocy/. Przy woltomierzach podziałka nierównomierna; nadaje się on na prąd stały i zmienny.

NIEKTÓRE CZYNNIKI, POWODUJĄCE FAŁSZYWE WSKAZANIA INSTRUMENTÓW. Przy przeprowadzaniu pomiarów należy bacznie uważać na to, by obce czynniki nie spowodowały fałszowania wyników. Te obce czynniki mogą być rozmaite i różnie wpływać na poszczególne typy instrumentów. Np. zmiana temperatury otoczenia daje się szczególnie odczuć instrumentom cieplnym, obce pola magnetyczne,np. w przewodach przeprowadzonych, zwłaszcza gdy ten prąd jest większy, instrumentom systemu Deprez d'Arsonwal, przy prądzie zmiennym nie bez znaczenia jest zmiana ilości okresów; także naboje elektrostatyczne mogą pofałszować pomiar. Całkiem błędne możemy uzyskać wyniki np. wówczas, gdy instrument nie jest ustawiony ściśle poziomo, lub pionowo, gdy jest podane, że ma mieć właśnie takie położenie w czasie pomiaru.

Z e s t a w i e n i e

Rodzaj instrumentu	buduje się	Rozszerzenie skali jest możliwe przez stosowanie u: amperomierzy	woltomierzy
Deprez d'Arsonwal'a	Amperomierze woltomierze	boczniki /upusty/	opory dodatkowe
Elektromagnetyczne	amperomierze woltomierze	prąd stały prąd zmienny transform.miern.	opory dodatk. trans.miernicz
Elektrodymaniczne	amperomierze woltomierze watomierze fazomierze	prąd st.boczniki prąd zmienny transformatorki miernicze	opory dodatkowe i transformatorki miernicze.
Cieplne	amperomierze woltomierze	dtto	dtto
Ferraris'a i indukcyjne	amperomierze woltomierze watomierze	transformatorki miernicze	transformatorki miernicze
Elektrostatyczne	woltomierze watomierze	- - - - - - - -	kondenzatory

OPIS POMIARU. Cechowanie woltomierzy /amperomierzy/ przeprowadzamy w ten sposób, że wskazania badanego instrumentu porównujemy ze wskazaniami instrumentu, przyjętego za normalny. W tym celu robimy układ połączeń, podany niżej. Kontrolujemy punkt zerowy /jeszcze przed załączeniem prądu/ i jeżeli zachodzi tego potrzeba, a jest odpowiednie urządzenie, to nastawiamy go dokładnie. Tak otrzymujemy pierwszy punkt. Teraz zamykamy obwód i zwiększamy napięcie /natężenie/ robiąc odczyty co $\frac{1}{2}$ wolta /$\frac{1}{2}$ ampera/, nastawiając na okrągłe wartości na instrumencie badanym. Odczyty na instrumencie badanym i tym, który przyjęto za normalny musi się robić równocześnie. Zwiększając napięcie /natężenie/, musimy je stale, t.j. bez wahań powiększać. Gdy dojdziemy do maksimum, zaczynamy napięcie /natężenie/ zmniejszać, robiąc także odczyty co $\frac{1}{2}$ wolta /$\frac{1}{2}$ ampera/, teraz stale zmniejszając. Mając wyniki pomiarów, możemy wyliczyć błędy i poprawki. Błędem nazywamy tutaj różnicę wskazań instrumentu badanego i instrumentu, przyjętego za normalny:

$$E_b - E_n \text{ względnie } I_b - I_n;$$

poprawką zaś różnicę:

$$E_n - E_b \text{ względnie } I_n - I_b.$$

Dla każdego wskazania otrzymujemy dwie poprawki, jedną, gdy zwiększamy napięcie /natężenie/, drugą przy zmniejszaniu; z tych dwu poprawek bierzemy średnią, tworząc średnią arytmetyczną. Wyniki cechowania można ująć albo w tabelę, gdzie α podaje wartość, na którą nastawiono wskazówkę instrumentu badanego, a "poprawki", to wartości średnie z poprawek, uzyskanych przy odczycie w górę i w dół, albo - wykresem, gdzie na osi odciętych są odcinane

Zakład Elektrotechniki
Akad.Górn.w Krakowie.
W o l t o m i e r z Nr....
R_{20^o} =.....

α	P o p r a w k i	
	pr. =	pr.
0.0		
0.5		
1.0		
1.5		
2.0		
2.5		
.....		
.....		

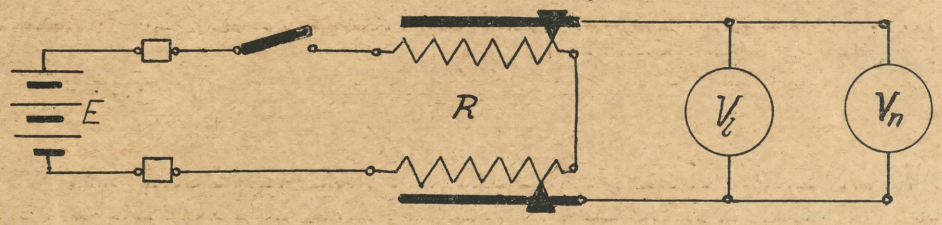
Sprawdzał: N.N.
Kraków, dnia...../.....193. r.

wartości wskazań instrumentu badanego, a na osi rzędnych instrumentu normalnego.

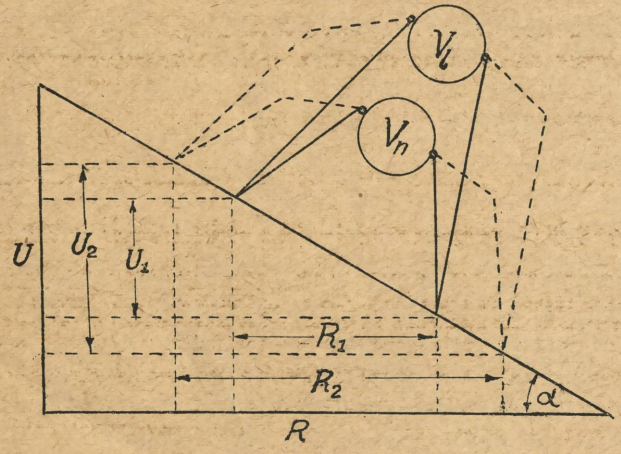
U w a g a: Gdy chcemy mieć wyniki cechowania tylko w formie wykresu, to zbędnym jest staranie się o dokładne nastawienie na wartości okrągłe na instrumencie badanym.

Przeprowadzony powyżej sposób cechowania woltomierzy /amperomierzy/ nie jest jedynym. Możemy cechować instrumenty np. przy pomocy kompenzatora, amperomierze przy pomocy woltametrów i t.p.

U k ł a d p o ł ą c z e ń d o c e c h o w a n i a w o l t o m i e r z y. Mamy tu dwie opornice połączone w ten sposób, że możemy z nich zbierać napięcie od zera /praktycznie/ do napięcia,jakie posiada źródło prądu; takie urządzenie nazywamy dzielnikiem

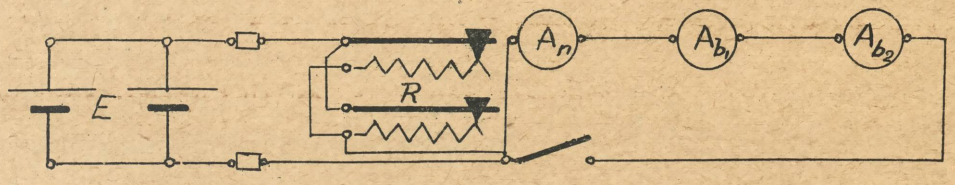


napięcia. Należy tu sobie zdawać sprawę z tego, że przesuwanie styku opornic nie powoduje zmiany oporności oporu włączonego w obwód źródła prądu, bo ten opór jest na stałe włączony, więc i prąd pobierany i płynący przez ten opór nie ulega poważniejszej zmianie /napięcie źródła jest wedle przyjęcia stałe/. Przez przesuwanie styków opornic zmieniamy jednak oporność w obwodzie woltomierzy, a ponieważ "I" mało się zmienia, to wskazania woltomierzy właśnie tylko od oporności w ich obwodzie będą zależne, bo U = I.R. Wykreślnie da się to przedstawić w ten sposób: Odcinki pionowe są proporcjonalne do napięcia, poziome do oporności, a nachylenie przeciwprostokątni zależy od natężenia prądu: im większy jest prąd, tym α jest większe. Gdyby "I" było ściśle const., to nachylenie byłony stałe /tak, jak jest narysowane/, a wskazanie woltomierzy zależałoby tylko od tego, na jakiej oporności byłby mierzony spadek napięcia. To "I" dlatego nie jest ściśle w całej opornicy jednakowe, bo w pewnej części płynie prąd większy, niż



w drugiej, a to większy o prąd płynący do woltomierzy /vide układ połączeń/; ponieważ jednak oporność dobrych woltomierzy powinna być stosunkowo bardzo duża, więc można przyjąć, że prąd prawie nie ulega poważniejszym zmianom.

U k ł a d p o ł ą c z e ń d o c e c h o w a n i ą a m p e r o m i e r z y. W tym układzie połączeń należy zwrócić uwagę na sposób łączenia opornic, a mianowicie łączymy je równolegle. Czynimy to w tym celu,



aby uzyskać możność dokładniejszego nastawiania natężenia prądu. Przez połączenie bowiem równoległe otrzymujemy wypadkową oporność równą połowie oporności jednej opornicy /gdy opornice mają równe oporności, jak to jest tutaj/ czyli $\frac{1}{4}$ oporności połączenia szeregowego. Jasnym jest więc teraz, że przy połączeniu równoległym to samo przesunięcie styku opornicy zmienia oporność tylko o około $\frac{1}{4}$ tej wielkości, o jaką byłaby zmieniona, gdyby opornice były w połączeniu szeregowym, czyli uzyskujemy w ten sposób regulację precyzyjniejszą.

Akumulatory łączymy równolegle, bo napięcie 2 wolty jest tu już wystarczające, a w ten sposób wolniej się wyczerpują /jeden akumulator dostarcza tylko połowę potrzebnego prądu/ Przy cechowaniu woltomierzy łączyliśmy trzy akumulatory w szereg, bo chcieliśmy uzyskać 5 wolt.

Jest samo przez się zrozumiałe, że amperomierze w czasie cechowania są połączone szeregowo, a woltomierze równolegle, t. j. tak, jak są łączone w czasie normalnej pracy.

PRZYKŁADY DO OBLICZENIA. Jaką oporność musi mieć woltomierz, aby wskazywał mierzone napięcie? Obliczyć z prawa Ohma, jakie będzie napięcie na zaciskach opornicy o oporności $R = 10\,\Omega$, gdy płynie przez nią prąd o natężeniu $I = 8$ A, a co nam pokażą woltomierze o: 1/ $R_{v_1} = 10\,\Omega$, 2/ $R_{v_2} = 10\,000\,\Omega$?

Co należy zrobić, aby woltomierz elektrodynamiczny na 30 wolt mógł być użyty do napięcia 300 wolt i dlaczego? /przyjmijmy, że oporność woltomierza jest 1000 omów/.

Jaką oporność musi mieć amperomierz, by wskazywał mierzone natężenie i dlaczego? Wyliczyć prąd, gdy $U = 100$ V, $R = 10\,\Omega$, a co wskaże amperomierz mający oporność: 1/ $40\,\Omega$, 2/ $0{,}01\,\Omega$.

Co należy zrobić, aby amperomierz np. na 0,3 A mierzył prąd np. do 30 A?

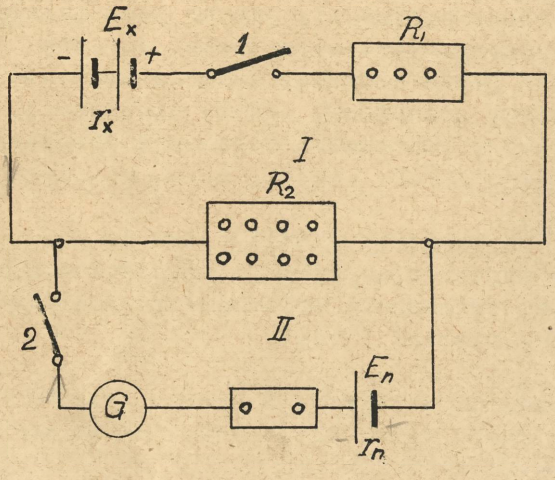
Jaką moc pobiera amperomierz o oporności 1/ $1\,\Omega$, gdy $I_{max} = 5$ A, 2/ $1\,\Omega$, gdy $I_{max} = 10$ A?

Jaką moc zużywa woltomierz o oporności R_V = 5000 Ω, przy napięciu 1/ 150 V, 2/ 300 V?

CEL ĆWICZENIA. Osiągnięte w powyższy sposób poprawki stosuje się przy użyciu zbadanych instrumentów mierniczych w ten sposób, że, chcąc otrzymać rzeczywistą wielkość zmierzonego napięcia /natężenia/ dodajemy poprawkę /uwzględniając znak!/ do wielkości odczytanej.

Ć w i c z e n i e 2.

P o m i a r s i ł y e l e k t r o m o t o r y c z n e j /SEM/ m e t o d ą P o g g e n d o r f f a i B o s c h y.



Jak czytamy z układu, to SEM badana i normalna są skierowane przeciw sobie, aby możliwą była kompenzacja t.j., aby SEM normalna mogła zostać zrównoważona przez spadek napięcia w części głównego obwodu,bo wówczas tylko możliwym jest, aby ogniwo normalne nie dostarczało żadnego prądu, czyli,aby galwanometr nie wychylił się.

Biorąc pod uwagę obwód I, otrzymujemy z drugiego prawa Kirchhofa:

$$E_x = I.(r_x + R_1 + R_2) \quad \ldots\ldots 1/$$

Stosując to samo prawo dla obwodu II, dla momentu, gdy galwanometr się nie wychyla, t.zn., gdy ogniwo normalne nie daje prądu, otrzymujemy:

$$E_n = I.R_2 \quad \ldots\ldots \quad \ldots\ldots 2/$$

Dzieląc 1/ przez 2/ mamy:

$$\frac{E_x}{E_n} = \frac{I.(r_x + R_1 + R_2)}{I.R_2} = \frac{r_x + R_1 + R_2}{R_2}$$

Uwzględniając, że r_x jest małe w stosunku do sumy oporności, możemy go opuścić i otrzymujemy ostatecznie wzór dla E_x

$$E_x = E_n \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2} = c.E_n$$

gdzie:

$$c = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

Jak jasno z powyższego wynika, musi być: $E_x > E_n$, bo $(R_1 + R_2) > R_2$; metodą więc tą można mierzyć tylko te SEM-e, które są większe od SEM-ej naszego ogniwa normalnego.

Ze sposobu wyprowadzenia wzoru /opuszczenie r_x/ wynika, że opory R_1 i R_2 muszą mieć odpowiednio duże oporności, jeżeli pomiar ma być z należytą dokładnością przeprowadzony. Zbyt jednak wielkie nie mogą być te oporności, gdyż czułość układu byłaby za mała.

O p i s p o m i a r u. Po zrobieniu układu połączeń, jak wyżej, nastawiamy pewne wartości na opornicach R_1 i R_2. Teraz zamykamy obwód I wyłącznikiem 1, a następnie wyłącznikiem 2 obwód II, to jest ten, gdzie znajduje się galwanometr; gdy galwanometr się wychyla, otwieramy n a j p i e r w wyłącznik 2, a n a s t ę p n i e wyłącznik 1. Porządek odwrotny jest niedopuszczalny, ze względu na całość galwanometru. Wychylanie się galwanometru dowodzi, że opory nie są dobrze dobrane, dlatego zostawiając R_1 bez zmiany np. zwiększymy opór R_2 i znowu załączamy wyłącznik 1, a później 2; gdy wychylenie zmniejszyło się, a jest w tym samym kierunku, to oznacza, że należy dalej zwiększać opór R_2. Wyłączamy więc 2 i 1, zwiększamy R_2, znowu załączamy obwody i w ten sposób postępując, tak długo badamy, aż galwanometr nie będzie się wychylał. Teraz zwiększamy wolno, np. co 0,5Ω opór R_2, kontrolując każdorazowo równowagę galwanometru, aż dochodzimy do takiej wartości R_2', której już minimalne zwiększenie /np. 0,1Ω / wywołuje wahanie wskazówki. Podobnie dostajemy przez zmniejszenie oporu R_2 wielkość R_2''; z otrzymanych wielkości wyliczamy:

$$R_{2śr} = \frac{R_2' + R_2''}{2}$$

a stąd:

$$c = \frac{R_1 + R_{2śr}}{R_{2śr}}$$

oraz

$$E_x = E_n \frac{R_1 + R_{2śr}}{R_{2śr}}$$

Następne pomiary robimy, zmieniając R_1 i znowu dobierając odpowiednie R_2. Tutaj dobieranie tego R_2 można sobie ułatwić przy pomocy pierwszego pomiaru, gdyż znając stosunek:

$$\frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

i mając przyjęte R_1', możemy wyliczyć R_2', bo powinno być:

$$\frac{R_1 + R_2'}{R_2'} = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

Ze względu na polaryzację i regenerowanie się elementów, a w konsekwencji zmianę SEM-ej w czasie oddawania prądu, należy prąd pobierać możliwie krótko, czyli momenty załączania obu wyłączników winny być krótkie i w tym celu mamy dane do dyspozycji wyłączniki sprężynowe.

U w a g a. Gdy zgrubsza wiemy w jakim stosunku pozostaje E_x do E_n /a tak zwykle jest/, to wiemy , jakie w przybliżeniu ma być R_2, gdy przyjęliśmy pewne okrągłe R_1, np. 400Ω. Np. gdyby $E_x : E_n = 5$, to i/$R_1 + R_2$/ : R_2 musi być równe 5 /p. wyprowadzenie wzoru/, czyli musiałoby być $R_2 = 100Ω$, bo wówczas /400 + 100/ : 100 = 5 = $E_x : E_n$.

M e t o d a B o s c h y. W układzie Boschy mamy połączoną SEM badaną z SEM-ą normalną za sobą, t.zn. dają wypadkową SEM-ą większą, a galwanometr pokaże zero wówczas, gdy gałąź, w którą jest on wbudowany, przyłączymy do dwóch punktów o tych samych potencjałach.

Stosując drugie prawo Kirchhoffa do pierwszego obwodu, oraz do drugiego /I i II/, dla momentu, gdy galwanometr się nie wychyla, otrzymujemy:

$E_x = I./r_x + R_1/$..... .....1/

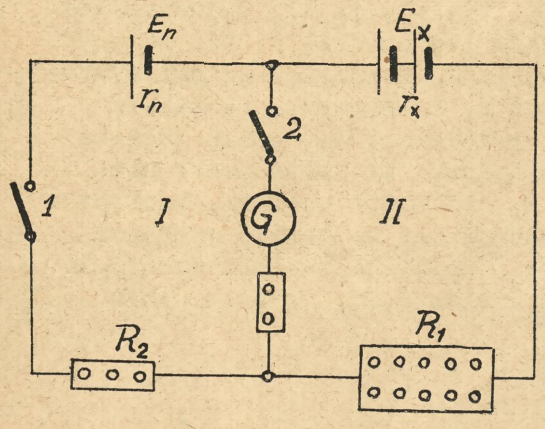
$E_n = I./r_n + R_22$..... .....2/

a stąd:

$$\frac{E_x}{E_n} = \frac{I./r_x + R_1/}{I./r_n + R_2/}$$

a dalej:

$$E_x.r_n + E_x.R_2 = E_n.r_x + E_n.R_1 \ldots\ldots \qquad \ldots\ldots a/$$



Zmieniwszy teraz opory R_1 i R_2, otrzymujemy teraz inny prąd I_2, ale stosowalność drugiego prawa Kirchhoffa nie ulegnie zmianie, więc znowu w chwili, gdy galwanometr się nie wychyla, mamy:

$$E_x = I_2./r_x + R_1'/\ldots\ldots \qquad \ldots\ldots 1a/$$

$$E_n = I_2./r_n + R_2'/\ldots\ldots \qquad \ldots\ldots 2a/$$

więc

$$E_x.r_n + E_x.R_2' = E_n.r_x + E_n.R_1' \ldots\ldots b/$$

Odejmując teraz od a/ równanie b/ otrzymamy:

$$E_x./R_2 - R_2'/ = E_n/R_1 - R_1'/$$

skąd:

$$E_x = E_n \frac{/R_1 - R_1'/}{/R_2 - R_2'/}$$

Ze wzoru tego czytamy, że $E_x \gtrless E_n$, bo licznik może być $\gtrless$ mianownikowi. Tutaj należy brać także opory o dużych opornościach, aby prąd płynął mały, bo ogniwo normalne powinno dostarczać możliwie najmniej prądu, aby odpowiadało swemu celowi t.j., aby miało stałą SEM-ą. Należy tu szczególnie uważać na dokładność pomiarów, bo gdyby przypadkiem zmierzono R_1 z nadmiarem, a R_1' z niedomiarem, gdy $R_1 > R_1'$, a przeciwnie przy R_2 i R_2', to mógłby przy takich pomiarach powstać wcale duży błąd /licznik większy, a mianownik mniejszy, niż w rzeczywistości/. Równie dobrze możliwym byłby błąd wprost przeciwny, t.zn. mianownik większy, a licznik mniejszy jak w rzeczywistości. Licząc się z tymi ewentualnościami, należy robić kilka pomiarów i brać średnią z nich. Z tych samych względów robimy także kilka pomiarów przy układzie Poggendorffa, ale, jak widzimy ze wzoru, przy tych samych założeniach różnice, czyli błędy wyników powinny być tym mniejsze.

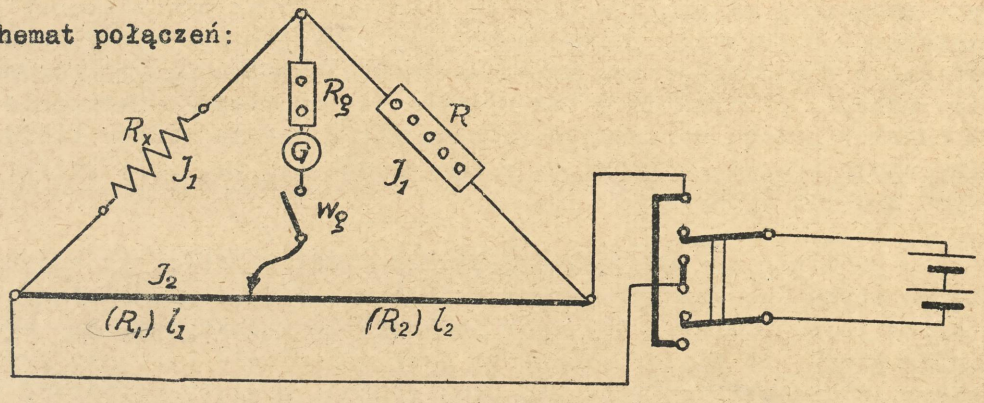
O p i s p o m i a r u. Postępowanie w czasie pomiaru zupełnie identyczne do tego, jakie było przy układzie Poggendorffa. Dla R_2 przyjmujemy /dla ułatwienia obliczenia/ wartości okrągłe, aby np. $R_2 - R_2' = 100$, 200 i t.p., a dobieramy R_1. Tutaj dobór R_1, gdy mamy przyjęte R_2, jest prostszy, jak w poprzednim pomiarze, bo przyjęcie: $E_x : E_n = R_1 : R_2$ jest błędnym tylko o tyle, że nie uwzględnimy tylko oporów wewnętrznych /p. wyprowadzenie wzoru/. Znając więc w przybliżeniu $E_x : E_n$ i przyjąwszy R_2, łatwo znajdziemy R_1, bo biorąc $E_x : E_n = R_1 : R_2$ popełniamy tylko mały błąd, czyli przy $R_1 = /E_x : E_n/.R_2$ już wychylenie galwanometru nie będzie duże.

Reasumując to, co powiedziano o obu układach, możemy powiedzieć, że układ Poggendorffa jest lepszy od układu Boschy dlatego, że SEM ogniwa normalnego nie wytwarza prądu i niedokładności odczytów nie są tak silnie szkodliwe, ale wadą jest, że otrzymany wzór jest tylko przybliżony, a nie całkiem dokładny jak u Boschy, a nadto jesteśmy ograniczeni z pomiarami tylko do $E_x > E_n$.

Ćwiczenie 7.

Pomiar oporności metodą mostu Wheatstone'a

Schemat połączeń:



Przez przesuwanie styku ślizgającego się po drucie oporowym osiągamy taki stan, że przez galwanometr prąd nie płynie; wówczas z drugiego prawa Kirchhoffa dostajemy:

$$I_1.R_x - I_2.R_1 = 0 \quad \text{czyli} \quad I_1.R_x = I_2.R_1 \ldots\ldots \quad \ldots\ldots 1/$$

oraz

$$I_1.R - I_2.R_2 = 0 \quad \text{czyli} \quad I_1.R = I_2.R_2 \ldots\ldots \quad \ldots\ldots 2/$$

Dzieląc przez siebie równania 1/ i 2/ dostajemy:

$$R_x = R\frac{R_1}{R_2} \ldots\ldots \quad \ldots\ldots 3/$$

Znając oporności R_1, R_2, R możemy oporność R_x wyliczyć. Opór R nazywa się oporem porównawczym, a opory R_1 i R_2 stosunkowymi.

Ponieważ jako oporów stosunkowych użyto drutu kalibrowanego, t.j. takiego, którego przekrój jest wszędzie jednakowy, więc mamy:

$$R_1 = \frac{l_1}{q}\rho \quad \text{i} \quad R_2 = \frac{l_2}{q}\rho$$

gdzie ρ = oporność właściwa drutu, więc mamy:

$$R_1 : R_2 = l_1 : l_2.$$

Ostatecznie wzór 3/ na wyliczenie oporności przybierze postać:

$$R_x = R\frac{l_1}{l_2}$$

Powyższy mostek jest właściwie mostkiem Kirchhoffa; jestto odmiana mostku Wheatstone'a; przy tym ostatnim używa się jako oporów stosunkowych dwu opornic wtyczkowych. Przełącznik użyto w celu wykrycia i usunięcia ujemnego wpływu oporów stykowych przez pomiar dwukrotny przy różnych kierunkach prądu. Opór R_g włączony w gałąź galwanometru, ma go zabezpieczyć przed przepłynięciem zbyt dużego prądu.

P r z e b i e g ć w i c z e n i a. Po wykonaniu połączeń nastawiamy pewien opór porównawczy i przy otwartym wyłączniku galwanometra /w_g/ za pomocą przełącznika łączymy układ z baterią. Następnie przy załączonym całkowitym oporze R_g /kołeczki wyjęte/ zamykamy wyłącznik w_g i stykiem rucho-

mym przesuwamy np. od strony lewej ku prawej, aby uzyskać zmniejszenie się wychyleń galwanometru; gdy wychylenia te są już minimalne, zwiększamy czułość układu przez wyłączenie oporu R_g /zaciskając kołeczki zatyczkowe/ i przesuwając styk w dalszym ciągu w tym samym kierunku dochodzimy do takiego położenia, że wskazówka galwanometru nie wychyla się przy zamykaniu i otwieraniu wyłącznika w_g. Teraz - o ile opór nie jest indukcyjny, tylko czysto omowy - załączamy na stałe wyłącznik i zmieniamy szybko kierunek prądu /przełącznikiem/, obserwując galwanometr; gdy mamy jeszcze wychylenie, nastawiamy ostatecznie równowagę przez przesuwanie stale w tym samym kierunku i teraz robimy odczyt, otrzymując w ten sposób: l_{l_1} mm /lewe/. Następnie przesuwamy styk nadal w prawo, obserwując galwanometr w czasie zmiany kierunku prądu i robimy znowu odczyt, otrzymując w ten sposób l_{l_p} mm, przy którym galwanometr zaczyna się już wychylać.

U w a g a. Gdy układ jest odpowiednio czuły, to najmniejsze przesunięcie styku już jest przyczyną zachwiania równowagi, dlatego uskutecznia się tylko jeden pomiar. Gdy opór jest silnie indukcyjny, np. opór uzwojeń transformatora, to niedopuszczalnym jest zmienianie kierunku prądu przy załączonym galwanometrze, gdyż SEM samoindukcji mogłaby wytworzyć tak duży prąd, że galwanometr zostałby zniszczony. Tutaj robi się pomiar przy przepływie prądu tylko w jednym kierunku, potym wyłącza się galwanometr, teraz dopiero zmienia się kierunek prądu, a gdy to już zostało uskutecznione, to załącza się znowu galwanometr i robi pomiar. W ogóle tutaj, gdy używa się galwanometrów, to zasadą jest, że najpierw włącza się prąd, a potym dopiero galwanometr, a wprost przeciwnie przy wyłączaniu, bo najpierw wyłącza się galwanometr, a potym prąd. Postępuje się tak dla uniknięcia ujemnego wpływu samoindukcji.

Mając już wielkości l_{l_1} oraz l_{l_p}, wyliczamy $l_{l_{śr}}$:

$$l_{l_{śr}} = \frac{l_{l_1} + l_{l_p}}{2} \text{ mm}$$

i

$$l_{2_{śr}} = /1000 - l_{l_{śr}}/ \text{ mm}$$

a następnie:

$$R_x = R \frac{l_{l_{śr}}}{l_{2_{śr}}}$$

Pomiaru dokonujemy dla trzech wielkości oporu porównawczego i z trzech otrzymanych oporności dla badanego oporu wyliczamy średnią $R_{x_{śr}}$.

Czułością układu nazywamy największą zmianę wielkości zmiennej obserwowanej, przy której nie da się jeszcze zauważyć naruszenia równowagi; tu więc miarą czułości układu będzie np. różnica odczytów $l_{l_1} - l_{l_p}$. Warunkiem czułości, wypływającym z dyskusji układu jest równość oporności wszystkich gałęzi:

$$R_x = R = R_1 = R_2 = R_g = R_{ogn},$$

gdzie R_g = oporność galwanometru, R_{ogn} = oporność wewnętrzna ogniwa. W praktyce powinniśmy przynajmniej dążyć do zbliżenia się do tego warunku, a więc:

styk powinien stać mniej więcej w środkowej części drutu.
opory galwanometru i ogniwa powinny być w przybliżeniu równe,
galwanometr powinien być włączony w gałąź łączącą punkt połączenia dwu oporów o dużych opornościach, z punktem połączenia oporów mniejszych /o ile niemożliwą była równość oporności/.

U w a g a. Ta metoda pomiaru nie nadaje się do mierzenia wielkich oporności, gdyż do ich pomiaru musielibyśmy użyć dużych napięć, by uzyskać odpowiednie natężenie prądu, a wtedy znów popłynąłby zbyt silny prąd przez drut kalibrowany i mógłby go przepalić; prócz tego czułość układu przy tym pomiarze byłaby mała /oporności mniej więcej równe, a opory stosunkowo mają małą oporność/. Metoda ta również nie nadaje się do pomiarów bardzo małych oporności, gdyż z badanym oporem mierzymy również oporności przewodów, łączących go z układem; oporności te w wypadku pomiaru oporu o bardzo małej oporności mogą stanowić dość znaczny procent oporu badanego, błąd więc popełniony przez ich nieuwzględnienie będzie duży.

Za ustawieniem styku ślizgającego się w środkowej części drutu przy pomiarze, prócz względów na czułość przemawiają jeszcze inne okoliczności; mianowicie w tym położeniu ten sam błąd odczytu i nastawienia wywołuje mniejszą różnicę w wyliczeniu oporności,niż gdyby styk ruchomy znajdował się przy końcu drutu. Dla przykładu można przeprowadzić następujący rachunek:

Przypuśćmy, że przy pomiarze oporności $R_x = 1\Omega$ popełniamy błąd przy odczycie o 1 mm /przyjęto 1 mm dla uproszczenia rachunku/:

A/ Oporowi porównawczemu $R = 1\Omega$ odpowiada stosunek długości $l_1 : l_2 = 500 : 500$. Biorąc zaś stosunek $l_1 : l_2 = 499 : 501$, dostajemy wartość $R_x = 1./499 : 501/ = 0,996$, różną od rzeczywistej wielkości o 0,4 %.

B/ Biorąc zaś przy oporze porównawczym $R = 99\Omega$, zamiast stosunku $l_1 : l_2 = 10 : 990$, stosunek $l_1 : l_2 = 9 : 991$ dostajemy wielkość: $R_x = 99./9 : 991/ = 0,899$, różną od rzeczywistej wielkości o 10,1 %.

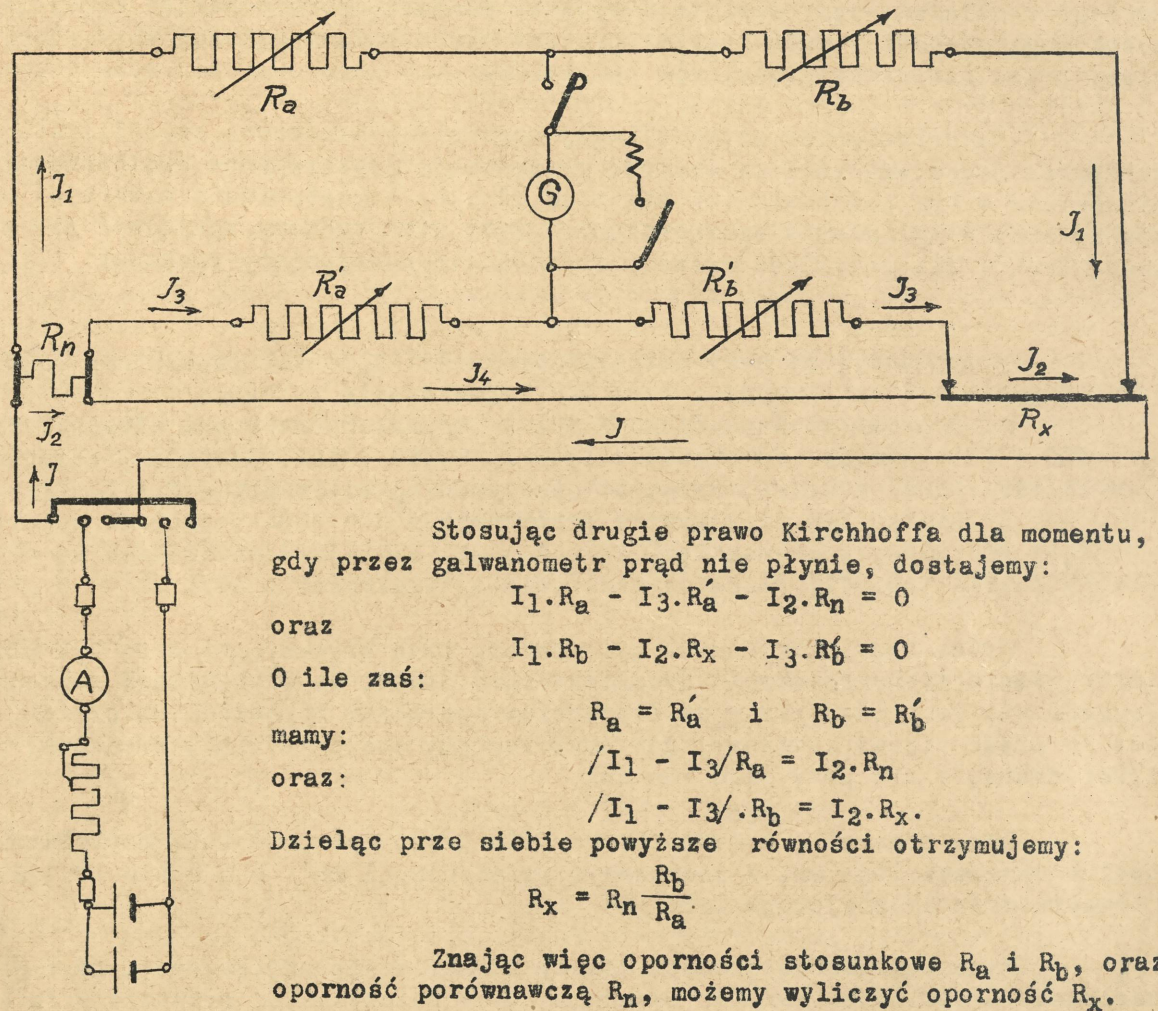
Prócz tego, gdy mostek był dłuższy czas używany, to może być nieco starta /zmniejszony przekrój/ środkowa część drutu; na skutek tego stosunek długości nie jest identyczny ze stosunkiem oporności odpowiednich części, a jest do niego więcej zbliżony, gdy styk ruchomy znajduje się w środkowej części drutu, a nie przy jego końcach.

Jako jednostkę oporności przyjęto 1 om; oporność taką posiada słup rtęci o długości 1063 mm, o jednakowym przekroju /1 mm^2/ i o masie 14,4521 g w temperaturze topniejącego lodu /0° C/.

Przy pomiarze oporności cieczy natrafia się na trudność, gdyż przepuszczenie prądu przez roztwór wywołuje jego polaryzację, powstaje siła elektromotoryczna polaryzacji, przeciwdziałająca przyłożonej SEM-ej; by tę siłę usunąć, używamy do pomiarów oporności cieczy prądu zmiennego i zamiast galwanometru - telefonu /mostek Kohlrauscha/.

Ćwiczenie 32

Pomiar małych oporności metodą mostku Thomsona, oraz pomiary oporności właściwych różnych metali



Stosując drugie prawo Kirchhoffa dla momentu, gdy przez galwanometr prąd nie płynie, dostajemy:

$$I_1 . R_a - I_3 . R'_a - I_2 . R_n = 0$$

oraz

$$I_1 . R_b - I_2 . R_x - I_3 . R'_b = 0$$

O ile zaś:

$$R_a = R'_a \quad \text{i} \quad R_b = R'_b$$

mamy:

$$/I_1 - I_3/ R_a = I_2 . R_n$$

oraz:

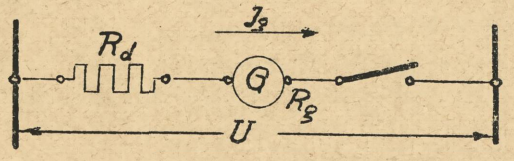
$$/I_1 - I_3/ . R_b = I_2 . R_x .$$

Dzieląc prze siebie powyższe równości otrzymujemy:

$$R_x = R_n \frac{R_b}{R_a}$$

Znając więc oporności stosunkowe R_a i R_b, oraz oporność porównawczą R_n, możemy wyliczyć oporność R_x.

Galwanometr można w dwojaki sposób chronić przed przepłynięciem zbyt silnego prądu, zagrażającego jego całości:



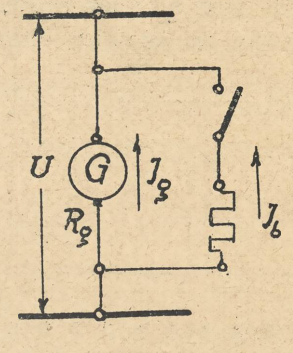
1/ za pomocą oporu dodatkowego R_d łączonego w szereg z galwanometrem. Przy połączeniu punktów o różnicy potencjałów U, przez galwanometr popłynie prąd:

$$I_g = \frac{U}{R_g + R_d}$$

Ażeby opór R_d spełniał swój cel, musi on być w stosunku do oporu galwanometru R_g duży, gdyż wtedy nawet przy dość znacznych U wielkość prądu I_g nie przybierze wartości zagrażającej całości instrumentu.

Przy tej metodzie chronienia galwanometru, należy z początkiem pomiaru, gdy mamy dość znaczne różnice potencjałów U, włączyć całkowity opór R_d przez wyjęcie kołeczków zatyczkowych, a dopiero później, gdy wychylenia już są minimalne, zwiększamy czułość układu przez wyłączenie oporu R_d /przez zaciśnięcie kołeczków/.

2/ Za pomocą oporu bocznikowego /upustowego/ R_b, łączonego równolegle do galwanometru. Prąd I, który teraz popłynie, jest wprawdzie dość duży:



$$I = \frac{U}{R}, \quad \text{gdzie} \quad R = \frac{R_g \cdot R_b}{R_g + R_b},$$

lecz dzieli się na dwie części: I_g oraz I_b, odwrotnie proporcjonalne do odpowiednich oporności:

$$I_g : I_b = R_b : R_g, \text{ czyli } I_g = I_b \cdot / R_b : R_g /;$$

aby więc I_g było małe, musi być opór R_b w stosunku do oporu galwanometru mały.

Przy tej łączni początkowo musimy włączyć upust, przez załączenie wyłącznika, a dopiero po ustaleniu równowago zgrubsza, wyłączamy upust przez otwarcie wyłącznika.

Za pomocą przełącznika, przez zmianę kierunku prądu możemy wykryć istnienie oporów stykowych.

O p i s p r z e b i e g u ć w i c z e n i a. Po wykonaniu połączeń według załączonego schematu, nastawiamy pewne oporności w opornicach R_a, $R_{á}$, R_b, $R_{b'}$, przyczym $R_a = R_{á}$ i $R_b = R_{b'}$; Łączymy układ z akumulatorami przez przesunięcie przełącznika np. na prawo, a prąd nastawiamy mały /około 1 A/, by badany opór w czasie pomiaru się nam nie nagrzewał. Przy zamkniętym wyłączniku upustowym zamykamy wyłącznik galwanometru, zwiększamy oporności R_a i $R_{á}$ /jeżeli są to oporności o szerszym zakresie zmienności oporów aniżeli R_b i $R_{b'}$/ o jednakową, a dość dużą wielkość i znowu zamykamy wyłącznik; o ile obecnie wychylenie galwanometru zwiększyło się, a jest w tym samym kierunku, oznacza to, że oporności R_a i $R_{á}$ są za duże, czyli przy wychylaniu się galwanometru na prawo należy je zmniejszać i naodwrót, przy wychyleniu w lewo zwiększać. Przeciwnie zaś, jeżeli naskutek zwiększenia oporności oporów R_a i $R_{á}$ wychylenie zmalało i jest w tym samym kierunku, wielkość ich jest za mała, czyli przy wychyleniu w prawo należy oporności R_a i $R_{á}$ zwiększać, a przy wychyleniu w lewo zmniejszać. W ten sposób się orientując, staramy się przez zmianę R_a i $R_{á}$, przy czym $R_a = R_{á}$, przy $R_b = R_{b'}$ = const. osiągnąć równowagą galwanometru. Gdy wychylenia wskazówki są już minimalne, zwiększamy czułość układu przez wyłączenie oporu bocznikowego /otwierając wyłącznik upustowy/; a gdy już równowaga jest zgrubsza ustalona, zwiększamy prąd /a nas do ca 5 A/,by jeszcze zwiększyć czułość; o ile nawet przy zwiększonym prądzie galwanometr się już nie wychyla, zamykamy jego wyłącznik na stałe i ostatecznie sprowadzamy równowagę przy przerzucaniu przełącznika z jednej strony na drugą. Teraz zwiększamy powoli, np. co 0,5 oma, jednakowo oba opory R_a i $R_{á}$, kontrolując każdorazowo równowagę galwanometru przez przerzucanie przełącznika, aż dochodzimy do takiej wartości R_{a1}, której już minimalne zwiększenie np. o 0,1 oma wywołuje wahanie wskazówki. Podobnie dostajemy przez zmniejszenie oporów R_a i $R_{á}$, wielkość R_{a2}. Z otrzymanych wielkości wyliczamy:

$$R_{aśr} = \frac{R_{a1} + R_{a2}}{2}$$

Pomiar uskutecznia się przy trzech różnych wielkościach oporu R_b, przy czym $R_b = R_b'$, a z otrzymanych wartości na R_x wyliczamy średnią.

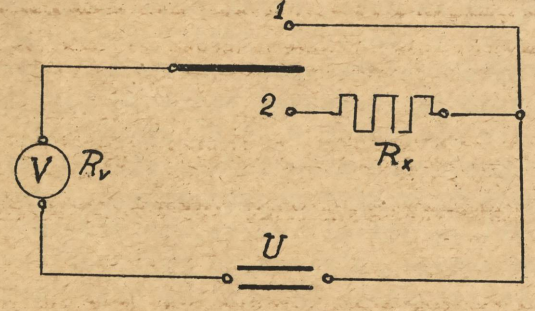
Opory stosunkowe R_a i R_b powinny mieć dużą oporność, aby oporności przewodów łączących je i opory stykowe nie grały większej roli.

Mostek Thomsona nadaje się specjalnie do mierzenia małych oporności, gdyż przy tym układzie mierzymy rzeczywiście tylko sam badany opór, a odpadają oporności przewodów łączących /w przeciwieństwie do mostku Wheatstone'a/.

Ć w i c z e n i e 3 7.

P o m i a r i z o l a c j i p r z e w o d ó w i w y z n a c z e n i e m i e j s c a b ł ę d u

Izolację przewodów sieci można badać albo pod napięciem, albo po wyłączeniu napięcia. Tutaj badamy izolację dwóch przewodów owiniętych razem na odpowiednim bębnie, a nie znajdujących się pod napięciem. Do pomiaru użyto induktora. Jest to maszynka prądu stałego /magnes stały a nie elektromagnes/ połączona z woltomierzem, który tu posiada podziałkę nie tylko w woltach, lecz także wprost w megomach. Napięcie otrzymujemy tu prosto przez obrót twornika tej maszynki odpowiednią korbką ręczną, i rzecz jasna, wielkość tego napięcia zależy od prędkości obrotu korbką. Skala w M-omach jest ważna tylko wówczas, gdy mamy odpowiednie obroty, a mianowicie takie, że uzyskujemy w chwili załączenia wyłącznika "w" wychylenie wskazówki woltomierza do czerwonej kreski na skali /110 V lub 220 V/.



W y p r o w a d z e n i e w z o r u. Jak czytamy z układu, to przełączenie na "1" spowoduje przepływ prądu:

$$I_1 = \frac{U}{R_v} = c.\alpha_1 \quad ..1/$$

gdzie c = stała instrumentu, a R_v = oporność woltomierza, która jest duża, dlatego możemy pominąć oporność przewodów; przy przełączeniu na "2" dostaniemy:

$$I_2' = \frac{U}{R_v + R_x} = c.\alpha_2 \ldots\ldots \qquad \ldots.2/$$

pod warunkiem, że w obu wypadkach U było to samo, czyli w razie użycia induktorka, że obracano korbką z tą samą prędkością. Dzieląc 1/ przez 2/ mamy:

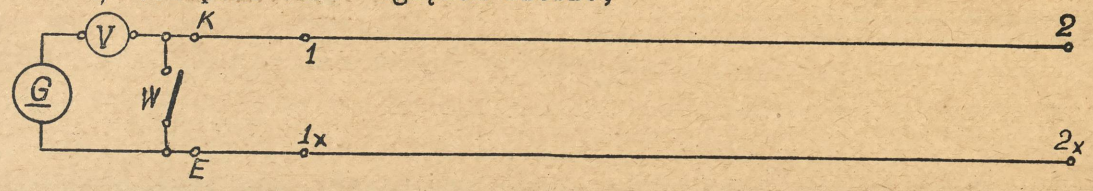
$$\frac{R_v + R_x}{R_v} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2}, \quad \text{czyli} \quad 1 + \frac{R_x}{R_v} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2}$$

skąd:

$$R_x = R_v \cdot / \frac{\alpha_1}{\alpha_2} - 1 /$$

Układy połączeń do badania izolacji.

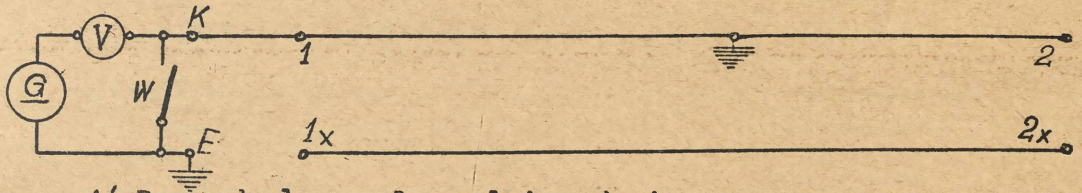
1/ Obu przewodów względem siebie;



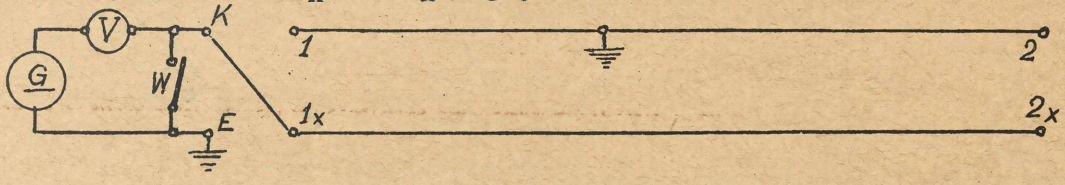
2/ Obu przewodów względem ziemi:



3/ Przewodu 1---2 względem ziemi:



4/ Przewodu 1_x --- 2_x względem ziemi:



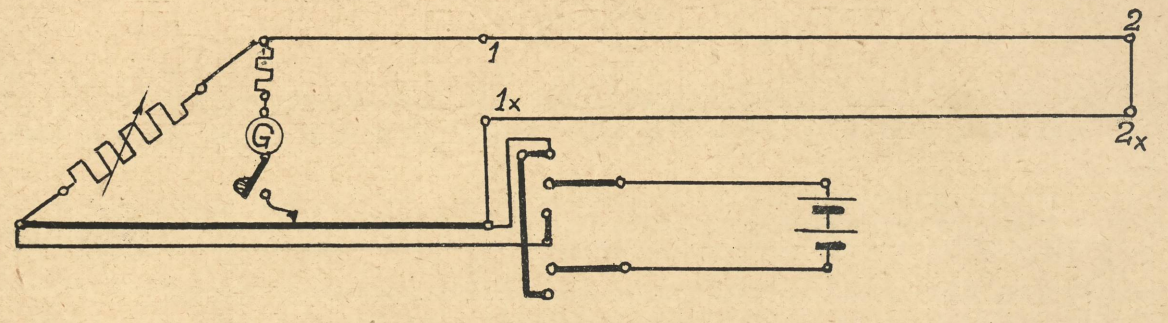
Gdy układ mamy gotowy, otrzymujemy α_1 w chwili, gdy obracamy korbką, a wyłącznik "w" jest zamknięty /tu taster naciśnięty/, a α_2, gdy wyłącznik jest otwarty, a obroty nie uległy zmianie. Mając dane R_v, odczytane α_1 i α_2, możemy już R_x obliczyć. Posiadając jednak induktorek ze skalą na megomy /M /, możemy wprost odczytać ilość megomów. Pomiar więc przeprowadza się tutaj w ten sposób, że naciska się taster i tak szybko obraca, aż wskazówka pokaże kreskę czerwoną. Teraz nie zmieniając prędkości obrotu, otwieramy wyłącznik i odczytujemy wielkość oporu.

Aby wyznaczyć miejsce uziemienia przewodu, musimy znać długość tego przewodu /p. niżej wyliczenia/. Ponieważ mamy tu podany przekrój przewodników, a wiemy, że są one z miedzi, to wystarczy nam zmierzyć ich oporność, aby wyliczyć długość, bo:

$$R = \rho \frac{l}{q} \quad , \qquad \text{więc} \qquad l = \frac{R}{\rho} . q$$

Oporność "R" znajdujemy mostkiem Kirchhoffa w sposób podany w ćwiczeniu 7. Przy obliczaniu "l" należy brać ρ dla tej temperatury, przy której wykonano pomiar, albo zmierzony opór przeliczyć na temperaturę 20° C i przyjąć $\rho = 1/57$ /miedź/.

BIBLIOTEKA GŁ. A. G.-H.



Teraz robimy nowy układ mostku Kirchhoffa, dla którego otrzymujemy tylko jedno położenie równowagi. Mamy tu relację:

$$l_1 : l_2 = l_3 : l_4$$

Stosując tu znane twierdzenie o proporcjach, otrzymujemy:

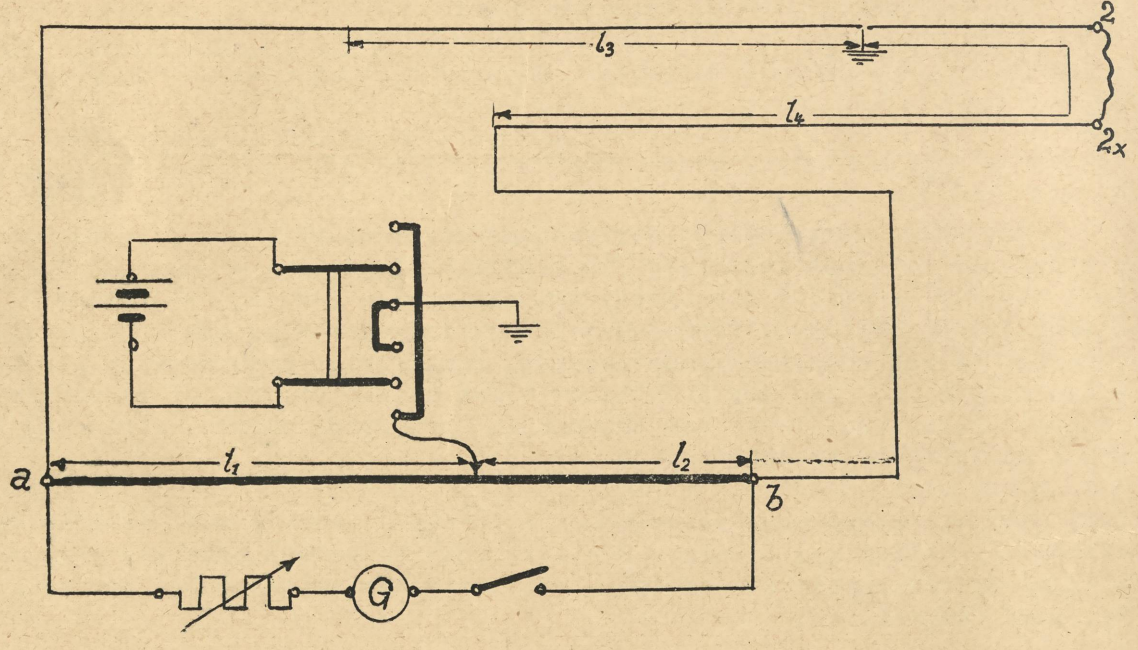
$$\frac{l_1}{l_1 + l_2} = \frac{l_3}{l_3 + l_4}$$, wiemy zaś, że:

$l_1 + l_2 = 1000$ mm, a $l_3 + l_4 = 1$.

l_1 jest znane, więc:

$$l_3 = l_1 \frac{1}{1000}$$ gdy 1 w metrach, a l_1 w mm.

Dla kontroli robimy tu drugi pomiar, a mianowicie łączymy l_x z "a", a 1 z "b". Otrzymane teraz l_3' winno być równe l_4, t.j. $1 - l_3$.



Ćwiczenie 52.

Pomiar indukcyjności wzajemnej metodą porównawczą

Gdy strumień magnetyczny, objęty przez daną cewkę o "z" uzwojeniach zmienia się, wówczas zostaje w niej wyindukowana SEM o wielkości:

$$E = -z.\frac{d\Phi}{dt} \quad /c.g.s./$$

gdzie $d\Phi$ jestto przyrost strumienia magnetycznego w czasie dt.

O ile zmienny strumień magnetyczny jest wywołany przez zmieniający się prąd elektryczny I_1, przepływający przez inną cewkę /pierwotną/ o liczbie uzwojeń z_1, nawiniętą na tym samym rdzeniu, co dawna /wtórna/, która posiada z_2 uzwojeń, mamy do czynienia z SEM-ą wzajemnej indukcji. Wielkość jej wynosi:

$$E_m = -z_2\frac{d\Phi}{dt} = -z_2\frac{d\Phi}{dI_1}\cdot\frac{dI_1}{dt} \quad /c.g.s./$$

Strumień magnetyczny wynosi: $\Phi = \mu.H.q$, gdzie:

$$H = \sim \frac{4.\pi.z_1.I_1}{l}$$

przy czym l = długość cewki w cm, μ = przenikliwość magnetyczna ośrodka, przez który strumień ten przechodzi, w liczbach niemianowanych, q = przekrój cewki w cm^2, czyli:

$$\Phi = \frac{4.\pi.z_1.I_1.\mu.q}{l}$$

zatym: $\frac{d\Phi}{dI_1} = \frac{4.\pi.z_1.\mu.q}{l}$, a wzór na SEM-ą wzajemnej indukcji przybiera postać:

$$E_m = -z_2\frac{d\Phi}{dI_1}\cdot\frac{dI_1}{dt} = -\frac{4.\pi.z_1.z_2.\mu.q}{l}\cdot\frac{dI_1}{dt}$$

czyli w końcu:

$$E_m = -M'\frac{dI_1}{dt} \quad /c.g.s./$$

gdzie M' jest indukcyjność wzajemna obu cewek i wynosi:

$$M' = \frac{4.\pi.z_1.z_2.\mu.q}{l} \quad /c.g.s./$$

przy czym "z_1" i "z_2" są ilości uzwojeń cewki pierwotnej i wtórnej, zaś I_1 - prąd przepływający przez cewkę pierwotną w jednostkach absolutnych /c.g.s/.

O ile zaś zmiany strumienia magnetycznego wywołuje zmieniający się własny prąd I cewki o "z" zwojach, wówczas dostaniemy siłę elektromotoryczną samoindukcji. Wielkość jej wynosi:

$$E_s = -z.\frac{d\Phi}{dt} = -z\frac{d\Phi}{dI}\frac{dI}{dt} = -z.\frac{4.\pi.z.\mu.q}{l}\frac{dI}{dt}, \quad \text{czyli:}$$

$$E_s = -L'.\frac{dI}{dt} \quad /c.g.s./$$

gdzie L' jest indukcyjnością własną /spółczynnikiem samoindukcji/ i wynosi:

$$L' = \frac{4.\pi.z^2.\mu.q}{l} \quad /c.g.s./$$

Chcąc dostać wyindukowaną SEM-ą w woltach, musimy powyższe wartości pomnożyć przez odpowiedni spółczynnik, a mianowicie:

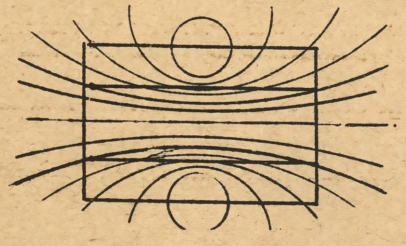
$$E_m = -M' \cdot \frac{di_1}{dt} \cdot 10^{-9} \text{ wolt} = -M \cdot \frac{di_1}{dt} \text{ wolt.}$$

$$E_s = -L' \cdot \frac{di}{dt} \cdot 10^{-9} \text{ wolt} = -L \frac{di}{dt} \text{ wolt}$$

gdzie "i" jest natężenie prądu w amperach, M i L - odpowiednie spółczynniki w henrach.

Jednostka techniczna natężenia prądu /1 amper/ = 1/10 jednostki w układzie c.g.s. Jednostka techniczna /współczynnika samoindukcji/ indukcyjności własnej /1 henr/ = 10^{-9} jednostki w układzie c.g.s.

Wyprowadzenie powyższych wzorów jest oparte na założeniu, że wszystkie linie sił magnetycznych są objęte przez wszystkie uzwojenia cewek; w rzeczywistości zaś zachodzi to tylko w pewnym przybliżeniu wskutek rozproszenia linij sił magnetycznych, jak to widać z załączonego rysunku, więc wielkości L, M, E_s i E_m, wyliczone na powyższej podstawie są wyższe od odpowiednich wielkości rzeczywistych.

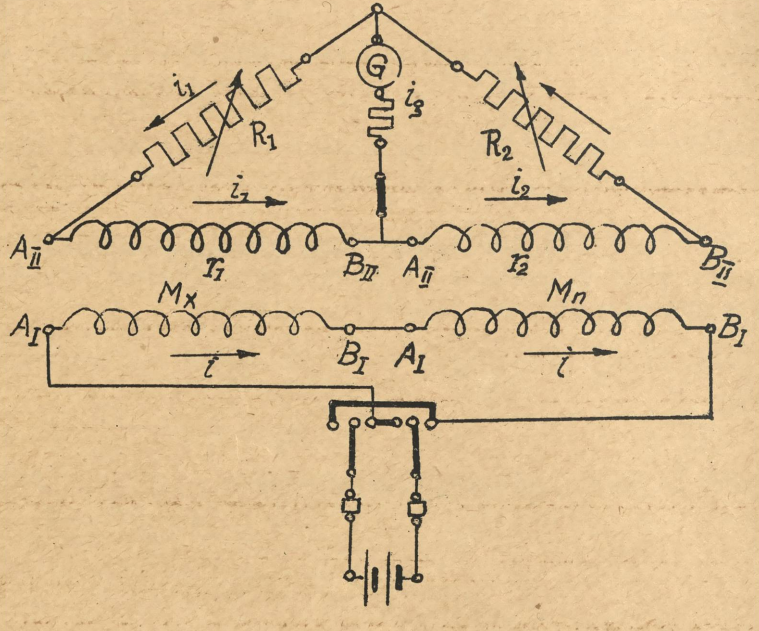


Kierunek strumienia magnetycznego w zależności od wytwarzającego go prądu podają nam najrozmaitsze reguły, np.: reguła korkociągu, Ampera /lewej ręki, pływaka/, reguła prawej ręki i t. d. Kierunek zaś wyindukowanej SEM-ej w zależności od zmian strumienia magnetycznego można wyznaczyć z prawa Lenza: prąd, jaki wytwarza wyindukowana SEM, stara się wstrzymać zmianę strumienia, powodującą powstanie tej SEM-ej. Kierunek ten możemy też łatwo znaleźć z reguły Maxwella. Brzmi ona: jeśli patrzymy w kierunku strumienia magnetycznego, a strumień ten wzrasta, to wyindukowana SEM w opasującej tenże strumień obręczy ma kierunek odwrotny do kierunku ruchu wskazówek zegara i na odwrót, gdy strumień magnetyczny maleje, kierunek SEM-ej jest z nim zgodny.

Zadaniem ćwiczenia jest pomiar indukcyjności wzajemnej pary cewek /bez rdzenia żelaznego/ metodą porównawczą; do porównywania służy druga para cewek o znanym spółczynniku wzajemnej indukcji.

U w a g a: Zaznaczono kierunki prądów indukcyjnych /i_1, i_2/ dla momentu wyłączenia prądu pierwotnego I.

Przy załączaniu względnie wyłączaniu prądu w obwodzie pierwotnym



powstają SEM-e po stronie wtórnej:

$$E_{mx} = -M_x \frac{di}{dt}, \quad \text{oraz} \quad E_{mn} = -M_n \frac{di}{dt}.$$

Te siły elektromotoryczne wywołają znowu prądy zależne od oporności odpowiednich obwodów. Przez odpowiedni dobór tych oporności /R_1 i R_2/ otrzymujemy taki stan, że przez galwanometr prąd nie płynie, czyli $i_g = 0$; wówczas

$$i_1 = i_2$$

Z drugiego prawa Kirchhoffa dostajemy:

$$i.r_1 + i.R_1 = -M_x.\frac{di}{dt}, \quad \text{oraz}$$

$$i.r_2 + i.R_2 = -M_n.\frac{di}{dt}.$$

Dzieląc przez siebie powyższe równości dostajemy:

$$\frac{i./R_1 + r_1/}{i./R_2 + r_2/} = \frac{M_x}{M_n}$$

czyli w końcu:

$$M_x = M_n \frac{R_1 + r_1}{R_2 + r_2}$$

Znając więc oporności R_1, r_1, R_2 i r_2, oraz M_n możemy wyliczyć wielkość M_x.

P r z e b i e g ć w i c z e n i a. Połączenia uskuteczniono według załączonego schematu, przy czym należy specjalną uwagę zwrócić na sposób łączenia cewek /p. Uwagi/. Nastawiamy pewne oporności w opornicach R_1 i R_2 /np. $R_2 = 3000\Omega$/ i włączamy całkowity opór chroniący galwanometr /przez wyjęcie kołeczków/; teraz włączamy prąd przez przesunięcie przełącznika np. na prawo i dostajemy w chwili włączania pewne wychylenie galwanometru, przypuśćmy, że też na prawo. Następnie wyłączamy prąd, przy czym dostajemy wychylenie w przeciwną stronę, zwiększamy oporność R_1 np. o 50 Ω i znów włączamy przełącznik na prawo. O ile obecnie wychylenie galwanometru zwiększyło się, oznacza to, że oporność R_1 jest za duża, czyli przy wychylaniu się galwanometru na prawo podczas załączania należy oporność R_1 zmniejszać, i naodwrót, przy wychyleniach w lewo zwiększać. Przeciwnie zaś, jeśli przez załączenie oporności 50Ω wychylenie zmalało, oporność R_1 jest za mała, czyli przy wychyleniu w prawo należy oporność R_1 zwiększyć, a przy wychyleniu w lewo zmniejszyć. W ten sposób orientując się, staramy się przez zmianę R_1 przy R_2 = = const. osiągnąć równowagę galwanometru przy włączaniu i wyłączaniu prądu. Gdy wychylenia są już minimalne, zwiększamy czułość układu przez wyłączenie oporu, chroniącego galwanometr, a ostatecznie równowagę ustalamy przy przerzucaniu przełącznika z jednej strony na drugą /po każdym przerzuceniu należy odczekać, by wskazówka przestała wahać/. Teraz zwiększamy wolno /np. co 0,5Ω/ oporność R_1, kontrolując każdorazowo równowagę galwanometru, przez przerzucanie przełącznika, aż dochodzimy do takiej wartości R_1, przy której już minimalne zwiększenie /np. o 0,1Ω/ wywołuje wahania wskazówki. Podobnie dostajemy,przez zmniejszenie znowu oporności R_1,wielkość R_1''; z otrzymanych wielkości wyliczamy:

$$M_x = M_n \frac{R_1 + r_1}{R_2 + r_2}$$

przy czym:

$$R_1 = \frac{R_1' + R_1''}{2}$$

Pomiar uskutecznia się przy trzech różnych opornościach R_2, a z otrzymanych wartości na M_x wyliczamy średnią.

U w a g i. Galwanometr nie wychyla się, gdy przezeń nie przepływa prąd, a to zachodzi wówczas, gdy łączy on punkty o równych potencjałach. Wzdłuż gałęzi zewnętrznej /poza cewkami/ maleje potencjał od potencjału jednego końca cewek do potencjału drugiego ich końca, przyjmując wszystkie wartości pośrednie; o ile więc potencjał punktu połączenia cewek /do którego przyłączony jest galwanometr/ posiada również wartość pośrednią /pomiędzy potencjałami końców/, wówczas istnieje w gałęzi zewnętrznej punkt o takim samym potencjale i przez połączenie obu tych punktów osiągamy równowagę galwanometru.

Np. przypuśćmy, że w pierwszej cewce powstaje na zaciskach różnica potencjałów 5 V, a w drugiej 3 V i niech początek pierwszej cewki ma potencjał O. Łączymy koniec pierwszej cewki z początkiem drugiej. Punkt ten połączenia ma potencjał 5 V.

1/ o ile potencjały w obu cewkach rosną w tym samym kierunku, sumują się one, więc na końcu drugiej cewki dostajemy potencjał 5 + 3 = 8 V. W tym więc wypadku potencjał punktu połączenia cewek posiada wartość pośrednią pomiędzy potencjałami pozostałych końców; O V < 5 V < 8 V, a ponieważ w gałęzi zewnętrznej spada potencjał od 8 V do O V, więc tu istnieje punkt o potencjale 5 V /równowaga galwanometru jest tu możliwa/.

2/ o ile zaś potencjały wzrastają w przeciwnych kierunkach, odejmują się; na końcu więc cewki drugiej dostajemy potencjał 5 - 3 = 2 V, od którego jest większy potencjał punktu połączenia cewek 5 > 2 > O; w obwodzie zewnętrznym maleje potencjał od 2 V do O V; nie ma więc punktu o potencjale 5 V, równowaga galwanometru nie jest tu możliwa.

Cewki więc powinny być tak połączone, by wzrost potencjałów, a więc SEM-e obu cewek miały ten sam kierunek, a ponieważ kierunki ich są zgodne /przy wyłączaniu prądu/, lub przeciwne /przy włączaniu/ z kierunkiem prądu w cewkach pierwotnych, więc porządek łączenia cewek powinien być identyczny po stronie pierwotnej i wtórnej /v.układ połączeń/ wtedy wyindukowane SEM-e mają ten sam kierunek.

Ćwiczenia 4 i 12.

4. Pomiar ilości elektryczności amperogodzinomierzem i cechowanie tegoż.

12. Pomiar pracy elektrycznej watogodzinomierzem i cechowanie tegoż.

S p o s ó b d z i a ł a n i a i b u d o w a l i c z n i k ó w e l e k t r y c z n y c h. Celem licznika elektrycznego jest pomiar zużycia energii elektrycznej danego uerządzenia. Energia /praca/, jaką licznik rejestruje, waraża się dla prądu stałego wzorem:

$$A = U.I.t$$

Jeżeli obciążenie nie jest stałe, lecz waha się, wzór się przedstawi:

$$A = \int_0^t U.I.dt.$$

Zależnie od zasady działania możemy liczniki podzielić na: 1/ elektrolityczne, 2/ wahadłowe, 3/ elektrodynamiczne, 4/ magnetomotoryczne, 5/ indukcyjne.

Jako liczniki pracy elektrycznej najwięcej rozpowszechnione są obecnie dla prądu stałego liczniki elektrodynamiczne, a dla prądu zmiennego liczniki indukcyjne; do pomiaru zaś ilości elektryczności przy prądzie stałym używa się liczników magnetomotorycznych, przy czym ilość elektryczności wyraża się wzorem:

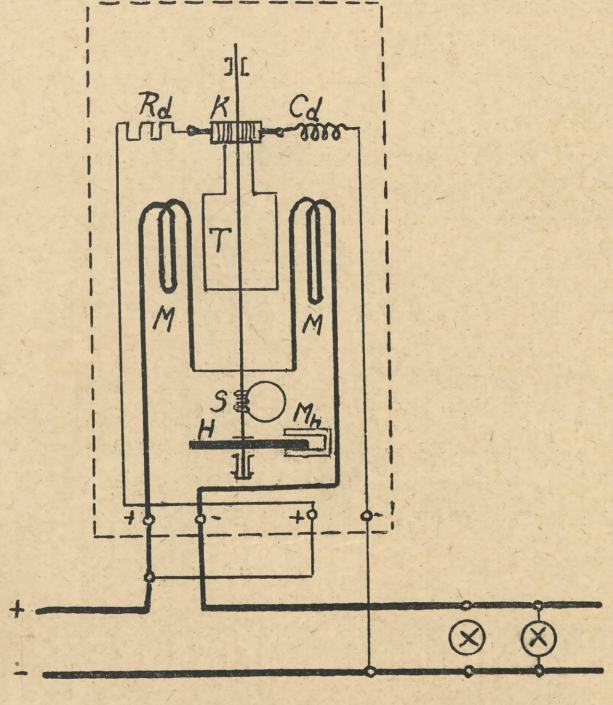
$$Q = \int_0^t I.dt$$

a przy stałej wartości prądu:

$$Q = I.t.$$

a/. W a t o g o d z i n o m i e r z p r ą d u s t a ł e g o. Budowa jego opiera się na zasadzie elektrodynamometru. Twornik,połączony jak cewka napięciowa watomierza i nie posiadający żelaza, wiruje w polu magnetycznym, wytworzonym przez cewki M - M /również bez żelaza/, które znów są połączone, jak cewka prądowa watomierza i pełnią rolę magnesów. Obroty twornika przenoszą się za pomocą mechanizmu zegarowego na liczydło. Cewka C_d,posiadająca już rdzeń żelazny,ma za zadanie wytworzyć dodatkowe pole, dla wywoałnia dodatkowego momentu na pokonanie tarcia wszędzie, gdzie ono w liczniku występuje. Moment ten, jak widać, nie zależy zupełnie od obwodu prądowego i jest tylko zależny od prądu w obwodzie napięciowym, czyli od napięcia.

Z takiego łączenia cewki dodatkowej wynikają niepożądane skutki,że motorek jest w możności ruszyć, jako szeregowy, pod samym tylko napięciem, chociażby odbiorniki zostały w całości odłączone. Zdarza się to wtedy, gdy napięcie U wzrośnie ponad pewną granicę.



T - twornik

M - M - cewki, pełniące rolę magnesów

K - kolektor

C_d - cewka dodatkowa

R_d - opór dodatkowy /jak w watomierzu/

H - tarcza hamująca

M_h - magnes hamujący

S - ślimak do przekładni liczydła.

Wyłączanie odbiorników odbywa się zwykle za licznikiem, dlatego cewka napięciowa /twornik/ znajduje się zawsze pod małym prądem i przez to zużywa pewną moc. To zużycie wynosi 1,5 do 2 Wat na 100 V napięcia i stano-

wi stratę, którą ponosi elektrownia /strata biegu jałowego/. Obwód zaś prądowy zużywa 1 do 1,5 % mocy pobieranej; zużycie to jest wykazane przez liczydło, stratę zatym ponosi konsument.

Wszystkie części rotujące motorka są bardzo lekkie, mimo to jednak posiadają pewną bezwładność, na pokonanie której potrzeba pewnego minimalnego pola w cewkach M - M. Jeśli więc obciążenie leży poniżej pewnego minimalnego prądu, jaki jest potrzebny na wytworzenie tego pola, licznik nie rusza, pomimo, że odbiorniki są załączone. Stratę oczywiście ponosi elektrownia. I ten fakt również normują przepisy /patrz dalej/.

Przy łączeniu zwracać należy baczną uwagę na to, by nie zmylić zacisków. Omyłki tego rodzaju mogą spowodować zwarcie w liczniku i przepalenie się zwojów, lub zmianę kierunku obrotów tarczy, a zatym liczydła. Można go użyć na prąd zmienny, pod warunkiem, że zwoje nie posiadają samoindukcji, w szczególności zaś obwód napięciowy.

W y p r o w a d z e n i e w z o r ó w d l a w a t o g o d z i n o m i e r z a. Jeśli oznaczymy przez I_{tw} prąd w tworniku motorka, zaś przez O_{tw} ciek magnetyczny z cewki M - M, przechodzący przez twornik, to moment obrotowy motorka:

$$M_d = C.I_{tw}.\Phi_{tw} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad \ldots\ldots\ldots a/$$

Ale I_{tw} jest proporcjonalne do U, gdyż:

$$I_{tw} = \frac{U}{R_d + R_{tw} + R_{Cd}}$$

zaś O_{tw} do prądu w obwodzie głównym I, gdyż:

$$\Phi_{tw} = \frac{0,4.\pi.I.z.q}{l}, \text{ zatym:}$$

$$M_d = C''.I.U \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad \ldots\ldots\ldots b/$$

Moc dostarczana przez licznik wyraża się znanym wzorem:

$$P_1 = M_d.\omega \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad \ldots\ldots\ldots c/$$

Chyżość kątowa jest proporcjonalna do ilości obrotów na minutę "n", co uwzględnimy we wzorze c/ i podstawimy równocześnie M_d ze wzoru b/:

$$P_1 = C_1.n.I.U$$

Moc tę zużywa się wyłącznie na wytworzenie prądów wirowych w tarczy hamulcowej /dla pokonania tarcia służy osobna cewka/.

Strata wskutek prądów wirowych w 1 cm^3 przewodnika wynosi według Steinmetza:

$$P_w = \beta.\nu^2.B_{max}^2.10^{-7} \text{ wat/cm}^3$$

gdzie β jest to spółczynnik proporcjonalny do kwadratu grubości blachy, a odwrotnie do jej oporności właściwej, ν jest to liczba cykli magnesowań w sekundzie. B_{max} - największa wartość indukcji, moc wytworzona w tarczy hamulcowej P_2 jest proporcjonalna do kwadratu obrotów, gdy β i B_{max} są stałe, czyli:

$$P_2 = C_2.n^2$$

ale P_1 musi być równe P_2, czyli

$$C_1.n.I.U = C_2.n^2, \text{ skąd}$$

$$I.U = C.n$$

Ilość obrotów tarczy w jednostce czasu jest proporcjonalna do mocy zużytej przez odbiorniki. Pomnóżmy ostatni wzór przez t, dostaniemy:

$$I.U.t = C.n.t$$

Energia więc zużyta przez odbiorniki w czasie t jest proporcjonalna do ilości obrotów, jakie wykonała tarcza licznika w tym samym czasie.

Odwrotność stałej C nazywamy przekładnią licznika i oznaczamy ją zwykle przez X, więc:

$$X = \frac{1}{C}, \text{ a zatym:}$$

Przekładnia jest to ilość obrotów tarczy, odpowiadająca pracy jednostkowej, wykazanej przez liczydło /np. w liczniku kilowatgodzin X = 1000 oznacza, że 1 kWh odpowiada 1000 obrotom tarczy/.

U w a g a: Wyrażenia C nie należy identyfikować ze"stałą licznika", którą później również będziemy oznaczać przez C.

b/ A m p e r o g o d z i n ó m i e r z. Użyty do ćwiczenia amperogodzinomierz jest typu magnetomotorycznego. Licznik ten pracuje jako silnik o stałych magnesach bez żadnego prawie obciążenia, gdyż tarcie jest zmniejszone do minimum. W czasie ruchu twornika występuje w nim przeciwnie skierowana siła elektromotoryczna E, zależna od strumienia Φ_m, liczby zwojów z i liczby obrotów n. Zatym:

$$E = c_1 . \Phi_m . z . n$$

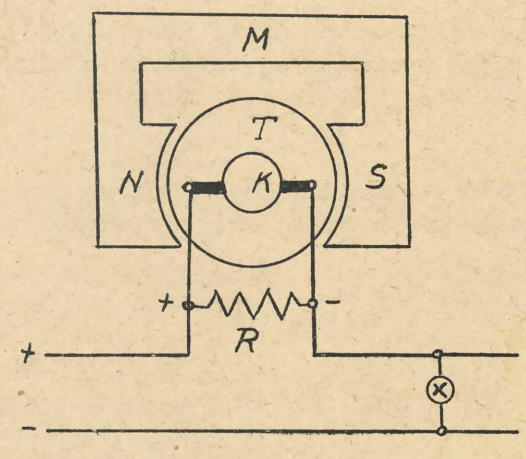
Ponieważ Φ_m i z są stałymi, więc:

$$E = c_2 . n$$

Stąd liczba obrotów w jednostce czasu

$$n = \frac{1}{c_2} . E, \qquad \text{albo}$$

$$n = c_3 . E \ldots\ldots\ldots \qquad \ldots\ldots\ldots 1/$$



Moment przeciwdziałający ruchowi jest tu bardzo mały i pochodzi tylko od tarcia w łożyskach, w kolektorze i liczydle; wobec tego również prąd twornika I_{tw}, potrzebny na wytworzenie powyższego momentu, będzie bardzo mały. Napięcie na zaciskach twornika wynosi:

$$U = E + I_{tw} . R_{tw}.$$

Ponieważ jednak I_{tw} jest bardzo mały, więc $I_{tw} . R_{tw} = 0$, czyli

$$U = \sim E.$$

Podstawiając to w równanie 1/ otrzymamy:

$$n = c_3 . U \ldots\ldots \qquad \ldots\ldots 2/$$

Napięcie U, jak to wynika z rysunku, możemy również znaleźć ze wzoru:

$$U = /I - I_{tw}/ . R.$$

Ale ponieważ $I \geqslant I_{tw}$, więc w przybliżeniu U = I.R, a wstawiając to w równanie 2/ dostajemy:

$$n = c_3 . I . R, \qquad \text{czyli}$$
$$n = c_4 . I$$

Mnożąc obie strony ostatniego równania przez t, otrzymamy:

$$n . t = c_4 . I . t, \qquad \text{skąd}$$
$$I . t = c . n . t \ldots\ldots\ldots \qquad \ldots\ldots\ldots 3/$$

Równanie 3/ wskazuje nam, że ilość elektryczności, jaka przepłynie w czasie t przez licznik jest proporcjonalna do liczby obrotów w tym czasie. Wskutek tego liczniki te są używane jako amperogodzinomierze. Odwrotność stałej "c" nazywamy przekładnią licznika "X", więc:

$$X = \frac{1}{c}$$

O b s ł u g a l i c z n i k a i j e g o s t a ł a. Liczniki należy zawieszać w pomieszczeniach suchych, niezbyt gorących, o możliwie stałej temperaturze, a przy tym wolnych od wstrząśnień, na wysokości patrzenia. Zwracać należy uwagę, że znajdujące się w pobliżu licznika masy żelazne, a także przewody o silnym prądzie mają wpływ na bieg licznika i pokazy jego liczydła. Odległość między osłoną licznika, a znajdującymi się w pobliżu masami żelaza musi przy prądzie stałym wynosić conajmniej 20 cm, przy prądzie zmiennym mniej.

Nie mniejszą uwagę zwracać należy na możliwość kradzieży prądu przy pomocy odgałęzień od przewodów głównych na torze przed licznikiem. W tym celu elektrownie wymagają, aby przewody doprowadzające do licznika umieszczone były w rurkach opancerzonych, zaś rozdzielnice t. zw. przedzegarowe /przed licznikami się znajdujące/ muszą być umieszczone w metalowych skrzynkach i na klucz zamknięte.

Przy łączeniu licznika należy zwracać uwagę, by nie zmylić końcówek, o czym przedtym wspomniano. Po uruchomieniu skontrolować, czy kierunek obrotów tarczy jest prawidłowy. Do tego celu służy strzałka czerwona, namalowana na osłonie instrumentu; jeżeliby się bieg okazał niezgodny ze strzałką, należy odpowiednio zmienić końcówki przewodów.

Przeciążenie licznika dopuszcza się znaczne /p. niżej "Przepisy"/. Na szyldziku, znajdującym się na froncie osłony, wypisane są wartości prądu, napięcia, jakie odpowiadają pełnemu, t.j. 100%-wemu obciążeniu. Wartości te nazywamy nominalnymi.

Stała licznika "C" jestto liczba, przez którą należy pomnożyć odczyty liczydła A' /A' = $\alpha_2 - \alpha_1$/, aby otrzymać rzeczywiste zużycie energii A:

$$C.A' = A, \quad \text{czyli:}$$

$$C = \frac{A}{A'}$$

Możemy więc stałą wyliczyć ze wzoru:

$$C = \frac{\frac{U.I.t}{60.1000}}{\alpha_2 - \alpha_1}$$

gdzie t podaje czas w minutach, α_1 i α_2 odczyty licznika w kilowatogodzinach, lub dla małych obciążeń ze wzoru:

$$C = \frac{\frac{U.I.t}{60.1000}}{N : X}$$

gdzie X jest to przekładnia licznika, a N - liczba obrotów tarczy.

Stała licznika jest zwykle "jeden", t. zn. że liczydło podaje nam wprost ilość takich jednostek, na jakie opiewa nazwa licznika. Jednakże z biegiem czasu stała aparatu zmienia się. Na zmianę stałej wpływa wiele czynników, zależnie od budowy i warunków pracy. Zwykle dopuszcza się pewien procent błędu /p. przepisy/, po przekroczeniu którego należy licznik dać do naprawy.

Jeżeli instalacja ma pozostać przez dłuższy czas w stanie nieczynnym, powinno się licznik odłączyć od sieci.

P r z e p i s y d l a l i c z n i k ó w. Wyciąg z V. D. E. D o p u s z c z a l n e g r a n i c e b ł ę d ó w /dla prądu stałego/. Licznik jest dopuszczony do użycia, gdy przy temperaturze otoczenia 15° do 20° C odpowiada następującym wymaganiom:

a/ błąd licznika, obliczony dla różnych obciążeń w granicach od 5 % do 100 % obciążenia nominalnego nie może nigdzie przekraczać:

$$\pm B\ \% = 3 + 0{,}3.\frac{P_n}{P},$$

w stosunku do każdorazowego rzeczywistego obciążenia /P_n - nominalne obciążenie licznika, P - rzeczywiste obciążenie/.

b/ Jeśli nominalne natężenie prądu zostanie przekroczone o x %, to dopuszczalny błąd licznika "B" może wynosić 0,1 % więcej, niż wypada ze wzoru wyżej podanego. To postanowienie jest ważne tylko dla natężeń nie większych, jak 125 % natężenia nominalnego.

c/Najmniejsze obciążenie, przy którym licznik już powinien ruszyć nie może być większe, jak 1 % obciążenia nominalnego. Dla liczników watogodzin prądu stałego obowiązuje 2 %.

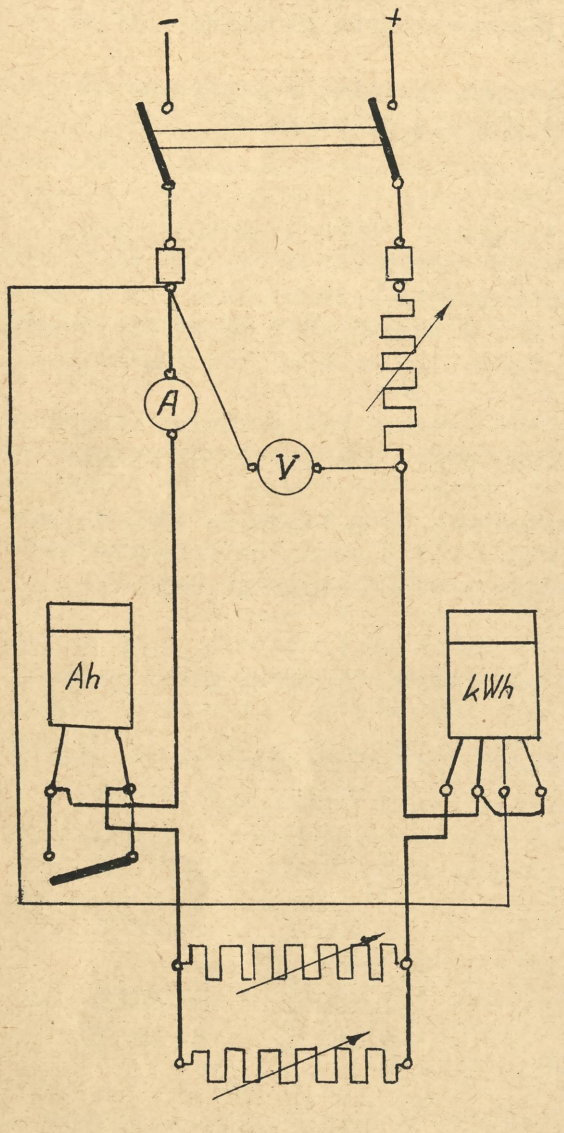
d/ W czysie, gdy odbiorniki są odłączone, bieg licznika wprzód, lub wstecz nie może wynosić więcej, niż to odpowiada 0,2 % obciążenia nominalnego. To postanowienie jest ważne aż do napięcia, przekraczającego napięcie nominalne o 10 %.

P r z e c i ą ż e n i e l i c z n i k ó w. Liczniki można przeciążać, trzymając się następujących dat:

	Prąd nominalny amperów	Przeciążalność przez czas 2 minut	2 godzin
Liczniki prądu zmiennego trójfazowego		o 200 %	o 100 %
Liczniki amperogodzin dla prądu stałego	1,5 i 3	o 200 %	o 100 %
Liczniki watogodzin dla prądu stałego		o 100 %	o 50 %
Wszystkie liczniki	5 do 30 50 do 10000	o 50 %	o 25 %

P r z e b i e g ć w i c z e n i a. Aby mieć możność badania równocześnie wato- i amperogodzinomierza, zrobiono układ niżej podany. Badanie polega na 1/ kontroli kierunku obrotu części ruchomej, 2/ zbadaniu, jakie jednostki pokazują liczydła, 3/ wyznaczeniu przekładni watogodzinomierza, 4/ odczytaniu najmniejszego prądu, przy którym zdecydowanie licznik rusza, 5/ wyznaczeniu stałej, 6/ próbie biegu jałowego /tylko dla watogodzinomierza/ Dla oszczędzenia czasu pierwsze trzy badania możemy wykonać za jednym zachodem w ten sposób, że załączamy obciążenie,/żarówki/ i patrzymy, czy kierunek obrotu części ruchomej jest zgodny ze strzałką na pokrywie. Gdyby strzałki nie było, wtedy można się orientować tylko na podstawie tego, czy liczba wskazana liczydłem rośnie, czy maleje. Gdyby kierunek był fałszywy tak w watogodzin- jak i amperogodzinomierzu, to należy zmienić kierunek prądu obciążenia, a o ile tylko w watogodzinomierzu, to należy zmienić kierunek prądu w obwodzie napięciowym. Teraz należy rozpocząć liczenie ilości obrotów tarczy

watogodzinomierza, notując wskazania liczydła tak watogodzinomierza "α_1", jak i amperogodzinomierza "α'_1" w chwili rozpoczęcia, oraz czas, kiedy to nastąpiło. Aby wygodnie było liczyć, należy dać takie obciążenie, by tarcza nie obracała się ani za prędko ani za powoli. Czym więcej obrotów naliczymy, tym pomiar będzie dokładniejszy, bo błędy odczytów będą procentowo mniejsze; naliczywszy np. u nas 387 obrotów, notujemy:



1/ czas, w którym nastąpiło tyle obrotów,
2/ wskazania liczydeł "α_2" i "α'_2" z końcem ostatniego obrotu. Znając więc napięcie, natężenie i czas, mamy możność obliczenia tak pracy, jak i ilości elektryczności, a przez porównanie ze wskazaniami kilowatogodzinomierza $\alpha_2 - \alpha_1$ i amperogodzinomierza $\alpha'_2 - \alpha'_1$ możemy wyliczyć, jakie jednostki pokazują liczydła. Teraz wiemy już, jaką pracę wskazał nam watogodzinomierz w czasie liczenia N obrotów, więc dzieląc te obroty przez wskazaną pracę w jednostkach pokazanych przez watogodzinomierz otrzymujemy przekładnię, t.j. liczbę obrotów tarczy licznika, gdy watogodzinomierz wskaże zużycie jednostki pracy:

$$X = \frac{N}{\alpha_2 - \alpha_1}$$

W analogiczny sposób możnaby wyliczyć przekładnię dla amperogodzinomierza, gdyby liczone były jego obroty.

Celem znalezienia najmniejszego prądu załączamy tylko jedna /najsłabszą/ żarówkę. Stwierdzamy, że licznik idzie, mimo, że prąd wynosi 0,95 % I_{nom}, więc licznik odpowiada tu przepisom, które powiadają: najmniejsze obciążenie, przy którym licznik powinien już ruszyć, nie może być większe od 2 % obciążenia nominalnego.

Stałą watogodzinomierza badamy dla 100 %, 50 % , oraz 10 % obciążenia nominalnego. Błąd licznika obliczamy wzorem:

$$B\,\% = \frac{A' - A}{A} \cdot 100 = \frac{1 - C}{C} 100$$

Stała dla dobrego nowego licznika wynosi zwykle "1", czyli błąd B % = 0. Pełne obciążenie /100 %/ należy u nas utrzymać przez 7 minut, a 50 % przez 14, aby mieć mniej więcej tę samą dokładność. Przy obciążeniu 10 % nominalnego liczyć należy obroty tarczy /~ 35/. Gdy obciążenie przekracza 5 A, należy zewrzeć amperogodzinomierz i włączyć go z powrotem dla I = 5 A i to jest 100 % obciążenia nominalnego dla niego; dla 2,5 A, t.j. 50 % nie badano amperogodzinomierza, tylko dla I = 1 A, t. j. 20 %, aby wykonać pomiar równocześnie z kilowatogodzinomierzem, dla którego wynosiło to 10 %.

Teraz wyłączamy wszystkie żarówki /I = 0/ i podnosimy napięcie do 121 V /o 10 % nad nominalne/ i stwierdzamy, że tarcza nie rusza, więc tu licznik odpowiada przepisom.

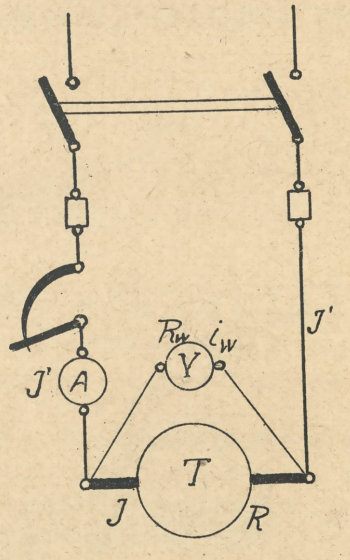
Ć w i c z e n i e 6

P o m i a r o p o r n o ś c i z p o m i a r ó w n a p i ę c i a i n a t ę ż e n i a p r ą d u

Znając spadek napięcia na pewnym oporze, oraz natężenie prądu, przezeń przepływającego, możemy, opierając się na prawie Ohma, wyliczyć oporność tego oporu:

$$R = \frac{U}{I} \quad \ldots\ldots\ldots \qquad \ldots\ldots\ldots 1/$$

W zależności od sposobu połączenia użytych do pomiaru instrumentów rozróżniamy: 1/ łącznię napięciową, 2/ łącznię prądową.



1/ Ł ą c z n i a n a p i ę c i o w a. Przy tym układzie instrumentów mierzymy rzeczywiście spadek napięcia na badanym oporze, $I' = I + i_w$, wyliczona więc oporność /R'/ na podstawie uskutecznionych pomiarów jest różna od rzeczywistej wielkości /R/.

$$R = \frac{U}{I'} = \frac{U}{I + i_w}; \qquad R = \frac{U}{I}$$

Różnica między obu wielkościami będzie mała, gdy i_w będzie w stosunku do I również małe, czyli, gdy $i_w \leqslant I$, a ponieważ:

$$i_w = \frac{U}{R_w}, \quad a \quad I = \frac{U}{R}, \quad \text{więc gdy}$$

$$\frac{U}{R_w} \leqslant \frac{U}{R}, \quad \text{czyli w końcu,}$$

gdy:

$$R_w \geqslant R.$$

Tej więc łączni używamy do pomiaru oporności małych w stosunku do oporności użytego woltomierza /np. oporność uzwojeń twornika, jak na schemacie/.

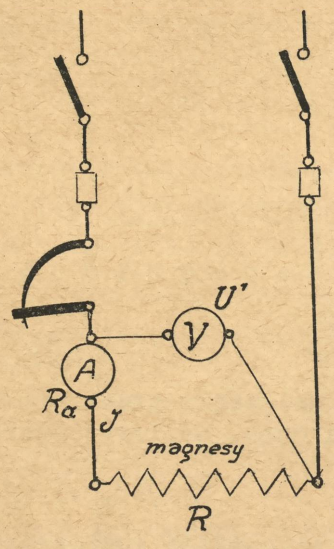
2/ Ł ą c z n i a p r ą d o w a. Przy tej łączni naodwrót, mierzymy za duże napięcie: $U' = U + I.R_a$, natomiast rzeczywistą wartość natężenia prądu, przepływającego przez badany opór /R/. I tutaj dostajemy z pomiarów wielkość R', różną od R, przy czym:

$$R = \frac{U}{I}, \quad \text{zaś} \quad R' = \frac{U + I.R_a}{I}$$

Wielkości te będą się mało od siebie różnić o ile $I.R_a$ będzie małe w stosunku do spadku napięcia w badanym oporze /U/, a więc, gdy: $I.R_a \leqslant U$, a ponieważ: $U = I.R$, więc, gdy $I.R_a \leqslant I.R$, czyli w końcu, gdy:

$$R_a \leqslant R.$$

Łączni tej używamy więc do pomiaru oporności dużych w stosunku do oporności użytego amperomierza /np.oporność uzwojeń magnesów przy maszynie upustowej/.



Zadaniem ćwiczenia jest pomiar oporności uzwojeń twornika i magnesów maszyny upustowej /bocznikowej/ przy zastosowaniu odpowiedniej łączni. Pomiar powinien być uskuteczniony prędko, by badany opór się nie nagrzewał. Dla tej samej przyczyny natężenie prądu przy pomiarze nie powinno być zbyt wielkie /nie powinno przekraczać 1/5 prądu nomin./. Przy pomiarze oporności twornika natężenie prądu pomiarowego również ogranicza ta okoliczność, że wskutek przepływu tegoż prądu może powstać w w polu szczątkowego magnetyzmu moment obrotowy $/M_d = C.I.\Phi_{tw}/$ większy od momentu tarcia /tarcie w łożyskach, szczotek/, więc tornik może ruszyć i przybrać zbyt wielką ilość obrotów, bo Φ_{tw} jest małe, a:

$$n = \frac{E}{c.\Phi_{tw}}$$

Ogólnie można kierować się taką zasadą: łączni prądowej używa się tam, gdzie mamy do czynienia ze stosunkowo wysokim napięciem, a małym natężeniem, łączni napięciowej zaś, gdy jest naodwrót.

Ć w i c z e n i e 1 3.

W y z n a c z e n i e s p r a w n o ś c i g r z e j n i k a e l e k t r y c z n e g o

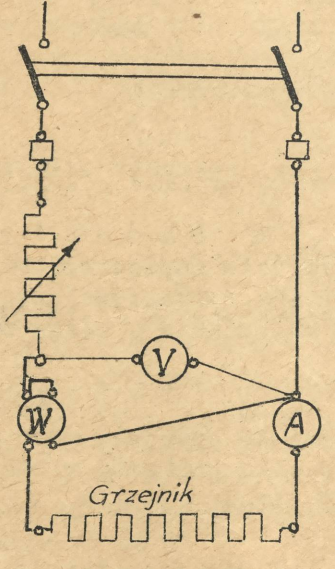
Do naczynia wlewamy dokładnie 1 litr wody o temperaturze T_1 stopni Celsjusza i załączamy grzejnik na sieć, mieszając stale zawartość. Odczytujemy co dwie minuty aparaty i termometr T, aż do zagotowania wody. Specjalnie notujemy odczyty, gdy T osiągnie 20° C.

Gdy woda zacznie wrzeć przy temperaturze T_2, odłączamy sieć, mierzymy objętość cieczy, /na wadze, lub w naczyniu cechowanym/ i konstatujemy ubytek "g" gramów wskutek wyparowania. Do grzejnika doprowadziliśmy energię elektryczną w ilości:

$$A_d = \frac{W.t_{sek}}{3600} \text{ watogodzin}$$

Otrzymaliśmy zaś:

$$/T_2 - T_1/.G_g \text{ kal ciepła}$$



na ogrzanie wody, oraz 539 g.kal na wyparowanie g gramów wody. Pozatym ciepło otrzymane wynosi: $/T_2 - T_1/.G_g + 539\ g$ Kalorýj gramowych, co zamienione na kcal i energię elektryczną daje:

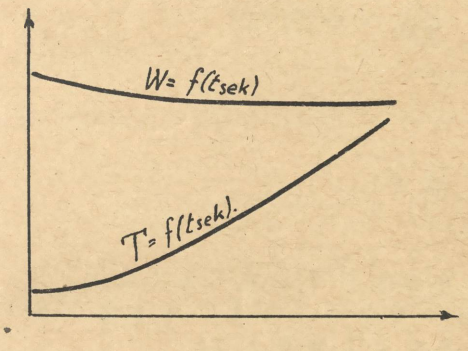
$$A_e = \frac{/T_2 - T_1/.G_g + 539.g}{1000} .1,164 \text{ watogodzin}$$

A zatym sprawność grzejnika /w procentach/:

$$\eta = \frac{A_e}{A_d} = \frac{/T_2 - T_1/.G_g + 539.g}{W.t_{sek}} .3,6.1,164$$

gdzie: T_1 i T_2 - temperatury początkowa i końcowa wody w ^oC
G_g - ilość cieczy w gramach przed zagotowaniem,
g - " " " zamienionej w parę,
W - średnie zużycie mocy w watach
t_{sek} - czas w sekundach, w jakim nastąpił przyrost temperatury całkowity.

Na podstawie przeprowadzonych wyżej pomiarów możemy wykreślić krzywe: $T = f/t_{sek}/$ i $W = f/t_{sek}/$, a z przebiegu ich wyprowadzić wnioski: i tak: z pierwszej krzywej o szybkości przyrostu temperatury, z drugiej o zachowaniu się oporności drutu opornikowego wobec wzrastającej temperatury.



Mając dane zużycie energii w grzejniku, możemy obliczyć koszt zagotowania jego nominalnej zawartości wody przy taryfie np. Y zł za 1 kWh:

$$\text{Koszt} = \frac{W.t_{sek}}{3600.1000}.Y \text{ w złotych}$$

Z a m i a n ą e n e r g i i e l e k t r y c z n e j w c i e p ł o. Prąd elektryczny, przepływając przez przewód, nagrzewa go. Wywiązujące się przy tym ciepło, t.zw. ciepło Joule'a, można wyzyskać do celów praktycznych w przyrządach, zwanych grzejnikami.

Pod słowem"grzejnik" w ścisłym tego słowa znaczeniu rozumiemy tylko tę część przyrządu, gdzie dokonywa się przemiana energii elektrycznej w ciepło. W garnuszku elektrycznym zatym grzejnikiem jest urządzenie zamknięte pod dnem naczynia.

Grzejnik zbudowany jest jak opornica z drutu oporowego /p. niżej Uwaga/, nawiniętego na porcelanowe lub azbestowe wałki, albo płytki, bywa też zwijany spiralnie, lub wężykowato; wyrabia się je również jako płytki mikowe, powleczone cienką warstwą metali szlachetnych. Wszystko musi być zamknięte lub zalepione szczelnie, aby uniknąć wpływu wilgoci.

Ciepło, jakie się w grzejniku wywiązuje, musi być równocześnie odbierane przez otoczenie, w przeciwnym razie materiał oporowy nagrzewa się zbytnio, co zwykle powoduje przepalenie. A zatym grzejniki powinny być przyłączone do prądu po napełnieniu ich cieczą, zaś odłączone przed opróżnieniem. Analogicznie z żelazkami, po rozgrzaniu należy zaraz prasować, zaś piecyki elektryczne powinny być ustawione w prądzie powietrza.

Zamiana jednostek pracy na jednostki ciepła.

1 Watosekunda = $\frac{1}{9,81}$ kgm = 1 Joule; 1 kgm = $\frac{1}{0,427}$ cal /mech.równoważnik ciepła/.

1 Watosekunda = $\frac{1}{9,81 \cdot 0,427}$ = 0,239 cal.

1 Wh = /0,239 . 3600/ : 1000 = 0,859 kcal

1 kWh = 0,859 . 1000 kcal = 859 kcal

1 cal = $\frac{1}{0,239}$ = 4,190 Watosek. 1 kcal = $\frac{1}{0,859}$ = 1,164 Wh.

Uwaga: Materiały na drut oporowy.

Nikielin	oporność	właściwa	0,42
Konstantan	"	"	0,50
Excelsior	"	"	0,86
Nowe srebro	"	"	0,36
Nikiel czysty	"	"	0,12
Manganin	"	"	0,44

---ooOoo---

Miedź w temperaturze 20° C ϱ_{20} = 0,01756

Ćwiczenia 15 i 17

15. Pomiar średniego natężenia światła /w poziomie/ żarówek metalowych i węglowych przy nominalnym napięciu.

17. Badanie natężenia światła żarówek metalowych i węglowych przy zmiennym napięciu.

Energia, jaką ciało świecące rozsyła w jednostce czasu w postaci fal świetlnych, rozchodzi się prostolinijnie na wszystkie strony jako t.zw. strumień świetlny /F°/. Wyobraźmy sobie ciało świecące skoncentrowane w punkcie, to strumień świetlny będzie się rozchodził we wszystkich kierunkach równomiernie po promieniach kuli, zatoczonej ze środka światła; wówczas przez pewną powierzchnię zamkniętą kątem bryłowym $d\omega$, przechodzi strumień dF^o; stosunek:

$$I^o = \frac{dF^o}{d\omega}$$

nazywamy natężeniem światła /światłością/.

Uwaga. Wielkość kąta bryłowego daje nam stosunek powierzchni /s/, wyciętej przezeń na powierzchni kuli, do powierzchni kwadratu, zbudowanego na promieniu tejże kuli, czyli:

$$\omega = s : r^2.$$

Jednostką kąta bryłowego jest stereoradian; kąt ten wycina na powierzchni kuli o jednostkowym promieniu powierzchnię jednostkową. Kąt pełny bryły wynosi:

$$\omega = \frac{s}{r^2} = \frac{4.r^2.\pi}{r^2} = 4.\pi.$$

W ogólności zależnie od kształtu ciała świecącego, natężenie światła w różnych kierunkach jest różne, lecz w wypadku punktu świecącego jest jednakowe we wszystkich kierunkach i wynosi:

$$I = \frac{dF^o}{d\omega} = \frac{F^o}{4\pi},$$

czyli jest to ta część strumienia świetlnego, która przypada na jednostkowy kąt bryłowy.

Jednostką natężenia światła jest 1 św. normalna, to jest. świeca normalna. Takie natężenie posiada w płaszczyźnie poziomej świeca Hefnera /płomień o wysokości 4 cm knota bawełnianego o średnicy 8 mm, zanurzonego w octanie amylowym/. Inną jednostką jest świeca międzynarodowa, czyli 1 św. przyczym 1 św. = 1,11 św. normalnej

W ogólności w różnych kierunkach mamy różne natężenie światła. Rozróżniamy więc:

I_h - średnie natężenie światła poziome: jestto średnia wartość natężeń światła, mierzonych w różnych kierunkach w płaszczyźnie prostopadłej do osi pionowej ciała świecącego, a przechodzącej przez jego środek.

I_v - średnie natężenie światła pionowe: jestto średnia wartość natężeń, mierzonych w płaszczyznach, przechodzących przez oś pionową ciała.

I_p - średnie natężenie światła przestrzenne /sferyczne/: jestto średnia wartość natężeń, mierzonych w płaszczyźnie poziomej i w płaszczyznach pionowych.

I_{pp} - średnie natężenie półprzestrzenne; może być dolne /odnosi się do półkuli dolnej/, lub górne /do półkuli górnej/.

Natężenie światła w otoczeniu punktu świecącego podaje nam wzór:

$$I^o = \frac{dF^o}{d\omega}, \text{ skąd } dF^o = I^o.d\omega;$$

chcąc dostać strumień świetlny, przypadający na kąt bryłowy ω_1, musimy powyższe równanie scałkować:

$$F^o = \int^{\omega} I^o.d\omega$$

W wypadku jednakowego I^o we wszystkich kierunkach dostajemy:

$$F^o = I^o.\int^{\omega_1} d\omega, \text{ czyli } F^o = I^o.\omega_1.$$

Podstawiając w powyższej równości: I^o = 1 św. normalna, oraz $\omega_1 = 1$, dostajemy również:

$$F^o = 1.1 = 1,$$

czyli strumień świetlny jednostkowy.

Jednostka strumienia świetlnego jestto ta część całkowitego strumienia, wysyłanego w jednej sekundzie, która przypada na jednostkowy kąt bryłowy, przyczym natężenie światła musi być we wszystkich kierunkach jednakowe; jednostka ta nazywa się "lumen" /lum/.

Chcąc dostać całkowity strumień świetlny, wysyłany przez punkt świecący, musimy całkowanie przeprowadzić dla pełnego kąta bryłowego, czyli dla $\omega = 4\pi$, a więc:

$$F^o = \int^{4\pi} I^o.d\omega.$$

W wypadku jednakowego I^o we wszystkich kierunkach:

$$F^o = I^o.\int^{4\pi} d\omega, \quad \text{czyli} \quad F^o = 4\pi.I^o.$$

Strumień świetlny, padając na pewną powierzchnię, wywołuje na niej jasność E^o. Miarą jasności danej powierzchni jest wielkość strumienia przypadającego na jej jednostkę. W wypadku więc punktu świecącego, jasność na powierzchni kuli koncentrycznej o promieniu "r" wynosi:

$$E^o = \frac{F^o}{4.r^2.\pi} = \frac{4.\pi.I^o}{4.r^2.\pi} = \frac{I^o}{r^2}$$

To samo równanie odnosi się do powierzchni płaskiej, o ile jej odległość jest taka, że płaszczyznę tę możemy uważać za cząstkę powierzchni kuli i światło pada na nią prostopadle. Mamy więc:

$$E^o = \frac{I^o}{l^2}$$

Jeśli I^o = 1 św. normalna, a l^2 = 1 m^2, to E^o = jednostce. Jednostka jasności nazywa się luks /luks/. Jasność taką posiada płaszczyzna, ustawiona prostopadle do promieni świetlnych w odległości 1 metra od źródła światła o natężeniu 1 św. normalnej.

U w a g a: Jednostkę jasności możemy jeszcze inaczej zdefiniować. Przypuśćmy, że na pewną powierzchnię, dowolnie ustawioną względem promieni światła, o wielkości "s" m^2 pada strumień świetlny "F^o" lum; miarą jasności jest iloraz:

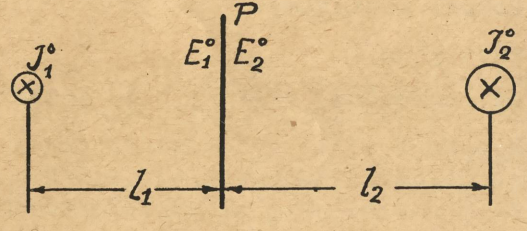
$$E^o = \frac{F^o}{s};$$

o ile przyjmiemy, że F^o = 1 lum, zaś s = 1 m^2, to jasność jest jednostkowa i wynosi 1 luks. Jasność więc jednego luksa posiada powierzchnia, o ile na jej metr kwadratowy pada strumień o wielkości jednego lumena.

Użyte tu: św., luks, lum. nie są znakami jednostek, tylko skrótami. Znaki tych jednostek nie są jeszcze u nas ustalone.

O ile weźmiemy dwa źródła światła, to wytworzą one na pewnej płaszczyźnie /P/ jasności:

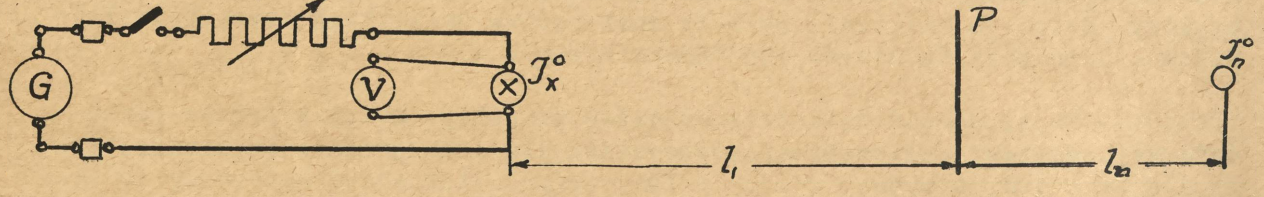
$$E_1^o = \frac{I_1^o}{l_1^2} \quad \text{i} \quad E_2^o = \frac{I_2^o}{l_2^2};$$



gdy obie jasności są sobie równe, wówczas:

$$\frac{I_1^o}{l_1^2} = \frac{I_2^o}{l_2^2} \quad \text{lub wkońcu:} \quad \frac{I_1^o}{I_2^o} = \frac{l_1^2}{l_2^2}$$

Na powyższej równości opiera się metoda wyznaczania natężenia światła



badanego źródła. Na końcach ławy optycznej ustawiamy źródło normalne /świecę Hefnera/ i żarówkę, której natężenie mamy badać. Do porównywania jasności służy fotometr Bunsena. Wyrównywujemy środki żarówki, fotometru i świecy Hefnera, regulujemy płomień tej świecy na odpowiednią wysokość, a na zaciski żarówki dajemy nominalne napięcie. Następnie przesuwamy fotometr np. od strony

lewej ku prawej, aż jasności wywołane obu źródłami się zrównają. O ile okaże się niemożliwym dokładne wyznaczenie miejsca równej jasności, to wyznaczamy graniczne położenia, przy których staje się już widoczną różnica jasności: l'_x i l'_n, oraz l''_x i l''_n i tworzymy średnie arytmetyczne:

$$l_x = \frac{l'_x + l''_x}{2} \quad \text{i} \quad l_n = \frac{l'_n + l''_n}{2},$$

a z równania:

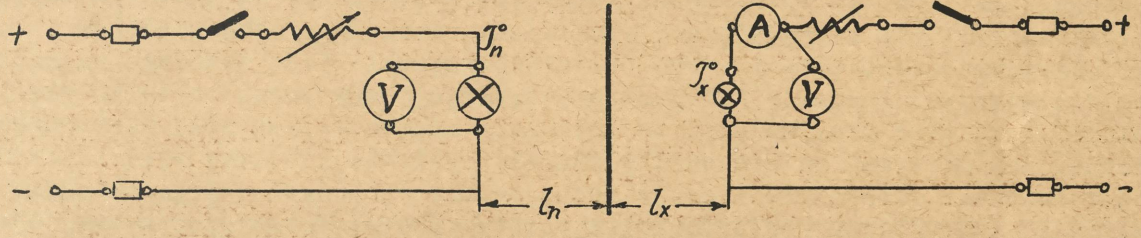
$$\frac{I^o_x}{I^o_n} = \frac{l^2_x}{l^2_n}$$ wyliczamy natężenie światła badanej żarówki:

$$I^o_x = I^o_n \cdot \frac{l^2_x}{l^2_n}$$

I^o_x, I^o_n są to odpowiednie natężenia światła w świecach normalnych, l_x, l_n - odległości źródeł światła od płaszczyzny fotometru. Pomiar ten uskuteczniamy trzy razy, dla trzech różnych długości ławy.

Mając już jedną żarówkę wycechowaną, możemy według niej cechować inne /po jednej metalowej i węglowej przy nominalnym napięciu/.

Drugim zadaniem ćwiczenia jest wyznaczenie natężenia światła I^o_x w zależności od zmienianego napięcia U. Pomiar uskuteczniamy identycznie, jak powyżej, tylko przy jednej długości ławy. Zaczynamy od napięcia, przy którym już zaczyna się żarzyć drucik badanej żarówki i idziemy z napięciem w górę, skokami co 10 V, aż do nominalnego, przy czym równocześnie odczytujemy napięcie i pobierany prąd; zależność tę $I^o_x = f/U/$ badamy dla jednej żarówki metalowej i jednej węglowej.



Na podstawie powyższych pomiarów wykreślamy charakterystyki dla obu żarówek; są to zależności:

1/ Natężenie światła /w świecach/: $I^o_x = f/U/$
2/ Moc /w watach/: $P = f/U/$
3/ Wydajność/w watach na świecę/ $P/I^o_x = f/U/$
4/ Oporność/w omach/: $R = f/U/$.

Przebieg tych krzywych wskazuje nam zachowanie się tej samej żarówki w różnych warunkach, względnie różnych żarówek w tych samych warunkach.

U w a g i. Zadaniem ćwiczenia jest pomiar średniego natężenia światła I^o_h; przy żarówkach metalowych wystarcza jednak wyznaczyć tylko natężenie w którymkolwiek poziomym kierunku, gdyż wskutek nawinięcia drucików jakby na powierzchni walca, we wszystkich kierunkach poziomych natężenie światła jest prawie zupełnie jednakowe. Okoliczność ta jednak nie zachodzi przy żarówce węglowej. Ściśle więc rzecz biorąc, powinniśmy byli dla niej zrobić szereg pomiarów w płaszczyźnie poziomej.

Teoria fotometrii oparta jest na założeniu, że źródłem światła jest punkt świecący; w rzeczywistości zaś tak nie jest. Mimo to jednak na

podstawie

orzeczenia Międzynarodowej Komisji Oświetleniowej /1924/ zależności wyprowadzone na powyższym założeniu, możemy również stosować do źródeł światła w praktyce spotykanych, a od tego idealnego założenia odbiegających, o ile tylko największy strumień źródła światła, prostopadły do osi fotometrycznej, mniejszy jest od 1/35 odległości pomiędzy tym źródłem światła a przesłoną fotometru.

Ćwiczenia 20 i 21.

20. Zdjęcie charakterystyki magnetycznej generatora /biegu luzem/.

21. Generator z obcym wzbudzeniem: zdjęcie charakterystyki napięciowej /zewnętrznej/ i krzywej regulacji.

20. Charakterystyka magnetyczna/biegu luzem/ podaje nam zależność siły elektromotorycznej od prądu wzbudzenia przy stałych obrotach i przy obciążeniu równym zero:

$$E = f/i_m/ \quad \text{przy } n = \text{const. oraz } I = 0 \text{ amperów.}$$

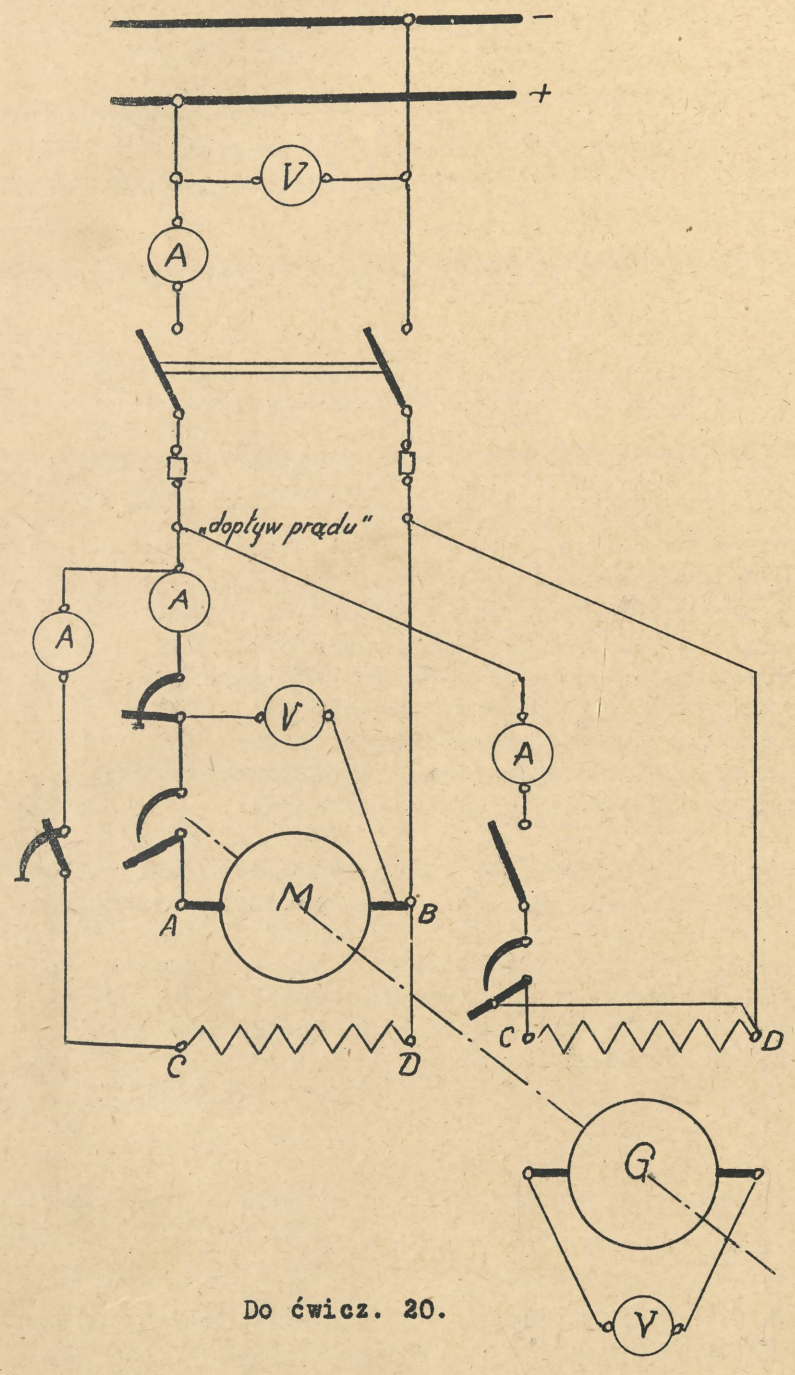
Kształt jej zależy od konstrukcji maszyny i to głównie od wielkości szczeliny między twornikiem a biegunami, i od użytych do budowy maszyny materiałów. Układ połączeń znajduje się na następnej stronie. Obce wzbudzenie dajemy tu dlatego, że I ma być równe zeru. Generator uruchamiamy motorem elektrycznym, bezpośrednio z nim sprzęgniętym, uzyskujemy nominalną ilość obrotów i robimy pierwszy odczyt przy $i_m = 0$. Odczytane napięcie jest wywołane magnetyzmem szczątkowym. Ponieważ "I" jest praktycznie równe zeru, bo tylko płynie do woltomierza, więc przyjmujemy, że odczytane napięcie jest siłą elektromotoryczną. Aby otrzymać dalsze punkty charakterystyki, zamykamy wyłącznikiem obwód wzbudzenia generatora i przez zmniejszanie oporności w jego obwodzie, zwiększamy i_m, utrzymując stale normalne obroty /2000/. W ten sposób znajdujemy około 12 punktów, aż do uzyskania $U_{nom} + I_{nom} \cdot /R_{tw} + R_{bp}/$, starając się zdejmować w ten sposób, by punkty wypadły w mniej więcej równej odległości na krzywej, a nie w stosunku do osi rzędnych lub odciętych, aby otrzymać najpoprawniejszy kształt /ta zasada odnosi się do zdejmowania wszystkich charakterystyk/. Bezpośrednio po tym zaczynamy zmniejszać i_m aż do zera, zdejmując znowu około 12 punktów. Baczną uwagę w czasie zdejmowania tych punktów należy zwrócić na to, by prąd wzbudzający nie wahał, t.zn. gdy i_m wzrasta, to musi stale wzrastać, gdy zaś maleje, to stale maleć, a-by otrzymać punkty rzeczywiście dolnej i górnej gałęzi tej charakterystyki, a nie jakieś pośrednie. Charakterystykę magnetyczną zdejmujemy w górę i na dół, by wiedzieć, jaki wpływ na siłę elektromotoryczną wywiera histereza.

21. Charakterystyka napięciowa /zewnętrzna/ generatora z obcym wzbudzeniem podaje nam zależność napięcia od prądu obciążenia przy stałym prądzie wzbudzenia i stałych obrotach:

$$U = f/I/ \quad \text{przy } i_m = \text{const.} \quad \text{oraz} \quad n = \text{const.}$$

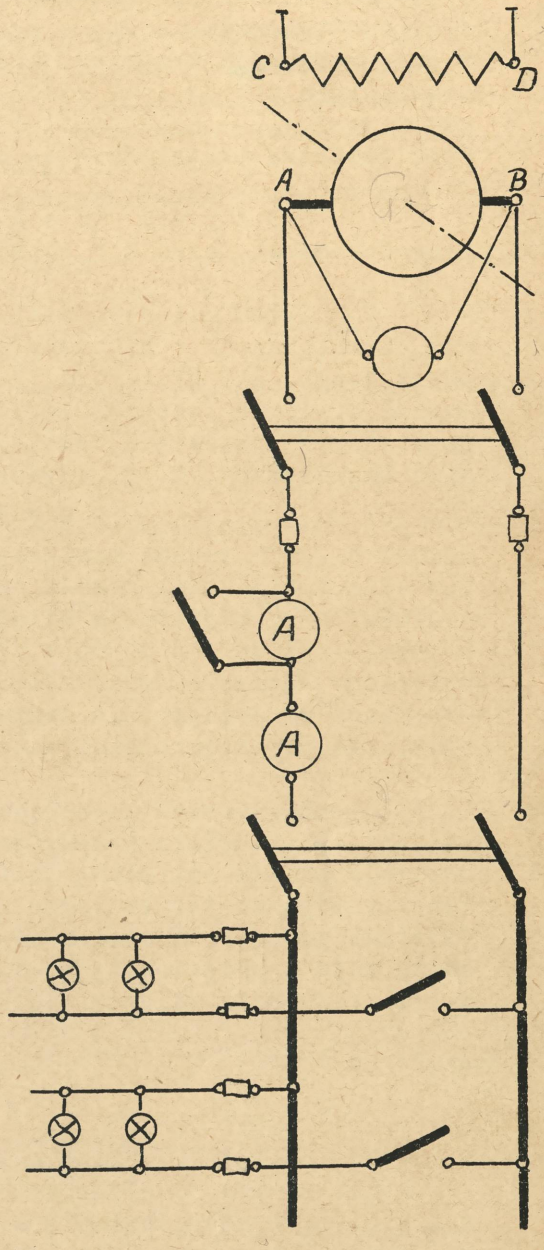
Pomiar przeprowadzamy w ten sposób, że po zrobieniu układu połączeń, /jak niżej/ uruchamiamy generator i wzbudzamy U_{nom} przy n = 2000 obr. na min.

/nominalna/, oraz I = 0 amp. Tak otrzymujemy pierwszy punkt. Następny punkt otrzymujemy, załączając lampki /przekręcając dwa wyłączniki/. Pod wpływem ob-



Do ćwicz. 20.

c.d. jak obok.



Do ćwicz. 21.

ciążenia motor zmniejsza obroty, więc musimy je podnieść do pierwotnej wartości albo regulatorem napięcia /zmniejszając oporność w obwodzie głównym/, albo regulatorem wzbudzenia /zwiększając oporność wzbudzenia/, gdy napięcie motoru jest już nominalne. Gdy obroty są już dobre, t. j. żądane, robimy odczyty: U, I, n = const. i_m = const. /bo nic nie zmieniamy w obwodzie wzbudzenia generatora/. W ten sposób postępując otrzymujemy 11 punktów /20 wyłączników/. Pomiaru wstecz nie robiono, tylko należy uważać przy odciążaniu, aby motor nie otrzymał zbyt dużych obrotów, t.zn. należy uważać, by jego napięcie zmniejszać, a i_m zwiększać.

Kształt charakterystyki napięciowej generatora z obcym wzbudzeniem przewidzieć można w przybliżeniu na podstawie dyskusji wzoru:

$$U = E - I./R_{tw} + R_{bp}/.$$

Czytamy z tego wzoru, że napięcie tu będzie się zmniejszać ze wzrostem obciążenia, a to z dwu powodów: 1/ rośnie odjemnik $I./_{tw} + R_{bp}/$, gdzie R_{tw} = oporność twornika, a R_{bp} = oporność biegunów pomocniczych, oraz 2/ maleje E z powodu reakcji twornika. Wpływy te są małe, dlatego napięcie maleje wolno, szczególnie przy małych natężeniach; dopiero przy natężeniach większych, t.j. gdy $I > I_{nom}$, spadek napięcia staje się silniejszy. Charakterystyka będzie więc zwrócona wklęsłością ku osi odciętych.

K r z y w a r e g u l a c j i podaje nam zależność: $i_m = f/I/$ przy U = const, oraz n = const.

Układ połączeń taki sam, jak dla zdjęcia charakterystyki napięciowej /zewnętrznej/ i pierwszy punkt zdjęty w ten sam sposób. Aby otrzymać punkt drugi, nie wystarcza, jak poprzednio, uzyskać nominalne obroty, ale musimy utrzymać jeszcze pierwotne napięcie generatora, a to uskuteczniamy regulatorem wzbudzenia, zmniejszając jego oporność, by otrzymać większy strumień magnetyczny, t. j. większe E, gdyż:

$$U = E - I.R - U_{szcz}$$

gdzie: U_{szcz} - spadek napięcia w szczotkach. Ponieważ I.R rośnie, a U ma być stałe, więc musi E róść /nie wahać z i_m!/. Tutaj zdejmujemy także ll punktów. Przy odciążaniu należy uważać tutaj nie tylko na to, by motor nie uzyskał zbyt dużych obrotów, lecz także na to, by generator nie miał zbyt wysokiego napięcia /przy odciążeniu mały spadek napięcia w tworniku/, aby ostatnich świecących się lampek nie przepalić. Należy więc zmniejszać obroty, oraz prąd wzbudzenia generatora w miarę odciążania /gaszenia lampek/.

Na podstawie charakterystyki napięciowej możemy powiedzieć, jaki kształt będzie miała krzywa regulacji. Widzimy tam, że zwiększenie obciążenia powoduje spadek napięcia; ponieważ krzywa regulacji żąda U = const., więc możemy to uzyskać /skoro także n = const./ tylko zwiększeniem prądu wzbudzenia. Ponieważ początkowo spadek napięcia jest mały, a później silniej daje się odczuć, więc i przyrost i_m początkowo jest mały, a później silniejszy, czyli krzywa regulacji wklęsłością będzie skierowana do góry.

Ć w i c z e n i e 2 2.

G e n e r a t o r s z e r e g o w y: z d j ę c i e c h a r a k t e r y s t y k i n a p i ę c i o w e j /z e w n ę t r z n e j/ i w y p o ś r o d k o w a n i e w p ł y w u s p a d k u n a p i ę c i a w o p o r a c h w e w n ę t r z n y c h o r a ł r e a k c j i t w o r n i k a.

Aby mieć możność znalezienia reakcji twornika musimy znać prócz charakterystyki napięciowej i oporności uzwojeń twornika i uzwojeń magnesów, także charakterystykę magnetyczną /biegu luzem/. Zdejmujemy ją ściśle w ten sam sposób, jak podano w ćwiczeniu 21-ym, ale tylko jedną gałąź dolną, bo także charakterystyką napięciową będziemy zdejmować tak, że będziemy zwię-

kszać obciążenie. Układ połączeń znajduje się poniżej.

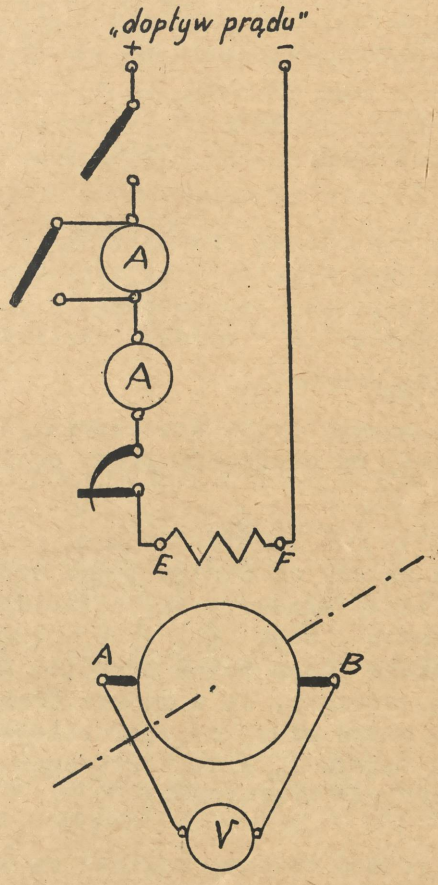
Charakterystyka napięciowa dla generatora szeregowego podaje nam zależność napięcia od prądu obciążenia przy stałych obrotach:

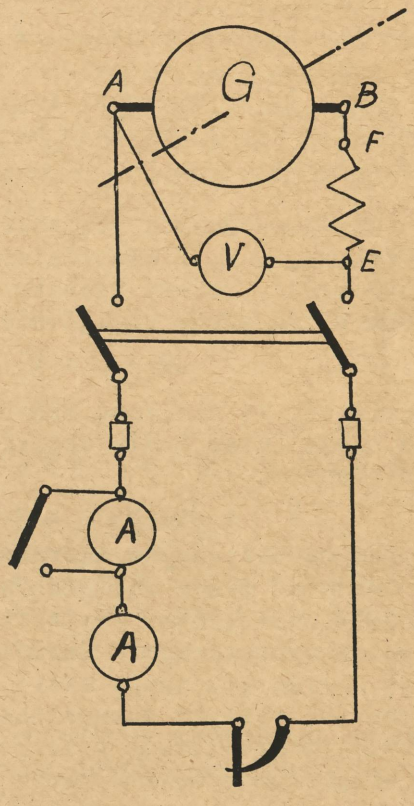
$$U = f/I/ \qquad \text{przy } n = \text{const.}$$

Ponieważ w generatorze szeregowym prąd wzbudzenia jest równocześnie prądem obciążenia, dlatego charakterystyka napięciowa otrzymuje kształt z gruntu różny od kształtu tej charakterystyki przy innych generatorach. Tutaj wychodzimy od małego napięcia /wywołanego remanentem magnetycznym/ przy I = 0. Następnie ze wzrostem I napięcie dochodzi do pewnego maksimum, aby przy dalszym zwiększaniu obciążenia opadać. Że taki kształt musi przyjąć charakterystyka napięciowa generatora szeregowego, wynika to ze wzoru na jego napięcie na zaciskach:

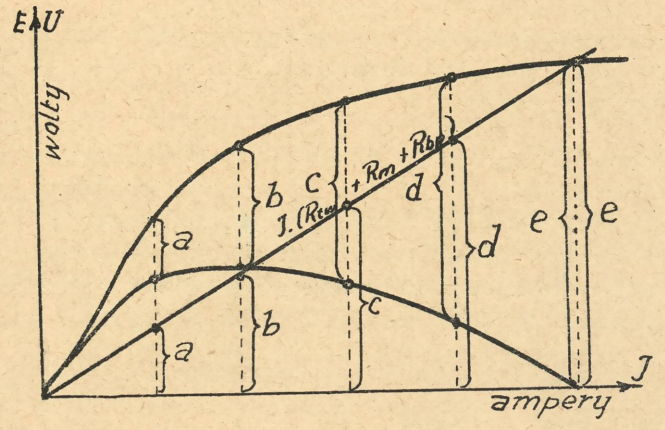
$$U = E - I./R_{tw} + R_m + R_{bp}/ - U_{szcz}$$

gdzie R_m - oporność uzwojeń magnesów. Czytamy z tego wzoru, że mając $E = f/I/$, $/I_m = I$ dla generatora szeregowego/, to musimy od wartości "E" odejmować wielkości: $I./R_{tw} + R_m + R_{bp}/$, aby otrzymać U. Jak wiemy, to E rośnie początkowo bardzo szybko ze wzrostem I, a później, gdy zbliżamy się do nasycenia żelaza w elektromagnesach, bardzo wolno, natomiast odjemnik przedstawia nam





prostą, czyli przyrost dla niego jest wszędzie jednakowy. Początkowo więc, gdy E wzrasta silniej, niż $I./R_{tw} + \ldots./$, mamy przyrost U, później przyrost E odpowiada przyrostowi prostej i mamy maksimum, a następnie E wolniej wzrasta jak odjemnik, więc U musi maleć. Wykreślnie przedstawia to rysunek znajdujący się poniżej.



Pomiar przeprowadzono w ten sposób, że po zrobieniu układu połączeń uruchomiono generator, doprowadzając go do nominalnych obrotów /przy pomocy motoru elektrycznego, sprzęgniętego z generatorem bezpośrednio/. Pierwszy punkt odczytano przy I = 0 amp., a n = 1170 obr. na min., następne przez zmniejszanie oporności oporu zewnętrznego, przez co zmniejsza się n, a rośnie I i U /to ostatnie tylko do pewnego maksimum/; n należy doprowadzić z powrotem do 1170 obrotów, za pomocą regulatora napięcia /do 110 V/, a o ile to nie wystarcza, to resztę regulatorem upustowym /nie przeciwnie!/.

U w a g a. Motor użyty tutaj do napędu generatora jest upustowym; motory takie bardzo mało zmieniają obroty z obciążeniem. Tymczasem tutaj stwierdzamy całkiem poważne zmniejszanie się obrotów. Pochodzi to stąd, że motor nie otrzymuje stałego napięcia, lecz ze wzrostem obciążenia napięcie to maleje, bo jak widzimy w układzie połączeń motoru w ćwiczeniu 20-ym, między szynami i motorem jest wstawiony opór. Napięcie więc motoru: $U_m = U_{szyn} - I.R_{rn}$, gdzie R_{rn} - oporność regulatora napięcia. Czytamy ze wzoru, że przy stałym napięciu szyn, napięcie na zaciskach motoru nie jest stałe, gdy obciążenie się zmienia.

Gdy mamy już zdjętą charakterystykę napięciową /zewnętrzną/ i znamy oporności R_{tw} i R_m i ewentualnie R_{bp} / w naszym wypadku suma tych oporności = 0,568 omów/, możemy skonstruować charakterystykę wewnętrzną, t.j. zależność SEM-ej od prądu obciążenia, przy założeniu: n = const., wedle wzoru:

$$E = U + I./R_{tw} + R_m + R_{bp}/ + U_{szcz}.$$

Należy pamiętać, że wielkość SEM-sej dla tego samego prądu wzbudzenia jest różną dla biegu luzem i dla obciążenia, a zależy od wielkości prądu obciążenia. Wiemy bowiem, że:

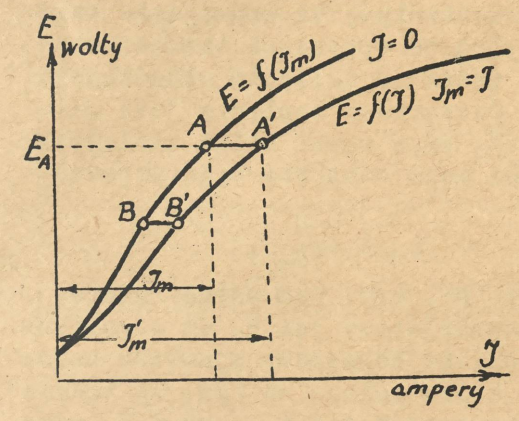
$$E = c.\Phi_{tw}.n, \quad \text{a dla} \quad n = \text{const}, \quad E = c'.\Phi_{tw}.$$

Strumień zaś magnetyczny w tworniku /Φ_{tw}/ nie zależy od samego prądu wzbudzenia, ale także od prądu obciążenia, który wytwarza własne pole, osłabiające i deformujące pole główne /wytworzone w magnesach/, więc $\Phi_{tw} < \Phi_m$, gdzie Φ_m jest polem wytworzonym w magnesach. Przy biegu luzem można przyjąć: $\Phi_{tw} = \Phi_m$, więc biorąc pod uwagę wzór: $E = c'.\Phi_{tw}$, widzimy, że w generatorze szeregowym charakterystyka wewnętrzna musi leżeć nieco niżej od charakterystyki magnetycznej /biegu luzem/ t.zn., że dla tego samego I_m siła elektromotoryczna przy biegu luzem będzie nieco większa, niż przy obciążeniu.

Aby, mimo obciążenie generatora, otrzymać tę samą wartość na SEM-ą, jak przy biegu luzem, musimy zwiększyć prąd wzbudzenia /p. rys. niżej/. Ten prąd przedstawiony odcinkami A - A', B - B' i t.d., o który musieliśmy zwiększyć prąd wzbudzenia, aby otrzymać taką samą SEM-ą, przy obciążeniu, jaka była przy biegu luzem, podaje nam wielkość oddziaływania /reakcji/ twornika.

Jak więc czytamy z rysunku na stronie niniejszej, różnica rzędnych charakterystyki wewnętrznej i napięciowej dla poszczególnych I podaje nam

wpływ spadku napięcia w oporach wewnętrznych dla tych "I", różnica zaś odciętych /rys. obok/ charakterystyki wewnętrznej i magnetycznej dla poszczególnych "E" podaje oddziaływanie /reakcję/ twornika dla prądów obciążenia, przy których otrzymujemy dane "E" charakterystyki wewnętrznej.



U w a g a. Ten sposób znajdowania reakcji twornika jest dopuszczalny tylko dla generatora szeregowego /głównikowego/, bo tutaj mamy $i_m = I$. Przy innych generatorach znajdujemy tę reakcję przy pomocy charakterystyki zwarcia:

$$I = f/i_m/,$$

przy n = const., U = 0 V /zwarcie/.

Celem tego ćwiczenia jest zaznajomienie się z zachowaniem się generatora szeregowego w czasie pracy. Miarodajną dla oceny jest /jak i u innych generatorów/ charakterystyka napięciowa. Widzimy, że w generatorze szeregowym napięcie zmienia się silnie ze zmianą obciążenia, więc wniosek prosty, że tych generatorów nie można używać tam, gdzie wymagane jest możliwie stałe napięcie, bez względu na wielkość obciążenia. Mogą mieć jedynie zastosowanie tam, gdzie obciążenie jest przez cały czas zapotrzebowania stałe /np. lampy łukowe do oświetlania ulic/. Nie nadaje się generator szeregowy do pracy równoległej w elektrowniach i nie nadaje się zupełnie do ładowania akumulatorów /możliwość zwarcia/. Z tych też powodów generatory szeregowe wyszły teraz prawie całkowicie z użycia.

Ć w i c z e n i a 2 3 i 24.

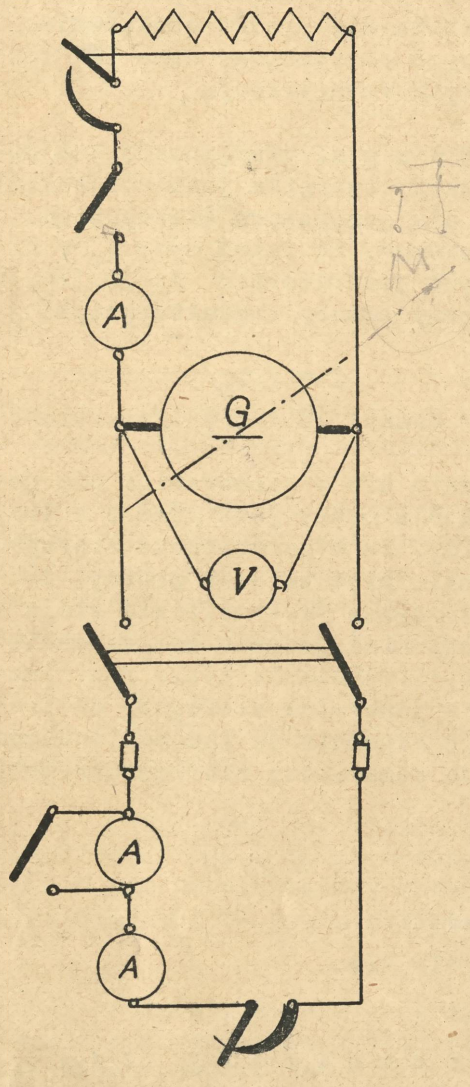
23. G e n e r a t o r u p u s t o w y /b o c z n i k o w y/ z d j ę c i e c h a r a k t e r y s t y k i n a p i ę c i o w e j /z e w n ę t r z n e j/ i k r z y w e j r e g u l a c j i.

24. G e n e r a t o r z e w z b u d z e n i e m c o m p o u n d: z d j ę c i e c h a r a k t e r y s t y k i n a p i ę c i o w e j /z e w n ę t r z n e j/.

23. Charakterystyka napięciowa generatora upustowego /a także compound/ podaje nam zależność napięcia od prądu obciążenia przy stałych obrotach i stałej oporności w przewodzie wzbudzenia.

$$U = f/I/ \quad \text{przy} \quad n = \text{const.}, \quad R_n = \text{const.}$$

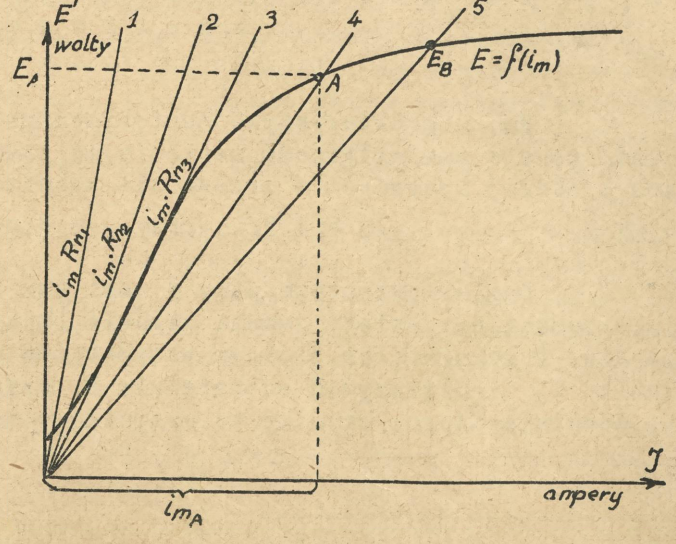
Pomiar przeprowadzamy w taki sam sposób, jak przy generatorze z obcym wzbudzeniem, należy jednak zwrócić tutaj uwagę, na zjawisko samowzbudzenia się. W generatorze z obcym wzbudzeniem można dowolnie nastawić prąd wzbudzenia i_m i otrzymywać odpowiednie E, oraz utrzymywać je w żądanej wysokości, dowolnie długo; czynimy to wszystko w prosty sposób opornicą w obwodzie

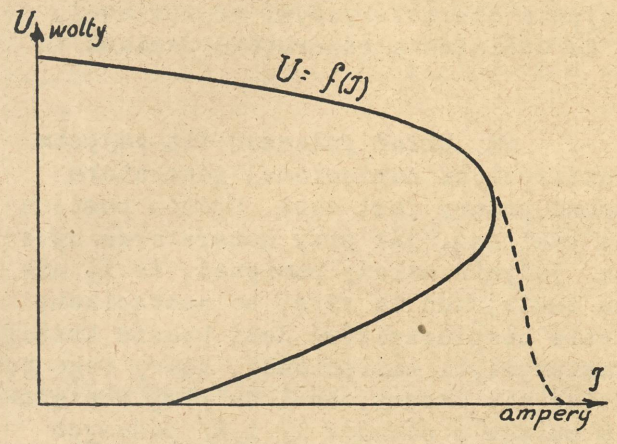


wzbudzenią bo napięcie obwodu wzbudzenia jest stałe. Inaczej jest przy generatorze z własnym wzbudzeniem, bo wzbudzenie zależy tu nie tylko od oporności obwodu wzbudzenia, ale także od napięcia wzbudzanego generatora. Początkowo napięcie jest małe /remanentowe/, więc nawet silne zmniejszenie oporności mało zwiększa prąd wzbudzenia, gdyż:

$$i_m = \frac{U}{R_n},$$

więc także i "E", t.j. SEM wolno rośnie. Gdy jednak zmniejszymy już R_n do odpowiedniej wartości, to otrzymamy zjawisko samowzbudzenia, które polega na tym, że będziemy obserwować wzrost tak i_m, jak i E, mimo, że już oporności oporu R_n całkiem nie zmniejszamy. Ten wzrost samoczynny odbywa się do pewnej wartości E i i_m /zależnie od wielkości R_n/, dalszy wzrost E osiągamy już przy pomocy opornicy w obwodzie wzbudzenia zupełnie podobnie, jak przy generatorze z obcym wzbudzeniem. Cały ten przebieg tłumaczy nam rysunek poniżej. Spadek napięcia na oporze obwodu wzbudzenia, który tutaj jest równocześnie napięciem na zaciskach generatora, przedstawia nam linia prosta /bo: $U = R_n i_m$/, przechodząca przez początek układu. Nachylenie tej prostej: $tg\alpha = U : i_m = R_n$ zależy tu tylko od R_n, czyli im większa jest oporność obwodu wzbudzenia, tym bardziej stromą jest ta prosta. Jak z rysunku widać, gdy oporność R_n jest tak duża, że otrzymujemy nachylenie takie, jak przedstawiają proste 1, 2, 3, to nie może zajść samowzbudzenie, bo U musiałoby być większe od E, a to przy generatorze prądu stałego jest niemożliwe. Gdy jednak zmniejszymy oporność R_n, tak, że otrzymamy teraz prostą 4, to samowzbudzenie nastąpi, a E przyjmie wartość E_A, tutaj bowiem $E = i_m R_n$ dla każdego i_m od zera do i_{mA}. Wcześniej stan równowagi jest niemożliwy, bo dla każdego mniejszego i_m /od i_{mA}/ jest E /które tu przyjmujemy jako równe U, bo jest to bieg luzem/ większe od $i_m \cdot R_n$, więc musi i_m wzrastać, ale powiększenie i_m powoduje dalsze zwiększenie U = E, zwiększenie U powoduje zwiększenie i_m i t.d. aż do E_A, bo widzimy, że $E_A = i_m \cdot R_n$. Aby otrzymać E_B musimy już dalej zmniejszyć R_n, aby otrzymać nachylenie prostej 5.





Kształt charakterystyki napięciowej generatora upustowego można przewidzieć na podstawie dyskusji wzoru:

$$U = E - I.(R_{tw} + R_{bp}).$$

Czytamy z tego wzoru, że napięcie będzie tu zmniejszać się ze wzrostem obciążenia, a to z trzech powodów: 1/ rośnie odjemnik $I.(R_{tw} + R_{bp})$, 2/ maleje E z powodu reakcji twornika, 3/ maleje E jeszcze z tego powodu, że gdy maleje U, to maleje także i_m, bo $i_m = U : R_m$, a założenie jest, że R_m = const, czyli Φ_{tw} maleje, a $E = c.\Phi_{tw}.n$ /n = const/. Jednak wszystkie te czynniki początkowo bardzo wolno wpływają, dlatego napięcie maleje, ale wolno, niewiele silniej, jak przy generatorze z obcym wzbudzeniem. Później jednak,/gdy znajdziemy się na prostolinijnej części charakterystyki magnetycznej/ napięcie tak silnie zaczyna opadać, że mimo dalszego zmniejszania oporności oporu zewnętrznego aż do zera, prąd pobierany z generatora nie tylko nie będzie rósł, ale nawet znacznie opadać. Prąd pobierany z generatora obliczamy wzorem:

$$I = \frac{U}{R_z}$$

gdzie R_z = oporność obwodu zewnętrznego. Zmniejszanie się I dowodzi, że prędzej maleje U, niż zmniejszamy oporność R_z. Takie zachowanie się generatora upustowego jest regułą; może jednak zachodzić taki wypadek, że nie następuje zmniejszanie się I. Ma to miejsce wówczas, gdy

$\frac{E_{zw}}{R_{zw}}$ daje prąd większy od wszystkich innych $\frac{U}{R_z}$

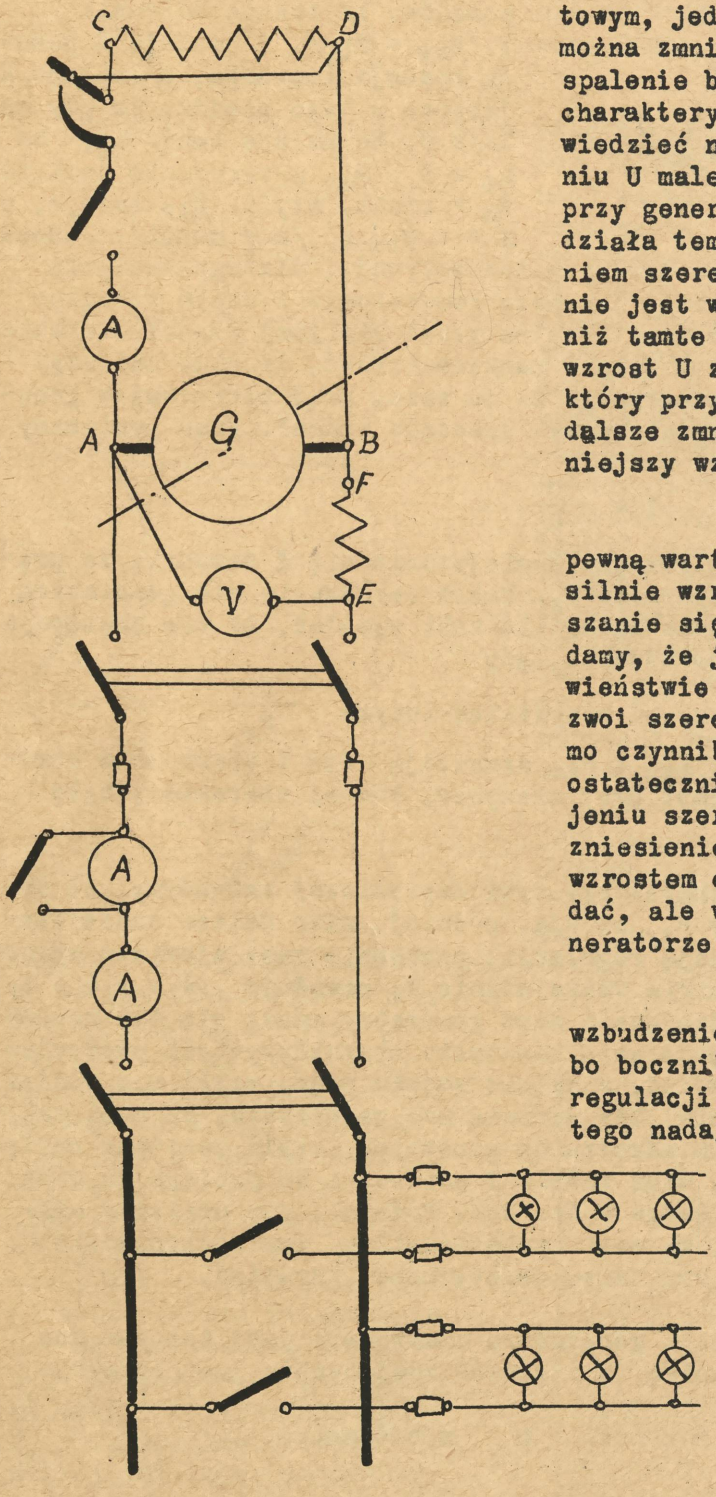
/dla badanej maszyny/, przy czym E_{zw} i R_{zw} oznaczają SEM i oporność w chwili zwarcia obwodu. Tak właśnie jest przy maszynie, której charakterystykę zdejmujemy w naszym ćwiczeniu.

W czasie zdejmowania charakterystyki napięciowej zauważymy, że obroty początkowo, gdy zmniejszamy R_z, maleją, później, mimo dalsze zmniejszanie R_z są stałe, czyli nie wymagają regulacji, następnie mamy zjawisko wprost odwrotne do początkowego, mianowicie zmniejszanie R_z powoduje w z r o s t obrotów. Że obroty motoru, napędzającego nasz generator muszą się tak zachowywać, wnioskować to możemy na podstawie kształtu charakterystyki napięciowej. Początkowo napięcie spada wolno, a silnie rośnie prąd, czyli moc oddana /U.I/ przez generator także rośnie. Gdy wzrasta moc generatora, to musi także wzrastać moc motoru, który nam napędza ów generator, czyli ponieważ napięcie szyn można przyjąć za stałe, więc rośnie I motoru, a to pociąga za sobą zmniejszenie ilości obrotów /p. uwaga w ćw. 22/. Później, gdy napięcie silnie maleje, a nadto prąd maleje, to musi nastąpić silne zmniejszenie się mocy generatora, a tym samym motoru, więc obroty muszą wzrastać.

Kształt krzywej regulacji generatora upustowego jest ten sam, co przy generatorze z obcym wzbudzeniem, a i sposób zdejmowania jest zupełnie podobny.

$i_m = f/I/$ przy U = const. i n = const.

Układ połączeń taki, jak do zdjęcia charakterystyki napięciowej, tylko zamiast opornicy użyte są lampki do obciążenia generatora /zmiana ta nie jest bezwzględnie konieczną/.



24. Układ połączeń dla zdjęcia charakterystyki napięciowej generatora compound podany jest obok. Sposób postępowania taki sam, jak przy generatorze upustowym, jedynie należy pamiętać, że R_z nie można zmniejszać do zera, bo nastąpiłoby spalenie bezpieczników. Jaki będzie kształt charakterystyki napięciowej, zgóry tego powiedzieć nie możemy, bo i tu przy obciążaniu U maleje z powodów 1/ i 2/ podanych przy generatorze upustowym, ale przeciwdziała temu przyrost Φ_{tw}, wywołany uzwojeniem szeregowym. Jeżeli to przeciwdziałanie jest większe /zależy od ilości zwojów/, niż tamte dwa czynniki, to nawet nastąpi wzrost U ze wzrostem I, czyli czynnik 3/, który przy generatorze upustowym powodował dalsze zmniejszanie U, tu powoduje silniejszy wzrost U.

/Uwaga: Gdy przekroczymy jednak pewną wartość I, to reakcja twornika tak silnie wzrasta, że i tu następuje zmniejszanie się U/. O takim generatorze powiadamy, że jest przekompoundowany, w przeciwieństwie do scompoundowanego, w którym zwoi szeregowych jest tylko tyle, aby mimo czynniki 1/ i 2/ U było stałe. Może ostatecznie zajść wypadek, że dzięki uzwojeniu szeregowemu nastąpi tylko częściowe zniesienie czynników 1/ i 2/, czyli ze wzrostem obciążenia, napięcie będzie opadać, ale w mniejszym stopniu, niż przy generatorze upustowym.

Poważną zaletą generatora ze wzbudzeniem compound, czyli mieszanym, albo bocznikowo-głównikowym, jest to, że bez regulacji mamy prawie stałe napięcie, dlatego nadaje się doskonale taki generator do zastosowania tam, gdzie potrzebne jest stałe napięcie, a wystarcza jeden generator. To zastrzeżenie jest z tego powodu konieczne, że generator compound nie nadaje się dobrze do pracy równoległej i do ładowania akumulatorów. Ponieważ w elektrowniach konieczną jest praca równoległa

jak i ładowanie akumulatorów /mowa tylko o elektrowniach mniejszych, bo tylko takie są na prąd stały/ dlatego ogólnie nie stosuje się tam generatorów compound, tylko upustowe, względnie z obcym wzbudzeniem.

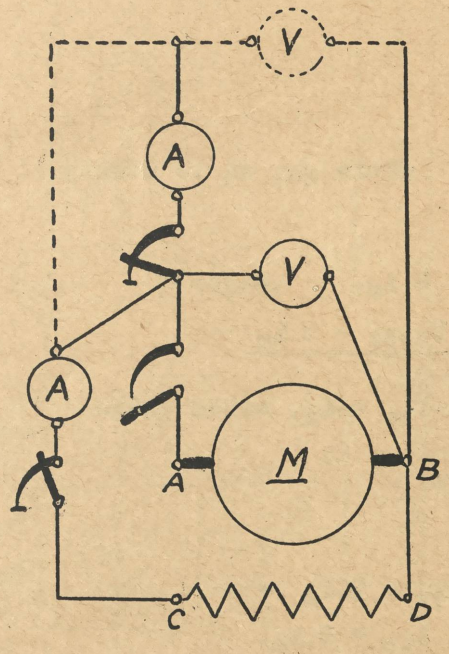
Ćwiczenie 26.

Hamowanie mechaniczne motoru upustowego, wypośrodkowanie momentu obrotowego, ilości obrotów, mocy, siły elektromotorycznej prądu pobieranego z sieci, strat elektrycznych i całkowitych przy zmiennym obciążeniu i stałym napięciu.

Hamowanie elektryczne.

Zmiana kierunku obrotów.

Motor obciążamy przy pomocy hamulca Prony'ego. Zadaniem naszym między innymi jest znalezienie η, dlatego musimy przez około $\frac{1}{2}$ godziny utrzymać motor w ruchu /bieg luzem/, aby straty mechaniczne się ustaliły /dotarcie łożysk i szczotek/. Dopiero wówczas możemy przystąpić do pomiarów /p. "Przepisy oceny i badania maszyn elektrycznych" P.N.E. 23, 1932. § 57, p.7/.



Że straty mechaniczne już się ustaliły, poznajemy po tym, że moc pobierana przez motor już przestała maleć, gdy mamy do czynienia z biegiem luzem. Bieg ten przy motorze upustowym jest możliwy, gdyż nie zachodzi obawa rozbiegania się / w przeciwieństwie do motoru szeregowego/. Ilość bowiem obrotów motoru upustowego wyraża nam wzór:

$$n = \frac{E}{c.\Phi_{tw}} = \frac{U - I_{tw}/R_{tw} + R_{bp}/ - U_{szcz}}{c.\Phi_{tw}}$$

przyczym Φ_{tw} jest prawie stałe, niezależne od obciążenia /osłabienie Φ_{tw} na skutek reakcji procentowo jest nieznaczne/, a spadek napięcia: I_{tw} /R_{tw} + R_{bp}/ + U_{szcz} nawet przy nominalnym obciążeniu stanowi mały procent napięcia sieci U; obroty więc motoru upustowego od biegu luzem do obciążenia nominalnego zmieniają się tylko nieznacznie.

Pomiar odbywa się w ten sposób, że pierwsze odczyty robimy, gdy na ramię hamulca wywarty jest nacisk $\frac{1}{2}$ kg, następne co $\frac{1}{2}$ kg dotąd, aż dokręceniem śrub uzyskano I = 4/4 I_{nom}. W czasie równowagi odczytujemy równocześnie /na dany znak tego, który jest przy wadze/:

F w kg /zmieniane co $\frac{1}{2}$ kg/

Obroty /maleją ze wzrostem obciążenia/

Prąd I /wzrasta z obciążeniem/,

przy czym napięcie U utrzymuje się stałe regulatorem napięcia. Prąd magnesów nie ulega w czasie pomiaru zmianie, wystarcza więc jednorazowy jego odczyt przy pierwszym pomiarze.

Dane: długość ramienia hamulca : l = 0,785 m.
opory: $R_{tw} + R_{bp} = 0,36$ oma.

W ten sposób mamy już wszystkie wielkości potrzebne do wykonania zadania.

1/ Moment obrotowy wyliczymy wzorem: $M_d = F.l$ kgm, gdy F w kg, a l w metrach.

2/ Obroty odczytuje się wprost.

3/ a/ Moc pobraną obliczamy według wzoru: $P_{pobr} = U.I$ watów.

b/ Moc oddaną wyliczamy ze wzoru:

$$P_{odd} = M_d.\omega \text{ kgm/sek} = \frac{F.1.2.\pi.n}{60} \text{ kgm/sek} = P.n\frac{0,785.2.3,14}{60} \text{ 9,81 wat.}$$

ostatecznie $P_{odd} = 0,806.F.n$ watów.

4/ $E = U - I_{tw}/R_{tw} + R_{bp}/ - U_{szcz}$, przy czym $I_{tw} = I - i_m$.

5/ Prąd całkowity odczytuje się wprost.

6/ Straty całkowite otrzymamy, odejmując od mocy pobranej moc oddaną, albo mnożąc: $P_{pobr}./1 - \eta_m/$.

7/ Straty elektryczne otrzymamy ze wzoru:

$$I_{tw}^2/R_{tw} + R_{bp}/ + U.i_m + I_{tw}.U_{szcz}$$

albo ze wzoru:

$$P_{pobr}/1 - \eta_{el}/$$

8/ Sprawność:

a/ mechaniczna:

$$\eta_m = \frac{P_{odd}}{P_{pobr}}.100\ \%$$

b/ elektryczna:

$$\eta_{el} = \frac{E.I_{tw}}{U.I}.100\ \%,$$

gdzie: $I_{tw} = I - i_m$.

U w a g a: $\eta_{el} = \frac{P_{pobr} - P_{el}}{P_{pobr}}$ gdzie p_{el} są to straty elektryczne, które możemy wyliczyć, mianowicie:

$$\eta_{el} = I_{tw}^2/R_{tw} + R_{bp}/ + I_{tw}.U_{szcz} + U.i_m, \quad \text{więc:}$$

$$\eta_{el} = \frac{U.I - I_{tw}^2/R_{tw} + R_{bp}/ - I_{tw}.U_{szcz} - U.i_m}{U.I}$$

Wzór ten możemy nieco przekształcić. Wiemy, że $I = I_{tw} + i_m$, wobec czego iloczyn:

$$U.I = U/I_{tw} + i_m/ = U.I_{tw} + U.i_m,$$

a ponieważ: $U = E + I_{tw}/R_{tw} + R_{bp}/ + U_{szcz}$,

więc iloczyn powyższy przybierze postać:

$$U.I = E + I_{tw}/R_{tw} + R_{bp}/ + U_{szcz}.I_{tw} + U.i_m =$$

$$= E.I_{tw} + I_{tw}^2/R_{tw} + R_{bp}/ + U_{szcz}.I_{tw} + U.i_m.$$

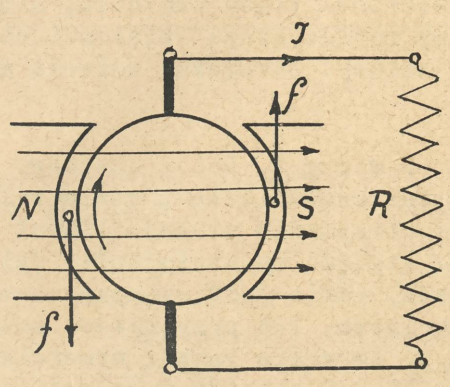
Po podstawieniu zaś powyższej równości we wzór na η_{el} dostajemy:

$$\eta_{el} = \frac{E.I_{tw} + I_{tw}^2./R_{tw} + R_{bp}/ + U_{szcz}.I_{tw} + U.i_m - I_{tw}^2/R_{tw} + R_{bp}/ - I_{tw}U_{szcz} - Ui_m}{U.I}$$

czyli w końcu:

$$\eta_{el} = \frac{E.I_{tw}}{U.I}.$$

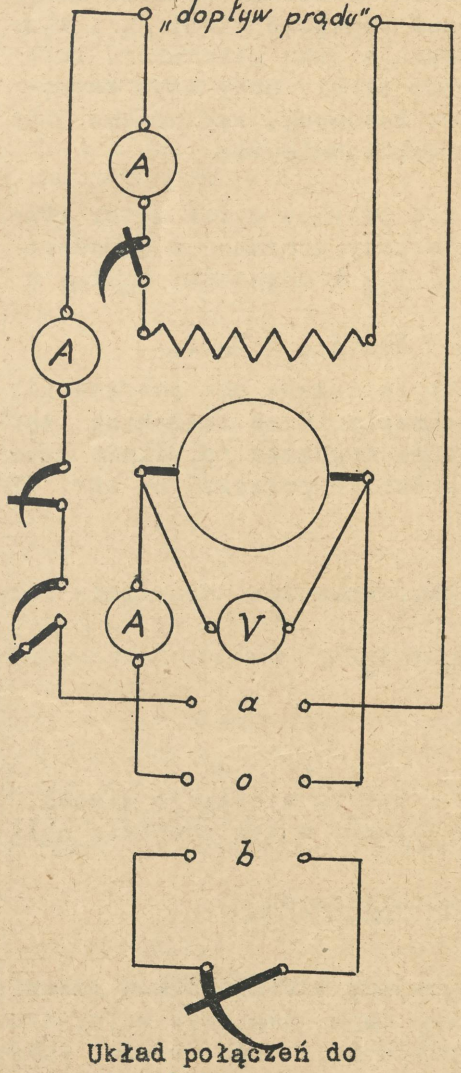
Wszystkie wykresy dla: 1/, 2/, 3a/, 4/, 5/, 8a/ i 8b/ robimy jako funkcje mocy oddanej: $M_d.\omega.9,81$.



H a m o w a n i e e l e k t r y c z n e. Gdy odłączymy od sieci wirujący rotor motoru przy pełnym wzbudzeniu magnesów, powstaje w nim w dalszym ciągu SEM, której kierunek znajdujemy według zasady prawej ręki. Ta SEM wywoła prąd:

$$I = \frac{E}{R_{tw} + R},$$

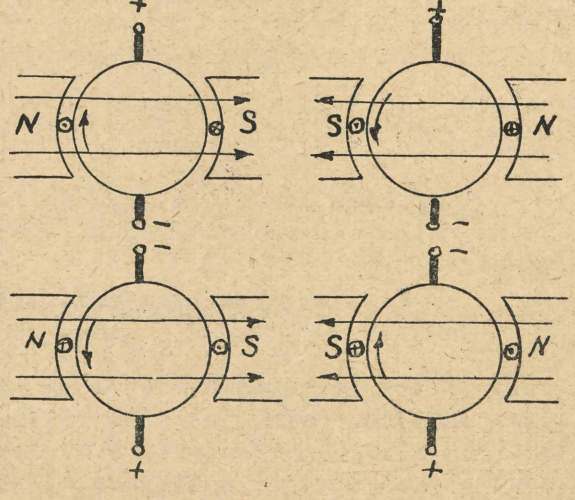
o ile szczotki rotoru połączymy za pomocą pewnego oporu o oporności R. Na przewód zaś, przez który przepływa prąd, pole magnetyczne wywiera siłę o wielkości P = B.I.l dyn /z prawia Biota i Savarta/, gdzie B - indukcja magnetyczna, I - natężenie prądu w jednostkach absolutnych /c.g.s./, l - długość przewodu w cm. Kierunek tej siły podaje nam duży palec lewej ręki i jest przeciwny do kierunku obrotów, a więc motor jest hamowany. Siła hamująca jest proporcjonalna do prądu I, chcąc więc ją zwiększyć, musimy powiększyć I, a zatym zmniejszyć oporność R i naodwrót.



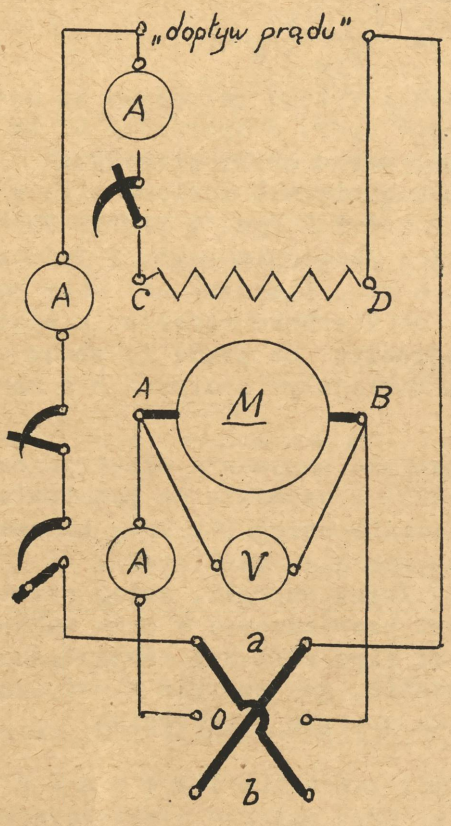
Układ połączeń do hamowania elektrycznego.

Zjawisko hamowania elektrycznego jest zupełnie zrozumiałe na podstawie "zasady zachowania energii". Przy hamowaniu dostajemy energię elektryczną /E.I/ kosztem innej formy energii, tutaj obrotu rotora wskutek bezwładności w polu magnetycznym; motor więc musi być równocześnie hamowany i stanie, gdy energia kinetyczna zamieni się na energię elektryczną.

Z m i a n a k i e r u n k u o b r o t ó w. Przy motorze elektrycznym mamy możność zmiany a/ kierunku strumienia magnetycznego przez zmianę kierunku prądu wzbudzającego, b/ kierunku prądu twornika. Kierunek obrotu w zależności od strumienia magnetycznego i prądu twornika daje nam wielki palec lewej ręki.



Z podanych powyżej rysunków widać, że chcąc zmienić kierunek obrotów motoru elektrycznego musimy zmienić albo kierunek prądu twornika, albo kierunek strumienia magnetycznego; gdy zmienimy równocześnie kierunki obu tych wielkości, kierunek obrotów zostanie bez zmiany. Zazwyczaj zmienia się kierunek prądu w tworniku.



Układ połączeń do zmianykierunku obrotów.

U w a g i. Motor upustowy znajduje zastosowanie tam, gdzie zależy nam na utrzymaniu stałej ilości obrotów bez względu na obciążenie; dalej w wypadkach, gdzie jest wymagany chwilowy bieg luzem, lub przypadkowo może zajść /n.p. zerwanie pasa/; wreszcie regulacja ilości obrotów w szerokich granicach, w sposób ekonomiczny jest możliwa przy zastosowaniu motoru upustowego.

O ile ilość obrotów motoru upustowego, z jakichkolwiek przyczyn wzrośnie ponad normalną, wówczas SEM wzrasta ponad napięcie sieci /U/; wtedy motor pracuje jako generator, zwraca energię do sieci, przy czym równocześnie jest hamowany, wykluczone jest więc jego rozbieganie się.

Moc pobrana przez motor równa się sumie mocy pobranej w obwodzie twornika $U_{tw}.I_{tw}$ i magnesów: $U_m.i_m$, a więc:

$$P_{pobr} = U_{tw}.I_{tw} + U_m.i_m.$$

W ten sposób obliczamy moc pobraną, gdy mamy różne napięcia na zaciskach twornika i obwodu magnesów /p. linie kreskowane na układzie połączeń na str. 45/ gdy jednak:

$$U_{tw} = U_m = U$$

/jak to mamy w układzie połączeń, użytym przy ćwiczeniu str. 45, linie pełne/, wówczas:

$$P_{pobr} = U.I_{tw} + U.i_m = U/I_{tw} + i_m/$$

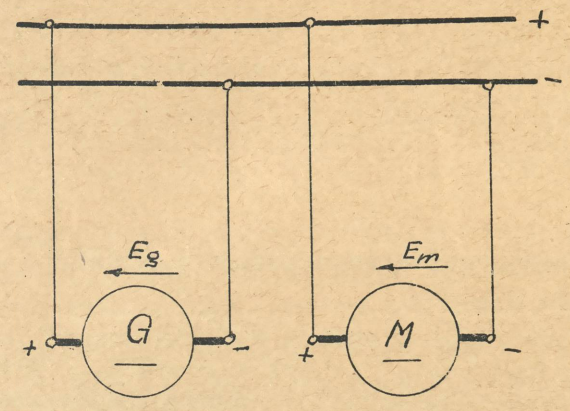
a ponieważ $I_{tw} + i_m = I$, więc w końcu:

$$P_{pobr} = U.I \text{ watów.}$$

Gdy mamy obwód elektryczny zamknięty, w którym występuje więcej, niż jedna siła elektromotoryczna, wówczas prąd płynący w tym obwodzie obliczamy wzorem:

$$I = \frac{\Sigma E}{\Sigma R} = \frac{\text{algebraiczna suma sił elektromotorycznych}}{\text{suma oporów.}}$$

Przez załączenie motoru na szyny otrzymujemy właśnie obwód zamknięty o dwu SEM-ych. Jedną jest SEM generatora, który daje napięcie szyn, drugą jest SEM motoru, przeciwnie skierowana do poprzedniej. Dla układu, znajdującego się na stronie następnej, jest:



Generator Motor

$$I = \frac{E_g - E_m}{R_g + R_m}$$

gdzie E_g i E_m są to SEM-e generatora i motoru, zaś R_g i R_m oporności obwodu generatora do szyn i motoru do szyn, albo,/gdy uwzględni się spadek napięcia na R_g, t.j. w generatorze i w przewodach łączących go z szynami, czyli weźmie się napięcie szyn U/:

$$I = \frac{U - E_m}{R_m} .$$

Gdy mamy uruchomić motor, to n = 0, E_m = 0, bo wzór ogólny:

$$E = c.\Phi.n.$$

Jasnym jest, że w tym wypadku I = U : R_m. Ponieważ celem uzyskania możliwie małych strat na ciepło Joule'a, R_m jest zwykle mała, więc prąd mógłby przybrać wartości zagrażające całości maszyny,/względnie bezpieczników/. Zapobiegamy temu, stosując rozruszniki, t. j. wstawiając opór między szyny a motor, bo teraz prąd przybierze wartość:

$$I = \frac{U}{R_m + R_{rozr}}$$

Gdy motor zaczyna się obracać, wówczas E_m wzrasta, czyli licznik zaczyna maleć - wówczas możemy i mianownik zmniejszać bez obawy, że wartość ułamka wzrośnie i tak stopniowo wyłączamy całkiem rozrusznik, puszczając w ten sposób motor w ruch.

Ć w i c z e n i e 2 7 a.

W y z n a c z e n i e s p r a w n o ś c i m o t o r u c o m p o u n d m e t o d ą b e z p o ś r e d n i ą /w z a k r e s i e ć w i c z e n i a N r. 2 6/.

Compoundowanie motoru upustowego może mieć dwojaki cel: otrzymanie większego momentu obrotowego przy tym samym prądzie twornika, albo automatyczne utrzymywanie obrotów mniej więcej stałych bez względu na obciążenie.

W motorze compound mamy dwa rodzaje uzwojeń magnesów: 1/ upustowe o liczbie z_n zwojów, przez które przepływa prąd i_m, zależny tylko od napięcia sieci /U/ i oporności obwodu tych uzwojeń /R_u/, a więc i_m = U : R_u, oraz 2/ szeregowo o z_s zwojach, przez które znowu płynie prąd twornika, a więc zależny od obciążenia motoru.

O ile powyższe uzwojenia w ten sposób połączymy, że kierunki przepływu prądów w obu uzwojeniach są zgodne, mamy c o m p o u n d z g o d n e, a amperozwoje się sumują, więc dostaniemy strumień magnetyczny:

$$\Phi_{tw} = \frac{0,4.\pi./z_u.i_m + z_s.I_{tw}/}{\sum \frac{l}{\mu.q}} \quad \ldots\ldots \quad \ldots\ldots 1/$$

O ile zaś kierunki uzwojeń są niezgodne, mamy c o m p o u n d n i e z - g o d n e, indukującą będzie różnica amperozwoi, czyli dostaniemy strumień:

$$\Phi_{tw} = \frac{0,4.\pi./z_u.i_m - z_s.I_{tw}/}{\sum \frac{1}{\mu.q}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad \ldots\ldots 2/$$

C o m p o u n d z g o d n e.

a/. M o m e n t. Wielkość momentu obrotowego podaje nam wzór:

$$M_d = c.\Phi_{tw}.I_{tw}.$$

Ze wzoru tego widać, że ze wzrostem prądu /I_{tw}/ w naszym wypadku moment /M_d/ rośnie z dwóch powodów, a mianowicie bezpośrednio wskutek wzrostu I_{tw}, oraz na skutek wzrostu Φ_{tw} /wzrost Φ_{tw} jest wywołany wzrostem amperozwojów szeregowych $z_s.I_{tw}$, co widać ze wzoru 1//. Natomiast przy motorze upustowym strumień magnetyczny jest w przybliżeniu stały, gdyż:

$$\Phi_{tw} = \frac{0,4.\pi.z_u.i_m}{\sum \frac{1}{\mu q}} \quad , \quad a \quad i_m = \text{const.},$$

zaś wpływ reakcji twornika nawet przy nominalnym obciążeniu jest procentowo nieznaczny, więc:

$$M_d = c.\Phi_{tw}.I_{tw} = c'.I_{tw}$$

czyli moment obrotowy jest wprost proporcjonalny do prądu I_{tw}. Jasnym więc jest, że temu samemu I_{tw} będzie odpowiadać większy moment obrotowy przy compound zgodnym, jak przy motorze upustowym.

b/. O b r o t y. Obroty motoru elektrycznego podaje wzór:

$$n = c''\frac{E}{\Phi_{tw}},$$

a dla danego wypadku:

$$n = c''\frac{U - I_{tw}./R_{tw} + R_{bp} + R_s/ - U_{szcz}}{\Phi_{tw}}$$

gdzie R_s - oporność szeregowych uzwojeń magnesów. Ze wzoru powyższego wynika, że ze wzrostem prądu twornika /a więc i ze zwiększeniem obciążenia/ obroty maleją z dwóch powodów, a mianowicie z powodu zmniejszenia się licznika przez wzrost całego odjemnika, a powtóre z powodu wzrostu mianownika /p. wzór 1//. Natomiast w motorze upustowym Φ_{tw} = const bez względu na obciążenie, więc z obciążeniem tylko licznik maleje, obroty więc dla tego samego prądu I_{tw} są większe, jak przy motorze compound zgodnym.

C o m p o u n d n i e z g o d n e.

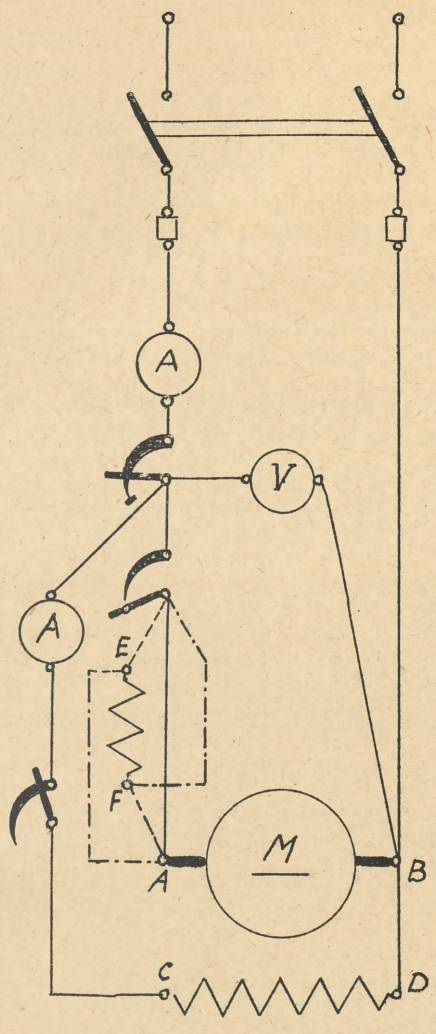
a/. M o m e n t. Gdy motor jest w połączeniu "compound niezgodne", to zwiększenie prądu I_{tw} powoduje zmniejszenie strumienia magnetycznego Φ_{tw}, co czytamy ze wzoru 2/. W równaniu więc na moment:

$$M_d = c.\Phi_{tw}.I_{tw}$$

jeden z czynników maleje /Φ_{tw}/, a drugi rośnie /I_{tw}/. Czy obecnie ze wzrostem I_{tw} moment będzie wzrastał, czy też malał, zależy od tego, czy przeważa wzrost I_{tw}, czy też zmniejszanie się Φ_{tw}. Zwykle jednak z powodu niezbyt silnego compoundowania /z_s małe/ przeważa wzrost I_{tw}, a więc moment będzie wzrastał ze wzrostem prądu twornika, lecz w każdym razie mniej, niż przy motorze upustowym, gdzie Φ_{tw} = const.

b/. O b r o t y. Ilość obrotów podaje nam wzór:

$$n = c''\frac{U - I_{tw}./R_{tw} + R_{bp} + R_s/ - U_{szcz}}{\Phi_{tw}}$$



———— układ motoru upustowego
— — — — układ motoru o compound zgodnym,
—·—·—układ motoru o compound niezgodnym.

ze wzrostem więc prądu twornika /I_{tw}/ maleje równocześnie licznik /przez wzrost całego odjemnika/ i mianownik Φ_{tw} /p.wzór 2//. Zależnie od tego, co szybciej maleje, czy licznik, czy też mianownik, czy też maleją równomiernie, będą obroty ze wzrostem I_{tw}, a więc i obciążenia, maleć względnie rosnąć, albo będą stałe.

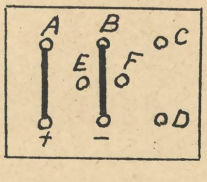
Z powyższych rozważań wynika, że temu samemu prądowi twornika /I_{tw}/, przy compound zgodnym odpowiada większy moment obrotowy, lecz mniejsze obroty, natomiast przy compound niezgodnym dostajemy mniejszy moment obrotowy, a większe obroty, niż przy motorze upustowym.

Sprawność wyznaczamy metodą bezpośredniego pomiaru mocy pobranej /P =U.I watów, gdzie I = I_{tw} + i_m/ i mocy oddanej, którą znowu wyznaczono mechanicznie, przy pomocy hamulca Prony'ego /P_{odd} = $M_d.\omega.9,81$ watów/. Sam przebieg pomiaru identyczny, jak przy ćwiczeniu 26-ym, przy stałym napięciu U = 110 V i stałym prądzie wzbudzenia i_m = 0,75 A; odczytano każdorazowo w momencie równowagi:

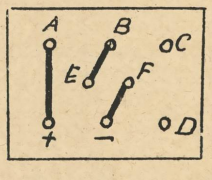
F w kg, I w Amp. n w obr/min.

Robimy trzy serie odczytów, a mianowicie 1/ przy połączeniu motoru jako compound zgodne, 2/ przy połączeniu motoru jako compound niezgodne, 3/ przy połączeniu motoru upustowym, czyli bocznikowym.

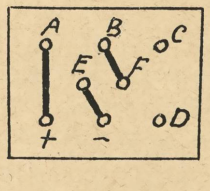
Na podstawie uskutecznionych pomiarów robimy wykresy:
n = f/Podd/, M_d = f/P_{odd}/, η = f/Podd/ dla trzech połączeń motoru, czyli dziewięć krzywych.



upustowy



comp. zgodne

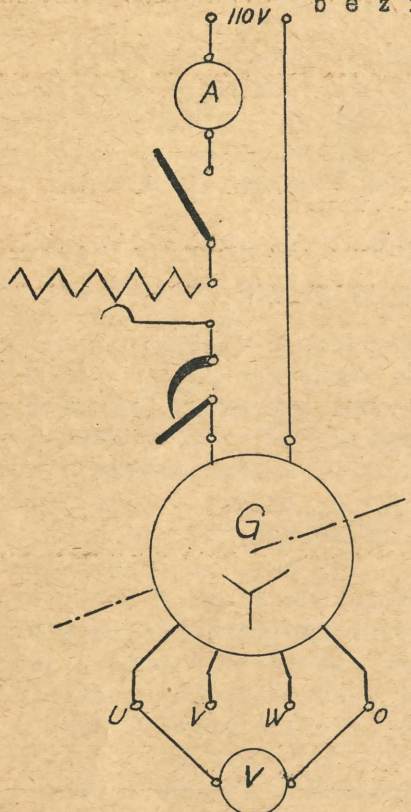


comp.niezgodne.

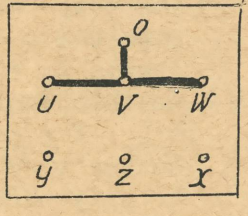
Ćwiczenia 29 i 30.

29. Zdjęcie charakterystyki magnetycznej /biegu luzem/ generatora jednofazowego.

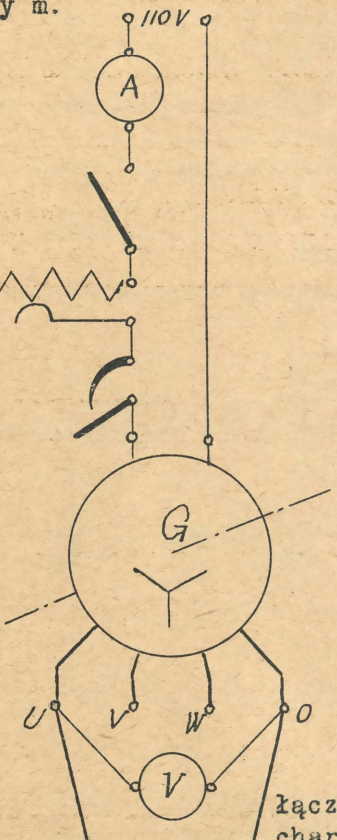
30. Zdjęcie charakterystyki napięciowej /zewnętrznej/ i krzywej regulacji generatora jednofazowego przy obciążeniu bezindukcyjnym.

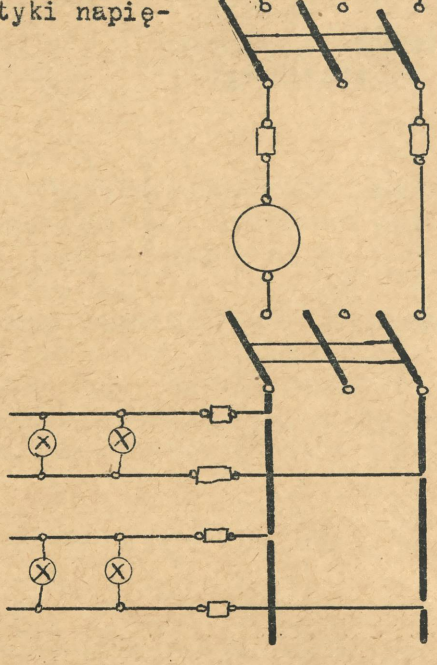


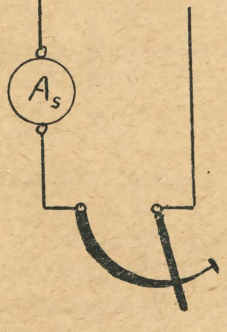
Dla charakteryst. magnet.



Układy połączeń dla zdjęcia charakterystyki napięciowej.







Dla krzywej regulacji

29. Charakterystykę magnetyczną /biegu luzem/ E = f/i_m/ przy I = 0 amperów, oraz n = const, generatora jednofazowego znajdujemy tak samo, jak przy maszynie prądu stałego, czyli uwagi tam podane mają tu pełne zastosowanie. Ponieważ tu używamy generatora trójfazowego, jako jednofazowego, to należy pamiętać, że łączymy woltomierz między O a U, lub O a V, albo w końcu O a W, o ile generator połączony jest w gwiazdę. O ile używamy układu w trójkąt, to nie można łączyć woltomierza do O, gdyż nie otrzymamy żadnego wychylenia, lecz musimy go łączyć między U a V, lub V a W, względnie U a W.

30. Tutaj mamy do czynienia z generatorem prądu zmiennego, więc charakterystyka napięciowa podaje nam zależność:

U = f/I/ przy n = const., i_m = const, cosφ = const.

Ponieważ jest zaznaczone, że obciążenie ma być bezindukcyjne, więc obciążamy generator żarówkami i możemy pomiar przeprowadzić zupełnie analogicznie, jak przy generatorze prądu stałego z obcym wzbudzeniem /ćwiczenie 21/. Uważać jedynie należy, aby żarówki łączyć tak, jak woltomierz /jak podano wyżej/ aby ich nie przepalić, bo są tylko na 120 wolt.

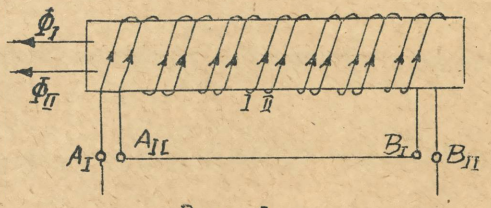
Przy znajdowaniu krzywej regulacji uważać należy na wzrost napięcia przy odciążaniu, gdy obciążenie indukcyjne lub bezindukcyjne, a przeciwnie przy obciążaniu, gdy pojemnościowe. Aby otrzymać tę samą ilość punktów krzywej regulacji, co przy charakterystyce napięciowej, należy wykręcić część żarówek, lub użyć opornicy bezindukcyjnej.

Ć w i c z e n i e 5 7.

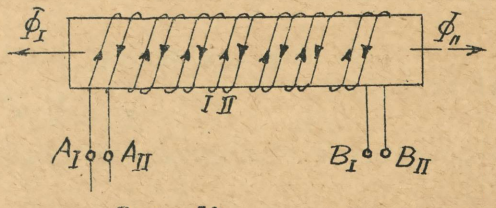
B a d a n i e o b w o d u p r ą d u z m i e n n e g o z s a m o i n d u k c j ą b e z ż e l a z a, o r a z o b w o d u z a w i e r a j ą c e g o d w i e i m p e d a n c j e w ł ą c z e n i u s z e r e g o w y m l u b r ó w n o l e g ł y m.

Badanie cewki indukcyjnej ograniczamy tu do: 1/ pomiaru indukcyjności własnej /współczynnika samoindukcji/ metodą techniczną, 2/ wyliczenia oporności pozornej Z, zwanej także impedancją, lub zawadą, oraz 3/ wyliczenia cosφ.

Ponieważ dana cewka składa się z dwóch uzwojeń o tej samej ilości zwojów, które nawinięte są równolegle /drut obok drutu/ to możemy łączyć te uzwojenia w dwojaki sposób: u n i f i l a r n e /rys. 1a/, łącząc koniec jednego B_I z początkiem drugiego A_{II}, czy B_{II} z A_I, lub b i f i l a r n i e /rys.1b/, gdy połączymy ze sobą końce B_I z B_{II}, albo początki A_I z A_{II}.



Rys. 1 a.



Rys. 1b.

Tutaj uzwojenie unifilarne jest niczym innym, jak dwukrotnym zwiększeniem ilości zwojów na tym samym rdzeniu w taki sposób, że prąd we wszystkich zwojach w każdym momencie ma zgodne kierunki. Ponieważ /współczynnik samoindukcji cewek/ indukcyjność własną L cewek obliczamy wzorem:

$$L = \frac{0,4.\pi.z^2.\mu.q}{l} \quad H/enry/$$

/p. ćwicz. 52/, to przy połączeniu unifilarnym uzyskujemy indukcyjność własną cztery razy większą, niż przy nawinięciu tylko jednego uzwojenia tej cewki.

W połączeniu bifilarnym mamy także połączenie obu uzwojeń cewki indukcyjnej, ale takie, że w każdych dwu sąsiednich zwojach, w każdym momencie kierunek prądu jest przeciwny, a natężenie to samo. W takich warunkach strumień magnetyczny wytworzony przez amperozwoje cewki równa się także zero, nie może więc powstać SEM samoindukcji i tak nawinięta cewka zachowuje się praktycznie tak samo przy prądzie stałym, jak i zmiennym, bo oporność pozorna równa jest oporności rzeczywistej: Z = R, gdyż oporność indukcyjna X_L = = L.ω równa się tutaj zero.

1/ Pomiar indukcyjności własnej metodą techniczną przeprowadzamy w ten sposób, że mierzymy napięcie na zaciskach cewki indukcyjnej i natężenie prądu, jaki przez jej uzwojenia płynie, gdyż:

$$L = \frac{1}{\omega}\sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)^2 - R^2}$$

Ze wzoru tego czytamy, że musimy mieć podane $\omega = 2.\pi.\nu$, czyli ilość okresów prądu, oraz oporność rzeczywistą R cewki indukcyjnej /obu uzwojeń/. Wzór powyższy otrzymujemy przez przekształcenie podstawowego wzoru prądu zmiennego:

$$U = I.Z = I.\sqrt{R^2 + L^2.\omega^2}.$$

Po zrobieniu układu połączeń 1, doprowadzamy generator do 1500 obrotów na minutę /bo jest czterobiegunowy, a chcemy mieć 50 okresów/, napięcie regulatorem wzbudzenia do 110 wolt i odczytujemy natężenie prądu I. Ściśle w ten sam sposób postępujemy po zrobieniu układu 2, to jest, gdy uzwojenia są w połączeniu bifilarnym.

Celem wykazania, że rodzaj połączenia uzwojeń nie odgrywa żadnej roli, gdy mamy prąd stały, robimy układ połączeń 3 i 4 i po nastawieniu opornicą U = 110 volt odczytujemy I.

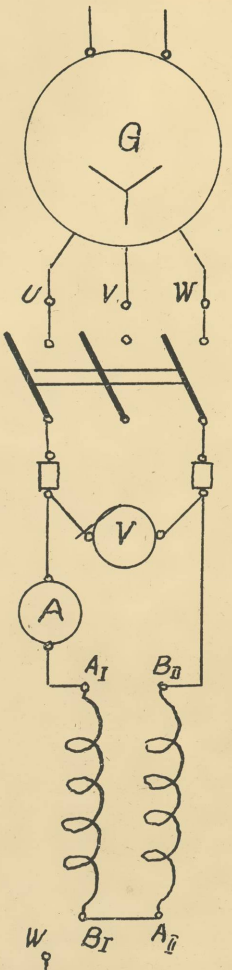
Pomiary należy wykonać tutaj możliwie szybko, szczególnie, gdy połączenie jest bifilarne, lub prąd stały, bo z powodu stosunkowo małego przekroju przewodów cewki następuje silne nagrzanie się zwojów i oporność podana dla t = 15° C, nie będzie zgodną z rzeczywistą w czasie pomiaru. Dla kontroli, czy nastąpiło nagrzanie cewki, wyliczamy przy prądzie stałym U : I; gdy to jest większe od R, nagrzanie nastąpiło. Aby mieć mniejsze poprawki instrumentów, których nie wyliczamy, łączymy tu woltomierz za amperomierzem, a nie na zaciskach samej cewki.

2/. Gdy znajdziemy już L, to Z wyliczamy, wstawiając otrzymaną wartość we wzór:

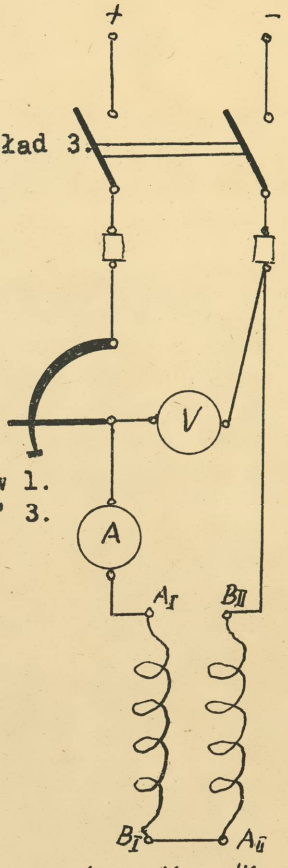
$$Z = \sqrt{R^2 + L^2.\omega^2}$$

dla połączenia bifilarnego i prądu stałego wypadnie L = 0, bo U : I = R, więc Z = R.

Układ 1.

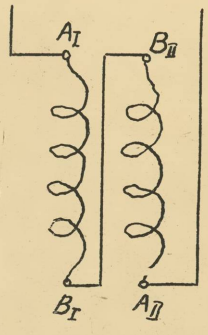


Układ 3.

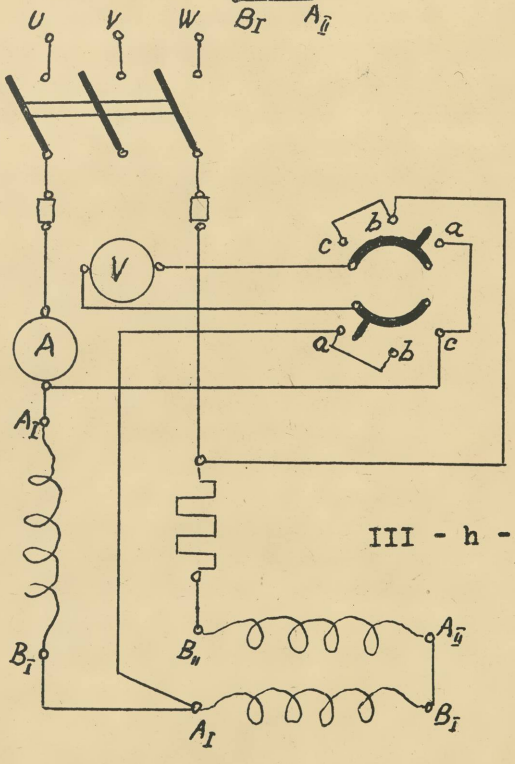


Ciąg dalszy:

dla ukł. 2, jak w 1.
" " 4, " " 3.

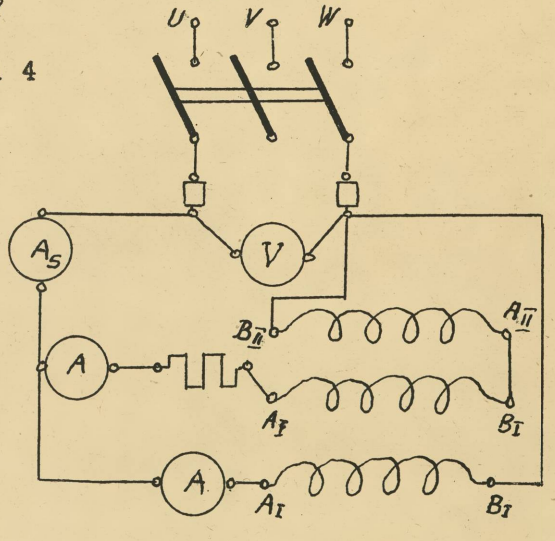


Układ 2 i 4



III - h - 109

Układ 5.

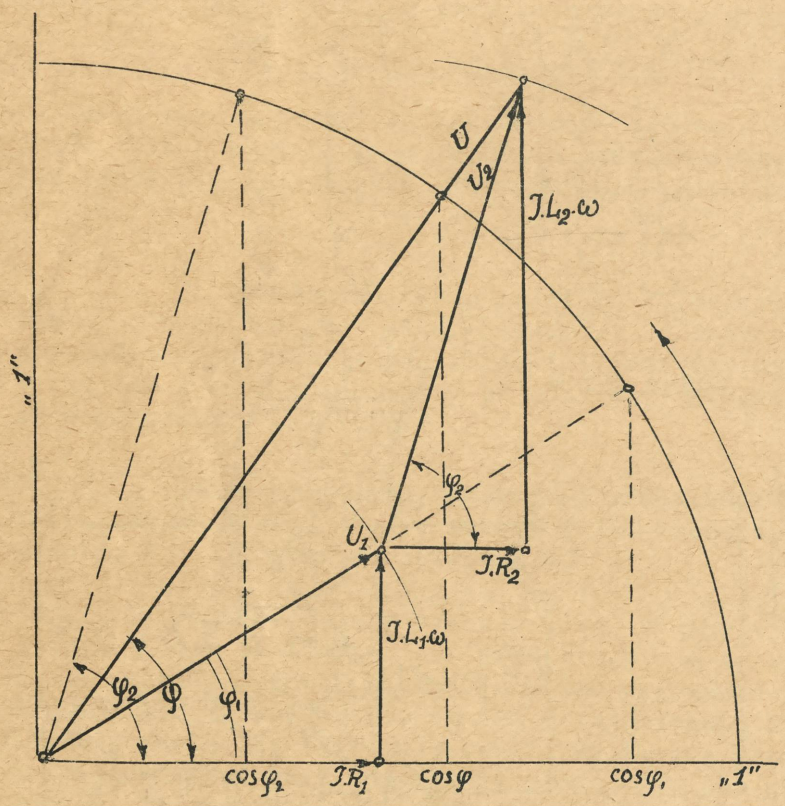


Układ 6

3/. Ponieważ badamy obwód prądu zmiennego z impedancją b e z ż e l a z a, więc $\cos\varphi$ wyliczamy wzorem:

$$\cos\varphi = \frac{R}{Z}, \quad \text{lub} \quad \cos\varphi = \frac{I.R}{U}$$

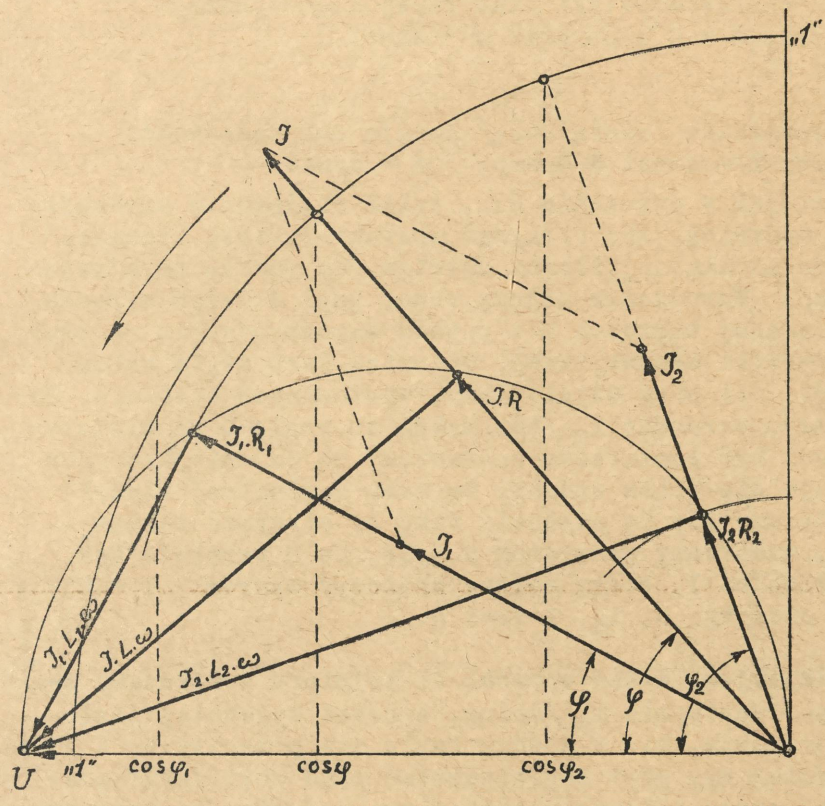
B a d a n i e i m p e d a n c y j p o ł ą c z o n y c h s z e r e g o w o. Robimy układ połączeń 5. Jedną impedancję stanowi cewka badana uprzednio, połączona unifilarnie oraz opór L.I. - III - h - 109 /35Ω/, drugą jedno uzwojenie cewki większej o oporności rzeczywistej R_{15^oC} = 25,3Ω. Woltomierz użyty z przełącznikiem dwubiegunowym, trójprzewodowym, nastawiono początkowo tak, by mierzył napięcie generatora. Po osiągnięciu 1500 obrotów na minutę wzbudzamy generator do 220 V. Gdy mamy już wymagane napięcie U = = 220 V, a obroty utrzymane 1500 obr/min., mierzymy napięcia U_1 i U_2 na pierwszej i drugiej impedancji /posługując się przełącznikiem/, oraz natężenie prądu I. Na podstawie otrzymanych wartości kreślimy dla obu impedancyj trójkąty napięć w ten sposób, że dla pierwszej z nich obieramy kierunek prądu np. poziomy i rysujemy wektor $I.R_1$, przyjąwszy jakąś podziałkę dla woltów. W jego końcowym punkcie wykreślamy prostopadłą, bo wiemy, że taki musi być kierunek wektora $I.L_1.\omega$. Aby uzyskać wielkość tego wektora, z początku wektora $I.B_1$, jako ze środka, zataczamy łuk promieniem U_1 /ta sama podziałka dla woltów!/ do przecięcia się z prostopadłą. Ten punkt przecięcia się jest szukanym punktem końcowym wektora $I.L_1.\omega$, bo wiemy, że U_1, $I.R_1$, oraz $I.L_1.\omega$ są bokami trójkąta prostokątnego /U_1 jest przeciwprostokątnią/. Dla drugiej impedancji kierunek wektora $I.R_2$ musi być zgodny z kierunkiem dla $I.R_1$, bo płynie prąd ten sam w obu cewkach, a R_1 i R_2 są skalarami. Dalsza konstrukcja jest ściśle ta sama, tylko bierzemy U_2. Napięcia U_1 i U_2 dają nam wypadkowe napięcie U, które musi być mniejsze od sumy algebraicznej $U_1 + U_2$, gdyż zawsze jeden bok trókąta musi być mniejszy od sumy dwóch boków pozostałych. Jeżeli pomiar robiono dokładnie, a wykres starannie, to zmierzone woltomierzem U, oraz otrzymane z wykresu $U = U_1 \hat{+} U_2$ /$\hat{+}$, $\hat{}$ dodawanie geometryczne/ będą się zupełnie zgadzać. Mając już gotowy wykres, obliczamy L_1, L_2, oraz L w ten sposób, że odczytane z wykresu wartości $I.L_1.\omega$, $I.L_2.\omega$, oraz $I.L.\omega$ dzielimy przez $I.\omega$; widzimy tu wyraźnie, że $L = L_1 + L_2$. Poszczególne oporności pozorne Z_1, Z_2, Z obliczamy ze wzorów:



$$Z_1 = \frac{U_1}{I}, \qquad Z_2 = \frac{U_2}{I}, \qquad Z = \frac{U}{I}.$$

Kąty przesunięcia faz φ_1, φ_2, φ możemy odczytać kątomierzem wprost z wykresu, a gdy chcemy mieć cosinusy tych kątów, to ważne są wyżej podane już wzory. Możemy także $\cos\varphi_1$, $\cos\varphi_2$, $\cos\varphi$ otrzymać konstrukcyjnie. Zakreślamy w tym celu czwartą część obwodu koła promieniem r = 1 dm, ustawiając nóżkę cyrkla w początku wektora $I.R_1$; punkt ten przyjmujemy za początek układu spółrzędnych prostokątnych. Odcięte punktów przecięcia się wektorów U_1 oraz U /względnie ich przedłużeń/ z obwodem koła w dm, podają nam wprost $\cos\varphi_1$ i $\cos\varphi$. Aby otrzymać tutaj $\cos\varphi_2$, musimy poprowadzić z przyjętego początku układu prostą równoległą do U_2, aż do przecięcia się z obwodem koła. Odcięta tego punktu podaje nam $\cos\varphi_2$.

B a d a n i e i m p e d a n c j i p o ł ą c z o n y c h r ó w n o l e g l e. W układzie połączeń 6, impedancje pierwsza i druga są te same, co w układzie 5. Po uzyskaniu 1500 obr./min., oraz U = 220 V, odczytujemy I, I_1 oraz I_2. Na podstawie otrzymanych odczytów /i znanych oporności rzeczywistych/ możemy uskutecznić w e k t o r i a l n e s k ł a d a n i e p r ą d ó w. Trójkąty napięć dla obu impedancyj posiadają wspólną przeciwprostokątną, bo U jest to same, gdyż obie gałęzie są pod tym samym napięciem /minimalny spadek anpięcia w amperomierzach pomijamy/. Celem uzyskania kątów prostych /90°/ zakreślamyna wektorze U, jako na średnicy półkole /kąty w półkolu!/. Wyliczamy wartości wektorów $I_1.R_1$ oraz $I_2.R_2$, i przyjmując je za promienie, zakreślamy łuki z początku wektora U. Otrzymane punkty przecięcia się tych łuków z półkolem łączymy z końcem wektora U i w ten sposób otrzymujemy $I_1.L_1.\omega$ oraz $I_2.L_2.\omega$, tak co do wielkości jak i kierunku. Są to bowiem trzecie boki trójkątów prostokątnych o danych już U, oraz I_1R_1, względnie $I_2.R_2$. Wiadomo, że wektory $I_1.R_1$ oraz $I_2.R_2$ mają te same kierunki, co I_1, oraz I_2, więc na wyrysowanych już wektorach $I_1.R_1$ i $I_2.R_2$ odcinamy w pewnej przyjętej skali odczytane wartości I_1 i I_2. Po dodaniu /geometrycznym/ wektorów natężeń prądów, otrzymujemy wypadkowy wektor I w tej samej przyjętej skali /powinien zgadzać się z odczytanym na instrumecie natężeniem prądu/. Mając już I, znajdujemy I.R oraz $I.L.\omega$, łącząc punkt przecięcia się wektora I /względnie jego przedłużenia/ z początkiem i końcem wektora U.



Skoro wykres został już skonstruowany, wyliczamy indukcyjności własne, oporności pozorne i cosinusy kątów przesunięcia faz w sposób podany w ustępie poprzednim. Konstrukcja dla $\cos\varphi_1$ i t.d. różni się od poprzednio podanej o tyle, że tu bierzemy odcięte punktów przecięcia się wektorów I.R, $I_1.R_1$ i t.d. z ćwierćkolem /p. wykres/.

Kontrolą poprawnego wykonania pomiarów i wykresów będzie to, że L_1 i L_2, Z_1 i Z_2 oraz $\cos\varphi_1$ i $\cos\varphi_2$ otrzymane przy łączeniu impedancyj szeregowym i równoległym są te same.

Ćwiczenie 60.

Zdjęcie statycznej /biegu luźnego/ i dynamicznej /obciążenia/ charakterystyki magnetycznej generatora, oraz konstrukcja charakterystyki napięciowej /zewnętrznej/ i krzywej regulacji.

Sposób zdejmowania charakterystyki statycznej magnetycznej:
$E = f/i_m/$ przy $I = 0$ amp. oraz $n = const.$,
opisany jest już w ćwiczeniu 20.

Charakterystyka dynamiczna /obciążenia/ podaje nam zależność:
$U = f/i_m/$ przy $I = const \neq 0$ amp, $n = const.$
Układ połączeń jest taki sam, jak w ćwiczeniu 21., tylko obciążenie uzyskujemy tutaj nie lampkami, lecz opornicą. Aby otrzymać charakterystykę dynamiczną, doprowadzamy generator do nominalnej ilości obrotów /za pomocą napędzającego go motoru elektrycznego/. Wzbudzenie dajemy obce, gdyż w innym wypadku nie uzyskalibyśmy dowolnie żądanej wartości U z powodu samowzbudzenia na prostolinijnej części charakterystyki magnetycznej. Opornica jest użyta celem otrzymania czulszej regulacji, niż przy użyciu lamp, wbudowanych w stację. Pomiar przeprowadzamy przy stałym wzroście i_m /bez wahań ze względu na histerezę/. Opór więc zewnętrzny musi być początkowo nastawiony na najmniejszą oporność. Pierwszy punkt otrzymuje się w ten sposób, że przy nominalnej ilości obrotów, oraz $i_m = 0$ amp. staramy się R_z nastawić tak, by otrzymać żądane I. Gdy się to nie uda osiągnąć, wzbudzamy generator o tyle, że U wzrośnie tak, że już otrzymamy żądaną wartość na I, którą możemy obliczyć wzorem: $I = U:R_z$; wówczas robimy równocześnie odczyty: U, i_m, I oraz n.

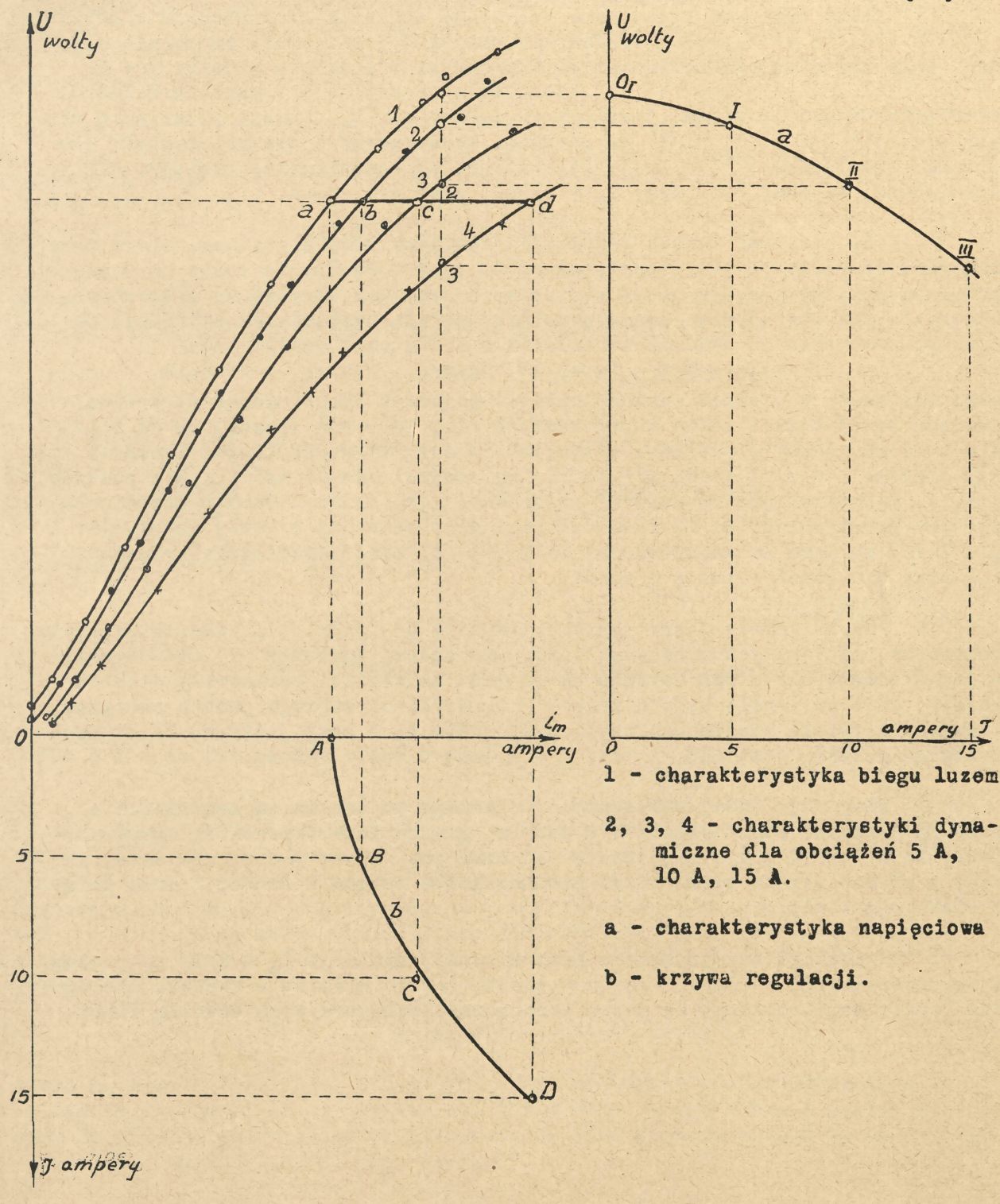
Następne punkty zdejmujemy w ten sposób, że najpierw zwiększamy oporność R_z oporu zewnętrznego, następnie i_m /można, a nawet wygodniej jest wykonywać te czynności równocześnie, ale w każdym razie nie przeciwnie, t.j. najpierw zwiększać i_m, a później R_z, gdyż mógłbypowstać prąd zbyt duży/,później obroty. Gdy I nie jest jeszcze dokładnie nastawione, czynimy to przy pomocy R_z, lub przez zwiększenie i_m /o ile U mało się różni od wartości przy poprzednim odczycie/, przy czym koniecznym jest równoczesne nastawienie obrotów, gdyż ze wzrostem I zmniejszają się . Gdy n jest nominalne, a I żądane, wówczas mamy chwilę do zrobienia odczytu.

W ten sposób zdejmujemy około 12 punktów, aż do uzyskania U nomin. Przy naszym ćwiczeniu, dla I = 10 i 15 amp. nie dochodzimy do U nominalnego. Przyczyną tego jest to, że źródło wzbudzenia nie ma potrzebnych 230 V napięcia, tylko około 125 V, więc nawet przy całkowitym wyłączeniu opornicy w obwodzie wzbudzenia, wskutek obecności oporności R_m /magnesów/ i R_{amp} /amperomierza/, $i_m = 125 : /R_m + R_{amp}/$ był za mały, aby wytworzyć taką siłę elektromotoryczną, by:

$$U = E - 15.R_{tw} - U_{szcz} = 230\ V.$$

Zdjęte zostały charakterystyki dynamiczne dla I = 5, 10, 15 amp. Przy pomocy tych charakterystyk i charakterystyki magnetycznej możemy skonstruować charakterystykę napięciową i krzywą regulacji.

K o n s t r u k c j a c h a r a k t e r y s t y k. Aby otrzymać charakterystykę zewnętrzną /napięciową/, wykreślamy prostą i_m = const. /t.j. równoległą do osi U, patrz rys.poniżej/, a ona przetnie dane charakterystyki



1 - charakterystyka biegu luzem

2, 3, 4 - charakterystyki dynamiczne dla obciążeń 5 A, 10 A, 15 A.

a - charakterystyka napięciowa

b - krzywa regulacji.

w punktach: 0, 1, 2, 3. Ponieważ te punkty leżą na charakterystykach obciążenia /dynamicznych/ więc podają nam napięcia generatora przy różnych prądach, czyli U = f/I/; ponieważ równocześnie znajdują się te punkty na prostej i_m = const, więc te napięcia odnoszą się również do tego samego prądu wzbudzającego /i_m = const/. Ostatni warunek, aby także było n = const, jest spełniony, bo wszystkie podane krzywe były zdejmowane przy tym samym "n"; w ten sposób mamy:

U = f/I/ przy i_m = const, oraz n = const.

Skoro już mamy wyznaczone potrzebne napięcia przy stałych obrotach i stałym prądzie wzbudzenia, wykreślamy krzywą U = f/I/ tak, że rysuje się obok drugi układ współrzędnych /U,I/ i prowadzi się cztery proste: I = 0, I = 5, I = 10, I = 15 amp, t. zn. równolegle do osi U, a z punktów 0,1,2,3, równoległe do osi I, która jest przedłużeniem osi i_m. Punkty przecięcia się tych prostych 0_I, I, II, III, są punktami konstruowanej charakterystyki zewnętrznej /napięciowej/ U = f/I/, jako leżące na odpowiedniej odciętej /I/ i odpowiedniej rzędnej /U/, przy i_m = const, oraz n = const.

Aby otrzymać krzywą regulacji, rysujemy prostą poziomą, która przecina dane charakterystyki w punktach a, b, c, d. Punkty te leżąc na prostopadłej do osi "U", podają stałe napięcie, a przez to, że leżą na różnych charakterystykach obciążenia /dynamicznych/, podają napięcia na zaciskach generatora przy różnych prądach wzbudzenia i obciążenia, czyli mamy:

i_m = f/I/ przy U = const., oraz n = const.

/dlaczego jest n = const. podano wyżej/. Aby teraz skonstruować tę krzywą, rysujemy niżej trzeci układ współrzędnych /i_m, I/ w ten sposób, że oś i_m będzie wspólną, a oś "I" stanowi przedłużenie osi "U" w dół. Teraz prowadzi się trzy proste: I = 5, I = 10, I = 15 /t. zn. równoległe do osi i_m/ a z punktów a, b, c, d, równoległe do osi "U" /względnie I,bo detto/. Punkty przecięcia się tych prostych: A, B, C, D są punktami konstruowanej krzywej regulacji: i_m = f/I/, bo leżą na odpowiedniej odciętej /I/ oraz odpowiedniej rzędnej /i_m/ przy U = const, oraz n = const.

Jak z rysunku jasno czytamy, funkcja U = f/I/, t.j. charakterystyka zewnętrzna nie jest jednoznaczną, t.zn., że pewnej wartości "I" nie odpowiada jakaś ściśle określona wartość na U, lecz zależy to /pominąwszy stan nagrzania/ od tego, jakie było U przy I = 0, czyli od którego punktu zaczynamy tę charakterystykę zdejmować, czyli przy jakim i_m i przy jakim n, bo od tych wielkości zależną jest SEM, a przy I = 0 jest U = E = SEM-ej.

Mamy więc tutaj uzasadnione, dlaczego konieczne są zastrzeżenia: "przy i_m = const. i n = const.". Z chwilą, gdy te zastrzeżenia są uskuteczniane, to E = f/I/ staje się ściśle jednoznaczną /rzecz jasna, dla danej maszyny/, a U = f/I/ o tyle, o ile nie nastąpiła zmiana oporności przez zmiane stanu nagrzania.

Z analogicznych powodów przy krzywej regulacji i_m = f/I/ potrzebne są zastrzeżenia: U = const. oraz n = const, jak to widzimy z rysunku. Ze sposobu konstrukcji widzimy, że można konstruować tych krzywych dowolną ilość.

Ćwiczenie 54.

Pomiar mocy elektrycznej watomierzem i cechowanie tegoż.

W prądzie stałym moc jest podana wzorem: P = U.I. W prądzie zmiennym jednak tak U jak I zmieniają się z każdym momentem, więc $U_t.I_t$ przedstawia nam moc chwilową, której wartość ulega ciągłym zmianom /U_t oraz I_t są to wartości chwilowe/. Aby otrzymać wartość średnią, bierzemy:

$$P = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T U_t.I_t.dt \ldots\ldots \qquad \ldots\ldots 1/$$

Wzór ten odnosi się do wszystkich prądów okresowo zmiennych, bez względu na kształt krzywej napięcia, czy natężenia. Gdy mamy do czynienia z prądem sinusoidalnym, to:

$$I_t = I_{max}.\sin\omega.t \ldots\ldots \qquad \ldots\ldots 2/$$

$$U_t = U_{max}.\sin/\omega.t + \varphi/\ldots\ldots \qquad \ldots\ldots 3/$$

gdy przyjęliśmy obciążenie bezindukcyjne, t.j., że napięcie wyprzedza prąd /rys./. Wstawiając te wartości we wzór 1/ otrzymamy:

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T \left[U_{max}.\sin/\omega.t + \varphi/.I_{max}.\sin\omega t\right].dt$$

$$P = \frac{U_{max}.I_{mx}}{T}\int_0^T /\sin^2\omega.t.\cos\varphi + \sin\omega.t.\cos\omega.t.\sin\varphi/.dt$$

$$P = \left|\frac{U_{max}.I_{max}}{T.\omega}.\cos\varphi./\frac{\omega.t}{2} - \frac{\sin\omega.t.\cos\omega.t}{2}/ + \frac{\sin\varphi}{2}.\sin^2\omega.t\right|_0^T$$

Pamiętając, że $\omega = \frac{2.\pi}{T}$, otrzymujemy:

$$P = \frac{U_{max}.I_{max}}{T.\omega}.\cos\varphi./\frac{\omega.T}{2} - 0/ + 0 - 0 = \frac{U_{max}.I_{max}}{T.\omega}.\frac{T}{2}\cos\varphi$$

$$P = \frac{U_{max}.I_{max}}{2}.\cos\varphi = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}}\cdot\frac{I_{max}}{\sqrt{2}}.\cos\varphi = U.I.\cos\varphi$$

$$P = U.I.\cos\varphi ,$$

gdzie U i I są wartościami skutecznymi.

Ponieważ watomierz podaje nam moc, więc musi uwzględnić tak U,jak I, oraz $\cos\varphi$. Watomierz zbudowany na zasadzie elektrodynamometru uwzględnia wszystkie te czynniki przez to, że jego cewka stała pobiera prąd "I", zaś cewka ruchoma jest pod napięciem U. Wzajemne działanie na siebie cewek jest proporcjonalne do pól magnetycznych, jakie te cewki wytwarzają /v. uwaga niżej/, a pola te są znowu wprost proporcjonalne do prądu, jaki przez te cewki przepływa, o ile nie mamy w pobliżu żelaza; średnia wartość tej siły wyrazi się wzorem:

$$F_1 = \frac{1}{T}\int_0^T c_1 \frac{U_t}{R_b}.I_t.dt$$

gdzie R_b jest oporem cewki napięciowej, c_1 jest stałą proporcjonalności, a U_t oraz I_t są wartościami chwilowymi, o ile mamy do czynienia z prądem zmiennym. Tę siłę równoważy siła sprężyny, która jest proporcjonalna do kąta skręcenia: $F_2 = c_2.\alpha$, więc $F_1 = F_2$, czyli:

$$\frac{1}{T}\int_0^T c_1 \cdot \frac{U_t}{R_b} \cdot I_t \cdot dt = c_2 \cdot \alpha,$$

lub biorąc wszystkie stałe na jedną stronę:

$$\frac{1}{T}\int_0^T U_t \cdot I_t \cdot dt = c \cdot \alpha$$

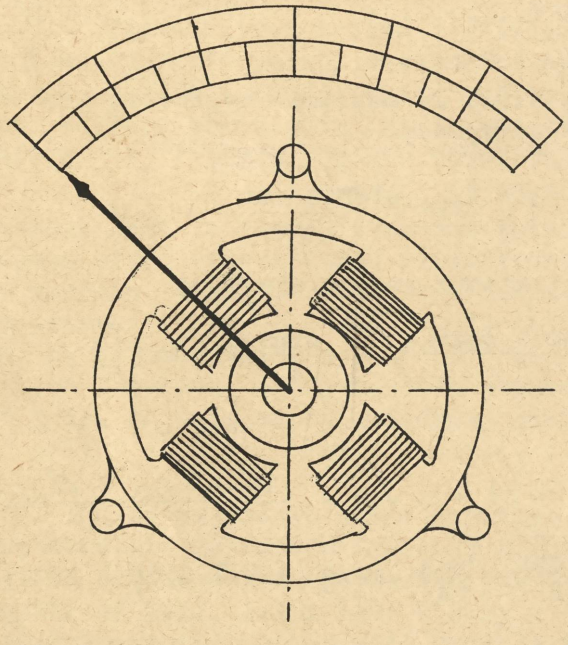
Jednak widzimy, że lewa strona to wzór 1/, więc:

$$P = c \cdot \alpha = U \cdot I \cdot \cos\varphi.$$

Moc jest wprost proporcjonalna do α, więc skala będzie równomierna. Dla prądu stałego mamy wprost:

$$c_1 \frac{U}{R_b} \cdot I = c_2 \alpha, \qquad \text{więc} \qquad U \cdot I = P = c \cdot \alpha.$$

U w a g a. Oddziaływanie cewek na siebie zależne jest jeszcze od wstawy kąta, jaki te cewki ze sobą tworzą, jednak przez odpowiednią konstrukcję cewek wpływ ten tutaj jest wyeliminowany.



Watomierz zbudowany na zasadzie prądów wirowych /Ferraris'a, typ bębnowy/, nadający się tylko do mierzenia mocy prądu zmiennego, ma cztery bieguny ustawione każdy w ⊥ stosunku do sąsiedniego pod kątem prostym /v.rys./. Bieguny przeciwległe sobie mają cewki, przez które przepływa ten sam prąd, przez jedną parę cewek płynie prąd U : R_b, przez drugą prąd I. Prądy te wytwarzają pola magnetyczne, które znów wywołują w bębnie aluminiowym, umieszczonym obrotowo w środku między biegunami prądy wirowe. Tak otrzymujemy moment, który chce obrócić ów bęben aluminiowy. Moment ten jest proporcjonalny do pól magnetycznych, więc do prądów, które je wywołały i do wstawy kąta między tymi polami, czyli:

$$M_d = c_1 \frac{U}{R_b} \cdot I \cdot \sin(90^\circ + \varphi).$$

Kąt 90° powoduje wzajemne położenie biegunów, a φ - przesunięcie fazowe, razem więc jest kąt $90^\circ + \varphi$.

Równoważny moment daje tu także sprężyna, więc:

$$c_1 \frac{U}{R_b} \cdot I \cdot \sin(90^\circ + \varphi) = c_2 \cdot \alpha,$$

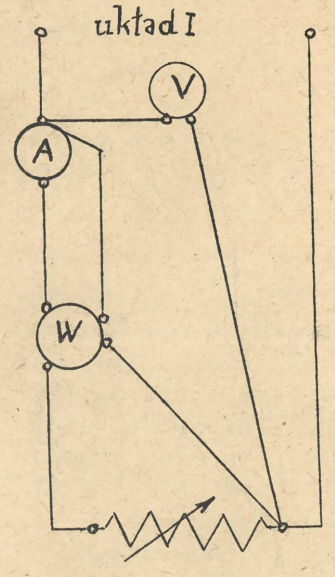
czyli biorąc stałe na jedną stronę i uwzględniając, że:

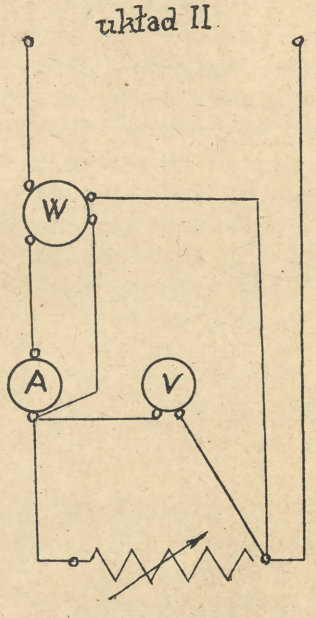
$$\sin(90^\circ + \varphi) = \cos\varphi$$

$$I \cdot U \cdot \cos\varphi = P = c \cdot \alpha$$

czyli skala także równomierna.

U k ł a d y p o ł ą c z e ń d o p o m i a r u m o c y. Są tu dwa układy, bo innego układu należy użyć, gdy mamy mierzyć moc o dużym stosunkowo napięciu, a małym natężeniu, czy na odwrót, dalej - czy mierzymy





moc źródła, dostarczającego energii, czy też moc pobraną przez odbieralnik. Ponieważ do pomiarów używamy instrumentów, a te, aby mogły wskazywać, muszą mieć dostarczoną pewną moc, dlatego koniecznym jest stosowanie poprawek mocy. Instrumenty powodują, że raz czytamy tu fałszywe napięcie, a dobre natężenie, w innym wypadku naodwrót.

Poprawki do układu I. a/ Moc odbieralnika: $P_o = P - I^2./R_A + R_W/$

b/ Moc źródła:

$$P_z = P + U^2/\frac{1}{R_V} + \frac{1}{\rho}/ .$$

Poprawki do układu II.

a/ Moc odbieralnika:

$$P_o = P - U^2/\frac{1}{R_V} + \frac{1}{\rho}/$$

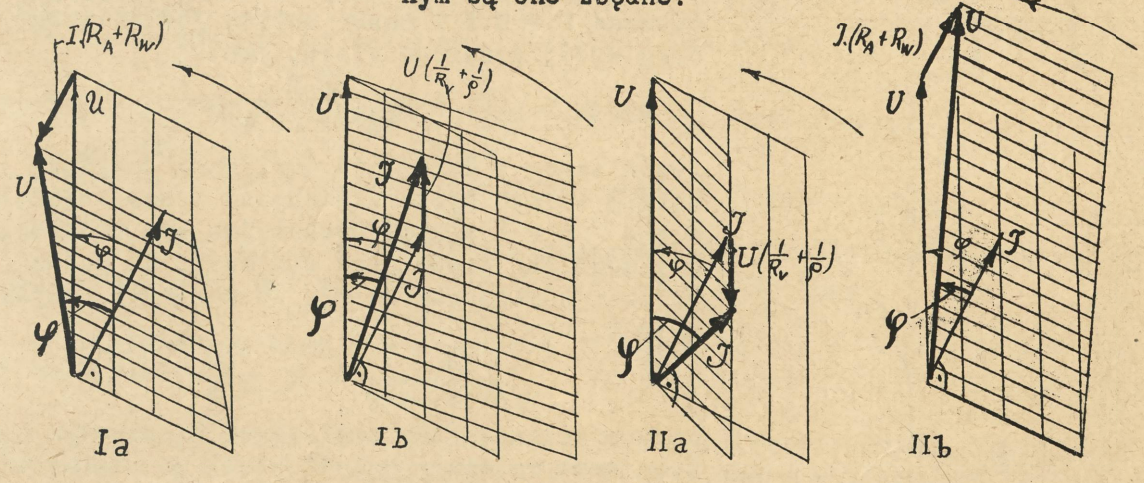
b/ Moc źródła:

$$P_z = P + I^2./R_A + R_W/$$

gdzie: R_A = oporność amperomierza,
R_V = oporność woltomierza
R_W = oporność cewki prądowej watomierza
ρ = oporność cewki napięciowej watom.
P = moc wskazana przez watomierz.

Wykreślne przedstawienie poprawek natężenia względnie napięcia oraz kątą φ i mocy, gdy napięcie i prąd nie są we fazie, przedstawia poniższy rysunek. Poprawki narysowane są grubszymi liniami /wzgl. gęściej zakreskowane/.

Do cechowania watomierza elektrodynamicznego za pomocą prądu stałego, robimy układ połączeń, przedstawiony na następnej stronie. Przełączniki konieczne są dla usunięcia wpływu magnetyzmu ziemskiego; przy prądzie zmiennym są one zbędne.

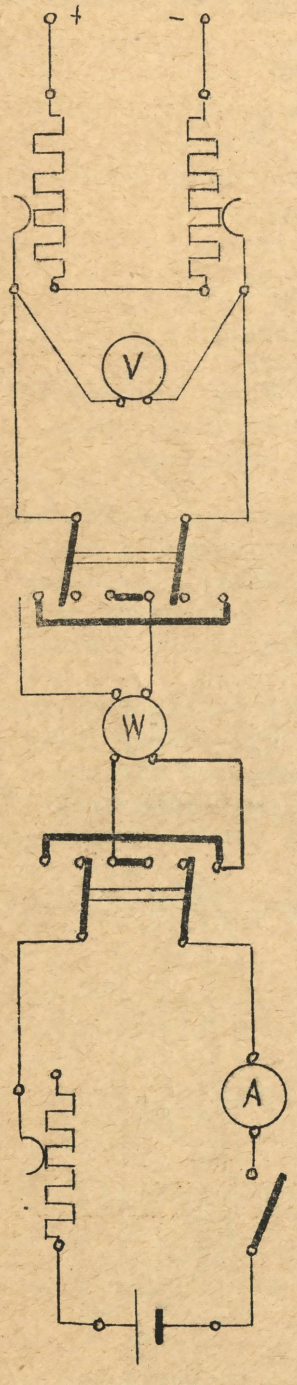


Łącząc według układu II /nast.str./ możemy cechować badany watomierz /n.p. prądem zmiennym/ według watomierza przyjętego za normalny.

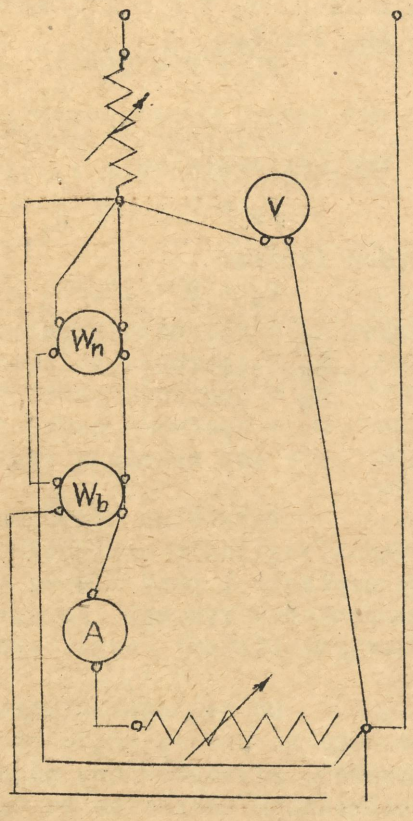
Ćwiczenie 59.

Badanie obwodu zawierającego impedancję i pojemność w łączeniu szeregowym; wyrównanie przesunięcia fazy pojemnością.

Układ I.



Układ II.



Gdy mamy do czynienia z prądem zmiennym, wówczas do obliczenia mocy nie wystarczy znajomość natężenia prądu i napięcia, lecz musimy jeszcze mieć $\cos\varphi$, gdyż:

$$P = U.I.\cos\varphi$$

dla prądu jednofazowego,

$$P = U.I.\sqrt{3}.\cos\varphi$$

dla prądu trójfazowego, względnie należy użyć specjalnego przyrządu, który już uwzględnia $\cos\varphi$, a którym jest watomierz. Skoro więc w jakimś obwodzie elektrycznym prądu jednofazowego wbudowano watomierz, woltomierz i amperomierz, to już mamy możność znalezienia $\cos\varphi$, gdyż:

$$\cos\varphi = \frac{P}{U.I}$$

gdzie P wskaże nam watomierz.

Gdy w obwodzie jest tylko opór omowy, to $\cos\varphi = 1$, więc $P = U.I$. Skoro prócz oporu omowego mamy także indukcyjny, to wówczas $P \neq U.I$ i $\cos\varphi$ możemy już obliczyć według wyżej podanego wzoru, lub:

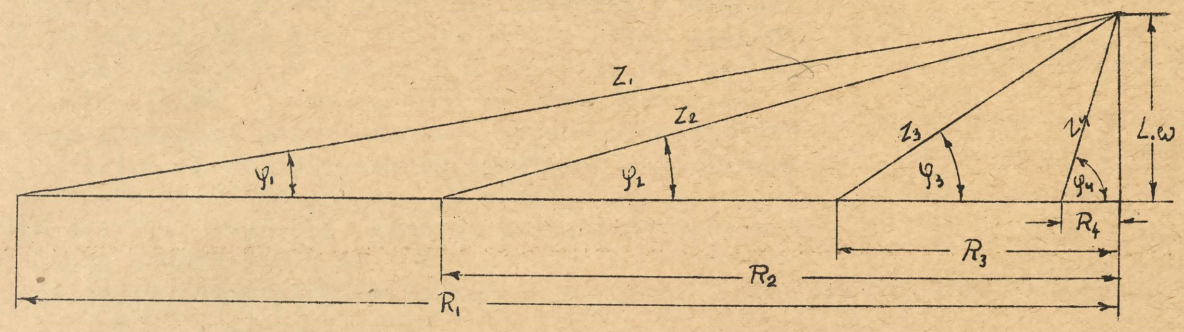
$$\cos\varphi = \frac{R}{Z} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + /L.\omega/^2}}$$

/wzór znany z ćwiczenia 57/. Wzór powyższy jest ściśle ważny tylko dla obwodu z samoindukcją bez żelaza. Dyskutując go, widzimy, że gdy opór /R/ omowy jest tak duży, że można $/L.\omega/^2$ opuścić w stosunku do R^2, to $\cos\varphi \to 1$, czyli $\varphi \to 0$, bo:

$$\frac{R}{\sqrt{R^2 + \to 0}} = \frac{R}{R} = \sim 1$$

Gdy teraz zaczniemy zmniejszać R przy tym samym $L.\omega$ zaczyna $\cos\varphi$ maleć, czyli φ wzrastać. Można to przedstawić wykresem.

Widzimy tu jasno, że przy L.ω = const, zmniejszanie R pociąga za sobą wzrost kąta φ /czyli zmniejszanie się cosφ/, a zmniejszenie "Z".



Ponieważ zaś prąd płynący w tym obwodzie oblicza się wzorem:

$$I = \frac{U}{Z}, \quad \text{a tutaj} \quad U = \text{const /oraz } \omega = \text{const/},$$

więc zmniejszenie "Z" powoduje wzrost I. Moc zużytą w tym obwodzie obliczamy jak wyżej podano wzorem: P = U.I.cosφ, czyli tu, gdy zmniejszymy opór R przy L.ω = const., jeden czynnik jest stały /U/, jeden wzrasta /I/, a jeden zmniejsza się /cosφ/, więc nie można z góry orzec, czy P wzrośnie, czy zmaleje,czy też może będzie stałe. Krótka jednak dyskusja wzorów:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + /L.\omega/^2}} \qquad \text{i} \qquad \cos = \frac{U}{\sqrt{R^2 + /L.\omega/^2}}$$

objaśni nas, że gdy mamy R duże w stosunku do L.ω, to musi "I" prędzej róść, niż cosφ maleć /we wzorze na cosφ tak licznik, jak i mianownik są prawie, że tej samej wielkości i prawie, że o tę samą wartość zostały zmniejszone przy zmniejszeniu R, więc zmiana wartości ułamka musi być minimalna; we wzorze na I tylko mianownik zmniejsza się, więc wartość I musi wzrastać. Przeciwnie,gdy R zmniejszymy tak, że jest znikome w stosunku do L.ω, to dalsze jego zmniejszenie już mało przyczynia się do powiększenia "I", a natomiast całkiem wydatnie do zmniejszenia cosφ/bo w liczniku jest samo R/. Uwzględniając to wszystko, możemy twierdzić, że moc pobierana przez taki obwód, przy zmniejszeniu R od dużej wartości /w stosunku do L.ω/ do małej, będzie początkowo wzrastać, osiągnie pewne maksimum, które może trwać od jakiegoś R_m do R_n, t.j. na tej przestrzeni /o ile taka będzie/, gdzie I będzie tak szybko wzrastać, jak szybko będzie cosφ maleć, a następnie zacznie "P" maleć.

Chcąc znaleźć to maksimum, liczymy w ten sposób:

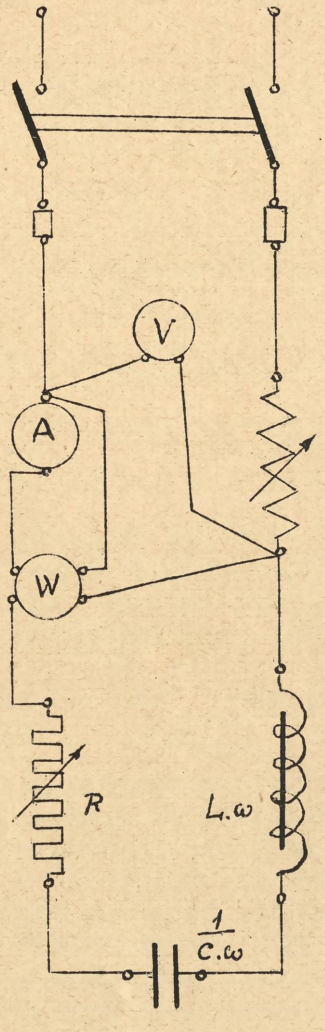
$$P = U.I.\cos\varphi = U.\frac{U}{\sqrt{R^2 + /L.\omega/^2}} \cdot \frac{R}{\sqrt{R^2 + /L.\omega/^2}} = \frac{U^2.R}{\sqrt{R^2 + /L.\omega/^2}}$$

$$\frac{dP}{dR} = \frac{U^2.[R^2 + /L.\omega/^2] - 2.U^2.R^2}{[R^2 + /L.\omega/^2]^2} = 0; \quad \text{skąd} \quad R = L.\omega$$

/ściśle: R = ± L.ω, znak tu jednak nie odgrywa żadnej roli/. Znajdując drugą pochodną, przekonamy się, że dla wartości R = L.ω jest P_{max}.

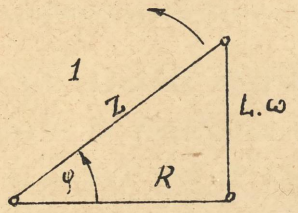
Oczywiście, samo się przez się rozumie, że gdy $R \to \infty$, to $I \to 0$, oraz $P \to 0$, zatym $P_{min} = 0$.

Aby się przekonać o prawdziwości wywodów teoretycznych, robimy układ połączeń /na stronie następnej/, z którego w obwód włączamy na razie tylko opór omowy. Biorąc różne wartości na R, oraz utrzymując U = const, odczytujemy równocześnie U, I oraz P i w ten sposób stwierdzamy, że stale:



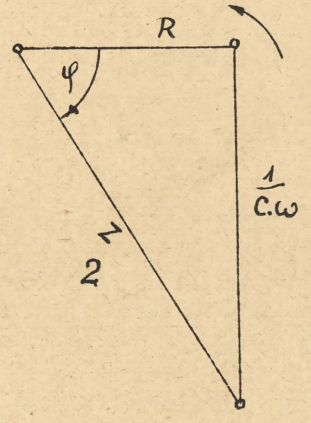
$$\cos\varphi = \frac{P}{U.I} = 1$$

Następnie włączamy szeregowo prócz oporu omowego jeszcze cewkę bez żelaza i teraz zmniejszamy R, robiąc dla każdego R odczyty: U = const, oraz I, P, a następnie wyliczamy $\cos\varphi$. Dalej, nie zmniejszając oporu, wkładamy rdzeń żelazny i obserwujemy silne zmniejszanie się tak I, jak i $\cos\varphi$, a szczególnie P. Robimy tu kilka odczytów dla różnych położeń rdzenia. Zjawiska te łatwe były do przewidzenia, gdyż przez wkładanie żelaza do cewki zmieniamy L, bo:



$$L = \frac{0{,}4.\pi.z^2.q.\mu}{l} 10^{-8} \text{ henr.}$$

Dla powietrza $\mu = 1$, dla żelaza zaś przybiera duże wartości, czyli L musiało wzróść, więc:



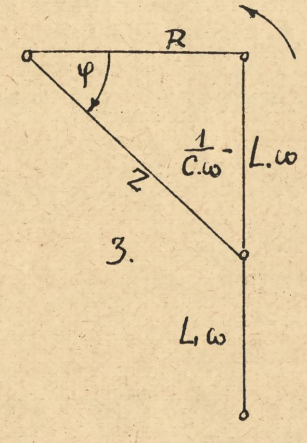
$$I = \frac{U}{R^2 + /L.\omega/^2},$$

oraz

$$\cos\varphi = \frac{R}{R^2 + /L.\omega/^2}$$

/wzór dla żelaza nieścisły/ musiały zmaleć, a tym bardziej $P = U.I.\cos\varphi$, gdy równocześnie oba czynniki zmalały.

Czwartą serię odczytów otrzymujemy, włączając szeregowo jeszcze kondenzator i znowu zmniejszając opór omowy. Obwód zachowuje się podobnie, jak w wypadku, gdy była tylko dana cewka z oporem omowym, tylko teraz wszystkie wartości mają wyższe maksimum. To dowodzi, że Z zmalało, a ponieważ dla obwodu elektrycznego, w którym mamy połączone szeregowo opory: omowy, indukcyjny i pojemnościowy, jest:



$$Z = \sqrt{R^2 + \left(L. - \frac{1}{C.\omega}\right)^2}$$

/v. wykres 3/, stąd wniosek, że:

$$\left|L.\omega - \frac{1}{C.\omega}\right| < L.\omega$$

Musimy tu brać wartość bezwzględną, bo nie wiemy jeszcze, co przeważa w tym obwodzie, pojemność czy indukcja. Aby ten problem tutaj rozwiązać, korzystamy ze stwierdzonego już faktu, że przez wkładanie rdenia żelaznego $L.\omega$ wzrasta. Skoro więc przy wkładaniu żelaza zacznie I i P róść, to mamy dowód, że Z maleje, a to przy R = const nastąpi, gdy:

$$/L. - \frac{1}{C.\omega}/^2 \text{ zmaleje.}$$

Zmniejszenie się tego wyrazu w chwili zwiększenia $L.\omega$ jest możliwe tylko w tym

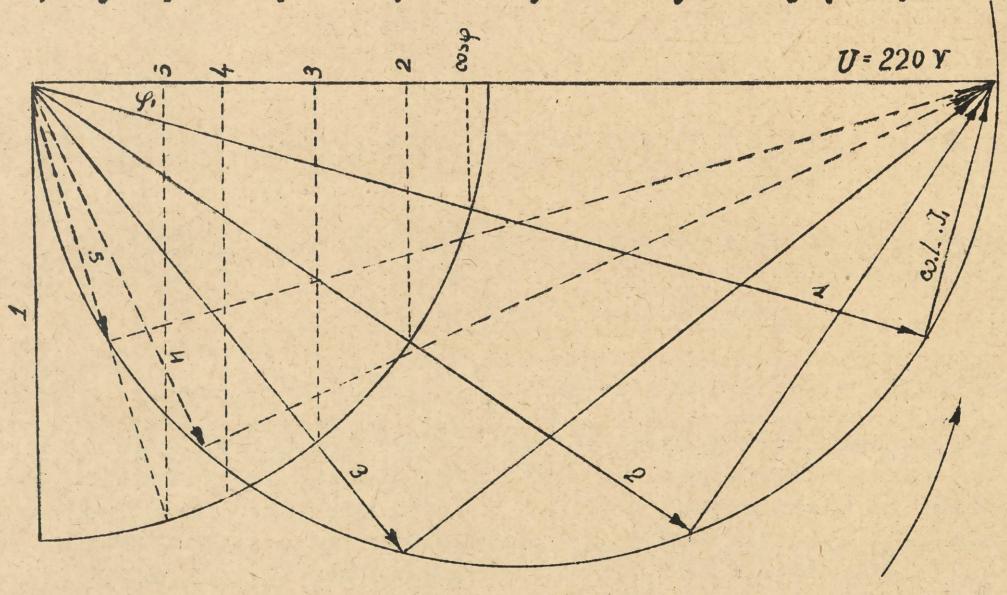
wypadku, gdy: $1 : C.\omega > L.\omega$, czyli mamy wykazane, że pojemność tu przeważa, t. zn. prąd idzie przed napięciem. Wykres 1 przedstawia zestawienie oporów: omowego i indukcyjnego, wykres 2 - omowego i pojemnościowego, wykres 3 - omowego, indukcyjnego i pojemnościowego, przy czym ten ostatni przeważa. Wykresy te powstały z wykresów napięć przez podzielenie przez natężenie prądu.

Z powodu stopniowego zagłębiania rdzenia $L.\omega$ staje się coraz większe. W chwili, gdy:

$$\frac{1}{C.\omega} = L.\omega$$

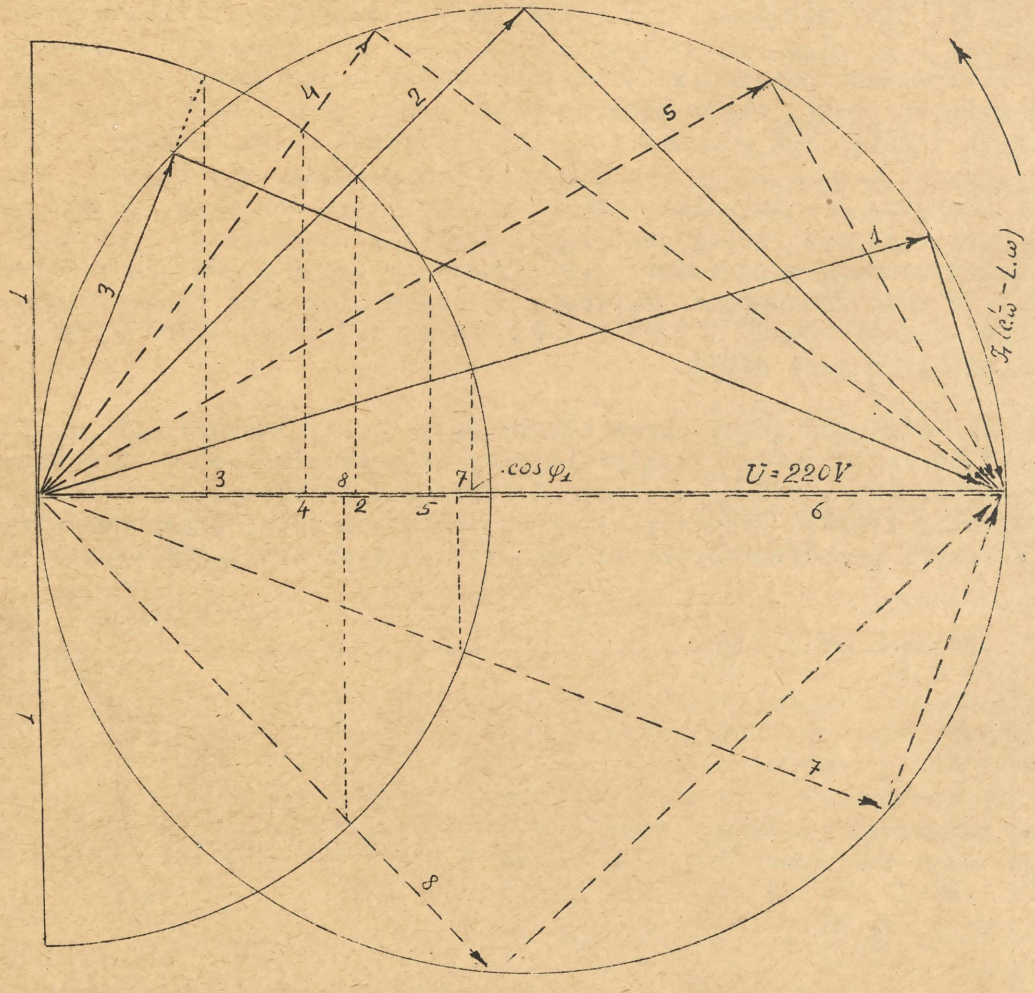
otrzymujemy r e z o n a n s n a p i ę ć, t. j. wypadek, gdzie mimo obecności indukcji i pojemności mamy $\cos\varphi = 1$. Dla tego wypadku jest $P_{max} = U.I.$ Tak samo i "I" jest maksimum, a $U = I.R.$ Dalsze zagłębianie żelaza powoduje dalszy wzrost $L.\omega$, więc otrzymujemy $L.\omega > 1 : C.$ /bo pojemność = const./, czyli znowu otrzymujemy przesunięcie między prądem a napięciem /ale teraz napięcie wyprzedza prąd/, czyli zaczyna maleć $\cos\varphi$, prąd i moc. Odczyty robimy przy różnych położeniach rdzenia tak, aby otrzymać kilka punktów: gdy $1 : C.\omega > L.\omega$, uchwycić moment $L.\omega = 1 : C.\omega$, a w końcu kilka, gdy $L.\omega > 1 : C.\omega$. W tej serii odczytów nie zmieniamy oporu omowego, lecz dobieramy go tak, aby przy rezonansie napięć /kiedy jest I_{max}/ prąd nie przekroczył 5 amperów, gdyż użyty w tym ćwiczeniu amperomierz jest zbudowany na 5 A. Należy również uważać na to, że przy rezonansie napięcia na cewce, jak i na kondenzatorze /które są sobie wówczas równe: $I.L.\omega = 1 : C.\omega$/ dochodzą tu do ~500 V, mimo, że całkowite napięcie jest 220 V.

Aby otrzymać jasny obraz zmiany kąta przy zmniejszaniu R, a $L.\omega =$ = const /II seria odczytów/, względnie przy zwiększaniu $L.\omega$, a R = const /III seria odczytów/, robimy wykresy. Z ćwiczenia 57 wiemy, że wektory I.R, I.L. i U tworzą trójkąt prostokątny. Przy pomiarach tutaj przeprowadzonych U = const, czyli przeciwprostokątnia wszystkich tych trójkątów prostokątnych



będzie ta sama, więc możemy ją przyjąć za średnicę półkola, na obwodzie którego muszą leżeć wierzchołki wszystkich trójkątów prostokątnych, a więc tych, które mamy skonstruować. Mamy więc dane dwa wierzchołki i miejsce geometryczne dla trzeciego wierzchołka; wystarcza znaleźć teraz kierunek dla jednej z przyprostokątni, a już trójkąt będzie ściśle oznaczony. Wiemy, że wektor I.R

tworzy z wektorem U kąt φ, którego cosinus mamy wyliczony, więc bez trudności już bok I.R wykreślimy, opierając się na twierdzeniu, znanym z początków trygonometrii, że cosφ jest wprost podane przez odciętą punktu przecięcia promienia wykreślonego pod kątem φ, z obwodem koła o promieniu równym jednostce /początek układu stanowi początek U/, odcinamy cos φ, jako odciętą i przy danej odciętej kreślimy prostopadłą do osi odciętych aż do przecięcia się z ćwierćkolem; otrzymany w ten sposób punkt łączymy z początkiem układu, otrzymując kierunek wektora I.R; przez przedłużenie tego odcinka do przecięcia się z obwodem półkola o średnicy U otrzymujemy już i wielkość I.R, a tym samym cały trójkąt może być wykreślony. W ten sposób otrzymujemy cały szereg trójkątów prostokątnych dla każdego R czy L.



Dla wypadku, gdy w obwodzie mamy jeszcze pojemność, robimy wykres osobno. Tutaj także otrzymujemy trójkąty prostokątne, ale jedna przyprostokątnia, zamiast L.ω jest teraz /L.ω - 1 : C.ω/, względnie /1 : C.ω - L.ω/. Sposób konstrukcji tych trójkątów jest ściśle ten sam , co poprzednio, różnica jest tylko w tym, że zamiast półkola budujemy całe koło na średnicy U i zamiast ćwiartki koła rysujemy półkole o promieniu równym jednostce, gdyż mamy tu $+\varphi$ i $-\varphi$, czyli raz przewagę indukcji, innym razem pojemności.

Aby poznać, które trójkąty odnoszą się do tego okresu, gdy przeważała pojemność i naodwrót, dajemy strzałkę kierunku obrotów wektorów i zaznaczamy odpowiednio /1 : C.ω - L.ω/, lub /L.ω - 1 : C.ω/. W ogóle przy wykresach wektorialnych nie należy nigdy pomijać tej strzałki, o ile nie zrobi się

zastrzeżenia na początku, że przyjmuje się raz na zawsze jeden kierunek, /np. teraz przyjęty jest przeważnie kierunek odwrotny obrotowi wskazówek zegara/.

U w a g a. Jako zmiennego oporu omowego użyto dwu opornic, połączonych szeregowo, a przy zmniejszeniu oporności wyłączono r ó w n o c z e ś n i e o b a o p o r y, a nie najpierw jeden, a potem drugi. Postępowanie takie jest konieczne z tego powodu, że napięcie sieci wynosi ~220 V, a opornice,użyte w tym ćwiczeniu, są zbudowane na 110 V. Zwykle mamy podane na opornicy tylko omy i ampery i stąd obliczamy, jakie napięcie jest dla takiej opornicy dopuszczalne /U = I.R/. Gdy natomiast mamy opornicę z drutu o różnej grubości, seriami wzrastającej, to zrozumiałym jest, że inny prąd dopuszczalny jest dla części, która ma przekrój drutu mały, inny, gdzie średni, a jeszcze inny, gdzie przekrój jest największy. Gdzie przekrój jest mniejszy,wiemy, że oporność jest większa i naodwrót, a wprost przeciwnie jest z prądem. Wszystko to już będzie uwzględnione, gdy podamy maksymalne dopuszczalne napięcie; chcemy bowiem np. zwiększyć prąd, to jasne, że przy U = const musi R zmaleć, czyli musimy wyłączyć część opornicy; przeciwnie, gdy zwiększamy oporność,to włączamy części o cieńszym drucie, ale teraz I = U.R, jest odpowiednio mniejsze, więc tym cieńszym drutom teraz nie zaszkodzi. Gdybyśmy jednak dali U większe, jak dopuszczalne, np. 220 V zamiast 110 V dla jednej opornicy, to jasne, że najcieńsze druty tej opornicy zostałyby spalone, gdyby praca była trwała, bo przez nie przepływałby prąd dwa razy większy, niż dopuszczalny. Dając natomiast dwie opornice w szereg, uzyskujemy rozdział napięcia na obie i właśnie, aby ten rozdział był po 110 V na każdą, musimy równocześnie obie wyłączać, wzgl. włączać. Gdybyśmy bowiem wyłączyli całkowicie jedną, to druga byłaby pod pełnym napięciem 220 V, czyli cel, który chcieliśmy osiągnąć, dając dwie opornice w szereg, byłby całkiem chybiony.

Ć w i c z e n i e 71.

B a d a n i e m o t o r u w ł ą c z n i L e o n a r d a.

Dyskutując wzór na ilość obrotów motoru elektrycznego bocznikowego dla prądu stałego:

$$n = \frac{U - I./R_{tw} + R_{bp}/ - U_{szcz}}{C.\Phi_{tw}}$$

stwierdzamy, że obroty gotowego motoru można zmienić przez zmianę napięcia na zaciskach twornika, względnie przez zmianę strumienia magnetycznego /nie bierze się tu pod uwagę wżływu obciążenia, który został dokładnie omówiony w ćwiczeniu 28/.

a/. Zmiana ilości obrotów przy pomocy zmiany strumienia magnetycznego idzie zwykle tylko w kierunku zwiększenia ilości obrotów, gdyż normalnie pracujemy przy dużym nasyceniu; drugą wadę stanowi tutaj konieczność zmniejszenia momentu ze wzrostem ilości obrotów /o ile nie chcemy motoru przeciążyć/, co jasno wynika ze wzoru: $M_d = C.I.\Phi_{tw}$. Ten sposób jest więc regulacją przy stałej mocy motoru, gdyż moc motoru podaje wzór:

$$P = M_d.\omega$$

ile wzrośnie ω tyle winno zmaleć M_d, by moc się nie zmieniła. Zaletą tej regulacji jest to, że jest ekonomiczną /bez strat/, dlatego ma zastosowanie

wszędzie tam, gdzie potrzebna jest zmiana ilości obrotów w małym zakresie.

b/. Zmiana napięcia na zaciskach motoru przy pomocy opornicy wstawionej między szyny a motor ma jeszcze poważniejsze wady. Po pierwsze regulacja tu może się odbywać tylko w kierunku zmniejszania ilości obrotów; powtóre jest ona nieekonomiczna, gdyż o ile procent zmniejszymy obroty,tyleż procent energii zniszczymy we wstawionej opornicy. Trzecią poważną wadą jest to, że zmiana napięcia na zaciskach motoru nie jest tutaj dziełem samej oporności /R/ wstawionej opornicy, lecz zależy w równej mierze od przepływającego prądu, bo:

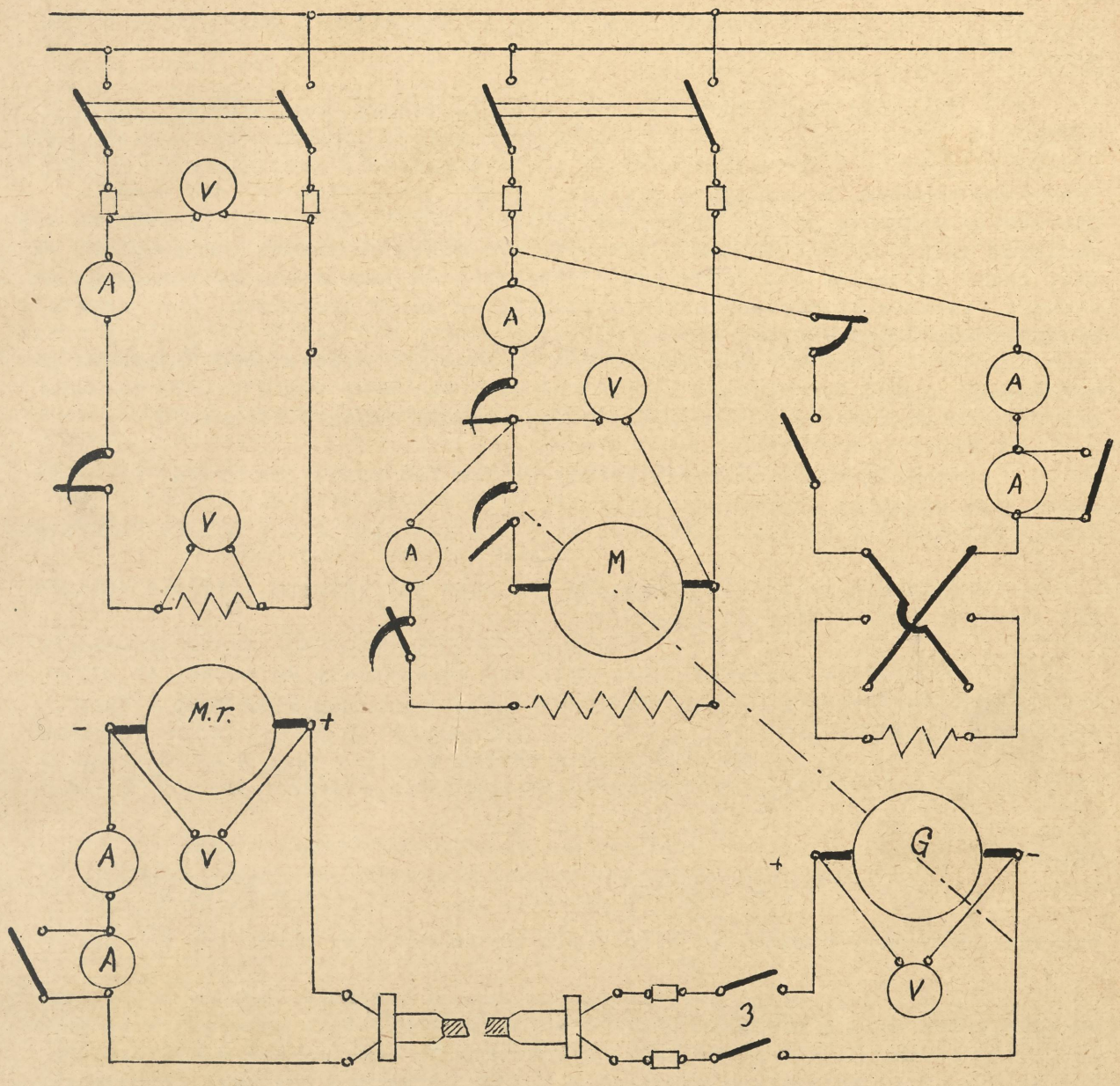
$$U = U_{szyn} - I.R,$$

czyli przy tym samym nastawieniu opornicy U będzie się silnie zmieniać, a co za tym idzie i obroty w zależności od obciążenia. Tą regulacją nie wywieramy wpływu ani na I, ani na Φ_{tw}, więc jest to regulacja przy stałym momencie M_d. Zastosowanie może mieć tam, gdzie mamy ruch dorywczy, gdyż tam w połączeniu z równoczesnym zastosowaniem regulacji przez zmianę Φ_{tw} jest wystarczającą i stosunkowo ekonomiczną /np. laboratoria zakładów naukowych/.

Potrzeba częstej regulacji ilości obrotów w szerokich granicach, zmuszała do szukania innych sposobów ekonomiczniejszych /pod pewnymi warunkami/ i tak powstały nawet stosunkowo dość skomplikowane układy, jak układ do regulacji różnicowej,motoru regulującego /Reguliermotor/, Ward-Leonarda i innych. Właściwie mamy dwa układy Leonarda: jeden dla prądu zmiennego,drugi dla prądu stałego. Tutaj zrobimy układ niżej podany.

Jak widzimy z układu, mamy tu trzy maszyny, t. j. dwa motory i jeden generator, tak ze sobą połączone, że motor roboczy /M.r./, ten którego obroty mamy zmieniać, jest połączony elektrycznie z generatorem. Prze takie połączenie uzyskujemy dokładną regulację napięcia na zaciskach motoru, zmieniając napięcie generatora /regulatorem wzbudzenia/, czyli mamy tu typ regulacji ilości obrotów przez zmianę napięcia. Ponieważ chcemy otrzymać możność regulacji napięcia od $\bar{0}$ do plus i do minus U_{nom}, tym samym obrotów od O do plus i do minus n_{nom}, dlatego wzbudzenie generatora jak i motoru roboczego musimy dać obce. W generatorze dlatego to robimy, bo musimy uniknąć samowzbudzenia, które nie pozwoliłoby na uzyskanie dowolnie żądanego napięcia; druga przyczyna, to konieczność uzyskania możności zmiany kierunku prądu wzbudzenia /dlatego dany przełącznik/, czyli strumienia magnetycznego, by uzyskać zmianę biegunowości generatora, tym samym zmianę biegunowości motoru roboczego, czyli zmianę jego kierunku obrotów, o ile wzbudzenie ma obce. Gdyby motor roboczy był w układzie bocznikowym, to nie tylko niemożliwą byłaby zmiana kierunku obrotów, bo mielibyśmy zmianę kierunku prądu tak w uzwojeniu magnesów, jak i w tworniku, ale także może przekonalibyśmy się, że takiego motoru w ogóle nie moglibyśmy w takim układzie uruchomić. Jak z układu widzimy, to nie mamy tu rozrusznika, czyli, aby motoru, względnie bezpieczników nie spalić, musi być przy rozruchu przyłożone niskie napięcie do jego zacisków. To powoduje, że prąd wzbudzenia będzie mały, zwłaszcza, że uzwojenie twernika stanowi upust, więc także Φ_{tw}, czyli moment $M_d = C.\Phi_{tw}$ będzie mały. I może okazać się za mały, by pokonać bezwładność wirnika, a prąd może tak wzróść, że przepalą się bezpieczniki. W ten sposób została umotywowana konieczność użycia obcego źródła wzbudzenia motoru roboczego i generatora. Jeszcze wypada wspomnieć, że motor roboczy musi mieć bieguny pomocnicze,i że przed tym,gdy nie znano jeszcze biegunów pomocniczych, nie można było regulować obrotów w szerszym zakresie /ponad ± 15%/ z powodu silnego iskrzenia szczotek.

Pomiar przeprowadza się w ten sposób, że po zrobieniu układu połączeń uruchamia się generator motorem, bezpośrednio z nim sprzężonym /M/, do-



prowadzając ilość obrotów do 1170 na minutę, a napięcie motoru do 110 V, przy czym utrzymujemy te wartości stale w czasie całego pomiaru. Wzbudzenia generatora początkowo nie załączamy, więc napięcie jego jest wywołane tylko magnetyzmem szczątkowym, czyli małe. Teraz wzbudzamy motor roboczy prądem nominalnym, gdyż motor ten pracuje normalnie, jako szeregowy /głównikowy/, a następnie załączamy wyłącznik "3" i w ten sposób puszczamy w ruch motor roboczy, który jest nieobciążony. Gdyby jednak motor już był obciążony, to napięcie remanentowe mogłoby się okazać za małe, dlatego należałoby załączyć wzbudzenie generatora i przez zwiększenie prądu wzbudzenia podnieść napięcie o tyle, by wirnik zaczął się obracać; uważać tu jednak należy, by I nie wzrósł aż do przepalenia bezpieczników. Gdy wirnik motoru roboczego już zaczął się obracać podnosimy napięcie do U_{nom} /tutaj do 110 V/, a tym samym obroty do n_{nom}. Pierwszą serię odczytów robimy przy biegu luzem /hamulec zdjęty/. Odczytujemy U_2, I_2, I_m, oraz "n" motoru roboczego /U_1, I_1 są te same, co motoru roboczego, v. układ/, dalej U_1, I_1 oraz "n_1" motoru pomocniczego, gdzie U_1 i "n" mają być stałe i każdy odczyt robimy dopiero po ich ustaleniu. W tej serii odczytów cała regulacja odbywała się przy pomocy opornicy we wzbudzeniu generatora;

zdejmuje się tu około 7 punktów, zmniejszając stopniowo U generatora, a tym samym "n" motoru roboczego.

Następną serię odczytów robi się dla połowy nominalnego prądu, dlatego po zatrzymaniu motoru roboczego /nie motoru pomocniczego!/ przez wyłączenie wyłącznika 3 /po doprowadzeniu prądu wzbudzenia generatora do 0/ zakłada się hamulec, a następnie puszcza w ruch, jak uprzednio, nie hamując. Gdy obroty dochodzą już do nominalnej ilości, czyli $U_2 = \sim U_{nom}$, zaczyna się obciążać motor, t. zn. hamować, starając się uchwycić moment równowagi na wadze, gdzie umieszcza się odpowiednie ciężarki. Na dany znak, że równowaga uzyskana, wszyscy równocześnie robią odczyty na swych aparatach. Tak uzyskuje się pierwszy punkt drugiej serii; następne punkty tej serii otrzymujemy przez zmniejszenie U_2 generatora /regulatorem upustowym/, nastawienie U_1 motoru pomocniczego na 110 V i obrotów na 1170 na min. /bo przy zmniejszeniu obciążenia obie te wartości wzrosły/ i znowu uzyskiwanie momentu równowagi.

Trzecią serię odczytów robimy ściśle tak samo, jak drugą, tylko na wadze jest ciężarek odpowiednio większy, gdyż chcemy otrzymać ca 3/4 I_{nom}, oraz, ponieważ już hamulec założony, więc nie zatrzymuje się motoru roboczego.

Ostatnią serię otrzymuje się tak samo jak trzecią, jedynie zmienia się ciężarek, by uzyskać ca I_{nom}.

Obliczenie ciężarka, jaki musi być umieszczony na wadze, by uzyskać w momencie równowagi obciążenie nominalne, t.j. I_{nom} przy U_{nom} i n_{nom} uskuteczniamy równaniem:

$$M. .9,81 = P \text{ w watach}$$

/P odczytane z tabliczki, umieszczonej na motorze/, czyli:

$$F.l.\frac{\pi.n}{30}.9,81 = P$$

skąd:

$$F = \frac{P.30}{l.\pi.n.9,81} \text{ kg} \qquad /l = 0,785 \text{ m}/$$

Ponieważ mamy wagę decymalną, więc ciężarek umieszczony równa się F : 10.

U w a g a. Układ pozwala nam na zmianę kierunku obrotów motoru roboczego przez zmianę kierunku prądu w obwodzie wzbudzenia generatora za pomocą przełącznika, jednak ze względu na konstrukcję hamulca nie uskuteczniamy tej zmiany. Przy mniejszych obrotach / < 300/ używa się ręcznego tachometru.

Na podstawie wykonanych pomiarów możemy już obliczyć:

1/. sprawność motoru roboczego:

$$\eta_{mot.r.} = \frac{M.\omega.9,81}{U_2.I_2 + U'.I'_m}.100\ \% = \frac{\text{moc odebrana przez hamulec}}{\text{moc dostarczona}}$$

gdzie M = F.l kgm, gdy F w kg, a l w metrach.

ω = prędkość kątowa $\frac{\pi.n_2}{30}$ na sekundę.

$U_2.I_2$ - moc dostarczona motorowi przez generator /w watach/
$U.I_m$ - " " do obwodu wzbudzenia/w watach/

2/ Sprawność agregatu pomocniczego:

$$\eta_{agr.} = \frac{U_2.I_2}{U_1.I_1 + 4,5.I_m}.100\ \%$$

gdzie $U_2.I_2$ watów = moc użyteczna generatora, t.j. dostarczona motorowi roboczemu.

$4,5.I_m$ watów = moc dostarczona do obwodu wzbudzenia. Napięcie wzbudzenia wynosi zaledwie 4,5 V, dlatego, bo generator jest szeregowy. Obliczamy je w ten sposób: prąd wzbudzenia wynosi maksymalnie ca 30 amp., opór uzwojeń magnesów R_m = 0,117 oma; uwzględniając 20 % wzrostu oporności z nagrzaniem,/czyli wzrost temperatury o 50° C/, czyli R'_m = 0,14 oma, obliczymy potrzebne napięcie:

$$U = I_m.R'_m = 30.0,14 = 4,2 \text{ wolta},$$

a uwzględniając spadek napięcia w przewodach doprowadzających, bierzemy 4,5 wolta.

U w a g a. U nas w czasie pomiaru napięcie obwodu wzbudzającego nie posiada 4,5 wolta, lecz około 120 V. W obliczeniach bierzemy jednak 4,5 V, gdyż chcemy otrzymać wynik zbliżony do praktyki, a rzecz jasna, że gdybyśmy stale używali łączni Leonarda, to postaralibyśmy się o źródło o odpowiednio niższym napięciu, aby nie mieć tak dużych strat w opornicy służącej do dławienia napięcia, a raczej użylibyśmy generatora upustowego /biorąc obce wzbudzenie/, jak to w praktyce ma miejsce.

3/ Sprawność całego układu:

$$\eta_{całk.} = \frac{M.\omega.9,81}{U_1.I_1 + 4,5.I_m + U'.I'_m} .100 \%;$$

mianownik podaje nam całkowitą moc układu, licznik moc, odebraną w watach.

Wykreślamy krzywe: $\eta_{całk} = f/P_{uż}/$ oraz $\eta_{całk} = f/U/$, obliczone według powyżej podanych wzorów, dla I = ca I_{nom}, I = ca 3/4 I_{nom}, i I = ca $\frac{1}{2}.I_{nom}$. Nadto krzywe obrotów motoru roboczego w zależności od U dla biegu luzem i dla wszystkich wymienionych poprzednio obciążeń /10 krzywych/.

Zalety łączni Leonarda są następujące:
1/ Dokładna regulacja obrotów w bardzo szerokich granicach.
2/ Prosty sposób zmiany kierunku obrotów.
3/ Aparaty do regulacji tanie, bo prąd wzbudzenia jest zwykle mały.
4/ Moment zupełnie nie zależy od ilości obrotów.

W a d y: Potrzebny agregat pomocniczy, złożony najmniej z dwu maszyn tej samej mocy /nawet nieco wyższej, ze względu na η/, co motor roboczy, czyli koszt instalacji jest duży.

Ć w i c z e n i e 7 4.

B a d a n i e m o t o r g e n e r a t o r a

/Wyznaczenie sprawności: 1-o: z generatorem upustowym, 2-o: z generatorem compound/

Układ połączeń motoru jak w ćwiczeniu 27a, linia ciągła; generatora: dla 1, jak w ćwicz. 23, dla 2: jak w ćwiczeniu 24.

Wyznaczymy η całego agregatu metodą bezpośrednią, gdzie moc doprowadzoną i oddaną mierzymy elektrycznie. Aby się szczotki i łożyska dotarły,

/v. "Przepisy oceny i badania maszyn elektrycznych", P.N.E. 23 - 1932.§ 57. p.1./ utrzymujemy agregat w ruchu przez około ½ godziny /bieg luzem/, teraz dopiero przystępujemy do pomiaru, utrzymując stałe napięcie motoru 110 V i generatora 220 V, oraz stałe obroty n = 1600 na minutę. Obciążenie generatora zmieniamy od I = 0 do I = I_{nom} przy pomocy lampek. Dla zbadania wpływu dozwojenia na η robimy dwa pomiary: jeden dla generatora upustowego, drugi dla compound. Wykreślamy cztery krzywe sprawności, dwie jako funkcje mocy pobranej /nie wychodzą z początku układu/ oraz dwie, jako funkcje mocy oddanej.

Zalety i wady wyznaczenia η metodą bezpośrednią podane są w ćwiczeniu 66.

Jest:

$$\eta_{agregatu} = \frac{U_{gen} \cdot I_{gen}}{U_{mot} \cdot I_{mot}}$$

gdzie U podają woltomierze, $I_{gen} = I_{tw} - i_m$ podaje amperomierz, $I_{mot} = I'_{tw} + i'_m$ podaje amperomierz w obwodzie głównym. Gdyby upustowe uzwojenie magnesów wyprowadzone było tak, jak to robimy normalnie przy innych układach połączeń, czyli przed amperomierzem w obwodzie głównym, wzór byłby:

$$\eta_{agregatu} = \frac{U_{gen} \cdot I_{gen}}{U_{mot} \cdot I'_{tw} + U'_{mot} \cdot i_m}$$

gdzie U'_{mot} podaje napięcie, pod jakim jest obwód wzbudzenia motoru.

Celem tego zadania jest poznanie jednego ze sposobów wyznaczenia sprawności całego agregatu.

Ć w i c z e n i e 2 7.

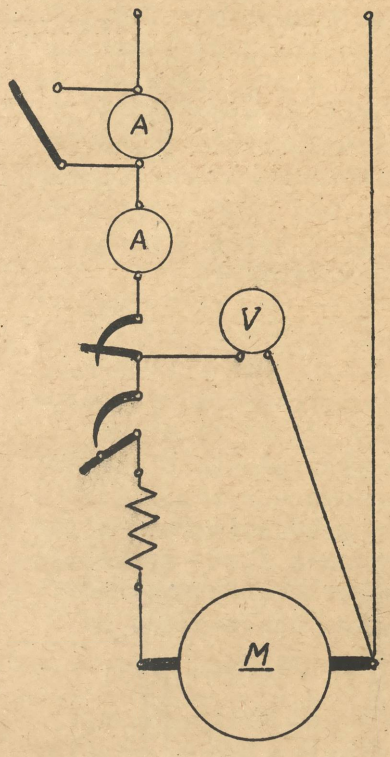
H a m o w a n i e m e c h a n i c z n e m o t o r u s z e r e g o w e g o.

Wypośrodkowanie momentu obrotowego, ilości obrotów, mocy, siły elektromotorycznej, prądu pobranego z sieci, strat elektrycznych i całkowitych przy zmiennym obciążeniu i stałym napięciu.

Motor obciążamy przy pomocy hamulca Prony'ego. Ponieważ badany motor jest szeregowy, więc już w chwili rozruchu musimy go obciążać, aby się nie rozbiegł /nie uległ zniszczeniu/. Zadaniem naszym między innymi jest znalezienie η, dlatego musimy przez około ½ godziny utrzymać motor w ruchu, aby straty mechaniczne się ustaliły /dotarcie łożysk i szczotek/. Dopiero wówczas możemy przystąpić do pomiarów /v. "Przepisy oceny i badania maszyn elektrycznych", P.N.E. 23 - 1932. § 57.p.1/.

Że straty mechaniczne już się ustaliły, poznajemy po tym, że moc pobierana przez motor przestaje maleć, gdy jest bieg luzem. Tutaj nie możemy motoru puszczać bez obciążenia, dlatego, opierając się na danych doświadczalnych z innych pomiarów, zaczynamy odczyty dopiero po upływie ca ½ godziny. Pomiar odbywa się w ten sposób, że pierwsze odczyty robimy, gdy na ostrze ramienia hamulca wywierany jest nacisk 2 kg, następne, gdy 2,5 kg i t.d., dopóki nie uzyskamy I = 4/4 I_{nom}. Odczytujemy równocześnie na dany znak tego, który jest przy wadze. W czasie całego pomiaru utrzymujemy napięcie U stałe

za pomocą regulatora napięcia. W miarę wzrostu obciążenia F w kg prąd I w amp. pobierany z sieci, wzrasta, obroty na minutę n maleją. Dane konstrukcyjne: długość ramienia hamulca l = 0,785 m; oporności: $R_{tw} + R_{bp} = 0,44\Omega$, $R_m = 0,135\Omega$ /przy 15° C/.



W ten sposób mamy już wszystkie wielkości potrzebne do wykonania zadania.

1/ Moment obrotowy wyliczamy wzorem:

$$M_d = F.l \text{ kgm.}$$

gdy F w kg, a l w metrach.

2/ Obroty na minutę odczytujemy wprost.

3a/ Moc pobraną obliczamy tutaj wzorem:

$$P_{pobr} = U.I \text{ watów.}$$

3b/ Moc oddaną podaje tu wzór:

$$P_{odd} = M.\omega \text{ kgm/sek} = \frac{2.\pi.l.n.F}{60} \text{ kgm/sek} =$$

$$= \frac{2.3,14.0,785}{60} .9,81.F.n \text{ watów, czyli:}$$

$$P_{odd} = 0,806.F.n \text{ watów.}$$

4/ $E = U - I./R_{tw} + R_{bp} + R_m/_{75°C} + (- U_{szcz})$ w V.

5/ prąd odczytujemy wprost.

6/ Straty całkowite otrzymamy, odejmując od mocy pobranej /3a/ moc oddaną /3b/, albo mnożąc: $P_{pobr}./1 - \eta_m/$.

7/ Straty elektryczne otrzymujemy wzorem:

$$P_{el} = I^2./R_{tw} + R_{bp} + R_m/_{75°} + I.U_{szcz},$$

lub też:

$$P_{pobr}./1 - \eta_{el}/.$$

8/ Sprawność: a/ mechaniczna:

$$\eta_m = \frac{P_{odd}}{P_{pobr}} .100\ \%$$

b/ elektryczna:

$$\eta_{el} = \frac{E.I}{U.I} .100\ \% = \frac{E}{U} .100\ \%.$$

U w a g a: Ponieważ U = const, więc wykres η_{el} będzie równocześnie wykresem SEM-ej w innej skali.

Wykresy robimy dla: 1/, 2/, 3a/ 4/, 5/, 8a/, 8b/, wszystkie jako funkcje mocy oddanej.

Obroty motoru obliczamy wzorem: $n = \frac{E}{C.\Phi_{tw}}$, a w motorze szeregowym:

$$E = U - I./R_{tw} + R_{bp} + R_m/ - U_{szcz}, \quad \text{więc:}$$

$$n = \frac{U - I./R_{tw} + R_{bp} + R_m/ - U_{szcz}}{C.\Phi_{tw}}$$

Gdy mamy bieg luzem, to I jest małe, więc także Φ_{tw} /motor szeregowy/ będzie stosunkowo małe, czyli n musi wzróść tak silnie, że motor może ulec zniszczeniu, co jasno ze wzoru wynika. Aby temu przeszkodzić, należy postarać się, aby I nie było zbyt małe, czyli dać już pewne obciążenie przy rozruchu. Należy także pamiętać, że ten motor nie może mieć zastosowania tam, gdzie potrzebny jest bieg luzem, lub tam, gdzie zachodzi obawa, że może się to stać; np.

gdy napęd transmisją, to należy liczyć się z tym, że pas zleci lub przerwie się. Tutaj więc nie wolno używać motoru szeregowego. Naodwrót, stosuje się motor szeregowy przy dźwigarkach, tramwajach i w ogóle tam, gdzie spodziewamy się silnych wahań obciążenia, gdyż moment wzrasta p o c z ą t k o w o z kwadratem prądu, a obroty ze wzrostem obciążenia maleją. Moment $M = C.\Phi_{tw}.I$. Dla motoru szeregowego $\Phi_{tw} = f/I/$, jest z dużym przybliżeniem przedstawione przez charakterystykę magnetyczną /w odpowiedniej skali/. Wiemy natomiast, że charakterystyka magnetyczna jest w początkowym swym przebiegu prawie, że linią prostą. Można więc ją tu przedstawić równaniem: $B = k.I$, czyli $\Phi_{tw} = k'.I$. Wstawiając tę wartość we wzór na moment:

$$M = C.k'.I.I = C'.I^2.$$

To, że obroty maleją ze wzrostem obciążenia, jest także w pewnych wypadkach korzystnym. Moc jaką motor pobiera, obliczamy wzorem:

$$P_{pobr} = U.I \text{ watów},$$

a moc, jaką oddaje:

$$P_{odd} = M.\omega.9{,}81 \text{ watów}.$$

Skoro więc moment wzrośnie /np. wóz jedzie pod górę/ to obroty zmaleją, czyli będzie ω mniejsze, więc P_{odd} nie wzrośnie tak silnie, jakby to miało miejsce przy ω = const. W tym wypadku wzrost P_{pobr}, a przy stałym U wzrost I nie będzie zbyt duży, czyli nie będziemy mieć tak zwanego uderzenia na sieć. Inaczej jest przy motorze upustowym, gdzie obroty mało zmieniają się z obciążeniem, a wykres momentu jest prawie, że linią prostą /jest proporcjonalny do I, bo Φ_{tw} jest prawie że const./. Używamy więc motoru upustowego tam, gdzie zależy nam na utrzymaniu stałej ilości obrotów, bez względu na wielkość obciążenia.

Gdy uwzględnimy tylko straty na ciepło Joule'a, to otrzymamy η_{el}. Dla motoru szeregowego wykres η_{el} jest równocześnie wykresem SEM-ej /tylko inna skala/. W motorze upustowym jest inaczej z powodu strat we wzbudzeniu.

U w a g a. Wielkość R_{tw}, R_{bp} i R_m potrzebne do wyliczenia E, p_{el} oraz η_{el} przeliczamy na 75^0 C /v. "Przepisy" P.N.E. 23. 1932. §.57.p.4/.

Ć w i c z e n i e 6 6.

W y z n a c z e n i e s p r a w n o ś c i d y n a m o m a s z y n y m e t o d ą p o m i a r u p o s z c z e g ó l n y c h s t r a t.

Oznaczmy sobie:

P_{pobr} - moc pobraną przez pewną maszynę,
P_{odd} - moc przez nią oddaną,
P_{str} - moc potrzebną na pokrycie strat, przy czym:

$$P_{str} = P_{pobr} - P_{odd},$$

to sprawnością nazywamy stosunek mocy oddanej do pobranej; sprawność można wyznaczyć:

1/ metodą bezpośrednią, gdy bezpośrednio pomierzymy tak moc oddaną jak i pobraną, a η wyliczymy ze wzoru:

$$\eta = \frac{P_{odd}}{P_{pobr}}.$$

2/ metodą pośrednią, gdy zmierzymy straty p_{str}, a η wyliczymy ze wzoru:

$$\eta = \frac{P_{pobr} - P_{str}}{P_{pobr}} \quad \text{/dla motoru/} \ldots\ldots\ldots\ldots 1/$$

lub:

$$\eta = \frac{P_{odd}}{P_{odd} + P_{str}} \quad \text{/dla generatora/} \ldots\ldots\ldots\ldots 2/$$

Wzory te mamy dlatego różne, że iloczyn z U i I, podanych na tabliczce motoru podaje nam moc pobraną, a ten sam iloczyn z wielkości wziętych z tabliczki generatora daje nam moc oddaną.

Jeśli chodzi o ocenę obu metod, to teoretycznie lepszą jest metoda bezpośrednia, bo uwzględnia także wszystkie straty dodatkowe. Z drugiej jednak strony wadą tej metody jest to, że cały procent błędów w pomiarze wchodzi jako błąd w η /jeżeli np. popełnimy w pomiarze błąd ± 3 %, to i η wyliczone będzie z błęden ± 3 %/; drugą wadę stanowi tu duże zapotrzebowanie energii w czasie pomiaru,/bo mierzymy tak moc pobraną, jak i oddaną/. Te wady przesądzają o tym, że ogólnie stawia się wyżej metodę pośrednią, której zaletą jest to, że mamy małe zapotrzebowanie energii w czasie pomiaru /tylko na pokrycie strat/, dalej błąd pomiaru nie wpływa tak silnie na fałszywe wyliczenie η. Np. gdy wszystkie straty wynoszą 10 %, t.j. $p_{str} = 0{,}1 . P_{pobr}$ /mowa o motorze/, a przy ich pomiarze popełniono błąd ± 3 %, to teraz:

$$p_{str} = /0{,}1 \pm 0{,}1.0{,}03/ \; . P_{pobr}$$

więc na η zamiast 90 % otrzymamy:

$$\eta_{mot} = \frac{P_{pobr} - /0{,}1 \pm 0{,}1.0{,}03/ . P_{pobr}}{P_{pobr}} . 100$$

czyli:

$$\eta_{mot} = \frac{1 - 0{,}103}{1} . 100 = 89{,}7 \ \%$$

lub:

$$\eta_{mot} = \frac{1 - 0{,}097}{1} 100 = 90{,}3 \ \%$$

błąd więc tylko wynosi $\sim$ 0,3 %.

Z tych powodów przy generatorach i motorach, których sprawność jest większa od 80 %, należy pomiar wykonywać tylko metodą pośrednią. Celem niniejszego ćwiczenia jest właśnie poznanie jednej z metod pośredniego wyznaczania sprawności.

Całkowite straty, występujące w maszynach elektrycznych, można podzielić na:

I. S t r a t y j a ł o w e /p_j/, które znowu dzielą się na:

1/ straty w żelazie $p_{żel}$ i w izolacji, przy czym straty w żelazie składają się ze:

a/ strat histerezy /p_h/, które zależą od indukcji magnetycznej w tworniku /B_{tw}/, jak również od ilości obrotów na minutę/n/, bo:

$$p_h = c_1 . n . B_{tw}^{1,6}$$

b/ strat wskutek prądów wirowych /p_w/; te również zmniejszają się z indukcją i obrotami:

$$p_w = c_2 . n^2 . B_{tw}^2 .$$

2/ Straty tarcia /p_t/ wywołane oporami powietrza, tarcie w łożyskach i szczotek na kolektorze:

$$p_t = c_3 . n^{1,5} .$$

II. S t r a t y w e w z b u d z e n i u /P_{wzb}/ przy maszynach z osobnym obwodem wzbudzenia i to:

1/ Straty cieplne w uzwojeniach bocznikowych, względnie w uzwojeniach magnesów z obcym wzbudzeniem łącznie ze stratami w regulatorach,

2/ Straty przy przechodzeniu prądu ze szczotek na pierścienie /przy maszynach synchronicznych prądu zmiennego/.

III. S t r a t y p r z y o b c i ą ż e n i u dzielą się na:

1/ straty cieplne w uzwojeniach twornika i magnesów szeregowych.

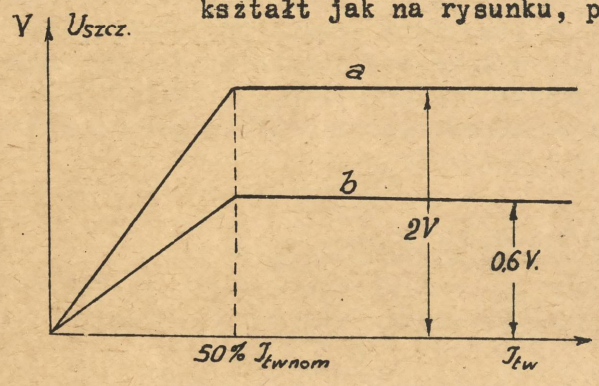
2/ straty przy przechodzeniu prądu ze szczotek na komutator, względnie pierścienie; Straty te wyliczamy z iloczynu:

$$u_{szcz} \cdot I_{tw}$$

gdzie u_{szcz} - spadek napięcia przy przejściu ze szczotek na komutator,

I_{tw} - prąd twornika /obciążenie/,

o ile mamy $u_{szcz} = f/I_{tw}$; w przeciwnym wypadku przyjmujemy kształt jak na rysunku, przy czym wykres a jest dla szczotek grafitowych i węglowych, wykres b - dla szczotek metalowych.



3/ straty dodatkowe; powstają one wskutek:

a/ deformacji pola magnetycznego pod wpływem reakcji twornika,

b/ wzrostu oporności uzwojeń twornika z powodu zjawiska naskórkowości /tylko przy prądzie zmiennym/.

Straty dodatkowe według przepisów polskich /P.N.E. 23 - 1932.§.66/ w maszynach prądu stałego uwzględnia się tylko wtedy, gdy w umowie podany jest sposób ich zmierzenia lub oszacowania; według przepisów niemieckich /R.E.M. 1932.§.63/ przyjmuje się pewien procent mocy pobranej /dla motorów/, względnie oddanej /dla generatorów/; i tak: dla maszyny nieskompenzowanej prądu stałego z biegunami pomocniczymi lub bez nich, według przepisów niemieckich, należy wziąść 1 %. Na straty dodatkowe ma silny wpływ sposób budowy maszyny.

W a r u n k i p o m i a r u. /§.57 "Przepisy oceny i badania maszyn elektrycznych"/.

1/ Maszyna podlegająca próbie na sprawność powinna być należycie wdrożona, w szczególności komutator i szczotki.

2/ Szczotki w maszynach z komutatorem winny stać w położeniu odpowiadającym pracy /np. znamionowej/.

Przy pomiarach podczas biegu jałowego, szczotki mogą być przesunięte w strefę obojętną.

3/ Sprawność wyznacza się dla maszyny w stanie nagrzanym.

4/ Jeżeli wyznaczenie sprawności maszyny nie jest dokonywane w stanie nagrzanym, to przy obliczaniu strat w oporach omowych wartości tych oporów należy sprowadzić do stanu przy 75° C.

Jeżeli jednak znany jest z próby cieplnej faktyczny przyrost temperatury uzwojeń, to należy uwzględnić właściwy danej maszynie przyrost ponad temperaturę otoczenia /20° C/.

5/ Temperatura otoczenia przy pomiarach może wynosić od 15° do 40°C.

6/ Moc mechaniczną należy mierzyć na wale badanej maszyny.

A. W y z n a c z e n i e s p r a w n o ś c i m o t o r u u p u s t o w e g o p r ą d u s t a ł e g o m e t d ą p o m i a r u p o s z c z e g ó l n y c h s t r a t.

Sprawność wyliczamy ze wzoru 1/:

$$\eta = \frac{P_{pobr} - p_{str}}{P_{pobr}} = \frac{U_{nom} \cdot I - p_{str}}{U_{nom} \cdot I} \quad \ldots\ldots \quad \ldots\ldots\ldots 3/$$

przy czym: U_{nom} - napięcie nominalne motoru,
I - całkowity prąd pobrany ze sieci, zatym:

$$I = I_{tw} + i_m.$$

W motorze mamy:

I. S t r a t y j a ł o w e p_j - w które wchodzą: 1/ straty żelaza: $p_{żel} = p_w + p_h$, oraz 2/ straty tarcia p_t, czyli:

$$p_j = p_{żel} + p_t;$$

straty te przy stałym napięciu zmieniają się tylko nieznacznie z obciążeniem maszyny.

II. S t r a t y w u z w o j e n i a c h m a g n e s ó w u p u s t o w y c h - p_{wzb}. $p_{wzb} = U_{nom} \cdot i_m$.
Zależność:

$$i_m = f/I_{tw}/ \text{ przy } U = 110 \text{ V i } n = 1600 \text{ obr/min.}$$

przedstawia nam następująca tabela:

I_{tw} w A.	0,00	4,00	12,00	16,00	20,00	24,00	28,00	32,00	36,00	44,00
i_m "	1,16	1,14	1,09	1,06	1,03	1,00	0,98	0,95	0,93	0,90

Na podstawie tej krzywej /nie utożsamiać jej z krzywą regulacji w generatorze!/ możemy z powyższego wzoru wyliczyć straty p_{wzb} dla dowolnego prądu I_{tw}.

III. S t r a t y p r z y o b c i ą ż e n i u:
1/ Straty cieplne w uzwojeniach twornika i biegunów pomocniczych, które wyliczamy ze wzoru:

$$I_{tw}^2 \cdot /R_{tw} + R_{bp}/_{75^oC}$$

przy czym oporności przeliczamy, ze względu na nagrzanie na temperaturę 75° C według przepisów polskich. W naszym wypadku przy $t = 20^o$ C:

$$R_{tw} = 0{,}1\,\Omega, \qquad R_{bp} = 0{,}025\,\Omega.$$

2/ Straty przy przejściu prądu ze szczotek na komutator dostajemy z iloczynu:

$$u_{szcz.} \cdot I_{tw}.$$

3/ Straty dodatkowe; strat tych nie uwzględniamy.

Ostatecznie więc wzór 3/ na sprawność motoru przyjmuje postać:

$$\eta = \frac{U_{nom} \cdot I - p_j + U_{nom} \cdot i_m + I_{tw}^2 \cdot /R_{tw} + R_{bp}/_{75^oC} + u_{szcz} \cdot I_{tw}}{U_{nom} \cdot I}$$

przy czym: $I = I_{tw} + i_m$.

Przy pomocy tego wzoru, o ile będziemy znali straty jałowe /p_j/ możemy sobie wyliczyć sprawność motoru dla dowolnego I_{tw}. Podstawiając więc za I_{tw} wartości $I_{tw} = 0, 4, 8, \ldots\ldots 48$ A, dostaniemy odpowiadające im sprawności. Dla każdego z tych prądów można wyliczyć również moc oddaną przez maszynę:

$$P_{odd} = P_{pobr} - p_{str},$$

czyli:

$$P_{odd} = U_{nom}\cdot/I_{tw} + i_m/ - p_{str}.$$

Wykreślamy krzywe: 1/ $\eta = f/P_{odd}/$, 2/ $i_m = f/I_{tw}/$, 3/ $u_{szcz} = f/I_{tw}/$, 4/ $p_j = f/U/$ /v. rozdział: " Oddzielenie strat tarcia i żelaza"/.

W y z n a c z e n i e s t r a t j a ł o w y c h. O ile silnik, sprzęgnięty z generatorem puścimy luzem, to moc obecnie przezeń pobrana /$P_o = U.I_{tw} + U.i_m$/ zużywa się na pokrycie strat biegu luzem. Straty te składają się:

I. ze strat jałowych: $p'_j = p_{żel} + p_t$ /przy czym straty tarcia występują tak w motorze, jak i w sprzężonym z nim generatorze/.

II. ze strat spowodowanych przepływem prądu I_{otw} /straty obciążenia/, które wyliczamy ze wzoru:

$$I^2_{otw}\cdot/R_{tw} + R_{bp}/ + u'_{szcz}\cdot I_{otw};$$

mamy więc:

$$P_o = U.I_{otw} + U.i_m = p'_j + U.i_m + I^2_{otw}\cdot/R_{tw} + R_{bp}/ + u_{szcz}\cdot I_{otw}.$$

Po uproszczeniu i przekształceniu dostajemy:

$$p'_j = I_{otw}.\ U - I_{otw}\cdot/R_{tw} + R_{bp}/ - u_{szcz}$$

a ponieważ: $U - I_{otw}\cdot/R_{tw} + R_{bp}/ - u_{szcz} = E$,

więc wkońcu:

$$p'_j = E.I_{otw},$$

czyli straty jałowe podaje nam iloczyn SEM-ej i prądu twornika przy biegu luzem.

Na wielkość strat jałowych mają wpływ tak obroty, jak też i indukcja magnetyczna w tworniku; aby więc dostać straty jałowe takie, jakie zachodzą przy obciążeniu nominalnym, musimy przy biegu luzem utrzymać tak obroty jak i indukcję na takich wartościach, jak to ma miejsce przy obciążeniu nominalnym; ale ponieważ SEM, wyindukowana w uzwojeniach twornika /$E = c.n.\Phi_{tw} = c'.n.B_{tw}$/ zależy tylko od obrotów i indukcji, dostaniemy więc wówczas taką samą SEM-ą, jak przy obciążeniu nominalnym, czyli naodwrót, chcąc dostać w tworniku nominalną indukcję, należy motor przy obrotach nominalnych załączyć na takie napięcie, by SEM była tej wielkości, co przy obciążeniu nominalnym. Wyliczymy więc SEM-ą przy nominalnym napięciu i obciążeniu w stanie nagrzanym:

$$E = U_{nom} - I_{tw_{nom}}\cdot/R_{tw} + R_{bp}/_{75^o C}/ - u_{szcz}$$

/temperaturę nagrzania przyjęto 75° C, według polskich przepisów/, a po dodaniu spadku napięcia, jaki ma miejsce przy biegu luzem, dostajemy żądane napięcie U:

$$U = E + I_{otw}\cdot/R_{tw} + R_{bp}/_{t^o} + u'_{szcz}$$

/gdzie "t" jestto temperatura otoczenia, a u'_{szcz} - spadek napięcia na szczotkach dla I_{otw}/.

Przy tym napięciu otrzymane straty jałowe /ze wzoru: $p'_j = E.I_{otw}$/ są równe stratom jałowym przy pracy nominalnej łącznie z tarciem w generatorze; ażeby więc dostać same straty jałowe w motorze, należy odjąć od tak obliczonego p'_j straty tarcia w generatorze, czyli:

$$p_j = p'_j - p_{t_{gen}}.$$

Ponieważ wymiary obu maszyn są prawie takie same, więc przyjmujemy, że i straty tarcia w motorze i generatorze są jednakowe, czyli:

$$p_{t_{gen}} = p_{t_{mot}} = \tfrac{1}{2}\, p_t,$$

gdzie "p_t" są to całkowite straty tarcia. Musimy więc wyznaczyć p_t, czyli należy oddzielić straty tarcia od strat żelaza.

O d d z i e l e n i e s t r a t t a r c i a i ż e l a z a. Napięcie na zaciskach silnika zmniejszamy, utrzymując stałe obroty, przez zmniejszanie strumienia magnetycznego. Za każdym razem możemy wyliczyć straty jałowe ze wzoru:

$$p'_j = E \cdot I_{otw},$$

gdzie $E = U - I_{otw}/R_{tw} + R_{bp}/ - u'_{szcz}$.

Straty te będą msleć, gdyż:

$$p'_j = p_w + p_h + p_t,$$

a ze zmniejszeniem strumienia magnetycznego maleje indukcja, w następstwie czego maleją również straty $p_w / p_w = c_2 . n^2 . B_w^2 /$, jak i straty $p_h / p_h = c_1 . n . B_{tw}^{1,6} /$, a tylko straty tarcia p_t zostają niezmienione przy n = const $/p_t = c_3 . n^{1,5} /$. O ile więc z napięciem będziemy zdążać do zera, czyli gdy:

$$U \rightarrow 0$$

to przy stałych obrotach musi również ciek magnetyczny:

$$\Phi_{tw} \rightarrow 0, \quad \text{a więc i} \quad B_{tw} \rightarrow 0,$$

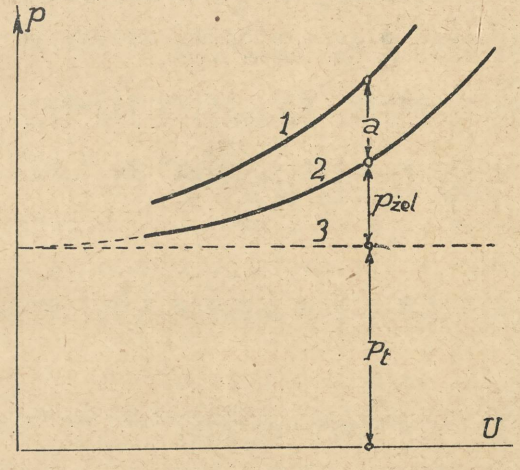
na skutek czego:

$$p_w \rightarrow 0, \quad \text{jak również} \quad p_h \rightarrow 0,$$

a zatym:

$$p'_j \rightarrow p_t,$$

czyli przez ekstrapolację krzywej $p'_j = f/U/$ dostajemy całkowite straty tarcia.



Na wykresie obok oznacza:

1 - $U . I_{otw} = f/U/$,
2 - $p'_j = f/U/$,
3 - $p_t = f/U/$.

Rzędna krzywej 2 jest mniejsza od rzędnej krzywej 1 o każdorazowe:

$$a = I^2_{otw} \cdot /R_{tw} + R_{bp}/ + u'_{szcz} \cdot I_{otw},$$

czyli jej rzędne dają $p'_j = p_{żel} + p_t$. Krzywą 3 otrzymujemy przez ekstrapolację krzywej 2.

Znając całkowite straty tarcia motoru i generatora $/p_t/$ i przyjmując, że w obu maszynach są one sobie równe, dostajemy jałowe straty motoru $/p_j/$ ze wzoru:

$$p_j = p'_j - \tfrac{1}{2} \cdot p_t$$

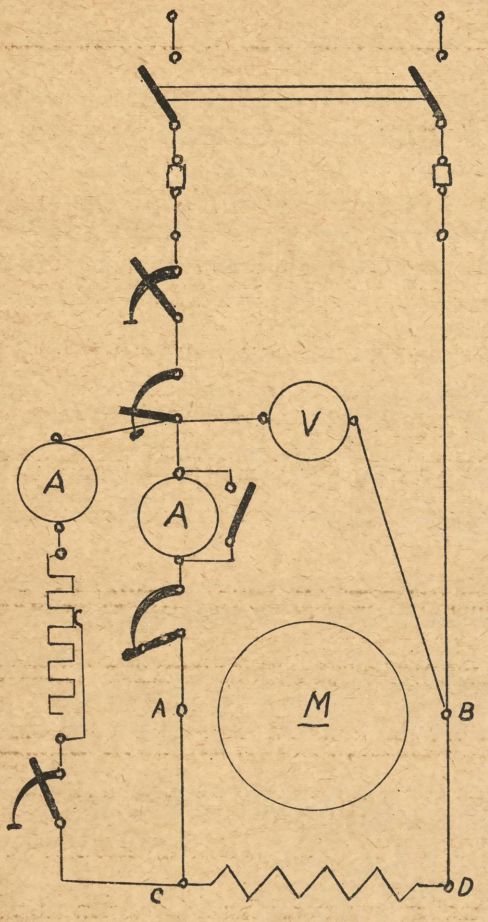
P r z e b i e g ć w i c z e n i a. 1. Puszczamy motor stacji Nr. 2 w ruch, a następnie nastawiamy napięcie na wartość wyliczoną ze wzoru:

$$U = U_{nom} - I_{twnom}/R_{tw} + R_{bp/75^o} - u_{szcz} + I_{otw}/R_{tw} + R_{bp/t^o} + u_{szcz}$$

a obroty na n = 1600 na minutę, przy czym:

$$R_{tw} = 0{,}1\Omega \quad - \quad R_{bp} = 0{,}025\Omega \quad - \quad \text{przy} \quad t = 20^o \text{ C}.$$

t = temperatura otoczenia, u_{szcz} - bierzemy z wykresu $u_{szcz} = f/I_{tw}/$. Przy stałym napięciu i obrotach utrzymujemy motor tak długo w ruchu, aż straty mechaniczne się ustalą. Poznajemy to po tym, że moc pobierana przez twornik przestanie maleć, robimy więc co 10 minut odczyty U, n, I_{otw} oraz i_m. Na podstawie ostatniego odczytu /po ustaleniu się strat/ możemy wyliczyć straty jałowe motoru łącznie ze stratami tarcia w generatorze /v. Wyznaczenie strat jałowych/.



2. Dane do oddzielenia strat tarcia od strat w żelazie otrzymujemy w ten sposób, że zaczynając od tak wysokiego napięcia, jakie można było uzyskać przy n = const = 1600 obrotów na minutę, zmniejszamy napięcie stopniowo /co $\sim$ 10 V/, utrzymując stale n = 1600 obr./min. /przez zmniejszenie i_m/ tak daleko, jak to tylko jest możliwe, i każdorazowo robimy odczyty U, I_{otw} oraz i_m.

B. W y z n a c z e n i e s p r a w n o ś c i g e n e r a t o r a u p u s t o w e g o p r ą d u s t a ł e g o m e t o d ą p o m i a r u p o s z c z e g ó l n y c h s t r a t.

Sprawność wyliczamy ze wzoru 2/:

$$\eta = \frac{P_{odd}}{P_{odd} + P_{str}} = \frac{U_{nom} \cdot I}{U_{nom} \cdot I + P_{str}} \quad \ldots 4/$$

przy czym U_{nom} - napięcie nominalne generatora,

I - prąd oddawany przez generator do sieci, zatym:

$I = I_{tw} - i_m$.

Straty zachodzące w generatorze, możemy podzielić na:

I. Straty jałowe /p_j/, które składają się:

1/ ze strat w żelazie $p_{żel} = p_w + p_h$,

2/ ze strat tarcia p_t,

zatym:

$$p_j = p_{żel} + p_t.$$

II. S t r a t y w u z w o j e n i a c h m a g n e s ó w u p u s t o w y c h:

$$p_{wzb} = U_{nom} \cdot i_m.$$

Mając podaną krzywą regulacji:

$i_m = f/I/$ przy U = 230 V i n = 2000 obr/min.

I w A.	0,00	1,5	3,0	4,5	6,0	7,5	9,0	10,5	12,0	13,5
i_m "	0,251	0,263	0,275	0,287	0,299	0,311	0,323	0,335	0,347	0,359

możemy dla dowolnego prądu I wyliczyć odpowiadające mu straty.

III. S t r a t y o b c i ą ż e n i a i to:

1/. Straty cieplne w uzwojeniach twornika i biegunów pomocniczych, które wyliczamy ze wzoru:

$$I^2_{tw} \cdot /R_{tw} + R_{bp}/_{75^oC}$$

przy czym: $I_{tw} = I + i_m$. Oporności przeliczamy ze względu na nagrzanie się na temperaturę 75° C. W naszym wypadku: $/R_{tw} + R_{bp}/ = 0{,}91\Omega$ przy $t = 15^o$ C.

2/. Straty przy przejściu prądu I_{tw} ze szczotek na komutator dostajemy z iloczynu:

$$u_{szcz} \cdot I_{tw}.$$

3/. Straty dodatkowe.

Wzór więc 4/ na sprawność generatora przyjmuje postać:

$$\eta = \frac{U_{nom} \cdot I}{U_{nom} \cdot I + \{p_j + U_{nom} \cdot i_m + I_{tw}^2 \cdot / R_{tw} + R_{bp/75^o} + u_{szcz} \cdot I_{tw}\}}$$

przy czym: $I_{tw} = I + i_m$.

Przy pomocy powyższego wzoru, o ile tylko będziemy znali straty jałowe /p_j/, możemy sobie wyliczyć sprawność generatora dla dowolnego obciążenia. Podstawiając więc za I kolejno I = 0,0; 1,5; 3,0; .....15 A, dostajemy odpowiadające im sprawności. Wykreślamy krzywe: 1/ η = f/I/, 2/ krzywą regulacji, 3/ u_{szcz} = f/I_{tw}/, 4/ p_j = f/U/.

W y z n a c z e n i e s t r a t j a ł o w y c h /p_j/.

1/. W y z n a c z e n i e s t r a t w ż e l a z i e. Puszczamy w ruch motor sprzęgnięty z badanym generatorem, przy czym generatora nie wzbudzamy, wówczas motor pobiera ze sieci moc:

$$P_1 = U_{mot} \cdot I_{1tw}$$

na pokrycie strat, zachodzących w motorze, oraz strat tarcia w generatorze /straty $p_{żel}$ w generatorze są praktycznie równe zeru, gdyż generator nie jest wzbudzony/. Gdy obecnie wzbudzimy generator np. do napięcia U_{gen}, wówczas do strat, które miały miejsce poprzednio, przybywają:

a/ straty w żelazie w generatorze - $p_{żel}$,

b/ straty cieplne w uzwojeniach magnesów /$U_{gen} \cdot i_m$/ i twornika /$i_m^2 \cdot R_{twg}$/ oraz przy przejściu ze szczotek na komutator /$i_m \cdot u'_{szcz}$/ wskutek przepływu prądu wzbudzenia i_m.

Moc więc P_2 obecnie pobrana ze sieci przez twornik motoru:

$$P_2 = U_{mot} \cdot I_{2tw}$$

musi być większą od mocy pobranej poprzednio właśnie o wielkość tych strat, czyli:

$$P_2 = P_1 + p_{żel} + U_{gen} \cdot i_m + i_m^2 \cdot R_{twg} + u'_{szcz} i_m,$$

skąd:

$$p_{żel} = P_2 - P_1 - U_{gen} \cdot i_m - i_m^2 \cdot R_{twg} - u'_{szcz} \cdot i_m,$$

a podstawiając odpowiednie wartości za P_1 i P_2 dostajemy:

$$p_{żel} = U_{mot} \cdot I_{2tw} - U_{mot} \cdot I_{1tw} - U_{gen} \cdot i_m - i_m^2 \cdot R_{twg} - u'_{szcz} \cdot i_m \quad \ldots\ldots\ldots 5/$$

Straty w żelazie zależą od obrotów maszyny i indukcji twornika; chcąc więc dostać straty w żelazie takie, jakie zachodzą przy nominalnym obciążeniu, musimy utrzymywać obroty oraz indukcję na takich wartościach, jak to ma miejsce przy pracy nominalnej; ale ponieważ SEM, wyindukowana w uzwojeniach twornika /$E = c \cdot n \cdot \Phi_{tw} = c' \cdot n \cdot B_{tw}$/ zależy tylko od obrotów i indukcji, dostaniemy więc wówczas taką samą SEM-ą, jak przy obciążeniu nominalnym, czyli naodwrót, chcąc dostać indukcję nominalną, należy generator przy obrotach nominalnych tak wzbudzić, aby SEM była tej wielkości, co przy pracy nominalnej. Obliczamy więc SEM-ą dla nominalnego napięcia i obciążenia w stanie nagrzanym:

$$E = U_{gnom} + I_{twnom} \cdot / R_{tw} + R_{bp/75^o} + u_{szcz},$$

a po odjęciu spadku napięcia, jaki zachodzi wskutek przepływu prądu wzbudzającego /i_m/ przez uzwojenie twornika, dostajemy napięcie U_g, na jakie należy wzbuduić generator, czyli:

$$U_g = E - i_m \cdot / R_{tw} + R_{bp/t^o} - u'_{szcz}$$

gdzie t - temperatura otoczenia.

Przy tak wzbudzonym generatorze, możemy wyliczyć ze wzoru 5/ straty w żelazie, jakie występują przy pracy nominalnej.

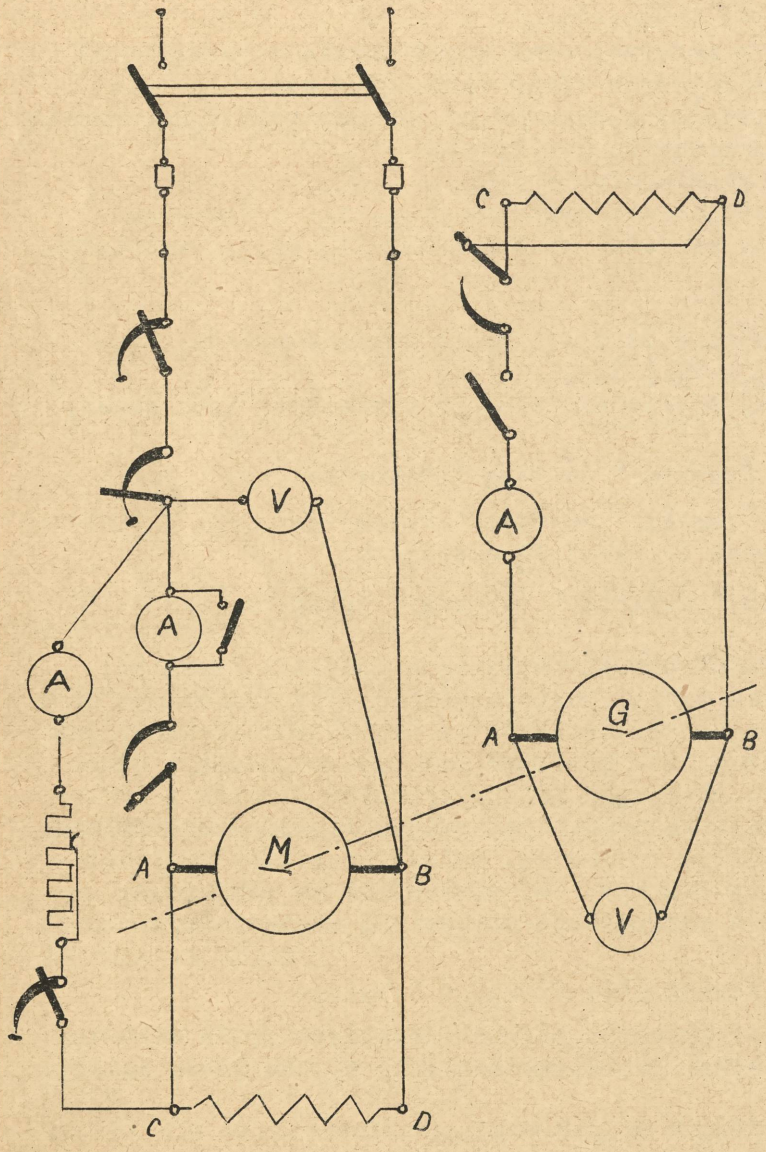
2/ W y z n a c z e n i e s t r a t t a r c i a. Ponieważ wymiary tak generatora, jak i sprzęgniętego z nim motoru są prawie takie same, więc przyjmujemy, że i straty tarcia w obu maszynach są jednakowe. Jako więc straty tarcia w generatorze p_{tgen} bierzemy połowę całkowitych strat tarcia p_t motoru i generatora, które wyznaczamy w sposób, podany powyżej w ustępie: Oddzielenie strat tarcia i żelaza, czyli:

$$p_{tgen} = \frac{1}{2} \cdot p_t .$$

3/ S t r a t y j a ł o w e p_j dostajemy, sumując straty żelaza - $p_{żel}$ i straty tarcia generatora - p_{tgen}

$$p_j = p_{żel} + p_{tgen}.$$

P r z e b i e g ć w i c z e n i a. Puszczamy w ruch motor stacji Nr. 1 ze sprzężonym z nim niewzbudzonym generatorem i utrzymujemy go tak długo w ruchu przy n = 2000 obr./min., oraz U_{mot} = 110 V, aż straty mechaniczne się ustalą. Poznajemy to po tym, że moc pobierana przez twornik motoru przestaje maleć; robimy więc z początku co 2, a później co 5 względnie 10 minut odczyty I_{tw}, oraz i_m. Po ustaleniu dostajemy U_{mot} oraz I_{tw}.



2/ Wzbudzamy generator do napięcia:

$U_g = U_{gnom} + I_{twnom} \cdot / R_{tw} + R_{bp}/_{25^o} + u_{szcz} + - i_m / R_{tw} + R_{bp}/_{t^o} - u'_{szcz}$

przy czym: U_{gnom} - napięcie nominalne generatora,
I_{twnom} - natężenie prądu nominalne generatora,
$/R_{tw} + R_{bp}/ = 0{,}91$ przy $t = 15^o$ C /oporności dla generatora/,
u_{szcz} - spadek napięcia na szczotkach przy prądzie nominalnym,
t - temperatura otoczenia,
$i_m/R_{tw} + R_{bp}/_{t^o}$ oraz spadek napięcia na szczotkach u'_{szcz} przy prądzie i_m możemy opuścić, gdyż są procentowo małe /mniejsze od dokładności odczytu woltomierza/
i przy n = 2000 obr/min. oraz U_{mot} = 110 V robimy odczyty: d l a m o t o r u prądu twornika $I_2 t_w$ oraz prąd wzbudzający, oraz d l a g e n e r a t o r a prąd wzbudzający i_m.

Na podstawie powyższych odczytów ze wzoru 5/ możemy wyliczyć straty w żelazie dla generatora.

3/ W celu znalezienia całkowitych strat tarcia p_t, puszczamy w ruch motor wraz z niewzbudzonym generatorem, a następnie zaczynając od tak wysokiego napięcia na zaciskach motoru, jakie można uzyskać przy n = 2000 obr/min., zmniejszamy napięcie stopniowo /co ~ 10 V/ utrzymując stale n = 2000 obr/min. /przez zmniejszenie i_m/, tak daleko, jak się to tylko da, i każdorazowo robimy odczyty: U_{mot}, I_{otw} oraz i_m. Wypośrodkowanie strat tarcia było opisane w ustępie: Oddzielenie strat tarcia i żelaza.

U w a g a: Oporności uzwojeń twornika i biegunów pomocniczych w m o t o r z e wynoszą przy 15° C:

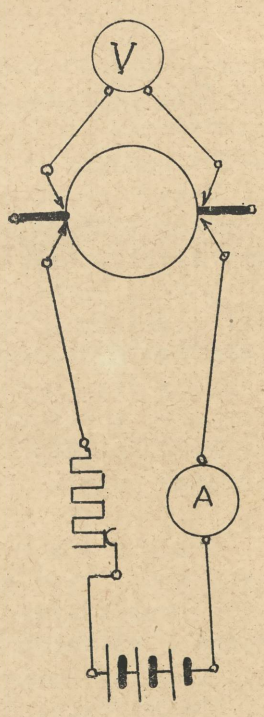
$$R_{tw} + R_{bp} = 0{,}122\,\Omega .$$

Oporności te są potrzebne do wyznaczenia strat tarcia.

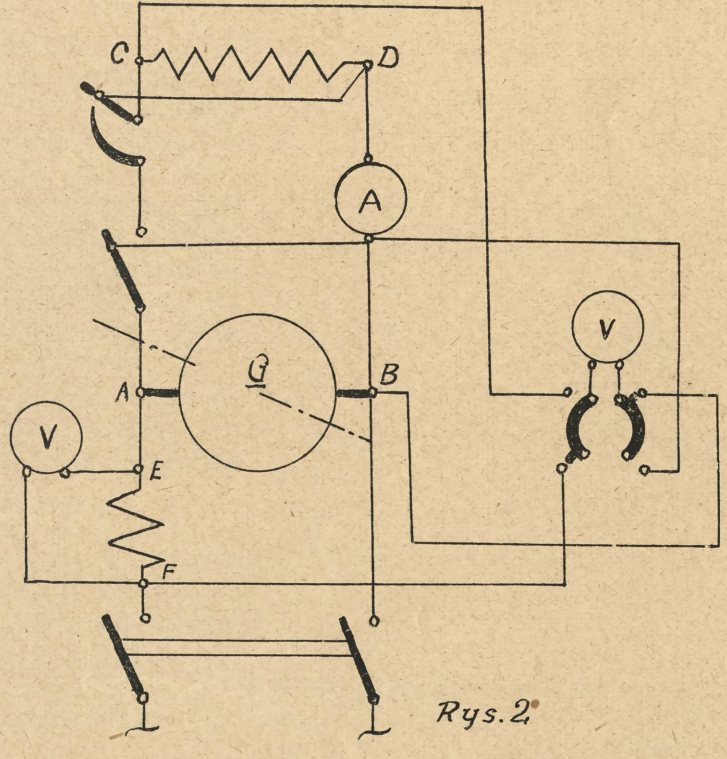
Ć w i c z e n i e 6 9.

B a d a n i e n a g r z a n i a d y n a m o m a s z y n y.

A. B a d a n i e n a g r z a n i a g e n e r a t o r a c o m p o u n d.



Rys.1a

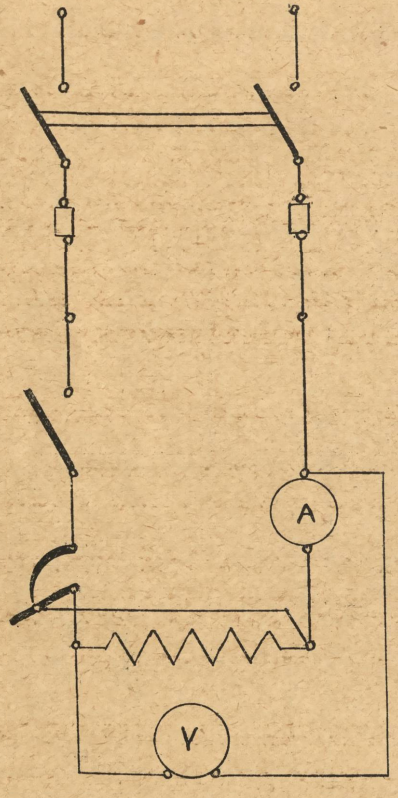


Rys.2

Przed uruchomieniem generatora /stacja Nr. 2/ robimy pomiar oporności twornika i uzwojeń upustowych magnesów w stanie zimnym /temperatura otoczenia/ metodą techniczną /rys. 1a i 1b/. Prąd pobieramy z akumulatorów /rys.

la/, doprowadzony jest wprost do kolektora za pomocą pałeczek /nie za pośrednictwem szczotek/ i tam także w ten sam sposób mierzono napięcie. Ze względu na samoindukcję należy najpierw przykładać pałeczki doprowadzające prąd, a później pałeczki woltomierza, przy odłączaniu z tych samych względów porządek jest odwrotny, t. j. najpierw odejmuje się pałeczki woltomierza, a potym prądowe. Przy pomocy układu z rysunku 1b mierzymy oporność uzwojeń upustowych magnesów, przy czym prąd pobieramy z "dopływu prądu", a pomiaru nie wykonujemy bezpośrednio na samej maszynie /jak przy tworniku/, lecz na tablicy, gdyż popełniony przez to błąd /przewody łączące magnesy z tablicą/ jest procentowo mały. Oporność uzwojeń compound przy 15° C wynosi R = 0,103Ω.

Po zmierzeniu powyższych oporności robimy układ połączeń według rys. 2, uruchamiamy generator i obciążamy go prądem nominalnym "I", utrzymując stałe obroty n = 1550 na minutę i stałe napięcie U = 220 V. Początkowo co 3 minuty, a potym w większych odstępach czasu robimy odczyty: I, U, n, i_m, U_m, U_s, t° C, oraz czas od chwili uruchomienia motoru, przy czym: U_m - spadek napięcia na uzwojeniach upustowych, U_s - na uzwojeniach compound, zaś temperaturę mierzymy, zawieszając termometr w odległości ca 1,5 m od generatora.



Rys. 1b.

Na podstawie I i U_s, oraz i_m i U_m wyliczamy oporności uzwojeń compound i upustowych, a ze wzrostu oporności wyliczamy przyrosty temperatury tych uzwojeń wzorem dla pracy ciągłej:

$$t = \frac{R_g - R_z}{R_z} \cdot /234,5 + t_z/ - /t_c - t_z/$$

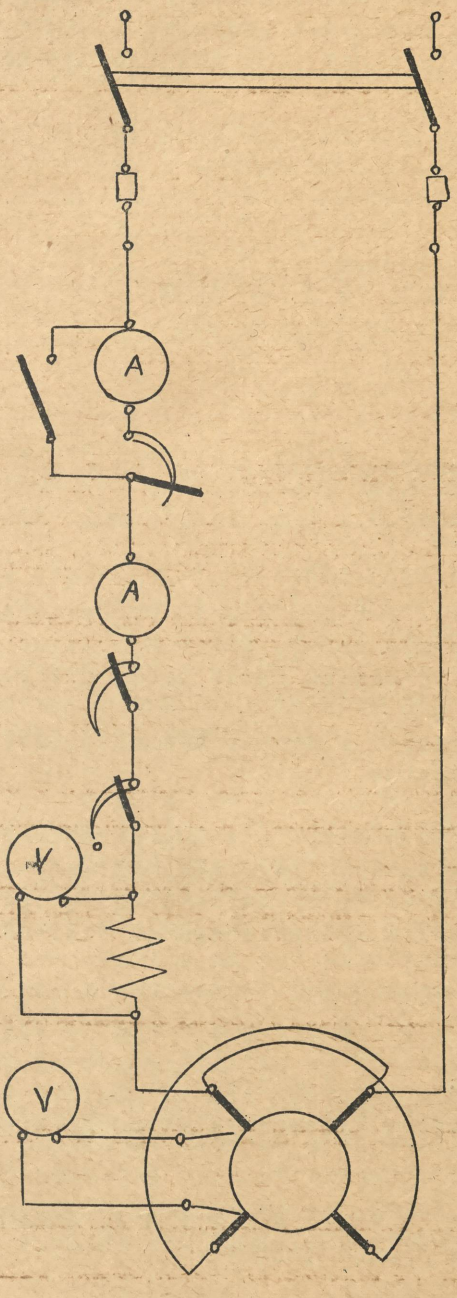
/v. §.31. "Przepisów", niżej/.

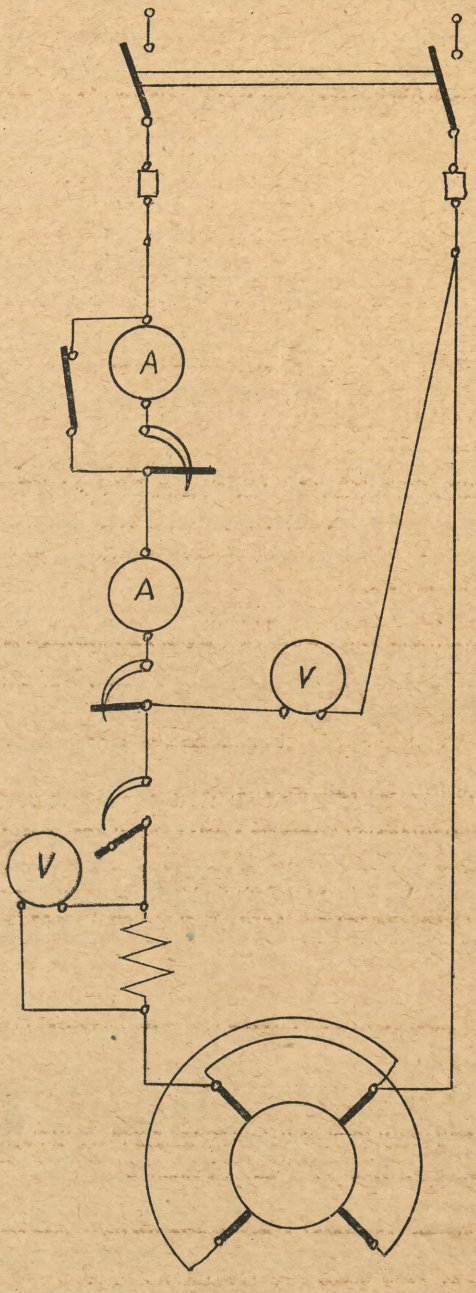
Kończyć pomiar możemy, gdy przyrost temperatury nie przekracza 2° C na godzinę. Gdy wyliczymy, że t jest już odpowiednio małe, zatrzymujemy motor i robimy pomiar oporności twornika według układu z rys. 1a. Układ ten winien być gotowy i należy tylko pałeczki przyłożyć. Pomiar należy wykonać możliwie szybko, aby temperatura części badanych nie spadła, zwłaszcza, że pomiary robimy termometrami rtęciowymi. Badamy nimi temperatury uzwojenia twornika, magnesów, komutatora i łożysk; pierwsze trzy powinny mieć owinięte gruszki staniolą, a tak miejsce pomiaru, jak i owiniętą gruszkę należy wspólnie pokryć złym przewodnikiem ciepła.

B. B a d a n i e n a g r z a n i a m o t o r u s z e r e g o w e g o. Przed puszczeniem motoru stacji Nr. 6 w ruch robimy pomiary oporności uzwojeń magnesów i twornika w stanie zimnym. Obie oporności mierzymy równocześnie według schematu na rys. 3, t. j. metodą techniczną. Spadek napięcia na tworniku mierzymy na działkach kolektora, leżących pod szczotkami przeciwnego znaku.

Następnie robimy układ według rysunku 4 i puszczamy motor w ruch pod obciążeniem /szeregowy!/, otwierając dopływ wody chłodzącej. Doprowadza-

my do nominalnej wartości napięcie i prąd i początkowo co 3 minuty, a potym w większych odstępach czasu /5, 10, 15 minut/ robimy odczyty: I, U, U_m, n, t° C /termometr w odległości ca 1,5 m od motoru/ i czasu, liczonego od chwili





uruchomienia motoru. Utrzymujemy I oraz U stałe i równe wartości nominalnej. Na podstawie odczytów U_m oraz I wyliczamy R_m, a ze wzrostu oporu wyliczamy przyrost temperatury uzwojeń magnesów wzorem: /dla pracy ciągłej/:

$$t = \frac{R_g - R_z}{R_z} \cdot /234{,}5 + t_z/ - /t_c - t_z/$$

/v. niżej "Przepisy" §.31./.

Kończyć pomiar możemy, gdy przyrost temperatury nie przekracza 2°C na godzinę. Gdy wyliczymy, że Δt jest już odpowiednio małe, zatrzymujemy

motor /zamykamy dopływ wody!/, robimy układ z rysunku 3 i mierzymy oporności, jak na początku. Wszystko to należy wykonać możliwie szybko, aby temperatura części badanych nie spadła, zwłaszcza, że jeszcze robimy pomiary termometrami rtęciowymi. Termometrami badamy temperaturę uzwojenia twornika i magnesów, kolektora i obu łożysk; pierwsze trzy termometry winne mieć owinięte gruszki staniolą /v. ustęp poprzedni/.

W y c i ą g
z "P r z e p i s ó w P. N. E.", 2 3 - 1932.

V. GRZANIE SIĘ MASZYN.

§.28. P r ó b a n a g r z e w a n i a. /Próba cieplna/. Próba nagrzewania powinna być dokonana zgodnie ze znamionami maszyny, lub też wyniki próby powinny być sprowadzone do warunków zgodnych z tymi znamionami. Bieg próbny należy prowadzić w sposób następujący:

a/ M a s z y n y d l a p r a c y c i ą g ł e j. Próbę można rozpocząć z maszyną zimną lub nagrzaną. Kończy się próbę, gdy temperatura maszyny przestanie wzrastać w sposób widoczny. W każdym razie próba nie powinna trwać dłużej nad 10 godzin.

U w a g a. Temperatura przestaje wzrastać w sposób widoczny, gdy przyrost temperatury nie przekracza 2° C na godzinę.

b/ M a z y n a d l a p r a c y d o r y w c z e j. Próbę można rozpocząć albo z maszyną zimną, albo tylko na tyle nagrzaną, iż temperatura najcieplejszego uzwojenia przewyższa temperaturę czynnika chłodzącego nie więcej niż 3° C. Próbę przerywa się po upływie wyznaczonego na tabliczce czasu.

c/ M a s z y n y dl.a p r a c y p r z e r y w a n e j. Względny czas pracy musi odpowiadać wartości, wyznaczonej na tabliczce. Próbę można rozpocząć z maszyną zimną lub nagrzaną. Próbę przerywa się na połowie ostatniego okresu włączenia, gdy temperatura maszyny przestanie wzrastać w sposób widoczny; gra ma wynosić 10 minut.

§.29. S p o s o b y p o m i a r u t e m p e r a t u r. Uznane są trzy następujące sposoby pomiaru temperatur /patrz § 33./:

a/ sposób termometrowy,
b/ sposób oporowy,
c/ sposób wskaźników wbudowanych.

§.30. S p o s ó b t e r m o m e t r o w y. Sposób ten przewiduje pomiar temperatury za pomocą termometru przyłożonego w miejscu dostępnym, gdzie należy spodziewać się najwyższej temperatury. Pod nazwą termometru należy rozumieć na równi z termometrem rtęciowym i alkoholowym, również niewbudowane wskaźniki termoelektryczne i oporowe.

W miejscach, gdzie mogą się zjawiać wpływy zmiennego, lub ruchomego pola magnetycznego, należy używać zamiast termometrów rtęciowych, termometry alkoholowe.

Należy zapewnić dobrą wymianę ciepła między powierzchnią nagrzaną a termometrem, a poza tym przykryć termometr razem z miejscem pomiaru złym przewodnikiem ciepła.

§.31. S p o s ó b o p o r o w y. Sposób ten przewiduje określenie przyrostu temperatury /patrz. §.38/ uzwojeń za pomocą pomiaru przyrostu oporności uzwojeń. Przyrost temperatury Δt w ^{o}C uzwojeń miedzianych oblicza się ze wzrostu oporności przy pomocy następujących wzorów, w których:

t_z - oznacza temperaturę uzwojenia zimnego,
R_z - " oporność uzwojenia zimnego,
R_g - " " " gorącego,
t_c - " temperaturę czynnika chłodzącego.

1/ Dla maszyny na pracę ciągłą lub przerywaną:

$$t = \frac{R_g - R_z}{R_z} /234,5 + t_z/ - /t_c - t_z/$$

2/ Dla maszyny na pracę dorywczą:

$$t = \frac{R_g - R_z}{R_z} /234,5 + t_z/;$$

przy czym R_z i t_z dotyczą początku badań.

U w a g a. Oporność początkowa. Jeżeli temperatura uzwojenia ma być określona z wzoru oporności, to temperatura uzwojenia, pomierzona termometrem przed rozpoczęciem próby, winna być praktycznie równa temperaturze otaczającego powietrza.

§.32. S p o s ó b w s k a ź n i k ó w w b u d o w a n y c h. Wskazówki ogólne. W maszynie powinno być conajmniej 6 wskaźników, umieszczonych w sposób najodpowiedniejszy na obwodzie czynnym maszyny oraz wzdłuż rdzenia w miejscach, gdzie przewidywana jest najwyższa temperatura. Każdy wskaźnik winien pozostawać w najściślejszym zetknięciu z powierzchnią, której temperatura ma być zmierzona, oraz w sposób zabezpieczający go od zetknięcia się z powietrzem chłodzącym.

. . . . . .

§.33. U w a g i, d o t y c z ą c e p o m i a r u t e m p e r a t u r u z w o j e ń. Pomiar przyrostu temperatury na podstawie wzrostu oporności uzwojeń może być stosowany dla wypadku wszelkich uzwojeń wzbudzających lub uzwojeń stojanów maszyn, dla których sposób wskaźników wbudowanych nie jest wskazany /Pomiar ten natomiast uważać należy za niewłaściwy dla wypadku stojanów turbo-maszyn/.

Sposobu termometrowego używać należy w wypadkach, w których ani sposób oporowy, ani sposób wskaźników wbudowanych nie może być stosowany.

Stosowanie sposobu termometrowego wskazane jest również w wypadkach następujących:

a/ jeżeli sposób oporowy nie może dać dość dokładnych wyników, jak to ma miejsce w zastosowaniu do uzwojeń o małej oporności, zwłaszcza, gdy oporność styków i złącz stanowi znaczną część ogólnej oporności uzwojenia.

b/ dla uzwojeń jednowarstwowych ruchomych i nieruchomych.

c/ jeżeli ze względów masowej produkcji wskazany jest sposób termometrowy, choć sposób oporowy jest możliwy.

§.34. P o m i a r t e m p e r a t u r y c z y n n i k a c h ł o d z ą c e g o p o d c z a s p r ó b y /patrz §.31 - wielkość t_o/.

1/ Dla maszyn z chłodzeniem naturalnym /symbol a/, z przewietrzaniem własnym /symbol b i b_2/ lub obcym /symbol c_2/ oraz zewnętrznym /symbol d/, jeżeli powietrze chłodzące pobierane jest z otoczenia bezpośredniego, za temperaturę czynnika chłodzącego uważać należy wartość średnią odczytów, dokonywanych w różnych odstępach ostatniej ćwierci czasu trwania próby.

Odczyty powyższe winny być brane, jako wartości średnie z odczytów na kilku termometrach, przynajmniej dwóch, umieszczonych w różnych punktach naokoło na poziomie środka maszyny, w odległości jednego do dwóch metrów od niej. Termometry należy chronić od wszelkich wpływów ruchu powietrza i promieniowania, pochodzącego od maszyny badanej, jak i wszelkich innych źródeł.

. . . . . .

§.35. P o m i a r t e m p e r a t u r m a s z y n y. Pomiar temperatur maszyny, zarówno sposobem termometrowym, jak oporowym winien być robiony możliwie podczas trwania próby cieplnej, lub, jeżeli inaczej nie można, to natychmiast po zatrzymaniu maszyny. Dopływ czynnika chłodzącego winien być przerwany jednocześnie z wyłączeniem maszyny. Czas trwania wybiegu w razie potrzeby należy sztucznie skrócić. Zaleca się w miarę potrzeby stosowanie termometrów maksymalnych.

§.36. M i e r z e n i e t e m p e r a t u r y p o z a t r z y m a n i u m a s z y n y.

1/ Jeżeli maszynę można prędko zatrzymać po odłączeniu od sieci, to należy zmierzyć temperaturę natychmiast po jej zatrzymaniu, przy czym za miarodajną temperaturę uważać należy największą wartość odczytaną.

2/ Jeżeli maszyny nie można zatrzymać odrazu po odłączeniu od sieci, to należy mierzyć temperaturę kilkakrotnie w pewnych odstępach czasu tak, aby można było wykreślić krzywą stygnięcia maszyny. Za temperaturę miarodajną należy uważać wielkość otrzymaną przez ekstrapolację krzywej do momentu odłączenia od sieci.

§.37. R o d z a j e m a t e r i a ł ó w i z o l a c y j n y c h. Materiały izolacyjne dzielą się na następujące rodzaje:

R o d z a j O. Bawełna, jedwab, papier i temu podobne organiczne materiały nienasycone /lub niezanurzone w oleju/.

R o d z a j A. Bawełna, jedwab, papier i temu podobne materiały, nasycone w masie zalewnej lub zanurzone stale w oleju.

U w a g a: Izolację uważa się za nasyconą, jeżeli powietrze między włóknami usunięte zostało przez odpowiedni materiał nasycający, nawet gdy ten ostatni nie wypełnia całkowicie przestrzeni pomiędzy przewodami izolowanymi. Aby użyty do nasycenia materiał można było uważać za odpowiedni, winien on posiadać dobre własności izolacyjne, powinien całkowicie pokrywać włókna i czynić je przystającymi jedne do drugich i do przewodnika, nie powinien w swym wnętrzu tworzyć przerw pod wpływem ulatniania się rozczynnika lub pod wpływem jakiejś innej przyczyny; nie powinien przy krańcowej temperaturze nagrzanej maszyny topić się ani zmieniać swych własności w sposób szkodliwy dla pracy maszyny.

R o d z a j B. Mika, azbest oraz podobne nieorganiczne materiały w formie wyrobów, zawierających czynnik wiążący. Jeżeli w związku z izolacją rodzaju B został użyty w małej ilości i dla celów li tylko pomocniczych

materiał rodzaju A, to taki złożony materiał może być uważany za należący do rodzaju B, pod warunkiem, że pod wpływem temperatury dopuszczalnej dla izolacji B, nie zostaną pogorszone własności elektryczne i mechaniczne uzwojenia izolowanego /słowo "pogorszyć" użyte jest w znaczeniu: spowodować zmiany, które mogłyby uczynić materiał izolacyjny niezdatnym do trwałej pracy/.

R o d z a j C. Mika bez czynnika wiążącego, porcelana, szkło, oraz inne podobne materiały.

I z o l a c j a r ó ż n o r o d n a. Jeżeli izolacja składa się z różnych materiałów /za wyjątkiem przypadków, gdzie wyraźnie izolacja należy do rodzaju B/, to przyrost temperatury osiągnięty przez każdy z materiałów, nie powinien przekraczać granicy dopuszczalnej dla danego materiału.

P r z y k ł a d y: a/ Jeżeli odmienne rodzaje izolacyjnego materiału użyte są w różnych częściach jednego i tego samego uzwojenia /np. inny materiał izolacyjny w żłobkach, a inny dla połączeń czołowych/, to granicznym przyrostem temperatury dla każdej z tych części z osobna będzie przyrost dopuszczalny dla izolacji, użytej dla danej części.

b/ Jeżeli izolacja jakiejkolwiek części uzwojenia składa się z warstw materiałów, należących do różnych rodzajów /np. warstwy materiału A i B/, to należy rozróżnić dwa następujące przypadki:

1/ Jeżeli możliwe jest zmierzenie temperatury, osiągniętej przez każdą z warstw, to każdy z materiałów może się dogrzać do temperatury jemu odpowiadającej.

2/ Jeżeli pomiar temperatur poszczególnych warstw jest niemożliwy, to granicznym przyrostem temperatury dla danej części uzwojenia powinien być przyrost dopuszczalny dla materiału, najmniej odpornego na gorąco.

§. 38. P r z y r o s t t e m p e r a t u r y. Przyrostem temperatury danej części maszyny, będącej w pracy ciągłej lub przerywanej, nazywamy różnicę temperatury rozpatrywanej części maszyny i temperatury czynnika chłodzącego doprowadzonego, dla wypadku zaś pracy dorywczej, różnicę temperatur danej części na końcu i początku okresu pracy.

§.39. T a b l i c a d o p u s z c z a l n y c h p r z y r o s t ó w t e m p e r a t u r y. W tablicy III podane są graniczne wartości dopuszczalnych przyrostów temperatur dla maszyn izolowanych materiałami rodzaju A i rodzaju B. Tablica ta jest ważna pod warunkiem, iż temperatura otoczenia lub czynnika chłodzącego nie przekracza 40° C. Jeżeli temperatura ta jest wyższa od 40° C, to przyrosty dopuszczalne powinny być o tę różnicę zmniejszone.

Dla materiałów rodzaju C, graniczne wartości dopuszczalnych przyrostów temperatury są o 15° C niższe od dopuszczalnych przyrostów temperatur dla rodzaju A.

Dla meteriałów rodzaju C, dopuszczalne przyrosty temperatur nie są jeszcze ustalone.

§.40. T e m p e r a t u r y k r a ń c o w e. Aby otrzymać wartość dopuszczalnych temperatur krańcowych, należy dodać do wartości przyrostów temperatury, podanych w tablicy umieszczonej niżej, wartość n a j w y ż s z e j

Wyciąg z tablicy III
/dopuszczalne przyrosty temperatur/

L.p.	Rodzaje uzwojenia oraz części maszyn	Dopuszczalne przyrosty temperatur			
		Mater.izol.rodz.A		Mater.izol.rodz.B	
		Sposób termomtr	Sposób oporowy	Sposób termmtr	Sposób oporowy
2	Uzwojenia prądu zmiennego, turboprądnic mniejszych niż wymienione pod 1 /poniżej 5000kVA.	50^{ox}/		65^{ox}/	
3	a/ Uzwojenie prądu zmiennego maszyn mniejszych niż wymienione pod 1b, oraz niewymienionych pod 2/. b/ Uzwojenia wzbudzające maszyn prądu zmiennego i stałego o wzbudzeniu prądem stałym, inne jednak niż wymienione pod 4 i 5. c/ Uzwojenia połączone z komutatorami	50^{ox}/	60°	65^{ox}/	80°
4	Uzwojenia wzbudzające turboprądnic o wzbudzeniu prądem stałym	-	-	-	-
5	Uzwojenia wzbudzające małej oporności jedno-, lub kilkowarstwowe oraz uzwojenia kompenzacyjne	60°	60°	80°	80°
6	Uzwojenia izolowane stale zwarte	60°	-	80°	-
7	Łożyska	45° sposobem termometrowym			
8	Uzwojenia nieizolowane stale zwarte	Temperatura tych części nie powinna w żadnym razie przekroczyć wartości, która mogłaby być szkodliwa dla pobliskich uzwojeń.			
9	Rdzeń żelazny oraz inne części nie pozostające w zetknięciu z uzwojeniami				
10	Rdzeń żelazny, oraz inne części pozostające w zetknięciu z uzwojeniami	Jak dla uzwojeń przylegających /spos. termometrowym/. Treść §.41 nie ma tu zastosowania.			
11	Komutatory i pierścienie ślizgowe, otwarte lub zamknięte	50° /patrz §.44/ sposobem termometrowym.			

^{x}/. Pozycje te podlegają poprawce, jeżeli napięcie przewyższa 11000 V. /patrz §.41/.

temperatury otoczenia, t.j. 40° C.

Przekroczenie temperatury krańcowej jest niedopuszczalne, gdyż grozi zniszczeniem izolacji.

Przekroczenie granicznego przyrostu temperatury jest dopuszczalne tylko wtedy, kiedy temperatura czynnika chłodzącego pozostaje stale tak niska, iż nie ma obawy przekroczenia temperatury krańcowej: fakt ten winien być zaznaczony w odnośnej umowie. W podobnym wypadku na tabliczce znamionowej obowiązujące jest podanie najwyższej temperatury czynnika chłodzącego, przy jakiej jeszcze maszyna może bezpiecznie pracować. Wszystkie inne postanowienia niniejszych przepisów winny być dla tego wyjątkowego wypadku zachowane.

Gdy maszyna stoi w małym pomieszczeniu tak, iż nie otrzymuje dostatecznego dopływu powietrza chłodzącego, nie może ona pracować stale przy pełnej mocy znamionowej, gdyż w przeciwnym razie może być przekroczona dopuszczalna temperatura.

. . . . . .

§.43. T e m p e r a t u r a c z y n n i k a c h ł o d z ą c e g o. Maszynę można próbować przy wszelkiej temperaturze powietrza chłodzącego, nie większej jednak od 40° C.

Jakąkolwiek okaże się temperatura czynnika chłodzącego, przyrost temperatury uzwojeń podczas próby nie powinien przekroczyć wartości podanych w tablicy III.

§.44. K o m u t a t o r y i p i e r ś c i e n i e ś l i z g o w e. Przyrost temperatury komutatorów i pierścieni ślizgowych może przekroczyć wartość podaną w wierszu 11 tabeli III, przy zachowaniu następujących warunków:

a/ Temperatura materiału izolacyjnego komutatora lub pierścieni ślizgowych oraz przylegających uzwojeń nie powinna przekraczać wartości, podanej w tablicy III, dla odpowiednich materiałów izolacyjnych.

b/ Wytwórca powinien dać specjalną gwarancję, iż osiągnięta wysoka temperatura nie wpłynie w sposób ujemny na komutację.

c/ Temperatura nie powinna być tak wysoka, by mogła wpłynąć na własności lutowanych styków i połączeń.

Ć w i c z e n i e 3 1.

B a d a n i e t r a n s f o r m a t o r a j e d n o f a z o w e g o p r z y o b c i ą ż e n i u b e z i n d u k c y j n y m.

T r a n s f o r m a t o r j e d n o f a z o w y. Transformatory służą do przetwarzania prądu zmiennego o pewnym napięciu na prąd zmienny o innym napięciu, ale o tej samej ilości okresów. Znaczenie transformatorów jest olbrzymie dla rozszerzenia zastosowania prądu elektrycznego. Aby się o tym szerzej nie rozpisywać, można wspomnieć tylko, że budowa elektrowni okręgowych, a w szczególności krajowych i wszystkie stąd płynące korzyści mogły nastąpić dopiero przy użyciu transformatorów, umożliwiających nam uzyskanie wysokiego napięcia, względnie zamiany wysokiego na niskie.

Tę zmianę napięcia w transformatorze uzyskujemy za pośrednictwem zmiennego strumienia magnetycznego. Wiemy bowiem na podstawie prawa indukcji Faraday'a, że gdy zmienimy strumień magnetyczny, objęty jednym zwojem, to

powstanie w tym zwoju siła elektromotoryczna /"SEM"/, która jest proporcjonalna do prędkości zmiany strumienia magnetycznego, t.j. do:

$$\frac{d\Phi}{dt}.$$

Kierunek tej SEM-ej otrzymujemy z prawa Lenza, które mówi, że prąd, jaki wytworzyłaby wyindukowana SEM starałby się powstrzymać zmianę strumienia, powodującą powstanie tej SEM-ej, dlatego znak powyższego ilorazu będzie minus. Gdy teraz weźmiemy nie jeden zwój, ale cewkę, posiadającą "z" zwojów, to otrzymamy wzór na chwilową idnukowaną SEM-ą:

$$E_t = -z\frac{d\Phi}{dt} = -z\,\frac{d\Phi}{dt}\cdot 10^{-8} \text{ woltów.....} \qquad .....1/$$

bo 1 wolt = 10^8 jednostek absolutnych /wolt jest praktyczną jednostką SEM-ej/.

Gdy strumień magnetyczny zmienia się sinusoidalnie, np. jest wywoływany prądem sinusoidalnym /I_μ/, to możemy znaleźć dla SEM-ej wartość maksymalną, a następnie i skuteczną. Przyjmijmy:

$$\Phi_t = \Phi_{max}.\cos\alpha..... \qquad .....2/$$

/bo cosinusoida jest sinusoidą przesuniętą o $\frac{1}{2}\pi$/ gdzie $\alpha = \omega.t$, to wstawiając we wzór 1/ mamy:

$$E_t = -z\frac{d/\Phi_{max}.\cos\alpha/}{dt}.10^{-8} =$$

$$= -z.\Phi_{max}./-\sin\alpha/.\frac{d\alpha}{dt}.10^{-8} \text{ woltów;}$$

ponieważ $\alpha = \omega.t$, więc $\frac{d\alpha}{dt} = \omega = 2.\pi.\nu.$

$$E_t = z.\Phi_{max}.\omega\sin\alpha\,10^{-8} =$$

$$= z.\omega.\Phi_{max}.10^{-8}.\sin\alpha \text{ woltów,}$$

czyli

$$E_t = E_{max}.\sin\alpha \text{ woltów,}..... \qquad .....1a/$$

gdyż:

$$E_{max} = z.\omega.\Phi_{max}.10^{-8} \text{ V.}$$

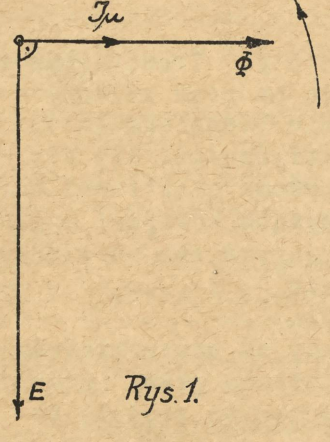
Biorąc teraz pod uwagę wzory 1a/ i 2/ widzimy, że gdy E ma się zmieniać wedle sinusoidy, to Φ, a więc i prąd I_μ, który ten strumień wytwarza, musi zmieniać się wedle cosinusoidy, czyli strumień magnetyczny wyprzedza SEM-ą o $\frac{1}{2}\pi$, bo $\cos\alpha = \sin/\alpha + \frac{1}{2}\pi/$. Można więc napisać:

$$\Phi_t = \Phi_{max}.\cos\alpha = \Phi_{max}.\sin/\alpha + \tfrac{1}{2}\pi/..... \qquad .....2a/$$

zestawiając ze wzorem:

$$E_t = E_{max}.\sin\alpha..... \qquad .....1a/$$

widzimy wyraźnie przedstawione opóźnianie się napięcia o 90^0 /rys. 1/. Aby otrzymać wartość skuteczną, bierzemy:



Rys. 1.

$$\frac{E_{max}}{\sqrt{2}}$$

$$E = \frac{\omega.z.\Phi_{max}}{\sqrt{2}}.10^{-8} = \frac{2\pi.\nu.z.\Phi_{max}}{\sqrt{2}}.10^{-8} \text{ V}$$

$$E = 4{,}44.z.\nu.\Phi_{max}.10^{-8} \text{ V}.....1b/$$

Dyskutując wzór 1b/ stwierdzamy, że gdy mamy ν=const, oraz Φ_{max}= const, to SEM zależy tylko od ilości zwojów. Skoro więc na rdzeniu żelaznym /żelazo - aby był dobry przewodnik dla linij magnetycznych/, złożonym z cieniutkich blach /dla zmniejszenia strat żelaza/ umieścimy dwa uzwojenia o różnych ilościach zwojów, to wywołane w nich SEM-e /zmiennym ciekiem

magnetycznym/ są proporcjonalne do ilości zwojów:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{z_1}{z_2} \quad \ldots\ldots\ldots \qquad \ldots\ldots\ldots 3/$$

Takie urządzenie, jak powyżej opisano nazywa się transformatorem. Jedno uzwojenie, t.zn. pierwotne jest połączone na sieć prądu zmiennego i pobiera z niej prąd, potrzebny do wywołania odpowiedniego strumienia magnetycznego. Drugie uzwojenie, t.zw. wtórne, może być w dowolny sposób obciążone tak oporem omowym, impedancją, czy pojemnością, jak motorami i t.d. Strona więc pierwotna transformatora zachowuje się jak motor, pobierając energię elektryczną ze sieci, natomiast strona wtórna oddaje tę energię odbieralnikom,czyli zachowuje się jak generator.

Pośrednikiem w przeniesieniu energii z uzwojenia pierwotnego na wtórne jest, jak już wspomniano, pole magnetyczne. Ponieważ według zasady zachowania energii, moc pobrana ze sieci musi być równą mocy oddanej po stronie wtórnej, zwiększonej o straty w obu uzwojeniach, zatym:

$$I_1.U_1.\cos\varphi_1 = U_2.I_2.\cos\varphi_2 + p_{str};$$

ponieważ jednak straty zachodzące w transformatorze są małe w stosunku do mocy oddawanej, poza tym:

$$U_1 = \sim E_1, \qquad U_2 = \sim E_2,$$

a przy obciążonym transformatorze:

$$\cos\varphi_1 = \cos\varphi_2,$$

możemy więc napisać:

$$E_1.I_1 = \sim E_2.I_2$$

lub:

$$\frac{I_1}{I_2} = \sim \frac{E_2}{E_1} \quad \ldots\ldots\ldots \qquad \ldots\ldots\ldots 4/.$$

a uwzględniając wzór 3/, otrzymujemy w końcu:

$$\frac{I_1}{I_2} = \sim \frac{z_2}{z_1} \quad \ldots\ldots\ldots \qquad \ldots\ldots\ldots 4a/$$

Ze wzorów 4/ i 4a/ czytamy, że prądy są odwrotnie proporcjonalne do ilości zwojów, względnie SEM-ych. Gdy transformator jest nieobciążony /zaciski wtórne otwarte, t.j. opór między nimi $\longrightarrow \infty$, czyli $I_2 = 0$, to przyjmujemy, że napięcia są równe SEM-ym i $U_1 = E_1$, $U_2 = E_2$, bo co do U_2 jest tak w rzeczywistości, a U_1 tak mało się różni od E_1, że można tej różnicy nie brać w rachubę. Inaczej jest, gdy transformator jest obciążony, gdyż tu $U_1 > E_1$, jak to ma miejsce w motorze, a U_2 jest mniejsze od E_2 /jak w generatorze/.Chcąc znaleźć U_1, gdy dane jest E_1, to biorąc dla strony pierwotnej wzór

$$\Sigma \overline{E} = \Sigma \overline{I.R}$$

/dodawanie geometryczne/ otrzymujemy:

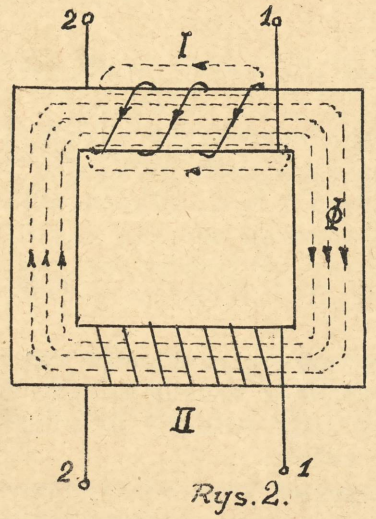
$$\overline{U_1} + \overline{E_1} + \overline{E_{s1}} = \overline{I_1.R_1},$$

skąd:

$$\overline{U_1} = -\overline{E_1} + \overline{I_1.R_1} - \overline{E_{s1}} \quad \ldots\ldots\ldots \qquad \ldots\ldots\ldots 5/$$

gdzie wektor $\overline{I_1.R_1}$ podaje nam spadek omowy w pierwotnym uzwojeniu /kreśli się równolegle do $\overline{I_1}$, bo R_1 jest skalarem/, a E_{s1} uwzględnia rozpraszanie się linij sił. Jeżeli bowiem do wywołania SEM-ej E_1 potrzeba jest Φ linij sił pulsujących w zwojach z_1, to ogólna ilość tych linij w uzwojeniu pierwotnym jest większa i wynosi $\Phi.c_1$, bo część ich $\Phi.c_1 - \Phi$ przebiega w powietrzu /rysunek 2/.

Całkowity więc strumień $\Phi.c_1$ wywołuje dwie SEM-e: E_1 oraz E_{s1}; ta ostatnia jest wywołaną ciekiem $\Phi_{c1} - \Phi$, który jest we fazie z prądem I_1, bo



Rys.2.

przedstawia rozproszone linie magnetyczne po stronie pierwotnej, czyli według wzorów 1a/ i 2a/ E_{s1} spóźnia się o $\frac{1}{2}\pi$ w stosunku do I_1. Strumień $\bar{\Phi}$ jest wypadkowym z cieków magnetycznych, wytworzonych po stronie pierwotnej i wtórnej, pomniejszonych o ich linie rozproszenia; nazywa się strumieniem głównym. Rzecz jasna, że takie E_1 jest prostopadłe do $\bar{\Phi}$ i spóźnia się o $\frac{1}{2}\pi$ w stosunku do $\bar{\Phi}$ /1a/ i 2a//. Mając już więc wzór:

$$\bar{U}_1 = -\bar{E}_1 + \overline{I.R_1} - \bar{E}_{s1}$$

oraz podane wielkości: E_1 i I_1, wykonujemy wykres z rys. 3. Widać tutaj wyraźnie, że U_1 jest większe od E_1.

Badając stronę wtórną, otrzymujemy na podstawie wzoru:

$$\Sigma\bar{E} = \Sigma\overline{I.R}$$

$$\bar{E}_2 + \bar{E}_{s2} = \overline{I_2.R_2} + \overline{I_2.Z_2}$$

gdzie:

$$\overline{I_2.Z_2} = \bar{U}_2,$$

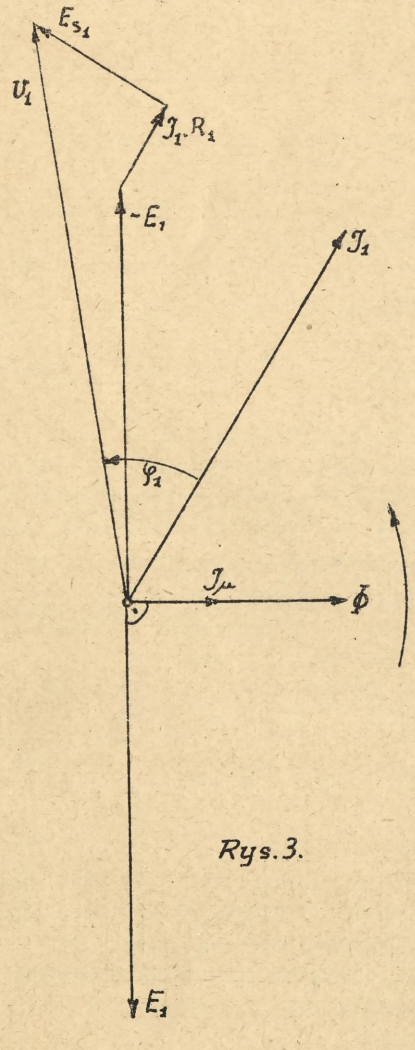
czyli:

$$\bar{E}_2 + \bar{E}_{s2} - \overline{I_2.R_2} = \bar{U}_2 \ldots\ldots\ldots\ldots 6/$$

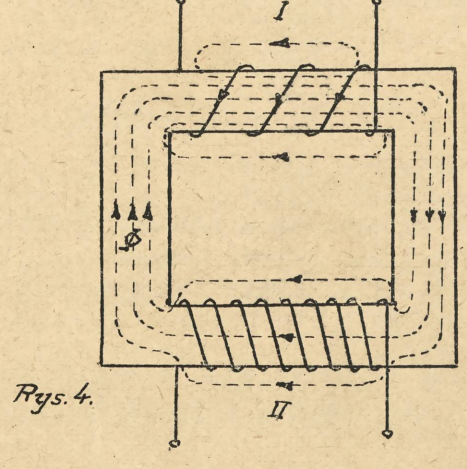
gdzie $E_2 \perp \bar{\Phi}$ i spóźnia się o $\frac{1}{2}\pi$, bo wywołane przez $\bar{\Phi}$, $I_2.R_2$ spadek omowy po stronie wtórnej /kreślony równolegle do I_2/; $E_{s2} \perp I_2$ i spóźnia się o $\frac{1}{2}\pi$, gdyż jest to SEM, wywołana ciekiem rozproszenia strony wtórnej. Skoro bowiem mamy I_2 /transfomator obciążony/, to w obrębie uzwojenia wtórnego, prócz strumienia głównego $\bar{\Phi}$ występują jeszcze wtórne linie rozproszenia. Te linie wywołane są przez I_2, czyli w żelazie miałyby kierunek przeciwny niż strumień główny, a to jest niemożliwe, by w tym samym miejscu równocześnie przepływały strumienie magnetyczne o przeciwnych kierunkach. Występowanie więc tych linij rozproszenia objawia się tu w ten sposób, że część strumienia głównego nie wchodzi do uzwojenia wtórnego, tylko zamyka się przez powietrze, jak to widać na rysunku 4. Stąd wniosek, że:

$\bar{E}_2 + \bar{E}_{s2} < \bar{E}_2$.

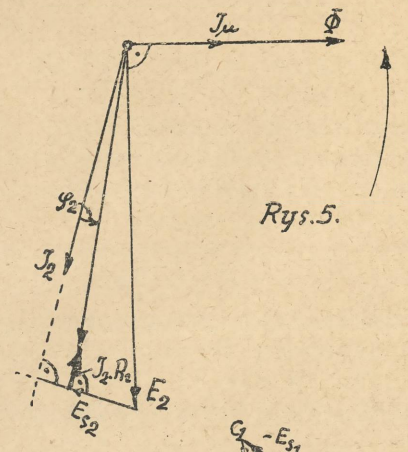
Na podstawie wzoru 6/ możemy znaleźć E_2, mając dane U_2 i I_2, względnie U_2, mając dane E_2 i I_2 /rys. 5/. Widzimy tu jasno, z rysunku, że $U_2 < E_2$.



Rys.3.



Rys.4.

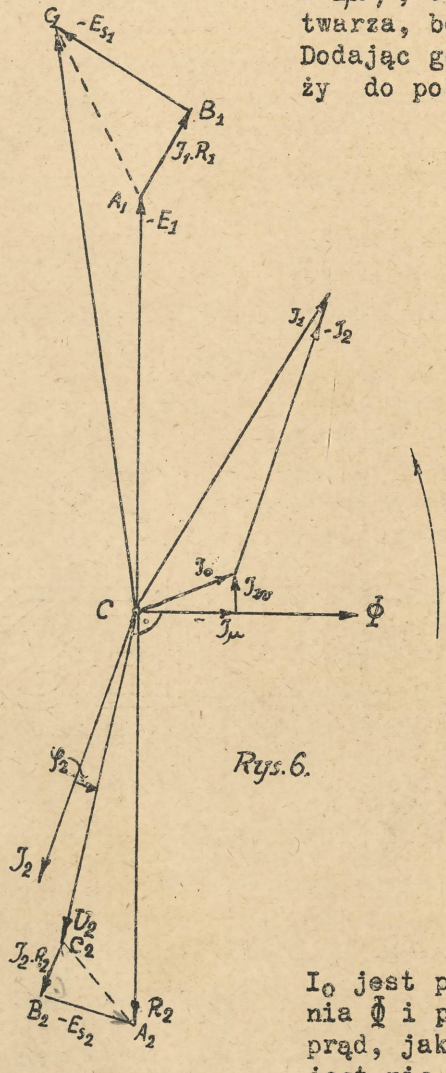


Rys.5.

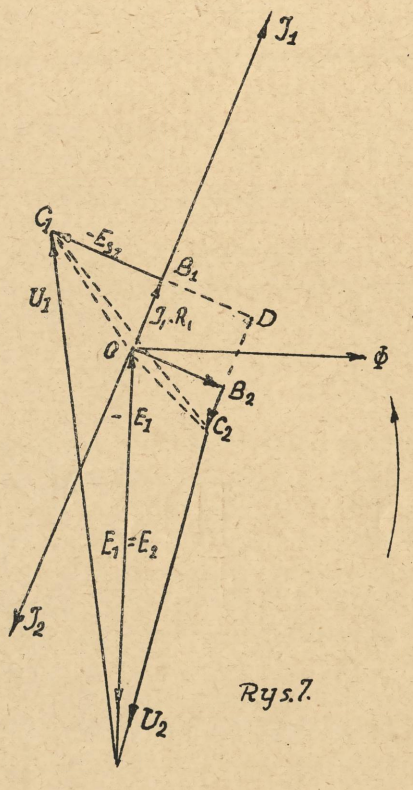
Aby otrzymać wykres całego transformatora, należy połączyć oba poprzednie wykresy. Mamy więc podać wykres transformatora, gdy mamy dane U_2 i I_2, oraz R_1, R_2, E_{s1} i E_{s2}, t.zn. chcemy wiedzieć, jakie będzie U_1, I_1 oraz $\cos\varphi_1$. Dla łatwości i większej jasności rysunku przyjmujemy $z_1 : z_2 = 1$, więc $E_1 = E_2$. Aby otrzymać E_2 korzystamy ze wzoru 6/, czyli mamy:

$$\overline{E}_2 = \overline{U}_2 + \overline{I}_2.R_2 - \overline{E}_{s2}.$$

Skoro E_2 jest już wykreślone /rys. 6/, to już można rysować $\overline{\Phi}$, czyli I_μ /bo $\overline{\Phi}$ jest we fazie z I_μ/, t. j. prąd, który ten ciek główny wytwarza, bo wiemy, że $E_2 \perp \overline{\Phi}$ i spóźnia się o $\frac{1}{2}\pi$. Dodając geometrycznie do I_μ prąd I_w, który służy do pokrycia strat w żelazie, otrzymujemy I_o;



Rys.6.



Rys.7.

I_o jest prądem potrzebnym do wywołania strumienia $\overline{\Phi}$ i pokrycia strat w żelazie, czyli jestto prąd, jaki transformator pobiera ze sieci, gdy jest nie obciążony, t.j. przy t.zw. biegu luzem; więc przy biegu luzem $I_o = I_1$. Gdy mamy I_2, to na wywołanie $\overline{\Phi}$ wpływa nie tylko I_1, lecz także I_2, czyli:

$$\overline{\Phi} = \overline{\Phi}_1 + \overline{\Phi}_2.$$

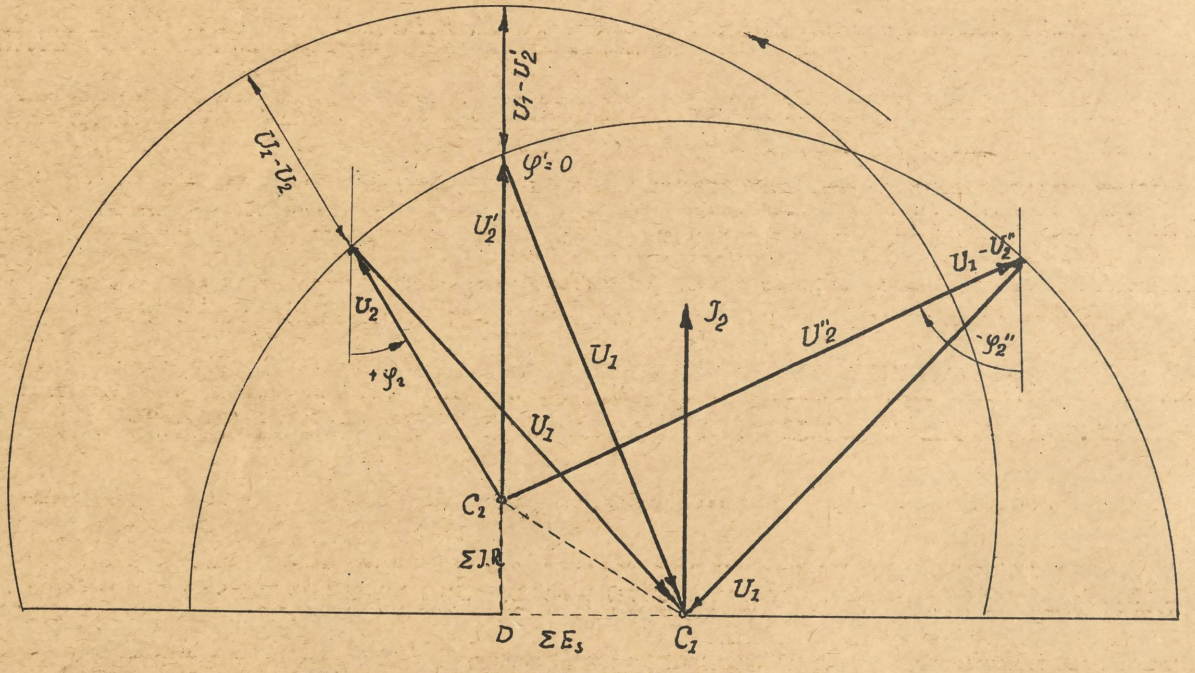
Ponieważ strumienie magnetyczne są we fazie z prądami, które je wywołują, więc uwzględniając i straty żelaza, otrzymamy:

$$\overline{I}_o = \overline{I}_1 + \overline{I}_2;$$

mając więc $\overline{I}_2$ i $\overline{I}_o$, rysujemy $\overline{I}_1 = \overline{I}_o - \overline{I}_2$, co właśnie uskutecznione jest na wykresie. Reszta wykresu jest jasna na podstawie tego, co poprzednio podano.

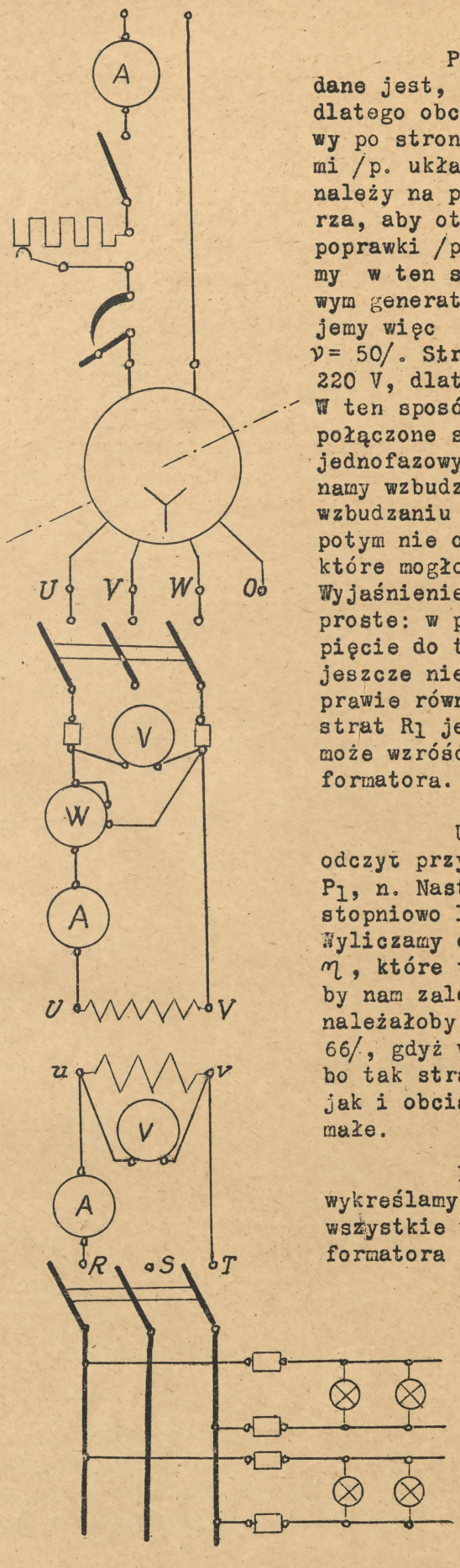
Chcąc mieć wprost podany wektor: $\overline{U}_1 + \overline{U}_2$, przekształciliśmy ten wykres tylko o tyle, aby oba trójkąty: $A_1B_1C_1$ i $A_2B_2C_2$ stykały się w punkcie O, bo suma się nie zmieni, gdy zmienimy porządek dodajników i w ten sposób uzyskuje się wykres z rysunku 7, gdzie jeszcze jest przyjęte, że I_1 jest o 180° przesunięte w stosunku do I_2, więc I_1R_1 jest równoległe do $I_2.R_2$, oraz Es_1 równoległe do Es_2. Przyjęcie: I_1 z I_2 zawiera kąt 180° nie wiele odbiega od prawdy, bo I_o stanowi zwykle zaledwie 5 - 10 % I_{1nom}.

Jak widzimy z wykresu 7, to $\overline{U}_1 + \overline{U}_2 = \overline{C_2C_1}$, czyli jest przeciwprostokątnią trójkąta C_1C_2D. Jedną jego przyprostokątnią stanowią spadki omowe, drugą SEM-e linij rozproszenia, co jasno czytamy z wykresu. Wielkość obu tych przyprostokątni dla danego transformatora zależy tylko od prądu, a nie zależy od φ, więc dla pewnego I_2 bez względu, czy jest we fazie, czy nie, z napięciem, trójkąt ten nie ulega zmianie i zawsze przeciwprostokątnia jego będzie podawać nam $\overline{U}_1 + \overline{U}_2$. Skoro więc z jednego końca tej przeciwprostokątni wykreślimy U_2, to łącząc koniec U_2 z drugim końcem przeciwprostokątni, otrzymamy U_1; to właśnie robimy w wykresie Kappa, otrzymując diagram z rys. 8.



Rys. 8

Przyjęte tu I_2 = const. i U_1 = const /co do wielkości/. Chcąc aby to I_2 przedstawiało nam różne przesunięcia fazowe, a U_1 stale było const /co do wielkości/, musi U_2 przybierać różne kierunki, stale wychodząc z punktu C_2, a kończąc się na obwodzie koła, zakreślonego z punktu C_1 promieniem o wielkości U_1. W ten bardzo prosty sposób uzyskujemy, że stale $U_1 + U_2 = C_2C_1$ przy zachowaniu U_1 = const. W diagramie powyżej narysowanym mamy uwzględniony wypadek obciążenia indukcyjnego /$+\varphi$/, omowego /$\varphi = 0$/ i pojemnościowego /$-\varphi$/. Jak czytamy jasno z wykresu, to U_2 może być większe od U_1, gdy mamy obciążenie pojemnościowe. Aby mieć wprost podaną różnicę $U_1 - U_2$ taką, jaką wykażą nam woltomierze, zakreślamy drugie koło także o promieniu U_1, ale z punktu C_2, przedłużamy U_2 /o ile to jest potrzebne/ do przecięcia się z tym drugim kołem, wówczas odcinek zawarty między oboma obwodami /leżący na U_2 lub jego przedłużeniu/ podaje nam wprost $U_1 - U_2$, co jest samo przez się zrozumiałym na podstawie sposobu konstrukcji.



P o m i a r. Ponieważ w temacie podane jest, że obciążenie ma być bezindukcyjne, dlatego obciążamy dany transformator jednofazowy po stronie niskiego napięcia /110 V/ żarówkami /p. układ płączeń obok/. Baczną uwagę zwrócić należy na połączenie cewki napięciowej watomierza, aby otrzymać dobre wychylenie i odpowiednie poprawki /p. ćwiczenie 54/. Pomiar przeprowadzamy w ten sposób, że uruchamiamy motorem upustowym generator trójfazowy o 4 biegunach /utrzymujemy więc stale 1500 obr.na minutę, aby było ν= 50/. Strona pierwotna transformatora jest na 220 V, dlatego załączamy ją na zaciski U i W. W ten sposób dwie fazy generatora trójfazowego, połączone szeregowo, użyte zostały jako generator jednofazowy. Gdy mamy już 1500 obr./min., zaczynamy wzbudzać generator. Wygodniej jest już przy wzbudzaniu generatora załączyć transformator, aby potym nie otrzymać chwilowego uderzenia prądu, które mogłoby spowodować spalenie bezpieczników. Wyjaśnienie tego uderzenia prądu jest bardzo proste: w pierwszym momencie, gdy przykładamy napięcie do transformatora /tu 220 V/, to w nim jeszcze nie ma E_1, czyli prąd powstający jest prawie równy $U_1:R_1$. Ze względu na zmniejszenie strat R_1 jest bardzo małe, zatym powstający prąd może wzróść do wartości niebezpiecznej dla transformatora.

Uzyskawszy U_1 = 220 V, robimy pierwszy odczyt przy I_2 = 0 i zapisujemy: U_1, U_2, I_1, I_2, P_1, n. Następne punkty otrzymujemy, włączając stopniowo lampki, aż do uzyskania I_1 nominalnego. Wyliczamy cos φ_1 /cosφ_2 = 1,według założenia/ i η, które tu znajdziemy metodą bezpośrednią. Gdyby nam zależało na dokładniejszym pomiarze, to należałoby użyć metody pośredniej /p. ćwiczenie 66/, gdyż wiemy, że η transformatora jest duże, bo tak straty żelaza /histerezy i prądów wirowych/ jak i obciążenia /$I_1^2.R_1 + I_2^2.R_2$/ są tu zwykle dość małe.

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów wykreślamy: 1/η, 2/cosφ_1/, 3/ U_2, 4/ I_1, 5/ P_1 - wszystkie w zależności od mocy odebranej z transformatora - P_2.

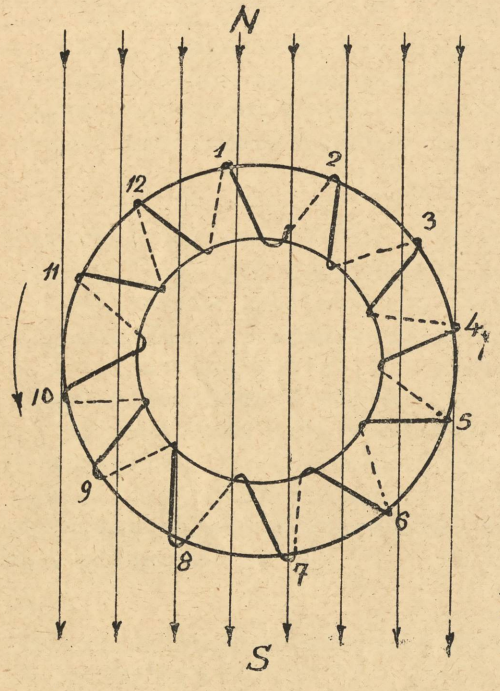
Ćwiczenie 82.

Zdjęcie charakterystyki napięciowej i krzywej regulacji generatora trójfazowego, łączonego w gwiazdę i trójkąt, przy obciążeniu bezindukcyjnym.

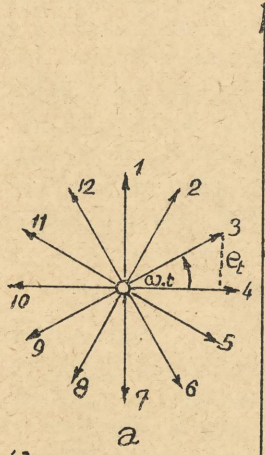
W objaśnieniu do ćwiczenia 31 wyprowadzony został wzór na SEM-ą:

$$E = 4{,}44.z.\nu.\Phi_{max}.10^{-8}\ V,$$

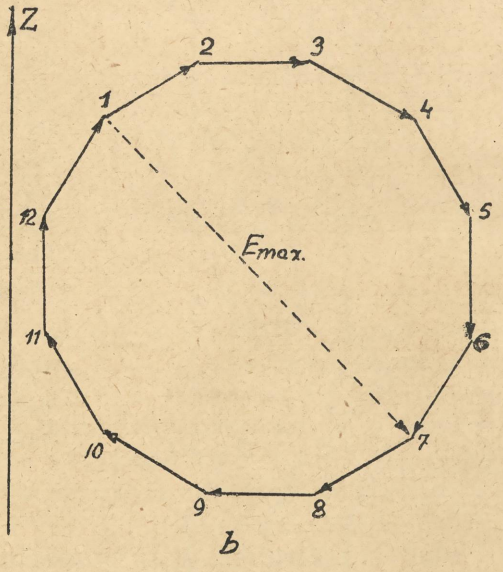
który ważny jest dla transformatora, gdzie w uważanym momencie ten sam strumień jest objęty przez wszystkie zwoje; można więc było obliczyć SEM-ą wyindukowaną w jednym zwoju i pomnożyć ją przez ilość zwojów, aby otrzymać całkowitą SEM-ą cewki. Inaczej musi być w maszynach, gdzie każdy zwój /nie leżący w tym samym żłobku/obejmuje w pewnym momencie inną ilość linij sił i tak: gdy jeden obejmuje Φ_{max}, to inny $\frac{1}{2}.\Phi_{max}$, jeszcze inny $\frac{1}{3}.\Phi_{max}$ i t.d. zero, a nawet wartości ujemne, co jasno czytamy z rysunku 1./przez wartość ujemną strumienia rozumiemy zmianę jego kierunku/. Zrozumiałym więc teraz jest, że w każdym z tych zwojów powstanie w danym momencie inna SEM i tak, gdy w jednym $e_t = \Phi$, to w innym $e_t = \frac{1}{2}.e_{max}$ i t.d. w innym $e_t = e_{max}$, a także są wartości ujemne. Gdy mamy uzwojenie rozłożone na całym obwodzie pierścienia /twornik rotorem a stator ma dwa bieguny/, to wyindukowane w poszczególnych zwojach SEM-e przy obracaniu rotora można przedstawić wykreślnie /rys. 2/.



Rys.1



a



b

Rys. 2.

Tutaj rzuty poszczególnych promieni na oś Z podają nam SEM-e chwilowe w zwojach /p. wzór 1a/ w ćwiczeniu 31/, a ponieważ zwoje są połączone ze sobą szeregowo, więc chcąc otrzymać diagram napięć całego uzwojenia, należy wykonać dodawanie geometryczne /rys. 2/. Jeżeli dowolne dwa przeciwległe punkty uzwojenia, np. 2 - 8, połączymy z pierścieniami wirującymi razem z uzwojeniem, to ze szczotek nieruchomych, ślizgających się po tych pierścieniach, możemy zbierać zmienne napięcie jednofazowe o amplitudzie, równej

wektorowi 2 - 8 = E_{max}. Widzimy wyraźnie, że wektor 2 - 8, t.j. uzyskana amplituda jest znacznie mniejsza od iloczynu utworzonego z ilości zwojów /z'/ między punktami 2 a 8 przez amplitudę jednego zwoju e_{max}:

$$E_{max} < z' . e_{max},$$

więc też i

$$E < z' . e,$$

gdzie E i e są wartościami skutecznymi. Aby to uwzględnić uzupełniamy wzór, wyprowadzony dla transformatora w ten sposób, że mnożymy go przez czynnik "ζ", czyli t. zw. współczynnik uzwojenia, który określony jest wzorem:

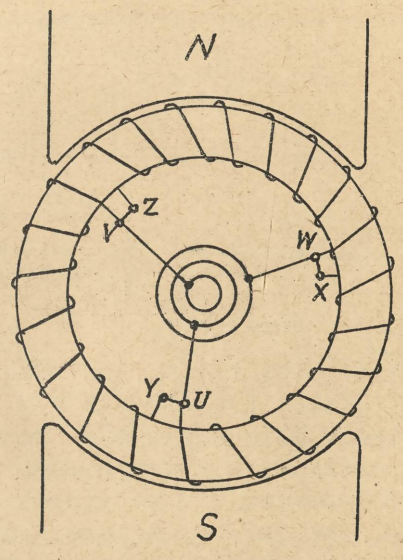
$$\zeta = \frac{E}{z' . e}$$

czyli:

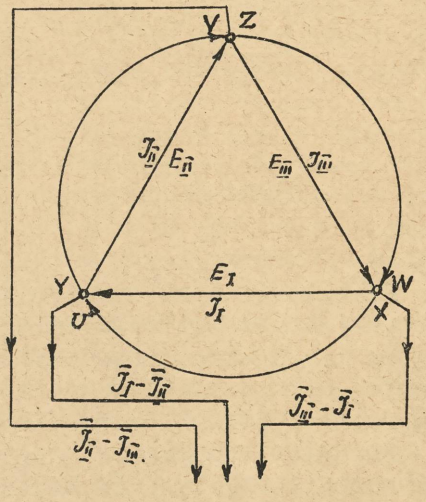
$$\zeta = \frac{\text{wypadkowa SEM skuteczna}}{\text{Suma SEM-ych skut. w poszczególnych zwojach}}$$

Otrzymamy więc teraz wzór:

$$E = 4{,}44 . \zeta . z . \nu . \Phi_{max} . 10^{-8} \text{ V}.$$



Rys. 3a.



Rys. 3b.

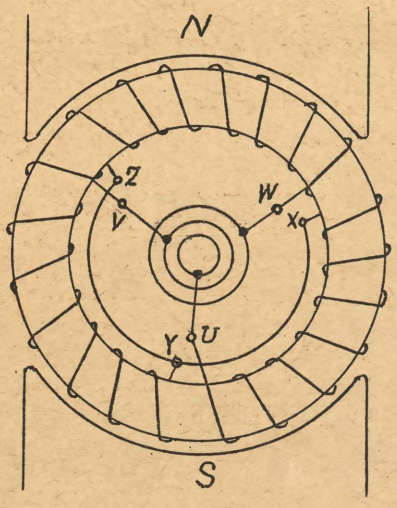
Z diagramu napięć czytamy, że przez zwiększenie ilości zwojów otrzymamy kształt wieloboku więcej zbliżony do koła, czyli wówczas ζ maleje i ostatecznie przyjmuje wartość:

$$\zeta = \frac{\text{średnica}}{\text{pół obwodu koła}} = \frac{2 . r}{r . \pi} = \frac{2}{\pi}$$

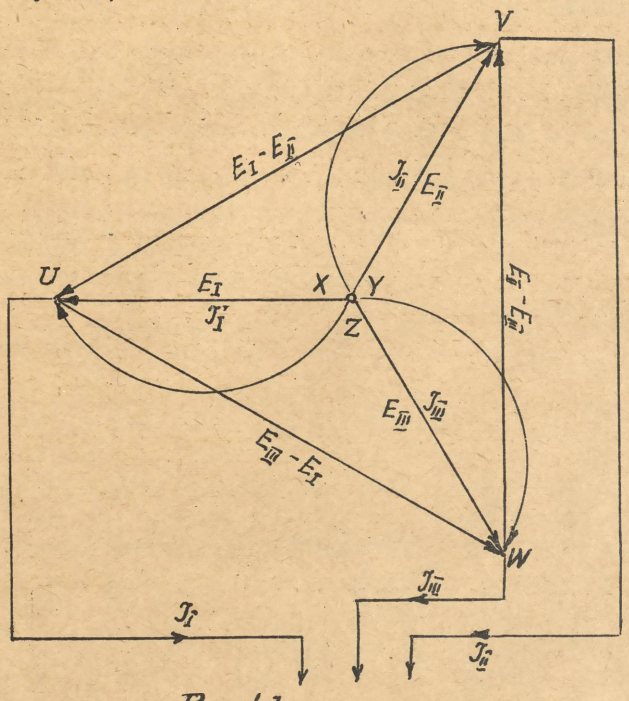
Ta wartość odnosi się do maszyny jednofazowej /lub maszyny prądu stałego/, gdy uzwojenie jest rozłożone równomiernie na całym obwodzie, a zwojów jest dużo.

Większe wartości przyjmuje ζ, czyli lepsze mamy wykorzystanie maszyny, gdy zbieramy napięcie nie z punktów przeciwległych, lecz np. z takich, które połączone promieniami ze środkiem koła dają kąty 120° między tymi promieniami; takich punktów dla jednego punktu przyjętego mamy trzy /bo 360 :120= = 3/, więc koniecznym jest użycie trzech pierścieni. To uzwojenie z trzema pierścieniami jest uzwojeniem trójfazowym w połączeniu w trójkąt /Δ/, gdyż możemy przyjąć, że mamy tu trzy odrębne uzwojenia /U - X, V - Y, W - Z/, przesunięte względem siebie o 120° i że koniec uzwojenia pierwszego jest połączony z początkiem trzeciego i t.d. /rys. 3a/, jak to właśnie ma miejsce przy

łączeniu w trójkąt. Cechą bowiem uzwojenia trójfazowego jest to, że mamy trzy uzwojenia, w których powstają SEM-e równe co do amplitudy i ilości okresów, więc i co do wartości skutecznych, ale różne co do wartości w danym momencie, bo uzwojenia te przesunięte są względem siebie o 120° /gdy mamy więcej par biegunów, to bierzemy stopnie elektryczne/.



Rys.4a



Rys.4b.

Połączenie tych uzwojeń może być albo takie, jak wyżej podane, t.j. łączy się koniec jednego uzwojenia z początkiem trzeciego i t.d. i te trzy punkty łączy się z wirującymi pierścieniami, albo łączy się razem wszystkie końce uzwojeń /lub wszystkie początki/, otrzymując w ten sposób t.zw. punkt zerowy, a wolne początki /wzgl. końce/ doprowadza się do pierścieni /rys.4a/.

Pierwsze połączenie nazywa się, jak już wspomniano, łączeniem w trójkąt i cechuje się tym, że napięcie między pierścieniami t. zw. napięcie międzyprzewodowe, jest równe napięciu fazowemu, natomiast prąd przewodowy, t.j. pobrany z pierścienia, równa się różnicy /geometrycznej, bo prąd zmienny/ prądów tych dwu faz, z punktu połączenia których ten przewód wychodzi /rys.3b/.

czyli:

$$\overline{I}_I - \overline{I}_{II} = \sqrt{3}\,.\overline{I}_I = \sqrt{3}\,.\overline{I}_{II}$$
$$\overline{I}_{II} - \overline{I}_{III} = \sqrt{3}\,.\overline{I}_{II} = \sqrt{3}\,.\overline{I}_{III}$$
$$\overline{I}_{III} - \overline{I}_I = \sqrt{3}.\,\overline{I}_{II} = \sqrt{3}\,.\overline{I}_I \quad /\text{przyjęto } I_I = I_{II} = I_{III}/$$

Przeciwnie mamy w drugim połączeniu, w t. zw. łączeniu w gwiazdę /Y/. Tu napięcie międzyprzewodowe /między pierścieniami/ jest równe różnicy napięć fazowych, a prąd przewodowy równy jest fazowemu /rys. 4b/. Jak z rysunku czytamy, to:

$$\overline{E}_I - \overline{E}_{II} = \sqrt{3}.\overline{E}_I = \sqrt{3}.\overline{E}_{II}$$

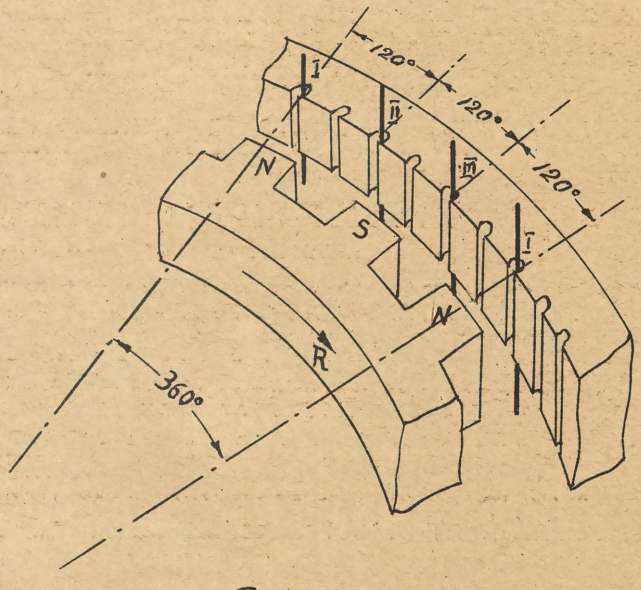
/przyjęte $E_I = E_{II} = E_{III}$, bo to nam pokaże woltomierz, który mierzy wartości skuteczne/; tak samo:

$$\overline{E}_{II} - \overline{E}_{III} = \sqrt{3}.\overline{E}_{II} \;;\quad \overline{E}_{III} - \overline{E}_I = \sqrt{3}.\overline{E}_{III}.$$

Chcąc otrzymać i przy połączeniu w gwiazdę napięcie fazowe, należy użyć jeszcze jednego pierścienia, czyli razem czterech pierścieni i połączyć go z punktem zerowym. Potrzebne to jest czasem z tego powodu, że oświetlenie chcemy

mieć pod napięciem fazowym, a motory pod napięciem międzyprzewodowym /np. 220/380 V/. Gdy życzymy sobie daną maszynę łączyć raz w trójkąt, innym razem w gwiazdę, to musimy mieć sześć pierścieni, bo wszystkie końce i początki musimy mieć wyprowadzone nazewnątrz /jak to jest na stacji trzeciej/.

Opisane wyżej uzwojenie odnosi się do twornika, który jest rotorem, a magneśnica statorem. Przy prądzie zmiennym takie wypadki należą do wyjątków, regułą natomiast jest, że magneśnica jest rotorem, a twornik jest nieruchomy i stanowi wydrążony walec, wewnątrz którego wirują magnesy; zwoje umieszczone są w żłobkach na wewnętrznej pobocznicy walca w ten sposób, że tworzą trzy oddzielne uzwojenia, przesunięte względem siebie przestrzennie o 120° elektr. Powyżej podane wywody, dotyczące współczynnika uzwojenia ζ mają i tu pełne zastosowanie, chociaż tu jest inne uzwojenie /rys. 5/, bo i tu dla pewnego momentu jeden zwój obejmuje Φ_{max}, inne zaś inne wartości strumienia magnetycznego. Obliczanie tych linij musi być bowiem wykonywane algebraicznie, t. zn., gdy tyle samo linij pochodzi z bieguna północnego, co z południowego w danym zwoju, to mówimy, że zwój obejmuje zero linij magnetycznych, gdyż skutek jest ten sam, jakby tam w ogóle żadnych linij nie było. Ponieważ uzwojenia są nieruchome, więc bardzo wygodnie /bez użycia pierścieni/ można wyprowadzić końce: X, Y, Z i początki U, V, W i przez odpowiednie ich połączenie uzyskać gwiazdę, czy trójkąt. Natomiast musimy mieć dwa pierścienie, aby doprowadzić prąd do uzwojenia magnesów /jak to jest na stacji czwartej/.



Rys.5.

Ponieważ na uzwojenia trójfazowe składają się trzy odrębne uzwojenia, więc moc, jakiej nam dostarcza taki generator trójfazowy, musi się równać sumie mocy poszczególnych uzwojeń. Gdy przyjmiemy jednakowe obciążenie we wszystkich fazach, to mamy:

$U_I = U_{II} = U_{III}$, $I_I = I_{II} = I_{III}$, $\cos\varphi_I = \cos\varphi_{II} = \cos\varphi_{III}$,

czyli suma tych mocy będzie:

$U_I \cdot I_I \cdot \cos\varphi_I + U_{II} \cdot I_{II} \cdot \cos\varphi_{II} + U_{III} \cdot I_{III} \cdot \cos\varphi_{III} = 3 \cdot U_I \cdot I_I \cdot \cos\varphi_I$.

Zwykle mierzymy prąd przewodowy i napięcie międzyprzewodowe, czyli mierzymy za duże albo napięcie /U/, albo prąd /I/ i to $\sqrt{3}$ razy /p. wzory powyżej/, wówczas musimy to napięcie, czy prąd przez ten $\sqrt{3}$ podzielić i mamy:

$$\text{moc prądu trójfaz.} = \frac{3.U.I.\cos}{\sqrt{3}} = \sqrt{3}.U.I.\cos$$

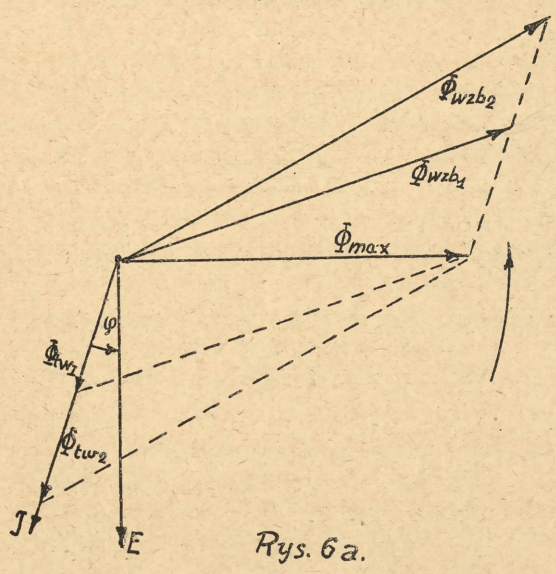
gdzie U - wartość międzyprzewodowa, a I - przewodowa, zaś $\cos\varphi$ = przesunięcie fazowe.

Jak to wynika ze wzoru:

$$E = 4{,}44.\zeta.z.\nu.\Phi_{max}.10^{-8}\ V,$$

dla gotowej maszyny SEM zależy tylko od Φ_{max} i obrotów /bo $\nu = \frac{p.n}{60}$/, gdyż

reszta to wartości stałe. Gdy chcemy mieć także stałą SEM-ą, to przy n = const. musi być także Φ_{max} = const. Strumień ten jest wypadkową z dwóch strumieni: jeden strumień wytworzony prądem wzbudzenia /Φ_{wzb}/, drugi prądem wyindukowanym w tworniku /Φ_{tw}/ i zależy od wielkości tego prądu, czyli od obciążenia.

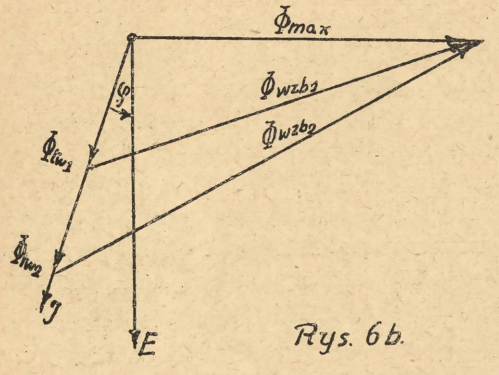


Rys. 6a.

Jak wiemy, to SEM jest prostopadła do strumienia magnetycznego, który ją wywołuje /ćwicz. 31/ i spóźnia się o $\frac{1}{2}\pi$. Na rysunkach 6a i 6b widzimy, że:

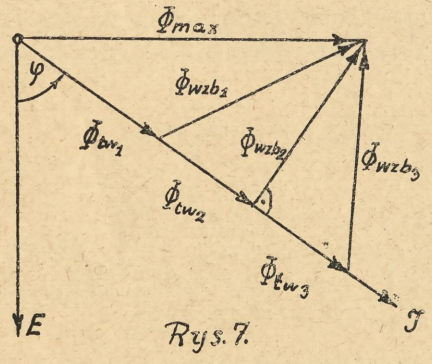
$$\overline{\Phi}_{max} = \overline{\Phi}_{wzb} + \overline{\Phi}_{tw}$$

zaś E jest prostopadłe do Φ_{max}. Rysunki 6a i 6b różnią się między sobą tylko sposobem /konstrukcją/ wyznaczenia strumienia wypadkowego Φ_{max}; strumień ten otrzymaliśmy na rys. 6a jako przekątnię równoległoboku, na rys. 6b zaś jako zamykającą trójkąta o bokach Φ_{tw} i Φ_{wzb}. Widzimy tu, że, aby Φ_{max} było const, to gdy zwiększamy obciążenie /czyli prąd twornika/ musi wzrastać prąd wzbudzenia i naodwrót. Tak jest wówczas, gdy mamy obciążenie omowe, a tym bardziej, gdy jest indukcyjne.



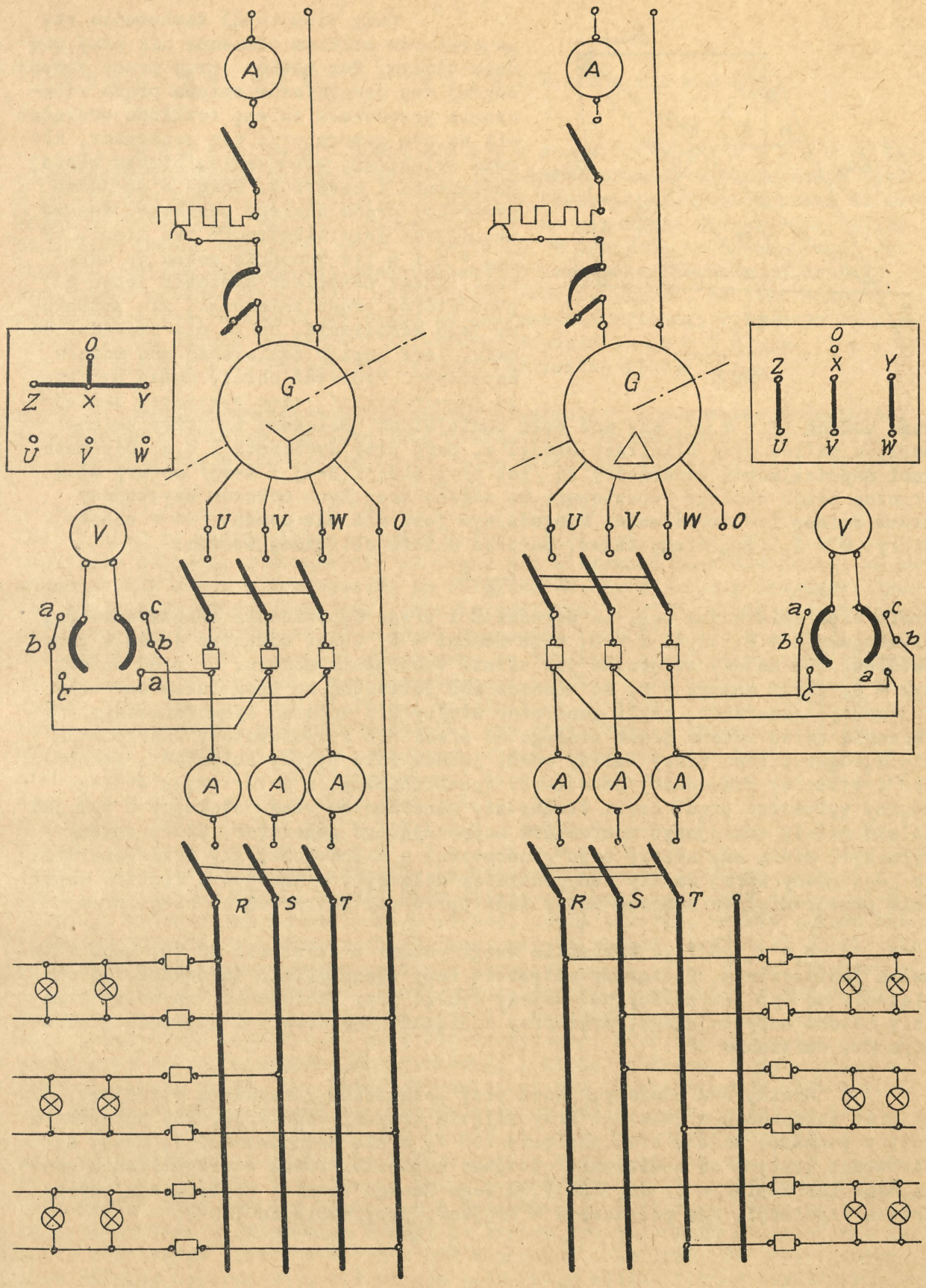
Rys. 6b.

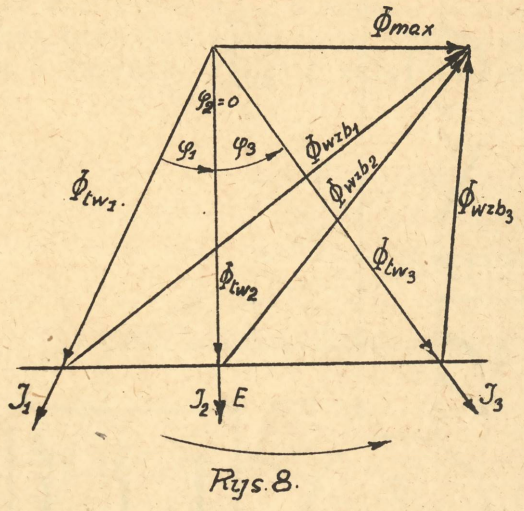
Nieco inaczej jest przy obciążeniu pojemnościowym /rys. 7/, bo tu początkowo ze wzrostem obciążenia należy zmniejszać prąd wzbudzenia, aż uzyska on pewne minimum; dalszy wzrost prądu i tu powoduje konieczność zwiększania prądu wzbudzenia. Możemy jednak przeprowadzić rozumowanie odwrotne, a mianowicie zastanawiamy się, jaki wpływ wywiera zmiana wzbudzenia, gdy żądamy, aby E = const, czyli Φ_{max} = const; ma to ważne praktyczne zastosowanie przy pracy równoległej generatorów prądu zmiennego, gdyż generatory te muszą pracować w synchroniźmie, czyli przy stałej ilości obrotów, więc moc oddawana przez taki generator jest stała /regulator motoru napędnego nie zmienia napełnienia/, t.j. U.I.cosφ = const., a ponieważ założono U = const, więc musi być I.cosφ = const. Jednak Φ_{tw} jest proporcjonalne do do I, więc musi być także Φ_{tw}.cosφ = const.



Rys. 7.

Skoro o tym wiemy, to zrozumiałym jest rysunek 8, z którego czytamy, że wzrost prądu wzbudzenia powoduje tu zwiększenie przesunięcia fazowego i wzrost prądu twornika i naodwrót. Minimum zachodzi przy φ = 0. Przy dalszym zmniejszaniu wzbudzenia prąd zaczyna wzrastać, ale już wyprzedza napięcie.


A
O
Z
X
Y
U
V
W
G
U
V
W
O
V
a
b
c
A
A
A
R
S
T



Rys. 8.

Mamy więc tutaj zachowanie się generatorów całkiem odmienne niż przy prądzie stałym. Tam bowiem przy pracy równoległej dwu generatorów zmiana prądu wzbudzenia powodowała zmianę rozkładu obciążenia na oba generatory; ten generator, któremu zwiększamy wzbudzenie, bierze więcej obciążenia i naodwrót. Chcąc więc jeden generator prądu stałego odstawić, należy zmniejszać jego wzbudzenie tak długo, aż $I_{tw} = 0$ i w tym momencie można go odłączyć. Chcąc natomiast odstawić jeden z generatorów prądu zmiennego, nie zmieniamy jego wzbudzenia, bo to nie prowadzi do celu, lecz musimy zmniejszać moc motoru napędnego. Ponieważ obroty muszą być stałe /synchronizm/, więc wystarczy zmniejszać moment /$P = M.\omega$/, aby moc była zmniejszona. Osiągamy to przez zmianę dopływu paliwa przy silnikach Diesel'a, pary przy turbinach i t.d. Gdy motorami napędzającymi generatory są /jak przy stacji 3-ej i 4-ej/ motory elektryczne prądu stałego /upustowe/, to zmianę mocy tych motorów uzyskujemy przez zmianę ich wzbudzenia. Miarodajnym jest dla nas moment /ω = const/, który: $M = C.I.\Phi_{tw}$. Wiemy także, że prąd motoru obliczamy wzorem:

$$I = \frac{U - E}{R}$$

Skoro więc zwiększamy Φ_{tw}, to wzrasta E i przez odpowiednie zwiększenie Φ_{tw} uzyskujemy E = U, czyli I = 0, więc moment = 0. Chcąc odłączyć jeden z generatorów, nie należy zwiększać tak silnie wzbudzenia motoru, by prąd motoru był = 0, czyli moment = 0, bo wówczas moc potrzebną na bieg luzem musiałby dostarczyć generator, czyli generator stałby się motorem synchronicznym. Odłączanie teraz motoru prądu stałego od sieci nie spowodowałoby zatrzymania się agregatu, lecz byłby dalszy ruch, jednak role byłyby zmienione: generator trójfazowy pracowałby jako motor synchroniczny, a motor prądu stałego mógłby wytwarzać prąd, czyli stałby się generatorem prądu stałego. O tym, jak daleko należy zmniejszyć moc motoru napędzającego generator, który chcemy wyłączyć, mówią nam ampery tego generatora, a mianowicie, gdy prąd generatora jest równy zeru, należy ten generator odłączyć, a następnie dopiero motor /nie przeciwnie!/bo wówczas motor daje tylko moc potrzebną na bieg luzem.

P o m i a r y. Wszystkie uwagi podane w ćwiczeniu 30-ym, mają i tu pełne zastosowanie. Obciążamy wszystkie fazy równomiernie żarówkami, bo obciążenie ma być bezindukcyjne. Należy uważać przy obciążaniu na wolty i ampery motoru napędzającego, oraz przy odciążaniu na obroty i napięcie generatora /v. ćwiczenie 30/.

Robimy dwa pomiary, jeden przy połączeniu generatora w trójkąt, drugi przy połączeniu w gwiazdę. Przy zdjęciu krzywej regulacji, gdy połączenie jest w gwiazdę, należy brać napięcie 210 V, a nie normalne 220 V, ażeby na żarówkach użytych do obciążenia otrzymać napięcie, równe w przybliżeniu nominalnemu ich napięciu t. zn. 120 V. Z tego samego również względu zdejmujemy krzywą regulacji, dla połączenia w trójkąt, przy napięciu 120 V.

Ćwiczenie 95.

Badanie motoru asynchronicznego.

Motor asynchroniczny trójfazowy. Maszynę asynchroniczną możemy traktować jako transformator ogólniejszego typu. W zwyczajnym bowiem transformatorze energia elektryczna, doprowadzana do uzwojenia pierwotnego, zostaje zamieniona na energię także elektryczną, tylko następuje zmiana natężenia prądu i napięcia. W maszynie asynchronicznej natomiast energia elektryczna doprowadzana do uzwojenia pierwotnego, zostaje zamieniona głównie na energię mechaniczną /obrót rotoru/, co jest właśnie celem w motorze, a częściowo także na energię elektryczną, przy czym mamy także zwykle zmianę napięcia i natężenia, a ponad to zmianę ilości okresów, możemy zaś uzyskać też zmianę ilości faz.

Maszyna asynchroniczna ma dwa uzwojenia: 1/ pierwotne w statorze, i 2/ wtórne w rotorze. Do uzwojenia pierwotnego doprowadzamy prąd trójfazowy i otrzymujemy w ten sposób t. zw. pole wirujące, które wiruje z ilością:

$$n_d = \frac{60.\nu}{p} \text{ obr/min.}$$

Jak widzimy ze wzoru, ilość obrotów zależną jest /gdy ν = const/ tylko od uzwojenia statora, a mianowicie od tego, ilu biegunowe jest uzwojenie, bo nawinąć stator można w ten sposób, że otrzymamy 2, 4, 6,....2.p biegunów. Skutek owego pola będzie taki sam, jaki uzyskalibyśmy, gdyby w miejsce statora umieszczony był pierścień ze stałymi magnesami i obracał się n razy na minutę. Jak długo rotor będzie w spoczynku, to uzyskamy przecinanie uzwojeń rotora liniami magnetycznymi, a w konsekwencji i SEM-ą i to o tylu okresach ile ma ich prąd statora, a o wielkości zależnej od stosunku ilości zwojów pierwotnych i wtórnych, zupełnie podobnie, jak przy zwykłym transformatorze. Jeżeli teraz z uzwojeń wtórnych utworzymy obwód zamknięty, ale taki, aby mógł w nich płynąć prąd, to otrzymamy moment obrotowy, starający się uruchomić rotor. Obrót rotoru nastąpi w tym samym kierunku w jakim wiruje pole, czyli pole wirujące zabiera ze sobą rotor. Jasnym to jest, jeżeli uwzględnimy tę okoliczność, że kierunek chwilowej SEM-ej, a więc i prądu, znajdujemy regułą prawej ręki /linie sił wchodzą w dłoń, duży palec wskazuje kierunek ruchu względnego prętów, czyli uzwojeń, reszta palców zaś kierunek SEM-ej/, a kierunek działającej siły - regułą lewej ręki /linie sił wchodzą w dłoń, cztery palce wskazują kierunek prądu, duży palec kierunek siły, czyli kierunek obrotów/. Skoro rotor zacznie obracać się w tym samym kierunku, w jakim wiruje pole, to prędkość względna przecinania uzwojeń wtórnych przez linie magnetyczne musi się zmniejszyć, a co za tym idzie, musi się zmniejszyć także wielkość SEM-ej wtórnej i ilość okresów. Czym większe obroty przybiera rotor, tym bardziej zmniejsza się liczba okresów, SEM i prąd uzwojenia wtórnego. Wzrost tej liczby obrotów rotoru jest jednak ograniczony, a mianowicie nie może uzyskać liczby obrotów pola wirującego n_d, bo wówczas pole wirujące i uzwojenie rotora byłyby w stosunku do siebie w spoczynku, czyli nie byłoby przecinania linij magnetycznych przez uzwojenie rotoru, więc nie mogłoby tam być SEM-ej, a w konsekwencji i prądu, a więc moment równałby się zeru. Widzimy więc tutaj, że koniecznym warunkiem do uzyskania momentu obrotowego jest asynchronizm, to jest, że rotor motoru musi wolniej obracać się, niż wiruje pole /stąd nazwa: "motor asynchroniczny"/.

Gdy motor biegnie nieobciążony, to wystarcza mały moment obrotowy, gdyż potrzebny on jest tylko na pokonanie strat biegu luzem. Dla uzyskania takiego momentu potrzebny jest stosunkowo mały prąd, a więc i mała SEM, gdyż oporność uzwojeń wtórnych jest zwykle bardzo mała. Dla uzyskania tak małej SEM-ej musi być właśnie uzyskana stosunkowo duża ilość obrotów, a mianowicie nie wiele mniejsza od ilości obrotów pola wirującego. Gdy motor obciążymy, to moment potrzebny jest większy, gdyż musi prócz zwiększonych strat pokonać głównie moment obciążenia M_d. Ponieważ:

$$M_d = C.I_2.\Phi.\cos\psi_{2\sigma}$$

/wyprowadzenie niżej/, więc zwiększamy moment obciążenia przez zwiększenie jednego lub więcej z podanych czynników. Wzrost I_2 nastąpi, gdy zwiększy się SEM-ą, a to uzyskuje się przez zmniejszenie ilości obrotów rotoru. Zmniejszenie tych obrotów powoduje równocześnie wzrost $\cos\psi_{2\sigma}$ /p.niżej/. Obie te wielkości /I_2 oraz $\cos\psi_{2\sigma}$ / występują jako czynniki iloczynu we wzorze na M_d, więc ponieważ obie rosną przy zmniejszaniu obrotów rotoru, to już ich małe zmniejszenie powoduje stosunkowo silny przyrost momentu, dlatego też różnica ilości obrotów motoru asynchronicznego przy biegu luzem, a pełnym obciążeniem jest stosunkowa mała, czyli pod względem tym motor asynchroniczny zachowuje się podobnie jak motor upustowy prądu stałego.

Gdy przez n_d oznaczymy ilość obrotów pola wirującego, a przez n ilość obrotów rotoru, to stosunek:

$$\frac{n_d - n}{n_d} = \sigma$$

nazywamy p o ś l i z g i e m. Gdy rotor stoi to n = 0, czyli $\sigma = 1$, gdy rotor biegnie synchronicznie z polem wirującym /rzecz jasna, napędzany z zewnątrz/, to $\sigma = 0$. Skoro E_2 przedstawia nam SEM-ą, wyindukowaną w uzwojeniach wtórnych przy zahamowanym rotorze, to wielkość SEM-ej wtórnej $E_{2\sigma}$ przy dowolnym poślizgu σ znajdziemy wzorem:

$$E_{2\sigma} = \sigma.E_2$$

bo

$$E_{2\sigma} : E_2 = /n_d - n/ : n_d,$$

skąd:

$$E_{2\sigma} = \frac{n_d - n}{n_d}.E_2 = \sigma.E_2 .$$

Widzimy więc z tych wzorów jasno, że im większe obroty rotora, tym mniejsze jest σ, im mniejsze σ, tym mniejsza SEM indukowana oraz ilość okresów w rotorze ν_2. Tę ilość okresów ν_2 dostajemy na podstawie następującego rozumowania: ilość obrotów pola wirującego w stosunku do rotoru jest $n_d - n$, więc musi być:

$$\nu_2 = \frac{p./n_d - n/}{60} = \frac{n_d - n}{n_d} \cdot \frac{p.n_d}{60} = \sigma.\nu_1$$

U w a g a. Wielkość poślizgu jest stosunkowo mała, bo wynosi od 0,01 do 0,06, czyli 1 do 6 %, gdy wyrażamy poślizg w procentach, co często ma zastosowanie. Wartości większe, t. j. 5 - 6 % odnoszą się do motorów mniejszych, natomiast mniejsze 1 - 2 % odnoszą się do dużych jednostek.

M o m e n t o b r o t o w y. Charakterystyczną cechą dla momentu obrotowego maszyn wielofazowych /w przeciwieństwie do jednofazowej/ jest to, że jest on wielkością stałą. Przy maszynie jednofazowej zmienia on swą wartość od maksymalnej do zera /a nie przyjmuje wartości ujemnej/.

Według pierwszego prawa Newtona, moment wywierany na rotor jest dokładnie tej samej wielkości, tylko przeciwnie skierowany, jak moment wywie-

rany na stator. Ponieważ moc we watach obliczamy wzorem: $P = M. .9,81$, więc moc, jaką pole wirujące przenosi na rotor, jest:

$$P_d = M.\omega_d.9,81 = M. \frac{.n_d}{30} .9,81 = M. \frac{n_d}{0,975} \text{ watów,}$$

bo ilość obrotów pola wirującego jest n_d. Natomiast moc mechaniczna, jaką uzyskujemy na wale:

$$P_m = M.\omega.9,81 \text{ watów} = M. \frac{\pi . n}{30} .9,81 = \frac{M.n}{0,975} \text{ watów}$$

bo rotor ma tylko n obrotów. Ta więc różnica $P_d - P_m$ przedstawia nam energię elektryczną P_e, którą tracimy w rotorze na ciepło.

$$P_e = P_d - P_m = \frac{M}{0,975} ./n_d - n/ = \frac{M.n_d}{0,975} ./\frac{n_d - n}{n_d}/ = \sigma.P_d, \quad \text{czyli:}$$

$$P_e = \sigma.P_d ..... \quad .....1/$$

oraz

$$P_m = P_d/1 - \sigma/ ..... \quad .....2/$$

Widzimy z tych wzorów, że tym mniej mamy energii mechanicznej im większą uzyskujemy energię elektryczną w uzwojeniu wtórnym, czyli im większy jest poślizg /z zastrzeżeniem, że moc P_d nie uległa zmianie/.

Z równania 1/ otrzymujemy:

$$P_d = \frac{1}{\sigma} .P_e$$

Wartość mocy elektrycznej /P_e/, straconej w rotorze na ciepło, można wyliczyć znając przy pewnym poślizgu σ, wartości: $E_{2\sigma}$, I_2 oraz $\psi_{2\sigma}$ /kąt pomiędzy $E_{2\sigma}$ i I_2/, a mianowicie:

$$P_e = m_2.E_{2\sigma}.I_2.\cos\psi_{2\sigma}$$

gdzie m_2 jest ilością faz rotoru.

Moc więc całkowita/P_d/ będzie:

$$P_d = m_2 \frac{E_{2\sigma}}{\sigma} .I_2.\cos\psi_{2\sigma};$$

uwzględniając, że:

$$\frac{E_{2\sigma}}{\sigma} = E_2$$

oraz:

$$E_2 = 4,44.\nu_1.z_2.\zeta_2.\Phi.10^{-8} \text{ V /p.ćwicz.82/,}$$

dostajemy w końcu:

$$P_d = m_2.4,44.\nu_1.z_2.\zeta_2.\Phi.10^{-8}.I_2.\cos\psi_{2\sigma}$$

Porównując prawe strony tego równania, oraz równania:

$$P_d = \frac{n_d.M}{0,975}$$

i uwzględniając, że:

$$n_d = \frac{60.\nu_1}{p}$$

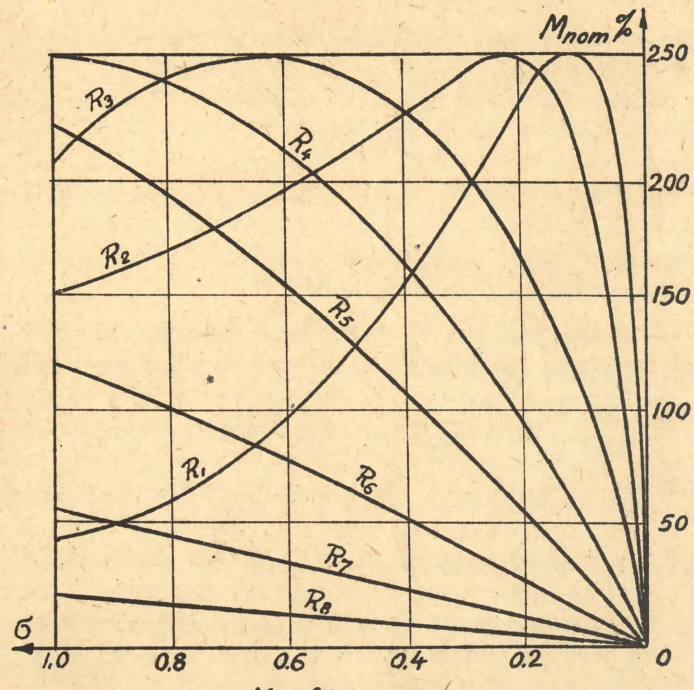
dostajemy:

$$M = 7,2.m_2.I_2.z_2.\zeta_2.p.\Phi.\cos\psi_{2\sigma}.10^{-6} \text{ kgm.}$$

względnie wzór uproszczony:

$$M = C.I_2.\Phi.\cos\psi_{2\sigma}.$$

W powyższych wzorach: m_2 - ilość faz rotoru, I_2 - prąd wtórny, z_2 - ilość uzwojeń w jednej fazie rotoru, ζ_2 - współczynnik uzwojenia rotoru, p - ilość par biegunów statora, Φ - wypadkowy strumień magnetyczny, $\psi_{2\sigma}$ - kąt przesunięcia między E_2 a I_2.



$M = f(\sigma)$
przy różnych opornościach obwodu rotoru
$R_1 < R_2 < \ldots\ldots < R_8$.
Rys. 1.

Moment w motorze asynchronicznym nie zależy tylko od prądu i strumienia magnetycznego i pewnej stałej, jak to było przy prądzie stałym, lecz wchodzi tu w grę jeszcze $\cos\psi_{2\sigma}$, t.j. cos kąta przesunięcia fazowego w uzwojeniu wtórnym. Zależność momentu od tego kąta uwydatnia się silnie już we wykresie, podającym nam zależność momentu od poślizgu: $M = f(\sigma)$ /rys. 1/. Czytamy bowiem z tego wykresu /krzywa R_1/, że moment nie przybiera bynajmniej wartości maksymalnej w chwili rozruchu, t.j. dla $\sigma=1$, mimo, iż w tej chwili mamy maksimum dla I_2. Przyczyna tego tkwi właśnie w tym, że także w tej chwili ma i kąt $\psi_{2\sigma}$ wartość maksymalną, czyli $\cos\psi_{2\sigma}$ ma wartość minimalną. Później, gdy rotor zaczyna nabierać coraz więcej obrotów, czyli zaczyna maleć $E_{2\sigma}$ /według wzoru: $E_{2\sigma} = \sigma . E_2$/, a tym samym

$$I_2 = \frac{E_{2\sigma}}{\sqrt{R_2^2 + (S_2 . \omega_{2\sigma})^2}}$$

gdzie S_2 - indukcyjność, wywołana strumieniem linij sił magnetycznych rozproszenia w uzwojeniu rotora, to równocześnie maleje $\psi_{2\sigma}$ i, jak czytamy z wykresu, szybciej musi rosnąć $\cos\psi_{2\sigma}$, niż maleje $I_2 . \Phi$, gdyż moment z początku - przy wzroście obrotów, czyli przy zmniejszeniu się σ - wzrasta. Że tak się zachowuje ten kąt $\psi_{2\sigma}$, mówi nam wzór:

$$\operatorname{tg}\psi_{2\sigma} = \frac{\sigma . S_2 . \omega_1}{R_2}$$

znany z trójkąta oporów.

Tutaj w liczniku mamy jeszcze σ, bo:

$$\omega_{2\sigma} = 2 . \pi . \nu_2$$

a uwzględniając wyżej podaną zależność:

$$\nu_2 = \nu_1 . \sigma,$$

otrzymujemy:

$$\omega_{2\sigma} = 2 . \pi . \nu_1 . \sigma,$$

czyli w końcu:

$$\omega_{2\sigma} = \omega_1 . \sigma.$$

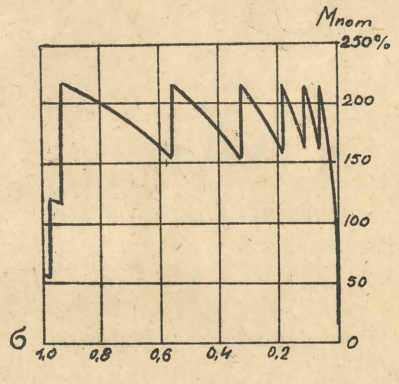
Widzimy jasno z powyższego wzoru, że im więcej mamy obrotów rotoru, czyli im mniejsze jest σ, to tym mniejszą wartość przyjmuje $\operatorname{tg}\psi_{2\sigma}$, czyli także kąt $\psi_{2\sigma}$, a rozpiętość tej zmiany dla $\operatorname{tg}\psi_{2\sigma}$ jest wcale znaczna, bo od pewnej wartości "c":

$$c = \frac{S_2 . \omega_1}{R_2}$$

przy $\sigma = 1$, do /0,06 ÷ 0,01/.c przy σ dla normalnego ruchu. Dla dalszego wzrostu obrotów rotoru mamy taki przyrost $\cos\psi_{2\sigma}$ jaki jest ubytek $I_2 . \Phi$, co się uwydatnia na wykresie, jako maksimum krzywej. Po osiągnięciu maksimum

krzywa gwałtownie spada, gdyż $\cos\psi_{2\delta}$ już bardzo wolno rośnie /p. kształt cosinusoidy/ w pobliżu $\psi_{2\delta} = 0$, a natomiast tak I_2 maleje tak, jak uprzednio i dla $\delta = 0$ jest, jak już powiedziano, $E_{2\delta} = \delta . E_2 = 0$, więc i dla $I_2 = 0$, czyli także i moment M = 0 kgm.

R o z r u c h m o t o r u a s y n c h r o n i c z n e g o. Jak widzimy z krzywej R_1 wykresu z rys. 1, w chwili rozruchu mamy mały stosunkowo moment i, jak to zostało wyjaśnione, przyczyną tego jest mała wartość $\cos\psi_{2\delta}$. Znamy jednak z ćwiczenia 59, w jaki bardzo prosty sposób można było zmieniać tam kąt φ, a mianowicie przez zmianę oporności rzeczywistej uważanego obwodu /p. wykres i wzory tam podane/. Mamy tam dokładnie wykazane, że jeżeli przy stałym "L.ω" zwiększymy R, to kąt φ maleje, czyli $\cos\varphi$ rośnie. Jak wiemy, to w rotorze motoru asynchronicznego jest R_2 małe, więc już przy stosunkowo niedużym $S_2.\omega_{2\delta}$ mamy kąt $\psi_{2\delta}$ duży, czyli $\cos\psi_{2\delta}$ małe. Aby więc zwiększyć to $\cos\psi_{2\delta}$, czyli zmniejszyć kąt $\psi_{2\delta}$, wystarczy wstawić w obwód rotoru opornicę, która tu nazywa się rozrusznikiem. Opornica ta nie może być jednak zbyt dużą, bo powoduje ona zmniejszenie się prądu I_2. Gdyby więc oporność była tak duża, że prąd zmalałby w wyższym stopniu, niż nastąpiłby wzrost $\cos\psi_{2\delta}$, to moment mógłby jeszcze zmaleć /p. rys. 1, krzywa R_8/, a nam właśnie przy rozruchu /dla pokonania bezwładności/potrzebny jest większy moment. Należy więc sobie dobrze zdawać sprawę z tego, że przy motorach prądu stałego koniecznym był rozrusznik tylko dla uniknięcia zbyt silnego prądu, natomiast przy motorach asynchronicznych ten wzgląd także wchodzi w grę /bo prąd zwarcia jest 6,5 do 3,5.I_{nom}/, ale zasadniczym motywem jest konieczność uzyskania odpowiedniego momentu rozruchowego. Krzywą momentu w zależności od poślizgu w czasie puszczania w ruch motoru asynchronicznego podaje nam rysunek 2. Jest on zupełnie zrozumiały, gdy się go porówna z rysunkiem 1. Podczas rozruchu mamy przechodzenie z jednej krzywej na drugą, trzecią, i t. d., gdyż zmniejszamy oporność włączoną w obwód rotoru.

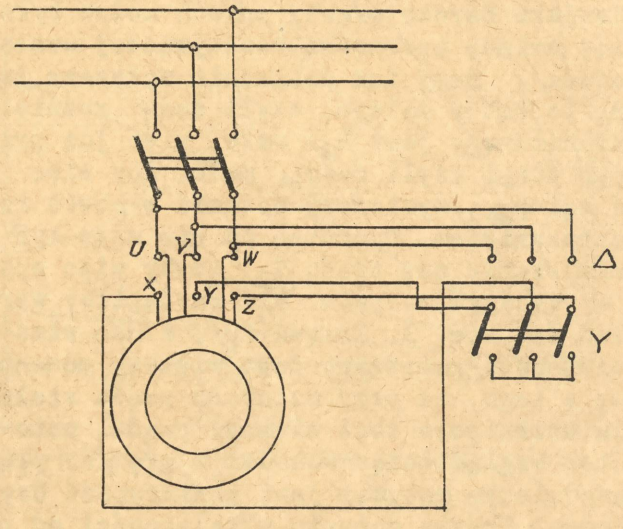


Rys. 2.

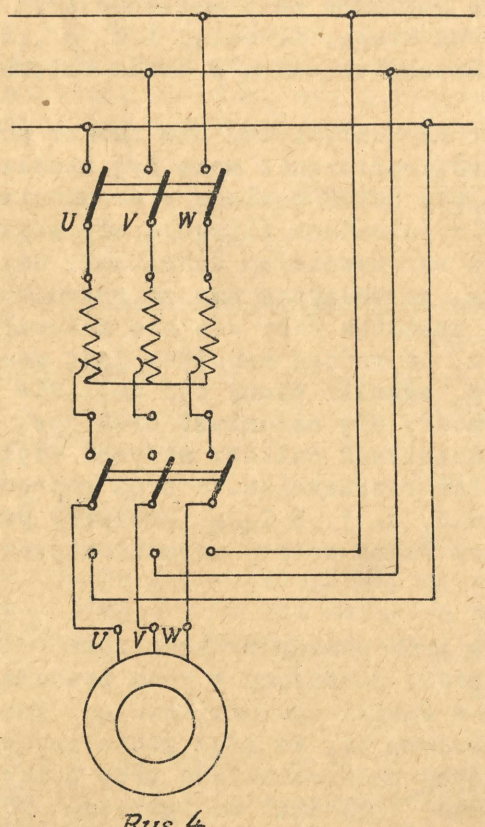
Motor asynchroniczny nie zawsze posiada rozrusznik; rozrusznik może być stosowany tylko wówczas, gdy rotor posiada pierścienie ślizgowe; na pierścieniach ślizgają się szczotki, połączone z rozrusznikiem kabelkami. Gdy jest urządzenie, pozwalające nam po rozruchu na podnoszenie szczotek /aby się nie zużywały/ i na zwieranie pierścieni, a tym samym rotoru, to rodzaj kabelków jest dość obojętny, tam zaś, gdzie brak tego urządzenia, kabelki winny być możliwie krótkie i grube, aby przedstawiały małą oporność. Gdy natomiast brak jest pierścieni ślizgowych, co ma miejsce przy jednostkach całkiem małych, czyli gdy mamy rotor zwarty, to nie stosujemy całkiem rozrusznika, a prąd rozruchu w pierwszym momencie jest równy prądowi zwarcia, t. j. 5.I_{nom}. Przepisy poszczególnych elektrowni orzekają, do jakich mocy wolno motory asynchroniczne załączać na sieć bezpośrednio.

Jednostki nieco większe załącza się przy pomocy przełącznika "gwiazda - trójkąt" /rys. 3/. Motor w ten sposób puszczony w ruch pracuje zasadniczo przy połączeniu w trójkąt; jednak w chwili uruchomienia go, łączy się go w gwiazdę. Przez takie połączenie zyskujemy to, że prąd pobierany ze sieci będzie $\sqrt{3} . \sqrt{3} = 3$ razy mniejszy, niż gdyby go uruchomiono przy połączeniu w trójkąt. Na skutek bowiem przełączenia "trójkata" na "gwiazdę" popłynie przez przewody prąd fazowy, a nie skojarzony, t. zn., że choćby nawet

wskutek przełączenia prąd fazowy nie uległ zmianie, zmalałby prąd przewodowy $\sqrt{3}$ razy; ale na skutek przełączenia maleje $\sqrt{3}$ razy napięcie przypadające na fazę, więc również i prąd fazowy musi jeszcze $\sqrt{3}$ razy zmaleć, czyli prąd przewodowy sumarycznie będzie $\sqrt{3} \cdot \sqrt{3} = 3$ razy mniejszy przy rozruchu przy połączeniu w gwiazdę niż w łączeniu w trójkąt. Nie należy zapominać tu o tym że równocześnie mamy także trzykrotne zmniejszenie momentu, bo m o m e n t z m i e n i a s i ę z k w a d r a t e m n a p i ę c i a p r z y ł o ż o n e g o d o p o s z c z e g ó l n e j f a z y.



Rys. 3.



Rys. 4.

Dle jednostek nieco większych od poprzednich używa się specjalnych transformatorków rozruchowych, które są zbudowane, jako autotransformatory /transformatory oszczędnościowe/,/rys. 4/. Dzięki takiemu uruchamianiu uzyskujemy zmniejszenie prądu proporcjonalnie do zmniejszenia napięcia, ale równocześnie moment maleje z kwadratem napięcia.

Z m i a n a i l o ś c i o b r o t ó w. Jednym z najprostszych sposobów regulacji obrotów, ale tylko w kierunku zmniejszenia ich ilości, jest wstawienie oporu w obwód rotoru. Rzecz jasna,że możliwym jest to tylko przy rotorach z pierścieniami ślizgowymi. Jak widzimy z rys. 1, to przez zwiększenie/do pewnej granicy/ oporu wstawionego nie powodujemy zmniejszenia momentu maksymalnego /t. zw. "Kippmoment"/, tylko przesuwanie się tego wierzchołka nalewo, t. zn., że poślizg, przy którym następuje owo maksimum staje się coraz większy, czyli obroty maleją. Praca motoru jest możliwa tylko na tej części krzywej, która jest na prawo od maksimum, gdyż w chwili gdy z powodu przeciążenia znajdziemy się po lewej stronie, motor staje i wówczas należy go natychmiast wyłączyć, by nie popalić bezpieczników /zwarcie/. O tym, że tak jest, powiada nam następujące rozumowanie: motor pracuje przy pewnym obciążeniu i ma pewien poślizg "ó". Gdy teraz obciążenie zwiększymy, to niejako hamujemy motor, czyli obroty jego maleją i to będzie tak długo trwało, aż moment wzrośnie o tyle, że zrównoważy moment obciążenia. Jak widzimy z wykresu, zmniejszanie obrotów

/wzrost poślizgu/ powoduje przyrost momentu tylko do chwili, gdy przybierze on wartość maksymalną; potym dalszy przyrost δ nie tylko nie daje nam większego momentu, ale nawet jego zmniejszanie, czyli moment hamujący będzie miał coraz to większą przewagę, aż nastąpi zatrzymanie motoru. Jak czytamy z krzywej R_1, to zakres zmniejszania ilości obrotów dla uzyskania większego momentu jest bardzo mały; większty jest dla krzywej R_2, jeszcze większy dla krzywej R_3 i t.d. Ujmując to innymi słowami, można powiedzieć, że dla tego samego momentu, czyli tego samego obciążenia w pierwszym wypadku mieliśmy największą ilość obrotów /δ jest najmniejszy/, w drugim, t.j. gdy jest wstawiony opór w obwód rotoru, mamy mniejszą ilość obrotów i t.d., czyli przez zwiększanie oporności obwodu rotoru uzyskujemy zmniejszenie ilości obrotów. O tym, że taki skutek musi wywierać włączenie oporu w obwód rotoru, wywnioskować można z następującego rozumowania: dla uzyskania jakiegoś określonego momentu konieczny jest określony prąd I_2, bo - jak wyżej podano - $M = C.\bar{\Phi}.I_2.\cos\psi_{26}$, a $\bar{\Phi}$ jest prawie że stałe /p. teoria transformatora: zależność I_1 od I_2 oraz $\bar{\Phi}$ wypadkowego od $\bar{\Phi}_1$ i $\bar{\Phi}_2$/, czyli chcąc uzyskać ten sam moment, musimy mieć ten sam prąd I_2, a raczej nawet nieco większy /p. uwaga niżej/. Wiemy jednak, że:

$$I_2 = \frac{\delta . E_2}{\sqrt{R_2^2 + /S_2 . 2/^2}}$$

Skoro więc R_2 zostało zwiększone, to musi także wzrosnąć δ , aby wartość I_2 nie zmniejszyła się, a właśnie wzrost δ uzyskuje się, gdy obroty rotoru zmniejszają się.

U w a g a. Nie możemy powiedzieć, że dla danego momentu mamy ściśle ten sam prąd mimo zmian oporności obwodu rotoru, gdyż musimy uwzględnić jeszcze $\cos\psi_{26}$; wiemy natomiast, że ze wzrostem δ rośnie także ψ_{26}, czyli że $\cos\psi_{26}$ maleje, więc dla uzyskania M = const. musi $\bar{\Phi}.I_2$ wzróść. Zmniejszenie się $\cos\psi_{26}$ będzie jednak bardzo małe /raz dlatego, że kąt wzrośnie stosunkowo mało, bo z powodów niżej podanych nie idziemy zbyt daleko ze zmniejszeniem obrotów, po drugie - ze względu na kształt cosinusoidy dla małych prądów/, dlatego praktycznie można przyjąć I_2 = const. Ścisłe przyjęcie, t.j., że I_2 nawet nieco wzrośnie - rzecz jasna - tym bardziej wykazuje konieczność zwiększenia .

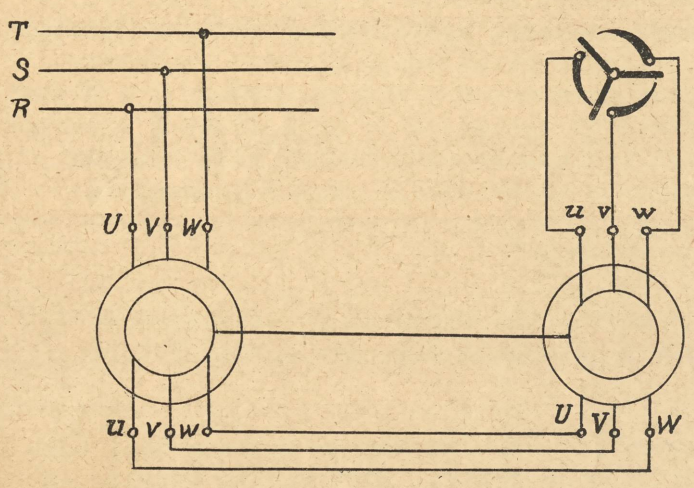
Wyżej opisana metoda regulacji obrotów ma podobne wady, jak przy prądzie stałym regulacja za pomocą dławienia napięcia w oporze, umieszczonym między motorem a szynami /p. ćwiczenie 71/. Wady te, to: 1/ zależność ilości obrotów nie tylko od oporu, ale także od wielkości prądu I_2, a więc od obciążenia, 2/ duże straty. Z wyprowadzonego bowiem wyżej wzoru na moc elektryczną straconą w rotorze: $P_e = \delta . P_d$ czytamy, że ile procent zmniejszymy obroty to prawie ten sam procent energii pola wirującego tracimy w oporze, czyli sprawność bardzo silnie maleje. Jeżeli np. zmniejszymy obroty o 30 %, to prawie o tyle samo spada "η" motoru.

Z m i a n a i l o ś c i o b r o t ó w p r z e z z m i a n ę i l o ś c i b i e g u n ó w Gdy uwzględnimy wyżej podany wzór na ilość obrotów pola wirującego:

$$n_d = \frac{60 . \nu_1}{p_1}$$

to widzimy, że możemy n_d, a tym samym i "n" zmieniać przez zmianę ν_1 i p_1. Zmiana ν_1, t.j. ilości okresów prądu dostarczonego do statora nie wchodzi praktycznie w rachubę, gdy pobieramy prąd wprost ze sieci. Natomiast zmiana ilości obrotów przez zmianę p_1 może się odbywać tylko grubymi skokami, bo

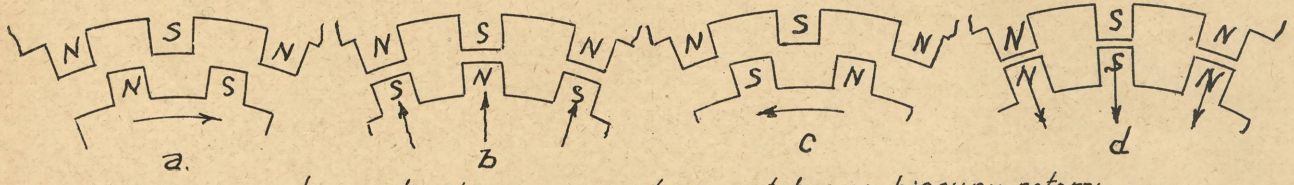
p_1 /ilość par biegunów statora/ może przybierać tylko wartości całkowite, t.j. 1, 2, 3 i t.d. Gdyby np. $\nu_1 = 50$ a $p_1 = 1$, a potym $p_1' = 2$, to mielibyśmy $n_d = 3000$, a następnie $n_d' = 1500$ obr./min. Przy większych "p" skoki nie są tak wałtowne. Tę zmianę p_1 uzyskujemy w małych motorach w ten sposób, że mamy w statorze dwa oddzielne uzwojenia, każde na inne p_1; we większych motorach stator ma tylko jedno uzwojenie, ale tego rodzaju, że łatwo daje się połączyć tak, żeby były różne p_1. Ponieważ jednak brak tu ciągłości w regulacji, dlatego często łączy się tę regulację z regulacją przy pomocy opornicy w obwodzie rotora.



Rys. 5.

Regulację ilości obrotów /także skokami/ uzyskujemy przez połączenie k a s k a d o w e dwóch motorów asynchronicznych /rys. 5/. Połączenie to polega na tym, że rotory są połączone ze sobą mechanicznie /na wspólnym wale lub za pomocą przekładni/. Prócz tego mamy także połączenie elektryczne, bo prąd ze sieci płynie tylko do statora jednego motoru; stator drugiego motoru jest zasilany prądem wytworzonym w rotorze pierwszej maszyny, czyli o stosunkowo małej ilości okresów, bo wywołanej tylko poślizgiem w pierwszej maszynie. Jednak ten poślizg będzie znacznie większy niż w tym wypadku, gdyby tylko sama pierwsza maszyna pracowała, t. zn. ilość obrotów rotoru przy połączeniu kaskadowym jest znacznie mniejsza, bo musi być mniejszą od t. zw. synchronicznej ilości obrotów kaskady "n_k" w ten sam sposób, jak musiała być przy zwykłym motorze asynchronicznym $n < n_d$.

Aby obliczyć synchroniczną ilość obrotów kaskady, musimy sobie zdać sprawę z kardynalnej zasady, obowiązującej wszystkie typy motorów tak prądu stałego, jak i zmiennego. Zasadą tą jest twierdzenie, że przy tej samej ilości biegunów w statorze i motorze fale sił magnetomotorycznych, wytworzone przez te bieguny, muszą być względem siebie w spoczynku, abyśmy mogli uzyskać stałe obroty. Zasada ta jest sama przez się zrozumiałą, gdy się uwzględni ogólnie znany fakt, że bieguny równoimienne w magnesach odpychają się, a różnoimienne przyciągają się. Dla uproszczenia więc przyjmijmy bieguny zamiast fal sił magnetomotorycznych. Jak z rysunku 6 widzimy, dla utrzymania stałego



Strzałki podają kierunki sił wywieranych przez stator na bieguny rotoru.

Rys6.

kierunku obrotów rotoru musi być stałe położenie biegunów rotoru względem biegunów statora. Z chwilą bowiem przesuwania się tychże względem siebie - siły działające na rotor, są zmienne i nie mogą wywołać jednostajnego ruchu. Typowy przykład tego mamy właśnie przy w y p a d a n i u ze synchronizmu przy motorach synchronicznych w chwili przeciążenia.

Również w motorze asynchronicznym bez względu na wielkość poślizgu stoją fale sił magnetomotorycznych w spoczynku, bo pole wirujące ma w stosunku do statora n_d obrotów; pole rotoru w odniesieniu do rotoru: $n_d - n$, rotor zaś ma n obrotów, więc pole rotoru w stosunku do statora ma:

$$n + /n_d - n/ = n_d$$

/dodajemy, gdyż kierunek ten sam/. Ponieważ oba pola w stosunku do statora wirują z jednakową ilością obrotów, zatym względem siebie muszą znajdować się w spoczynku.

Na podstawie wyżej przytoczonych wywodów zrozumiałym teraz jest. że aby mieć stały bieg motoru w połączeniu kaskadowym, tak w pierwszym, jak i w drugim motorze musi być spełniony warunek, że fale sił magnetomotorycznych mają być w stosunku do siebie w spoczynku. To pozwoli nam znaleźć n_k - synchroniczną ilość obrotów kaskady, t.j. tę ilość obrotów na minutę, jaką osiągnęłaby kaskada, gdyby w drugiej maszynie rotor biegł bez poślizgu w stosunku do statora.

Wiemy, że dla ilości obrotów pola wirującego pierwszej maszyny mamy wzór:

$$n'_d = \frac{60.\nu_1}{p_1}$$

a dla ilości okresów prądu w rotorze tej maszyny przy n_k obrotach wzór:

$$\nu_2 = \frac{n'_d - n_k}{60} \cdot p_1$$

Ponieważ prąd rotoru pierwszej maszyny płynie do statora drugiej, wytwarza tam pole wirujące o obrotach, obliczonych wzorem:

$$n''_d = \frac{60.\nu_2}{p_2}$$

Żądamy jednak, aby także w drugiej maszynie obie fale sił magnetomotorycznych były względem siebie w spoczynku, a to możliwe jest tylko wówczas /jak w ogóle przy każdym motorze asynchronicznym/, gdy synchroniczna ilość obrotów będzie równa ilości obrotów pola wirującego w statorze, czyli, gdy $n_k = n''_d$. Wstawiając wartość ν_2 we wzór na n''_d, otrzymujemy:

$$n_k = n''_d = \frac{/n'_d - n_k/.p_1}{p_2}, \qquad \text{skąd}$$

$$n_k.p_2 = n'_d.p_1 - n_k.p_1; \qquad n_k/p_2 + p_1/ = \frac{p_1.n'_d}{60} \quad .60 = 60.\nu_1$$

i ostatecznie:

$$n_k = \frac{60.\nu_1}{p_1 + p_2}$$

Widzimy więc z tego wzoru, że synchroniczna ilość obrotów kaskady jest równa synchronicznej ilości obrotów motoru asynchronicznego, ale posiadającego tyle par biegunów, ile ich posiadają oba motory kaskady.

Dzięki takiemu połączeniu kaskadowemu uzyskujemy trzy zasadnicze ilości obrotów pola wirującego, a mianowicie:

1/ $\frac{60.\nu_1}{p_1}$, gdy pracuje sam motor pierwszy,

2/ $\frac{60.\nu_1}{p_2}$, gdy na sieć załączony jest sam motor drugi oraz

3/ $\frac{60.\nu_1}{p_1 + p_2}$, gdy pracują oba motory w połączeniu kaskadowym.

Rzecz jasna, że obroty motoru będą nieco niższe ze względu na poślizg.

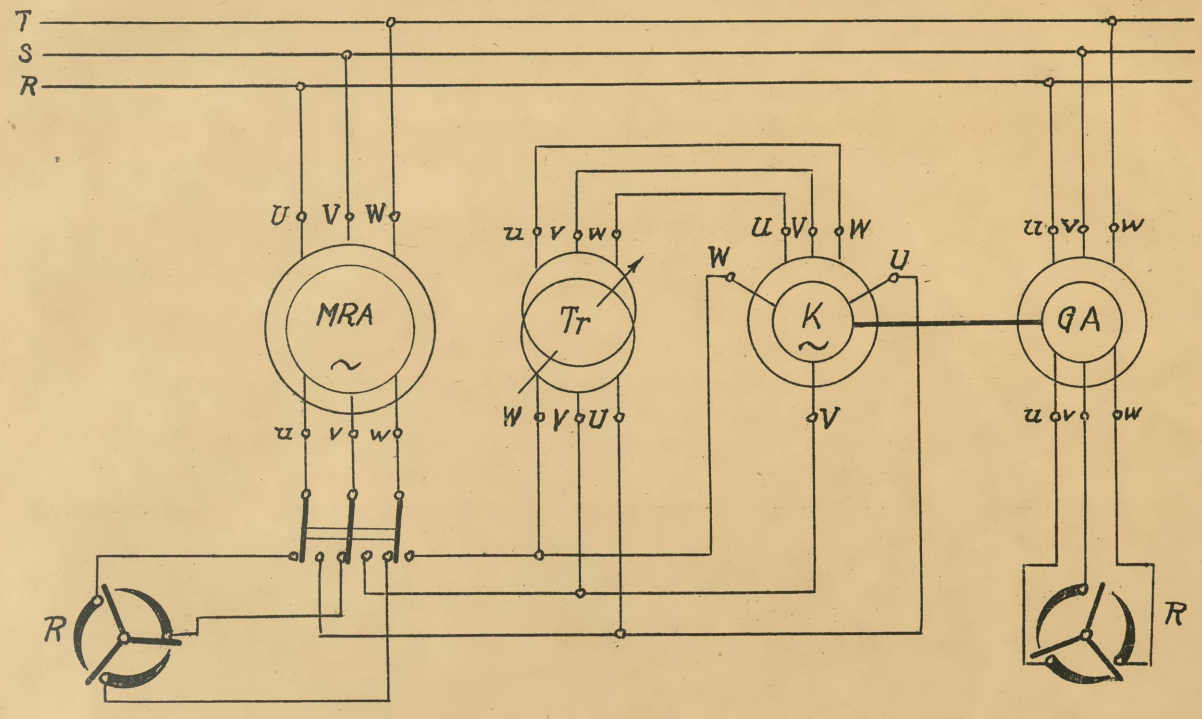
R e g u l a c j a o b r o t ó w z a p o m o c ą s p e c j a l n y c h u r z ą d z e ń. Już wyjaśnione zostało, że dla pewnego stałego momentu musimy mieć pewien stały prąd, czyli np. przy zwiększonej oporności obwodu rotoru musiała wzrosnąć $E_{2\delta}$, by ten warunek był zachowany. Możemy jednak jeszcze w inny sposób wpłynąć na zmianę $E_{2\delta}$ /a tym samym na ilość obrotów, co właśnie jest naszym celem/, a mianowicie możemy do pierścieni motoru przykładać pewne napięcie - rzecz jasna - o tej samej ilości okresów, jakie ma $E_{2\delta}$. Gdy to napięcie - oznaczmy je przez U - będzie przeciwnie skierowane jak $E_{2\delta}$, to otrzymamy teraz wzór na I_2:

$$I_2 = \frac{E_2 - U}{\sqrt{R_2^2 + /S_2 + \omega_{2\delta}/^2}}$$

czyli, aby I_2 miało nadal poprzednią wartość, musi $E_{2\delta}$ wzróść i to tym silniej, im większe będzie U, a to oznacza zmniejszenie ilości obrotów. Przeciwnie znowu, gdy U będzie zgodnie skierowane z $E_{2\delta}$, bo wówczas w liczniku mamy dodawanie, więc, by prąd się nie zmienił, musi $E_{2\delta}$ maleć, czyli obroty muszą rosnąć. W ten sposób możemy osiągnąć synchroniczną, a nawet ponadsynchroniczną ilość obrotów /$n = n_d$, lub $n > n_d$/. Widzimy więc, że przez zmianę U tak co do wielkości, jak i kierunku możemy uzyskać regulację w szerokich nawet granicach. Zalety tej regulacji są następujące: 1/ regulacja ciągła /nie skokami/, 2/ tak w górę jak i w dół ilości synchr., 3/ wykorzystanie energii elektrycznej rotoru. Wadę natomiast stanowi konieczność posiadania jeszcze specjalnej maszyny, a mianowicie: 1/ trójfazowej maszyny komutatorowej K /rys. 7 i 8/, lub 2/ przetwornicy jednotwornikowej PJT /rys. 9/, a nadto dla wypadku 1/ - generatora trójfazowego GA /rys. 7/, dla wypadku zaś 2/ - motoru prądu stałego MP /rys. 9/. Ta maszyna /komutatorowa, względnie przetwornica jednotwornikowa/ pobiera właśnie energię elektryczną rotoru /energię poślizgu/ i daje nam U o tylu okresach, ile ich ma $E_{2\delta}$, co właśnie stanowi conditio sine qua non. Maszyna komutatorowa połączona jest z rotorem motoru roboczego albo tylko elektrycznie /rys. 7/ albo i elektrycznie i mechanicznie /rys. 8/. Gdy regulujemy obroty poniżej synchronizmu, to maszyna komutatorowa zachowuje się jak motor /bo $E_{2\delta}$ jest większe od U/, czyli oddaje energię na wał /przy połączeniu mechanicznym, rys. 8/, lub obraca generator, który wówczas pracuje na sieć /przy połączeniu tylko elektrycznym, rys. 7/. Gdy regulujemy obroty ponad synchronizm, zachowuje się jak generator /bo $U > E_{2\delta}$/, to jest, dostarcza rotorowi motoru roboczego energii elektrycznej. Generator musi mieć dostarczoną moc elektryczną, więc tu przy połączeniu tylko elektrycznym z motorem głównym mocy tej musi dostarczyć maszyna sprzęgnięta /GA rys. 7/ z maszyną komutatorową; przy połączeniu mechanicznym i elektrycznym, mocy tej dostarcza motor główny /rys. 8/.

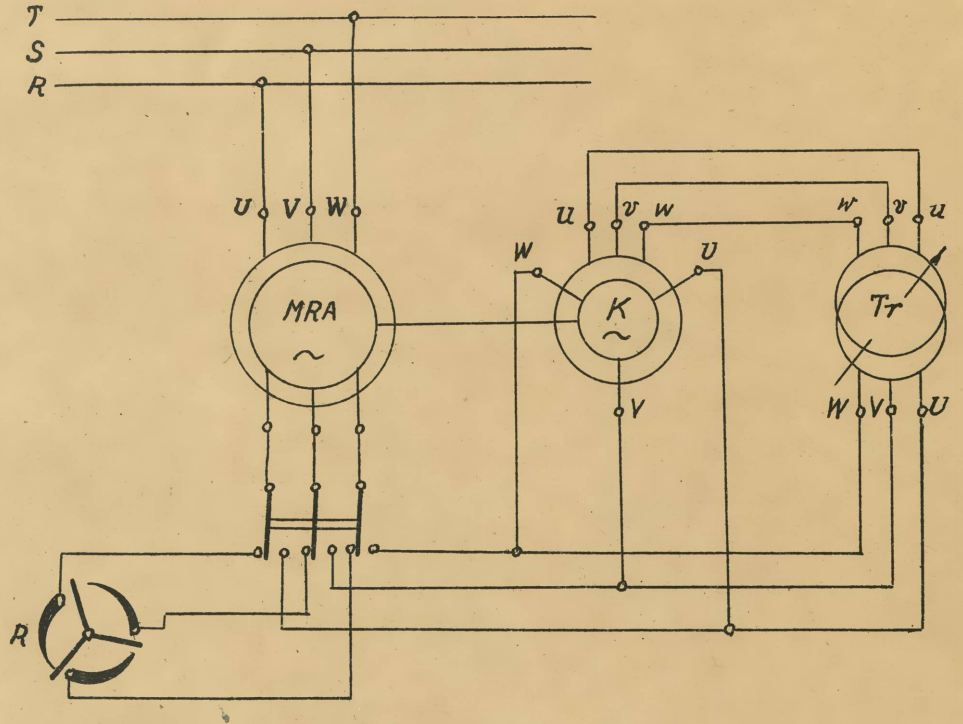
O b j a ś n i e n i a d o r y s. 7, 8 i 9. MRA - motor roboczy asynchroniczny, Tr - transformator regulujący, K - motor komutatorowy, GA - generator asynchroniczny, R - rozrusznik, PJT - przetwornica jednotwornikowa, MP - motor pomocniczy prądu stałego, OR - opornice regulujące.

Łączenia Scherbiusa

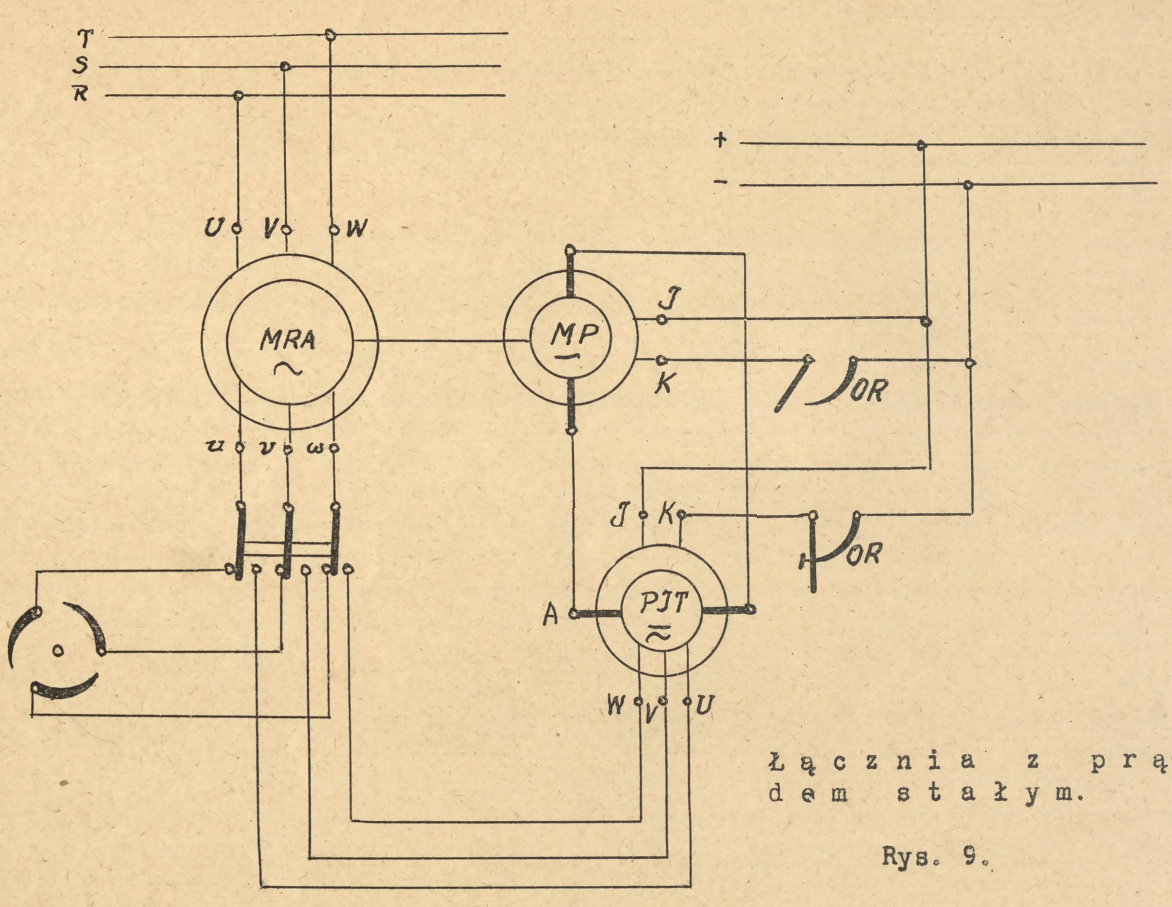


Rys. 7.

Łączenia Krämera



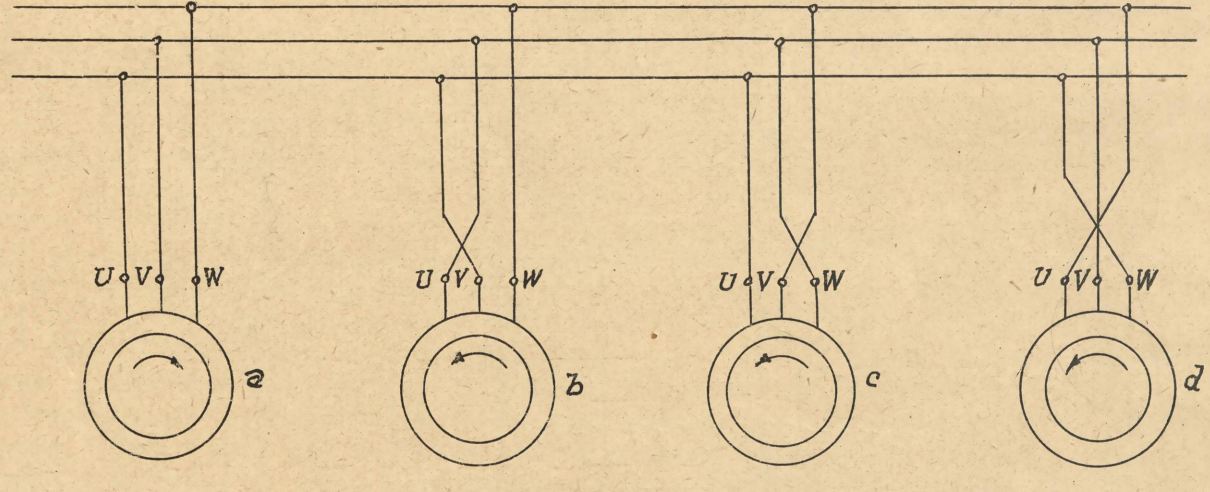
Rys. 8.



Łączenia z prądem stałym.

Rys. 9.

Zmianę kierunku obrotów motoru asynchronicznego uzyskujemy przez zmianę dowolnych dwu doprowadzeń /rys. 10/. Jest samo przez się zrozumiałe, że zamianę tę można uskutecznić tylko podczas postoju motoru.



Rys. 10.

Maszyna asynchroniczna jako generator. Gdy moc potrzebną na pokrycie strat biegu luzem dostarczymy maszynie asynchronicznej mechanicznie, to rotor może się obracać z tą samą prędkością,

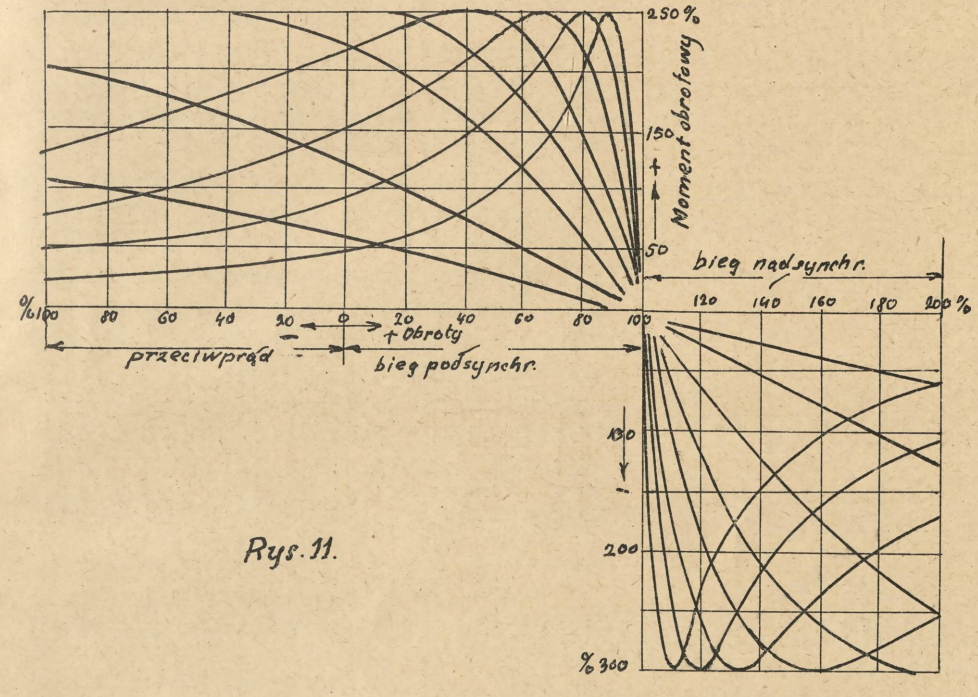
co pole wirujące, czyli wówczas $E_{2\delta} = 0$, więc także $I_2 = 0$. Gdy tę moc dostarczoną zwiększymy, to rotor zacznie się obracać jeszcze prędzej i teraz otrzymamy znowu E_2 , ale w kierunku przeciwnym do poprzedniego /ruch względny linij sił i zwojów jest teraz przeciwny, więc to samo jest także z prądem I_2. Jednak zmiana kierunku I_2 powoduje także zmianę kierunku I_1, czyli maszyna asynchroniczna, zamiast pobierać prąd, oddaje go do sieci, czyli staje się generatorem. Jasnym jest to na podstawie wykresu transformatora /ćwicz. 31/, gdy się uwzględni, że I_0 = const, oraz, że $I_0 = I_1 + I_2$ /wykres/. Widzimy więc, że maszyna asynchroniczna, obracająca się z prędkością ponadsynchroniczną staje się generatorem asynchronicznym.

U w a g a. Maszyna asynchroniczna pracuje, jako motor wówczas, gdy wektor SEM-ej, wyindukowanej polem głównym w uzwojeniu pierwotnym, i wektor prądu I_1 tworzą kąt większy od 90°; gdy ten kąt jest mniejszy niż 90° mamy do czynienia z generatorem. Przy prądzie stałym była nieco inna ocena, a mianowicie w generatorze prąd był zgodny z SEM-ą, przy motorze prąd i SEM miały kierunek wprost przeciwny.

Wykres momentu, potrzebnego do uruchomienia generatora asynchronicznego w zależności od poślizgu przy różnych opornościach, włączonych w obwód rotoru, podany jest na rysunku 11. /bieg nadsynchroniczny/. Poślizg jest tutaj ujemny, co wynika ze wzoru na poślizg:

$$\delta = \frac{n_d - n}{n_d},$$

bo $n > n_d$.

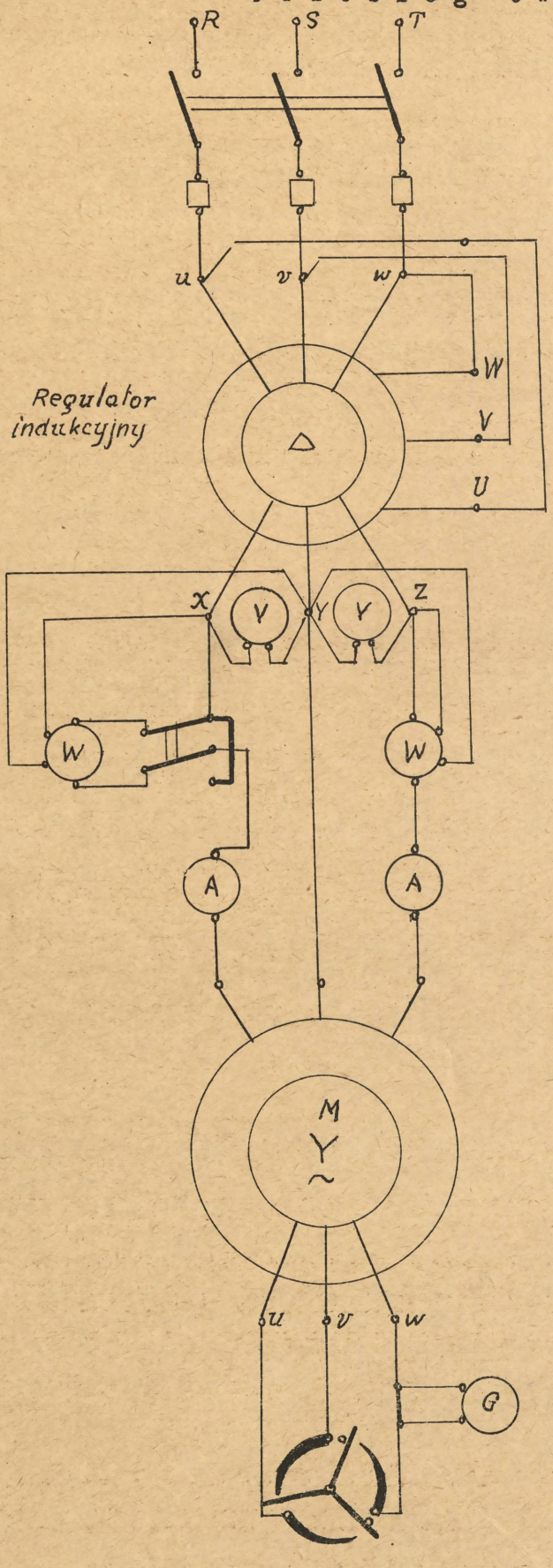


Rys. 11.

M a s z y n a a s y n c h r o n i c z n a j a k o h a m u l e c. Gdy zaczniemy obracać rotor maszyny w kierunku przeciwnym, jak wiruje pole, to otrzymamy działanie hamujące, bo wiemy, że pole wirujące chce porwać za sobą rotor. Działanie więc pola wirującego chce nie dopuścić do obrotów przeciwnych i stąd mamy hamulec. Wielkości momentu hamującego w zależności od poślizgu przy różnych opornościach włączonych w obwód rotoru daje nam również wykres z rysunku 11. /przeciwprąd/. Ponieważ mamy obroty w kierunku przeciwnym, to znak dla n będzie ujemny, więc $\delta > 1$, bo:

$$\delta = \frac{n_d - /-n/}{n_d} = \frac{n_d + n}{n_d} = 1 + \frac{n}{n_d} > 1 .$$

Przebieg ćwiczenia



Po zrobieniu układu połączeń według podanego obok schematu, załączamy motor na sieć /rozrusznik na maksimum, cewki prądowe obu watomierzy zwarte/. Ponieważ zaciski rozrusznika są otwarte, więc rotor nie rusza z miejsca, czyli motor asynchroniczny zachowuje się tak, jak zwykły transformator przy biegu luzem. Aby zbadać jego przekładnię, ustawiono przy pomocy regulatora indukcyjnego napięcie /U_s/ na zaciskach statora $U_s = U_{nom} = 220$ V, a następnie przyłożono pałeczki woltomierza do pierścieni 1 - 2, 1 - 3, 2 - 3 i odczytano napięcie U_r; przekładnia:

$$\vartheta = \frac{U_s}{U_r} = \frac{\text{napięcie statora}}{\text{napięcie rotoru}}$$

Wiadomym jest z wykresu transformatora, że przy biegu luzem φ jest duże /$\varphi > 80^0$/, więc spodziewać się należy, że watomierz wbudowany w fazę R będzie miał wychylenie ujemne. Po stwierdzeniu tego /wyłączając ostrożnie wtyczkę zwierającą cewkę prądową/ ustawiamy odpowiednio przełącznik i robimy równocześnie odczyty na obu watomierzach, amperomierzach i woltomierzach. Teraz puszczamy w ruch rotor, wyłączając stopniowo rozrusznik. Motor biegnie luzem /hamulec zdjęty/ celem ustalenia strat tarcia. Co pewien czas robimy odczyty wskazań watomierzy, aby się przekonać, czy już moc pobierana przestaje maleć, co byłoby dowodem ustalenia się strat mechanicznych. Gdy to nastąpi, zakłada się hamulec, otwiera się dopływ wody chłodzącej i postępuje dalej ściśle tak samo, jak w ćwiczeniu 26. Zaczynając od F = 1 kg, dochodzimy do F = ~ 5 kg, t.j. takiego, by uzyskać I = ~I_{nom}. Podczas całego ćwiczenia utrzymujemy napięcie równe 220 V, a odczytujemy dwa watomierze, dwa woltomierze, dwa amperomierze, obroty i kilogramy w momencie równowagi. Jak wiemy, to α_1 jest tu początkowo ujemne, czyli ze wzrostem obciążenia będzie się zmniejszać i gdy będzie $> 60^0$, to α_1 stanie się do-

datnie, więc przełącznik należy wówczas znowu odpowiednio ustawić, aby można było odczytywać wychylenie. Wyliczamy: 1/ moc pobraną: $P_{pobr} = c./\alpha_1 + \alpha_2/$ watów, gdzie α_1 musi być brane z odpowiednim znakiem, 2/ moc oddaną $P_{odd} = M.\omega.9{,}81$ watów, 3/ $\eta = /P_{odd} : P_{pobr}/.100$ %, 4/ $\cos\varphi$ ze wzoru:

$$\cos\varphi = \frac{P_{pobr}}{3 .U.I},$$

względnie z krzywej $\cos\varphi = f/\frac{\alpha_1}{\alpha_2}/$, 5/ poślizg w procentach:

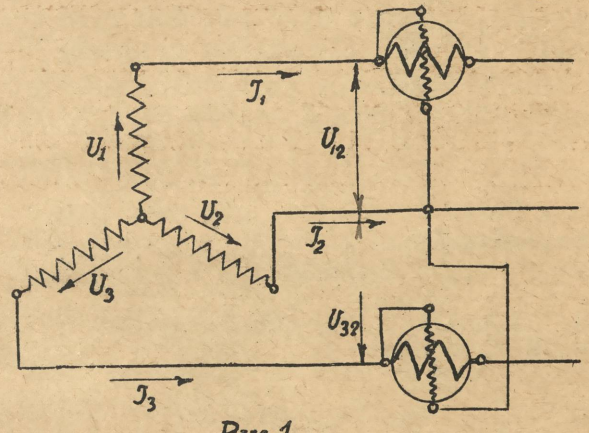
$$\delta = \frac{n_d - n}{n_d} .100 \%,$$

6/ M = F.l kgm /przy czym l = 0,785 m/. Wykreślamy krzywe, jako funkcje mocy oddanej 1/, 3/, 4/, 5/ 6/, nadto $n = f/P_{odd}/$, oraz I_1 w tej samej zależności.

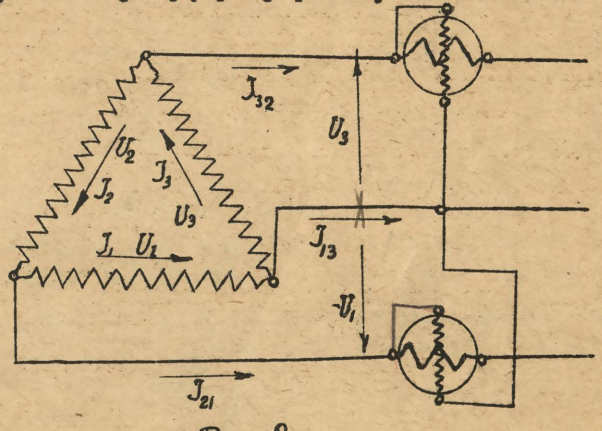
DODATEK Układ Arona

Pomiar mocy prądu trójfazowego metodą dwóch watomierzy

Moc prądu trójfazowego równa się sumie mocy poszczególnych faz, czyli $P = P_1 + P_2 + P_3 = U_1.I_1.\cos\varphi_1 + U_2.I_2.\cos\varphi_2 + U_3.I_3.\cos\varphi_3$, gdzie U i I są wartościami skutecznymi. Możemy więc mierzyć ją przy pomocy trzech wato-



Rys. 1.



Rys. 2

mierzy, z których każdy mierzy moc jednej fazy. Gdy obciążenia faz są jednakowe, t.j. $U_1 = U_2 = U_3 = U$, $I_1 = I_2 = I_3 = I$ oraz $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \varphi$, to można użyć tylko jednego watomierza, który mierzy moc jednej fazy; chcąc otrzymać moc całkowitą, która tu wynosi $P = 3.U.I.\cos\varphi$, należy wskazania tego watomierza pomnożyć przez 3. Metoda ta jest jednak rzadko używaną, bo nawet przy motorach nie zawsze zachodzą równomierne obciążenia faz.

Najczęściej używaną jest metoda dwóch watomierzy, gdzie całą moc prądu trójfazowego mierzymy tylko dwoma watomierzami w odpowiedni sposób załączonymi /rys. 1 i 2/. Przy połączeniu w gwiazdę łączymy watomierze w ten sposób, że przez jeden z nich płynie prąd chwilowy I_{1t}, a jego cewka napięciowa jest w tym samym momencie pod napięciem: $U_{1t} - U_{2t} = U_{12t}$; równocześnie przez drugi watomierz płynie prąd I_{3t}, gdy cewka jest pod napięciem: $-/U_{2t} - U_{3t}/ = U_{3t} - U_{2t} = U_{32t}$ /p. rysunek, uwzględnić strzałki i początki

cewek/ Pierwszy więc watomierz pokazuje moc:

$$P_1 = \frac{1}{T}\int_0^T U_{12t}.I_{1t}.dt$$

drugi:

$$P_2 = \frac{1}{T}\int_0^T I_{3t}.U_{32}.dt \qquad \text{/p.ćwicz.54/.}$$

Wiemy, że przy połączeniu w gwiazdę w każdym momencie algebraiczna suma prądów chwilowych wszystkich faz równa się zero: $I_{1t} + I_{2t} + I_{3t} = 0$, więc: $I_{2t} = -/I_{1t} + I_{3t}/$. Moc chwilową prądu trójfazowego obliczymy wzorem:

$$P_t = I_{1t}.U_{1t} + I_{2t}.U_{2t} + I_{3t}.U_{3t}$$

/wszystko wartości chwilowe/, a wstawiając tu wartość za I_{2t} mamy:

$P_t = I_{1t}.U_{1t} - I_{1t}.U_{2t} - I_{3t}.U_{2t} + I_{3t}.U_{3t} = I_{1t}./U_{1t} - U_{2t}/ + I_{3t}/U_{3t} - U_{2t}/$
czyli:

$$P_t = I_{1t}.U_{12t} + I_{3t}.U_{32t}.$$

Aby z mocy chwilowej otrzymać moc skuteczną, należy wykonać całkowanie:

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T P_t.dt = \frac{1}{T}\int_0^T I_{1t}.U_{12t}.dt + \frac{1}{T}\int_0^T I_{3t}.U_{32t}.dt;$$

Praktycznie całkowanie to uskuteczniają nam watomierze. Skoro więc załączymy watomierze tak, jak wyżej podano, to wskazywać nam one będą moc całkowitą:

$$P = P_1 + P_2 = C./\alpha_1 + \alpha_2/,$$

gdzie C - stała watomierza /założenie, że oba watomierze jednakowe/, a α_1 i α_2 - wychylenia wskazówek watomierzy.

U w a g a. Założenie $I_{2t} = -/I_{1t} + I_{3t}/$, które było punktem wyjścia naszego rozumowania, jest prawdziwe tylko wówczas, gdy nie ma przewodu zerowego, t.j. dla sieci trójfazowej, ale trójprzewodowej; gdyby były cztery przewody, to metoda dwóch watomierzy nie jest odpowiednia i należy użyć trzech watomierzy.

Metoda dwóch watomierzy nadaje się także i wówczas, gdy mamy połączenie w trójkąt, bo wówczas ważnym jest twierdzenie:

$U_{1t} + U_{2t} + U_{3t} = 0$ /wartości chwilowe/, stąd: $U_{2t} = -/U_{1t} + U_{3t}/$

a po wstawieniu we wzór na moc chwilową $P_t = U_{1t}.I_{1t} + U_{2t}.I_{2t} + U_{3t}.I_{3t}$ otrzymamy: $P_t = U_{1t}.I_{12t} + U_{3t}.I_{32t}$. Całkowita więc moc:

$$P = \frac{1}{T}.\int_0^T U_{1t}.I_{12t}.dt + \frac{1}{T}\int_0^T U_{3t}.I_{32t}.dt.$$

Gdy więc zrobimy układ połączeń z rysunku 2, to przez jeden watomierz płynie w danym momencie prąd I_{32t}, a cewka napięciowa jest pod napięciem U_{3t}, więc ten watomierz wskaże moc:

$$P_1 = \frac{1}{T}.\int_0^T U_{3t}.I_{32t}.dt.$$

Przez drugi watomierz płynie w tym samym momencie prąd I_{21t}, a cewka napięciowa jest pod napięciem $/-U_{1t}/$, więc moc wskazana przez drugi watomierz wynosi:

$$P_2 = \frac{1}{T}.\int_0^T /-U_{1t}/.I_{21t}.dt = \frac{1}{T}\int_0^T /-U_{1t}/./-I_{12t}/.dt =$$

$$= \frac{1}{T}\int_0^T U_{1t}.I_{12t}.dt$$

czyli oba te watomierze razem wskazują nam całkowitą moc także przy połącze-

niu w trójkąt: $P = P_1 + P_2$

W ćwiczeniu 54 mamy wyprowadzone dla prądów sinusoidalnych:

$$\frac{1}{T}\int_0^T U_t . I_t . dt = U.I.\cos\varphi ,$$

gdzie U i I są to wartości skuteczne, a φ jest to kąt przesunięcia prądu I względem napięcia U. Z wykresu na rysunku 3 czytamy, że przy połączeniu w gwiazdę mamy dla jednego watomierza:

$$P_1 = \frac{1}{T}\int_0^T I_{1t} . U_{12t} . dt =$$

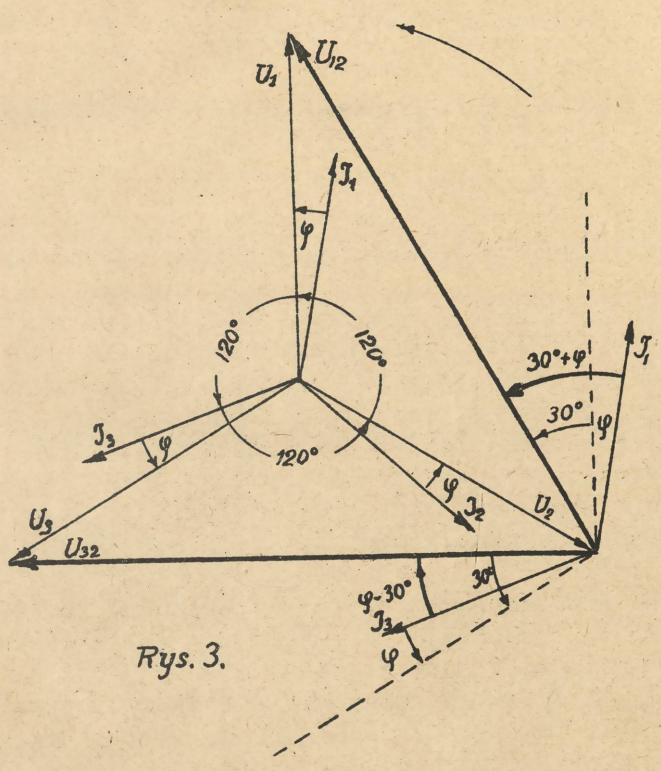
$$= I_1 . U_{12} . \cos(30^\circ + \varphi),$$

a dla drugiego:

$$P_2 = \frac{1}{T}\int_0^T I_{3t} . U_{32t} . dt =$$

$$= I_3 . U_{32} . \cos(\varphi - 30^\circ).$$

Przyjęte: $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \varphi$.



Rys. 3.

Przy połączeniu w trójkąt:

1/. $\frac{1}{T}\int_0^T U_{3t} . I_{32t} . dt =$

$= U_3 . I_{32} . \cos(30^\circ + \varphi) = P_1.$

2/ $\frac{1}{T}\int_0^T U_{1t} . I_{12t} . dt =$

$= U_1 . I_{12} . \cos(\varphi - 30^\circ) = P_2$

/rys. 4/.

Mamy więc wzory zupełnie podobne. Ze wzorów tych wynika jasno, że:

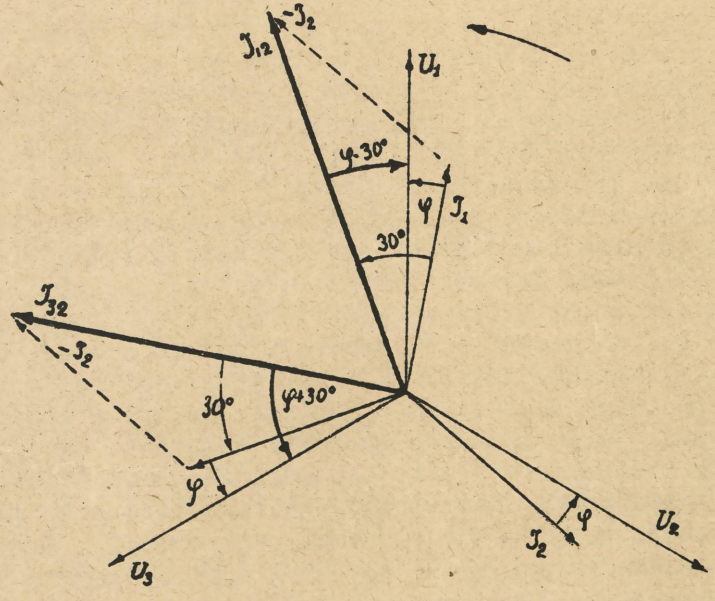
$$\frac{P_1}{I_1 . U_{12}} \neq \cos\varphi , \quad \frac{P_2}{I_3 . U_{32}} \neq \cos\varphi$$

tylko:

$$\frac{P_1}{I_1 . U_{12}} = \cos(30^\circ + \varphi), \text{ a}$$

$$\frac{P_2}{I_3 . U_{32}} = \cos(\varphi - 30^\circ)$$

i podobnie dla połączenia w trójkąt. Nie wolno więc tu dzielić mocy wskazanej danym watomierzem przez przynależne napięcie i natężenie, chcąc uzyskać $\cos\varphi$, jak się to robi przy trzech watomierzach. Gdy $\varphi_1 \neq \varphi_2 \neq \varphi_3$, a chcemy wyliczyć te kąty, względnie ich cosinusy, to musimy użyć trzech watomierzy do pomiaru mocy.



Przy metodzie dwóch watomierzy mamy jednak również wyliczenia i to nawet tak proste, że zbędną jest znajomość napięcia i natężenia, a wystarczą same wychylenia watomierzy α_1 i α_2, a mianowicie:

$$P_1 - P_2 = U.I.\cos(30^\circ + \varphi) - U.I.\cos(\varphi - 30^\circ) = C.(\alpha_1 - \alpha_2) =$$
$$= U.I.[\cos 30^\circ.\cos\varphi - \sin 30^\circ.\sin\varphi - (\cos 30^\circ.\cos\varphi + \sin 30^\circ.\sin\varphi)] =$$
$$= U.I.(\tfrac{1}{2}\sqrt{3}.\cos\varphi - \tfrac{1}{2}.\sin\varphi - \tfrac{1}{2}\sqrt{3}.\cos\varphi - \tfrac{1}{2}.\sin\varphi) = -U.I.\sin\varphi = C.(\alpha_1 - \alpha_2).$$

$$P_1 + P_2 = U.I.\cos(30^\circ + \varphi) + U.I.\cos(\varphi - 30^\circ) = C.(\alpha_1 + \alpha_2) =$$
$$= U.I.\sqrt{3}.\cos\varphi = C.(\alpha_1 + \alpha_2), \quad \text{więc:}$$

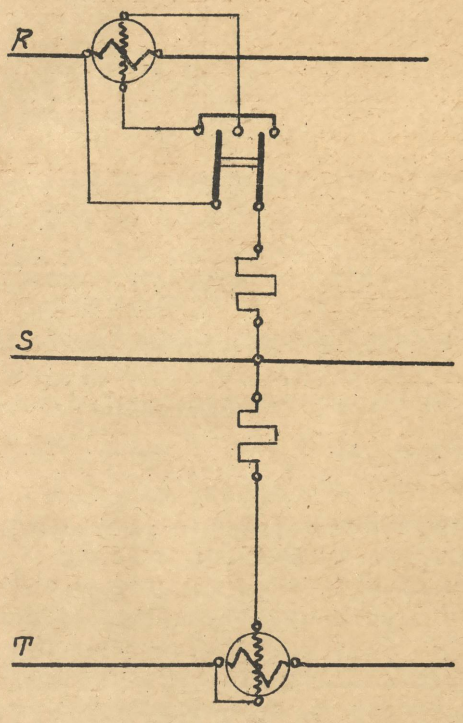
$$\frac{C.(\alpha_1 - \alpha_2)}{C.(\alpha_1 + \alpha_2)} = -\frac{U.I.\sin\varphi}{U.I.\sqrt{3}.\cos\varphi} = -\frac{1}{\sqrt{3}}.\operatorname{tg}\varphi, \quad \text{czyli ostatecznie:}$$

$$\operatorname{tg}\varphi = \sqrt{3}\,\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2}$$

Wzór ten jest ważny tylko dla równomiernego obciążenia wszystkich faz, co widać z wyprowadzenia, gdzie przyjęto $U_3 = U_1 = U$, $I_{32} = I_{12} = I$, względnie $I_1 = I_3 = I$, $U_{12} = U_{32} = U$. Gdy w liczniku przestawimy α_1 i α_2, to otrzymamy: $-\operatorname{tg}\varphi = \operatorname{tg}(-\varphi)$, czyli wyliczona tak wartość kąta będzie dobrą, ale znak przeciwny, t. zn., gdy będzie obciążenie indukcyjne $(+\varphi)$ uznamy je za pojemnościowe $(-\varphi)$ i naodwrót. Obciążając generator trójfazowy transformatorem lub motorem asynchronicznym, wiemy, że obciążenie jest bezindukcyjne, czyli φ musi być dodatnie, a ze wzoru czytamy, że wówczas musi być $\alpha_2 > \alpha_1$, więc watomierz, który ma większe wychylenia wskazówki podaje α_2 a drugi α_1. Wprost przeciwnie byłoby, gdyby obciążenie było pojemnościowe.

Gdy nie wiemy z góry, jakie jest obciążenie, to na podstawie jednego odczytu nie możemy podać, który watomierz podaje α_1, a który α_2. W takim wypadku wskazanym jest np. zwiększyć indukcję /inne wartości nie mogą być przy tym zmienione/. Na podstawie zmian wychyleń wskazówek watomierzy orientujemy się wtedy, jakie jest obciążenie; gdy było pojemnościowe, to $\alpha_1 + \alpha_2$ wzrosło, gdy indukcyjne, to $\alpha_1 + \alpha_2$ zmalało. Należy uwzględnić znak przy α_1 /p. niżej!/.

D y s k u s j a w z o r ó w n a m o c m i e r z o n ą p r z e z p o s z c z e g ó l n e w a t o m i e r z e. Jeden watomierz mierzy moc: $P_1 = U.I.\cos(30^\circ + \varphi)$. Gdy przyjmiemy U oraz I stałe, to P_1, czyli i wychylenie wskazówki watomierza α_1 zależy tylko od kąta φ. Wychylenie α_1 będzie maksymalne α_{1max}, gdy $\varphi = -30^\circ$, t. j. następuje to już przy obciążeniu pojemnościowym. Przy $\varphi = 0^\circ$, to jest obciążeniu czysto omowym, mamy tylko $0{,}866\,\alpha_{1max}$. Gdy $\varphi = 60^\circ$, to $P_1 = 0$, bo $\cos 90^\circ = 0$, czyli $\alpha_1 = 0$; mimo że prąd i napięcie jest tej samej wielkości, jak w poprzednich wypadkach, to wskazówka watomierza zupełnie się nie wychyla, czyli w tym wypadku całą moc prądu trójfazowego mierzy watomierz drugi. Gdy $\varphi > 60^\circ$, to $\cos(30^\circ + \varphi)$ mniejsze od $\cos 90^\circ = 0$, czyli P_1 będzie ujemne, a na watomierzu objawi się to jako wychylenie wskazówki w stronę przeciwną do poprzedniej, czyli α_1 przybierze teraz znak ujemny. Ponieważ na watomierzach mamy zwykle zero na początku skali, więc ujemnych wychyleń wskazówki odczytywać nie można. W takim wypadku radzimy sobie w ten sposób, że w obwodzie cewki napięciowej umieszczamy przełącznik, przy pomocy którego możemy te same punkty łączyć tak z początkiem, jak i z końcem cewki napięciowej. Gdy w szereg z cewką napięciową łączymy opór dodatkowy, to układ musi być taki, by mimo stosowania przełącznika napięcie między cewką prądową a napięciową nie ulegało zmianie /rys.5/. Można także, jak to w naszym ćwiczeniu robimy, dać przełącznik w obwodzie

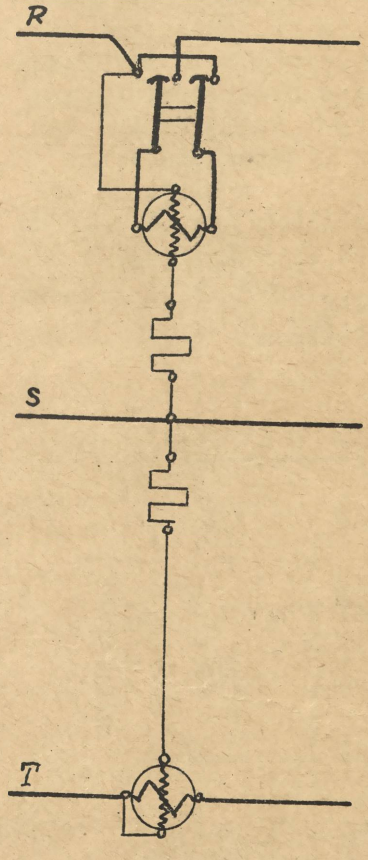


Rys. 5.

cewki prądowej, tylko połączyć należy tak, by przez połączenie nie zmieniać łączni prądowej na napięciową i naodwrót /rys. 6/. Skoro więc w pewnym wypadku obciążenia indukcyjnego zauważymy, że wskazówka jednego z watomierzy chce się wychylić za skalę /mimo że połączenie jest dobre/, to wiemy, że ten właśnie watomierz podaje α_1, a aby je odczytać, należy skorzystać z przełącznika. Uzyskane wychylenie ma znak ujemny, a więc teraz:

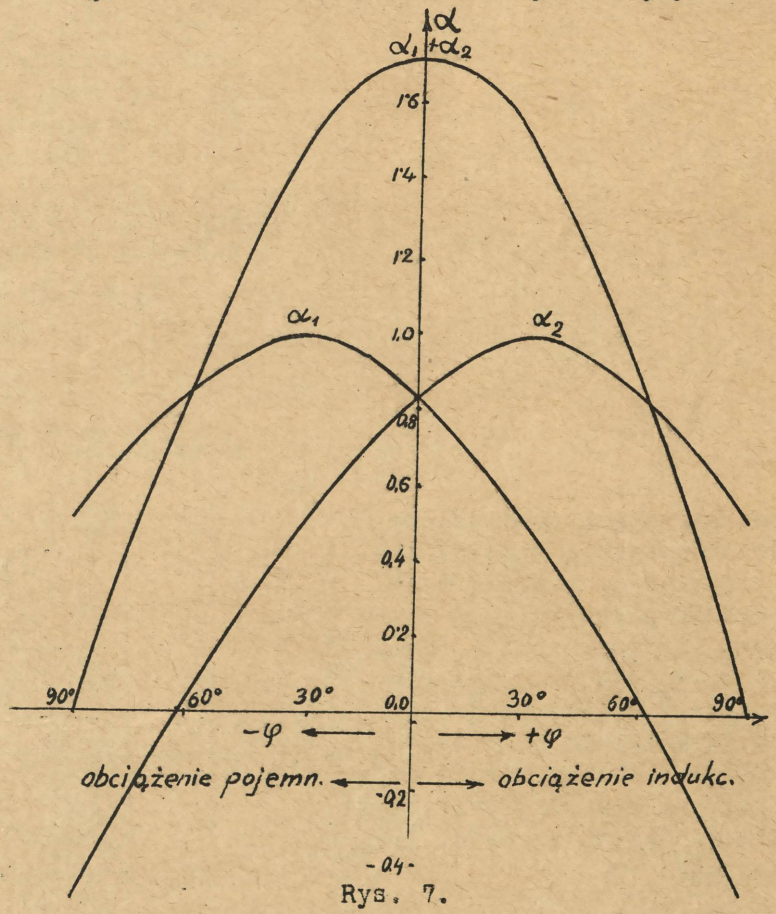
$$tg\varphi = \sqrt{3}\ \frac{\alpha_2 - /-\alpha_1/}{-\alpha_1 + \alpha_2} = \sqrt{3}\ \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\alpha_2 - \alpha_1}$$

Gdy analogiczną dyskusję przeprowadzimy dla $P_2 = U.I.\cos(\varphi - 30^\circ)$, stwierdzimy, że dla wszystkich obciążeń indukcyjnych /$\varphi = 0 \rightarrow 90^\circ$/ wychylenie watomierza drugiego jest dodatnie i przybiera maksimum /α_{2max}/ dla $\varphi = 30^\circ$. Wychylenia nie ma, czyli $\alpha_2 = 0$ dla $\varphi = -60^\circ$, a ujemną wartość przyjmuje α_2 dla $\varphi < -60^\circ$. Dyskusję powyższą przedstawić można wykreślnie /rys. 7/.



Rys. 6.

Ponieważ, jak czytamy z tego rysunku, każdemu φ odpowiada ściśle określone α_1 i α_2, więc można na podstawie tych krzywych

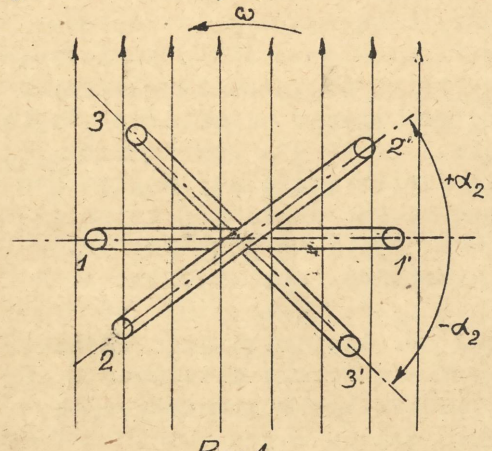


Rys. 7.

wykreślić nową krzywą: $\cos\varphi = f(\frac{\alpha_1}{\alpha_2})$; przy pomocy tej krzywej bardzo łatwo można dla dowolnego stosunku $\alpha_1 : \alpha_2$ znaleźć odpowiadające mu $\cos\varphi$.

Indukcyjny regulator trójfazowy.

Działanie regulatora indukcyjnego można wyjaśnić na podstawie następującego rozumowania. Gdy umieścimy uzwojenie /rys. 1, 1 - 1'/ w wirującym polu magnetycznym, wówczas strumień magnetyczny, opasany przez to uzwojenie, będzie się zmieniał sinusoidalnie. Na skutek zmian tego strumienia magnetycznego zostanie wyindukowana w uzwojeniu /1 - 1'/ SEM o wartości skutecznej:



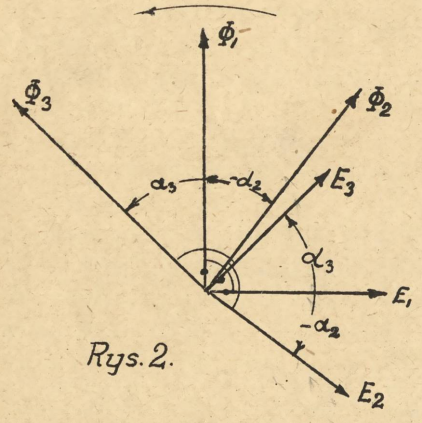
Rys. 1.

$$E_1 = 4{,}44 . z . \nu . \Phi_{1max} . 10^{-8} \quad V \quad /ćwicz.\ 31/$$

opóźniona o $\frac{1}{2}\pi$ względem indukującego ją strumienia magnetycznego $/\overline{\Phi}_1/$ co jest uwidocznione na rysunku 2. Obróćmy obecnie uzwojenie o pewien kąt $+\alpha_2$, zgodnie z kierunkiem wirowania pola magnetycznego, w położenie /2 - 2'/. Ciek magnetyczny opasany w tym wypadku przez uzwojenie, przedstawia nam wektor $\overline{\Phi}_2$, równy co do wartości liczbowej wektorowi $\overline{\Phi}_1$ /$\overline{\Phi}_2 = \overline{\Phi}_1$/, lecz przesunięty względem tego ostatniego o kąt $-\alpha_2$, czyli opóźniony, bo najpierw osiąga maksimum ciek $\overline{\Phi}_1$ a później ciek $\overline{\Phi}_2$. Jak widać z rys. 1, to opóźnienie to równe jest czasowi, potrzebnemu do obrotu pola wirującego o kąt $+\alpha_2$. Siła więc elektromotoryczna $\overline{E}_2$, jako opóźniona o $\frac{1}{2}\pi$ względem indukującego ją $\overline{\Phi}_2$ musi być przesunięta o kąt $-\alpha_2$ w stosunku do $\overline{E}_1$, t.j. w kierunku odwrotnym, jak wirują wektory /rys. 2/; co do wartości liczbowej, to $E_1 = E_2$, gdyż:

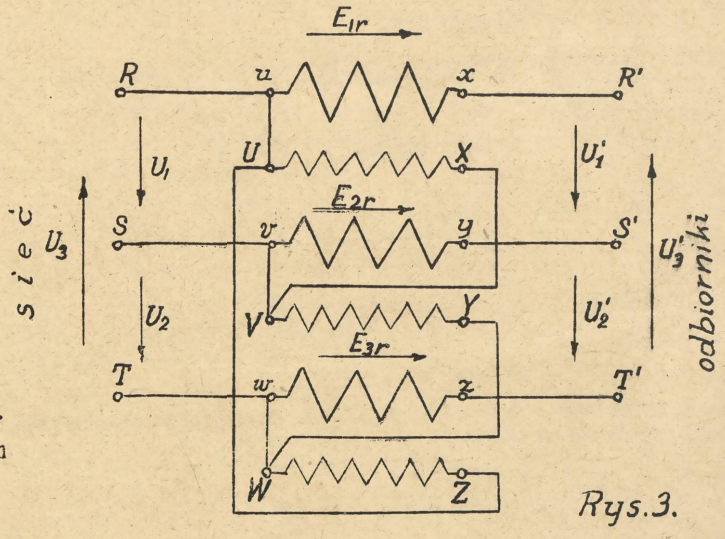
$$E_2 = 4{,}44 . z . \nu . \Phi_{2max} . 10^{-8} \quad V, \text{ a zarazem}$$

$$\Phi_{1max} = \Phi_{2max}.$$



Rys. 2.

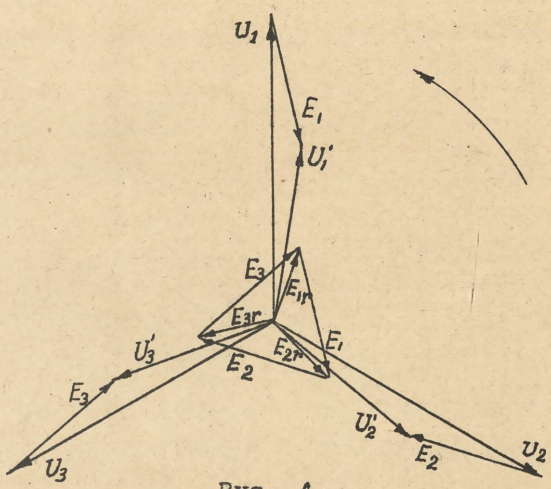
Podobnie można wykazać, że obrót uzwojenia w położenie 3 - 3', czyli o kąt $-\alpha_3$ /w kierunku przeciwnym do kierunku wirowania pola/ /rys. 1./ spowoduje przesunięcie wektora $\overline{\Phi}_3$ względem $\overline{\Phi}_1$, oraz $\overline{E}_3$ względem $\overline{E}_1$ o kąt $+\alpha_3$ /w kierunku obrotu wektorów, p. rys. 2/, przy czym $E_3 = E_1$ /co do wartości liczebnej/



Rys. 3.

Przez obrót więc uzwojenia znajdującego się w polu magnetycznym wirującym o pewien kąt zgodny względnie niezgodny z kierunkiem wirowania pola, osiągamy obrót wektora SEM-ej wyindukowanej w danym uzwojeniu o taki sam kąt, ale w kierunku przeciwnym, względnie zgodnym z kierunkiem obrotu wektorów, przy czym wielkość siły elektromotorycznej nie ulega zmianie.

Na tej zasadzie polega działanie regulatora indukcyjnego trójfazowego. Budowa jego jest identyczna z budową motoru trójfazowego asynchronicznego. Stator maszyny dwubiegunowej połączony w trójkąt, jest załączony na sieć /rys. 3, uzwojenia U - X, V - Y, W - Z/, wytwarza więc pole wirujące. W polu tym znajduje się rotor, który za pomocą przekładni ślimakowej możemy obracać względem statora. Na rotorze mamy trzy uzwojenia /u-x, v-y, w-z/ przesunięte względem siebie o 120°, włączone między sieć a odbiorniki. W uzwojeniach tych zostają wyindukowane pod wpływem pola wirującego siły elektromotoryczne $\overline{E}_{1r}$, $\overline{E}_{2r}$ i $\overline{E}_{3r}$, liczbowo równe sobie, lecz przesunięte względem siebie o 120°. W razie obrotu rotoru o pewien kąt, wektory $\overline{E}_{1r}$, $\overline{E}_{2r}$ oraz $\overline{E}_{3r}$ przesuną się o taki sam kąt względem wektorów napięcia sieci $\overline{U}_1$, $\overline{U}_2$, $\overline{U}_3$, w kierunku obrotu wektorów, względnie przeciwnym do tegoż, zależnie od tego, czy obrót rotoru nastąpił w kierunku przeciwnym, czy też zgodnym z polem wirującym. Niechaj rys. 4 przedstawia nam wzajemne położenie wektorów napięcia sieci $\overline{U}_1$, $\overline{U}_2$ i $\overline{U}_3$ oraz $\overline{E}_{1r}$, $\overline{E}_{2r}$ i $\overline{E}_{3r}$ dla pewnego położenia rotoru. Chcąc obliczyć napięcia $\overline{U}_1'$, $\overline{U}_2'$ i $\overline{U}_3'$ po stronie odbiorników, stosujemy prawo Kirchhoffa /p. ćwicz. 31/: dla obwodu zamkniętego R S S' R' /rys. 3/ dostajemy: $\overline{U}_1 + \overline{E}_{2r} - \overline{E}_{1r} = \overline{U}_1'$, dla obwodu S T T' S' dostajemy: $\overline{U}_2 + \overline{E}_{3r} - \overline{E}_{2r} = \overline{U}_2'$ oraz dla obwodu T R R' T' dostajemy: $\overline{U}_3 + \overline{E}_{1r} - \overline{E}_{3r} = \overline{U}_3'$. Z rysunku 4 otrzymujemy:



Rys. 4.

$$\overline{E}_{2r} - \overline{E}_{1r} = \overline{E}_1, \quad \overline{E}_{3r} - \overline{E}_{2r} = \overline{E}_2$$

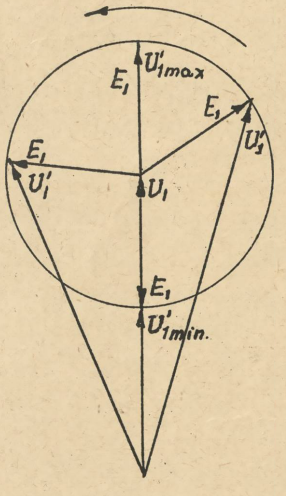
$$\overline{E}_{1r} - \overline{E}_{3r} = \overline{E}_3.$$

Uwzględniając powyższe równości, dostajemy w końcu:

$$\overline{U}_1' = \overline{U}_1 + \overline{E}_1, \quad \overline{U}_2' = \overline{U}_2 + \overline{E}_2, \text{ oraz}$$

$$\overline{U}_3' = \overline{U}_3 + \overline{E}_3,$$

co uskuteczniono na rysunku 4. O ile będziemy obracać rotor, to również będą obracały się wektory $\overline{E}_{1r}$, $\overline{E}_{2r}$, $\overline{E}_{3r}$, a więc także i wektory $\overline{E}_1$, $\overline{E}_2$, $\overline{E}_3$; przy obrocie więc rotoru o 360° wektor np. $\overline{E}_1$, zaczepiony przy końcu wektora $\overline{U}_1$ /rys. 5/ obróci się również o kąt 360°, a każdorazowe napięcie na odbiornikach $\overline{U}_1'$ zależnie od położenia rotoru, przedstawi nam wektor, łączący początek wektora $\overline{U}_1$ z końcem wektora $\overline{E}_1$. Napięcie więc



Rys.5.

na odbiornikach przy obrocie rotoru będzie się zmieniać w sposób ciągły od napięcia maksymalnego, równego sumie arytmetycznej U_1 i E_1, czyli $U'_{1max} = U_1 + E_1$, do napięcia minimalnego, równego różnicy U_1 i E_1, czyli $-U'_{1min} = U_1 - E_1$, co widać z rysunku 5.

W tych granicach możemy więc regulować napięcie przy pomocy regulatora indukcyjnego, lub też, w wypadku wahań napięcia sieci, można za pomocą tego regulatora utrzymywać je stałe, jak to ma miejsce w ćwiczeniu 95.

U w a g i.

1/ W powyższych rozważaniach nie uwzględniano dla uproszczenia spadku napięcia w rotorze przy przepływie prądu, czyli przyjęto, że w rotorze tak oporności rzeczywiste /omowe/ jak i rozproszenie magnetyczne jest równe zeru.

2/ W ogólnym wypadku, gdy regulator indukcyjny posiada "p" par biegunów, wystarczy obrócić rotor o kąt:

$$\frac{360}{p} \text{ stopni}$$

by dostać obrót wektora napięcia w rotorze o 360°.

---ooOoo---

BIBLIOTEKA GŁ. A.G.H.