

Ponieważ

$$i_t N = \pi \cdot D \cdot A P$$

jest liczbą amperoprzewodów całego twornika, gdzie
D - średnica twornika, więc

$$l_t \chi_s = \frac{\pi \cdot D \cdot A P}{2 K} = \frac{1}{2} \beta_D A P$$

Podstawiając to do wzoru 101 otrzymamy

$$e_s = 2 \frac{\beta_D}{b_D} \chi_s l_t \Lambda \cdot V \cdot A P \cdot 10^{-8} \text{ woltów } 104.$$

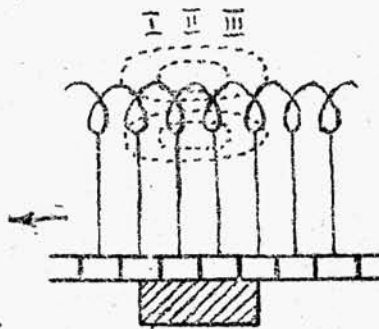
Wzór ten daje możność określenia elektromotorycznej siły samoindukcji, powstającej w zwojnicy zwartej skutkiem zmiany własnego pola magnetycznego zwojnicy bez uwzględnienia oddziaływania pól magnetycznych sąsiednich zwartych zwojnic czyli bez uwzględnienia indukcji wzajemnej, która występuje gdy szczotka jest szersza od podziałki komutatorowej.

3 Komutacja przy szerokości szczotki większej od podziałki komutatorowej.

W maszynach elektrycznych szczotka pokrywa zwykle kilka działek komutatora tak, że w okresie komutacji zwarta jest nie jedna lecz kilka zwojnic obok siebie leżących. W każdej zwojnicy zachodzą wszystkie wyżej opisane zjawiska w kolejności nam znanej.

Na rys. 108 pokazane jest uzwojenie twornika pier-

ściennego z komutatorem, przytem $b = 3\beta$, a więc przez



Rys. 108.

szczętkę w pewnej chwili
zwarte będą trzy zwojnice
I, II i III.

Przy kierunku ruchu twornika, pokazanym na rysunku naj-
pierw będzie zwarta zwojnica I,
po upływie czasu przesunięcia

się komutatora o wielkość podziałki komutatorowej β -
zwojnica II, a po przesunięciu się o wielkość 2β - zwoj-
nica III.

Wszystkie trzy zwarte zwojnice są związane ze sobą
magnetycznie w ten sposób, że na każdą z nich, oprócz włas-
nego pola magnetycznego, działają magnetyczne strumienie,
wywołane zmianą prądu w sąsiednich zwartych zwojnicach.
Inaczej, w każdej zwartej zwojnicy, oprócz siły elektro-
motorycznej samoindukcji, indukują się siły elektromo-
toryczne indukcji wzajemnej, powstałe skutkiem oddziały-
wania zmiennych strumieni sąsiednich zwartych zwojnic.

Ogólna siła elektromotoryczna, którą nazywać bę-
dziemy e l e k t r o m o t o r y c z n ą s i ł ą
k o m u t a c j i $/e_k/$, jakiegokolwiek jednej zwartej
zwojnicy będzie sumą siły elektromotorycznej samoind-
ukcji $/e_g/$ i sił elektromotorycznych indukcji wzajem-
nej, czyli

$$e_k = e_s + \sum e_m$$

gdzie $e_m = m \cdot e_s$ jest siłą elektromotoryczną indukcji wzajemnej, indukowaną w rozpatrywanej szwojnicy, m - współczynnik indukcji wzajemnej /zawsze $m < 1$ /.

Dla tego ogólnego wypadku siła elektromotoryczna samoindukcji

$$e_s = 2 \frac{1}{n_K} z_s \cdot l_z \cdot \lambda \cdot v \cdot AP \cdot 10^{-8} \text{ woltów } 105.$$

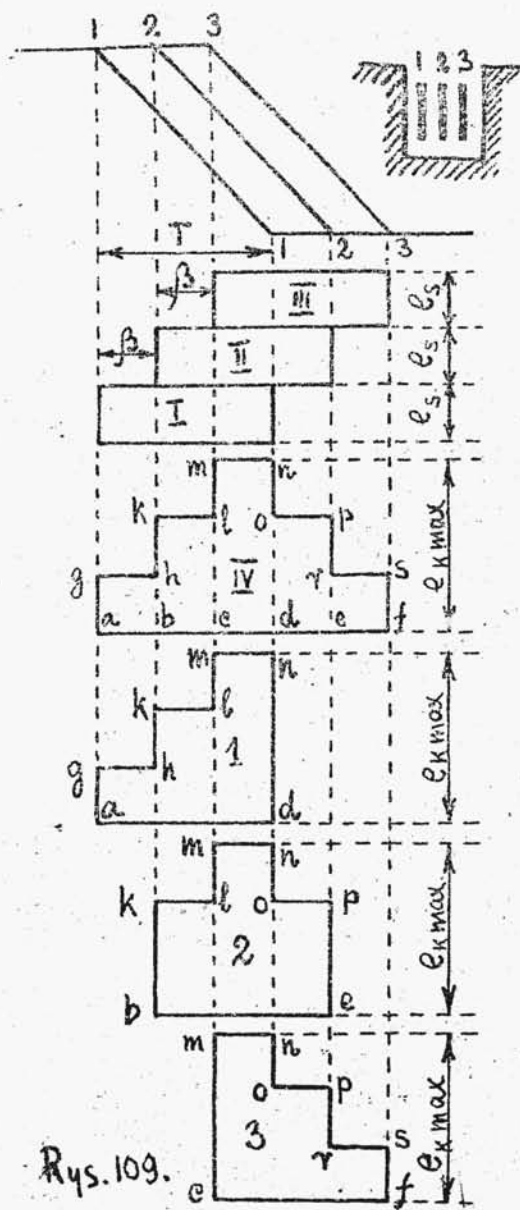
gdzie $n_K = \frac{b_D}{\beta_D}$ - jest ilością działek pokrytych przez jedną szczotkę. Gdy $b_D = \beta_D$ to $n_K = 1$.

Przyjmując w dalszym ciągu prostoliniowy przebieg zmiany prądu komutacji, mamy za cały okres komutacji stałą wartość siły elektromotorycznej samoindukcji /prostokąt a-b-c-d, rys.104/ oraz indukcji wzajemnej. Charakter zmienności siły elektromotorycznej komutacji będzie oczywiście inny niż siły samoindukcji lub indukcji wzajemnej.

Rozpatrzmy teraz twornik uzębiony.

Zakładając w przybliżeniu, że współczynnik indukcji wzajemnej dla wszystkich przewodników, znajdujących się w poziomym rzędzie jednego zębka jest równy jedności, możemy siłę elektromotoryczną samoindukcji, powstałą w każdym przewodniku jako też i siłę elektromotoryczną komutacji, za cały okres komutacji, określić w sposób przedstawiony na rys.109.

Na tym rysunku pokazany jest żłobek twornika
bebnowego z trzema przewodnikami. Widzimy, że najpierw



zostanie zwarta zwojnica,
do której należy przewodnik 1
/ o ile kierunek ruchu twor-
nika będzie na lewo/, przy-
czem w przewodniku tym zaj-
dzie zmiana prądu według
linji 1-1. Po przesunięciu
się komutatora o jedną dział-
kę zajdzie komutacja w prze-
wodniku 2 według linji 2-2
i w końcu w przewodniku 3
według linji 3-3.

Siły elektromotoryczne samoindukcji, powstałe w zwar-
tych zwojnicach od własnych
strumieni, przedstawione są
na rysunku w formie prostokątów I, II, III, przesuniętych
względem siebie o wielkość
jednej podziałki komutatora.

W celu otrzymania siły elektromotorycznej komutacji w poszczególnych przewodach dodajemy wysokości prostokątów I, II i III, z czego otrzymujemy stopniowaną

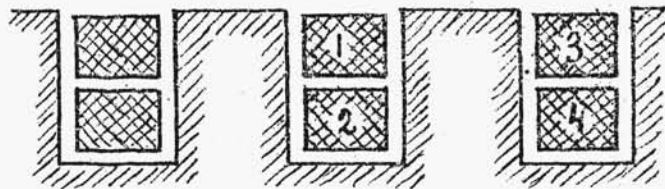
krzywą IV.

Zmienność elektromotorycznej siły komutacji, indukującej się w przewodniku 1 przedstawia krzywa a-g-h-k-l-m-n-o, w przewodniku 2 - krzywa b-k-l-m-n-o-p-e, a w przewodniku 3 - krzywa c-m-n-o-p-r-s-f.

Maksymalna wartość elektromotorycznej siły komutacji w każdym przewodniku przy tych warunkach będzie:

$$e_k \max = 3e_s$$

W tworniku bębnowym w większości przypadków mamy w żłobku uzwojenie dwuwarstwowe, zatem musimy się liczyć z indukcją wzajemną przewodników leżących w tym samym żłobku nie tylko obok siebie, lecz i przewodników leżących jeden pod drugim, rys. 110.



Rys. 110.

Oznaczmy przez e_1 - siłę elektromotoryczną samoindukcji poszczególnych przewodników warstwy górnej, rys. 110. i przez e_2 - siłę elektromotoryczną przewodników warstwy dolnej. Obie te siły elektromotoryczne są różne skutkiem różnych przewodności magnetycznych przewodników obu warstw. Wyznaczono doświadczalnie, że $\frac{e_2}{e_1} = 2 - 3$

Gdy założymy, że w okresie komutacji znajdują się zwojnice, do których należą przewody 1, 2, 3 i 4 to na każdy przewód górnej warstwy np. na przewód 1 działać będą następujące siły elektromotoryczne:

- a/ siła el-mot. samoindukcji e_1 ,
- b/ siła el-mot. indukcji wzajemnej od przewodnika 2 o wielkości $m_{12} \cdot e_2$,
- c/ siła el-mot. ind. wzaj. od przewodnika 3 o wielkości $m_{13} \cdot e_1$,
- d/ siła el-mot. ind. wzaj. od przewodnika 4 o wielkości $m_{14} \cdot e_2$

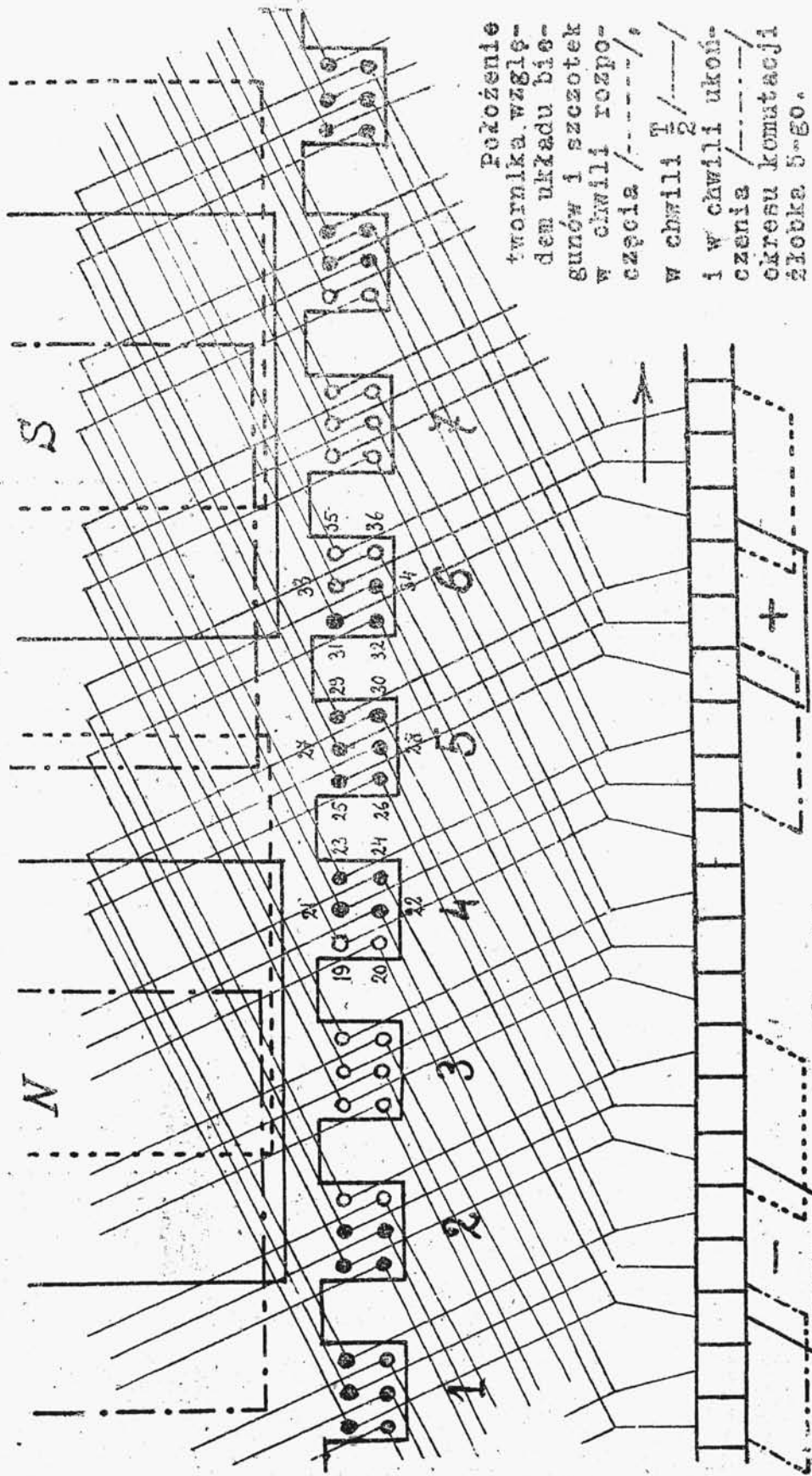
gdzie m - odpowiednie współczynniki indukcji wzajemnej.

Na każdy przewód dolnej warstwy np. na przewód 2 działać będą siły elektromotoryczne:

- a/ siła el-mot. samoindukcji e_2 ,
- b/ siła el-mot. ind. wzaj. od przewodnika 1 o wielkości $m_{12} \cdot e_1$,
- c/ siła el-mot. ind. wzaj. od przewodnika 3 o wielkości $m_{23} \cdot e_1$ $m_{14} \cdot e_1$,
- d/ siła el-mot. ind. wzaj. od przewodnika 4 o wielkości $m_{24} \cdot e_2$

Rozpatrzmy normalne uzwojenie pętlicowe, rys. 111, z następującymi danymi:

ilość czynnych przewodników twornika $N = 96$,
 zwojność jednej sekcji $U_s = 1$,



Położenie
 twornika, względem
 układu bież-
 gunów i szczotek
 w chwili rozpo-
 częcia /-----/
 w chwili $\frac{T}{2}$ /-----/
 i w chwili ukon-
 czenia /-----/
 okresu komutacji
 zębka 5-go.

ilość przewodników w żłobku = ilości boków

sekcji w żłobku $U_p = U_k = 6$,

uzwojenie żłobka - dwuwarstwowe

ilość żłobków $Z = 16$,

ilość działek komutatora $K = 48$,

ilość biegunów $2p = 4$,

ilość par gałęzi równoległych $2a = 4$,

poskok tylny uzwojenia $y_1 = 25$,

poskok przedni $y_2 = 23$,

poskok żłobkowy $X = 4$,

* poskok komutatorowy $y_k = 1$,

ilość działek pokrytych przez szczotkę $n_k = 3$.

Zbadajmy komutację w jednym ze żłobków np. 5-ym,

rys.111.

Z rysunku widzimy, że w tym przypadku komutacja zachodzi jednocześnie w przewodnikach górnej warstwy /przewodniki tej warstwy należą do zwojnic zwartych przez szczotkę dodatnią/ i w odpowiadających im przewodnikach warstwy dolnej /przewodniki tej warstwy należą do zwojnic zwartych przez szczotkę ujemną/.

Ponieważ $n_k = 3$ więc w okresie komutacji znajdować się będą zawsze trzy przewodniki warstwy górnej i trzy przewodniki warstwy dolnej. Okresem komutacji będzie tu czas zwierania jednego żłobka, inaczej będzie to czas, który upłynie od chwili rozpoczęcia zwierania /oczywiś-

cie przez dwie szczotki różnoimienne/ zwojnic, do których należą przewodniki 29 i 30, do końca zwierania zwojnic, posiadających przewodniki 25 i 26, o ile kierunek ruchu twornika będzie na prawo.

Z chwilą rozpoczęcia komutacji w żłobku 5-tym, na przewodniki 29 i 30 tegoż żłobka, działać będą strumienie od będących w tej chwili w okresie komutacji przewodników 31, 32, 33 i 34 żłobka 6-go. Podobnie z chwilą ukończenia okresu komutacji żłobka 5-go na przewodniki 25 i 26 tegoż żłobka działać będą strumienie magnetyczne od przewodników 21, 22, 23 i 24 żłobka 4-go.

Przyjmując wzajemny stosunek sił elektromotorycznych zwartych przewodników taki jaki przy uzwojeniu, przedstawionym na rys. 110, jako też, przyjmując współczynnik indukcji wzajemnej, dla przewodników poziomej warstwy jednego żłobka, równy jedności, możemy sposobem graficznym pokazanym na rys. 112 wyznaczyć charakter zmienności sił elektromotorycznych komutacji przewodników żłobka 5-go, rys. 111.

Przy założeniu, że komutacja prądu jest prostoliniowa, krzywe wszystkich wielkości sił elektromotorycznych samoindukcji i indukcji wzajemnej, przedstawia się jako cały szereg prostokątów o różnych wysokościach lecz równych podstawach, odpowiadających w pewnej skali szerokości szczotki. Wszystkie te prostokąty będą względem sie-

bie przesunięte o wielkość jednej podziałki komutatorowej β . Dodając wysokości tych prostokątów możemy znaleźć następujące wypadkowe siły elektromotoryczne:

e_{11} - indukowana w każdym przewodniku warstwy górnej skutkiem zmian strumieni przewodników warstwy górnej,

e_{12} - indukowana w przewodniku warstwy górnej skutkiem zmian strumieni przewodników warstwy dolnej,

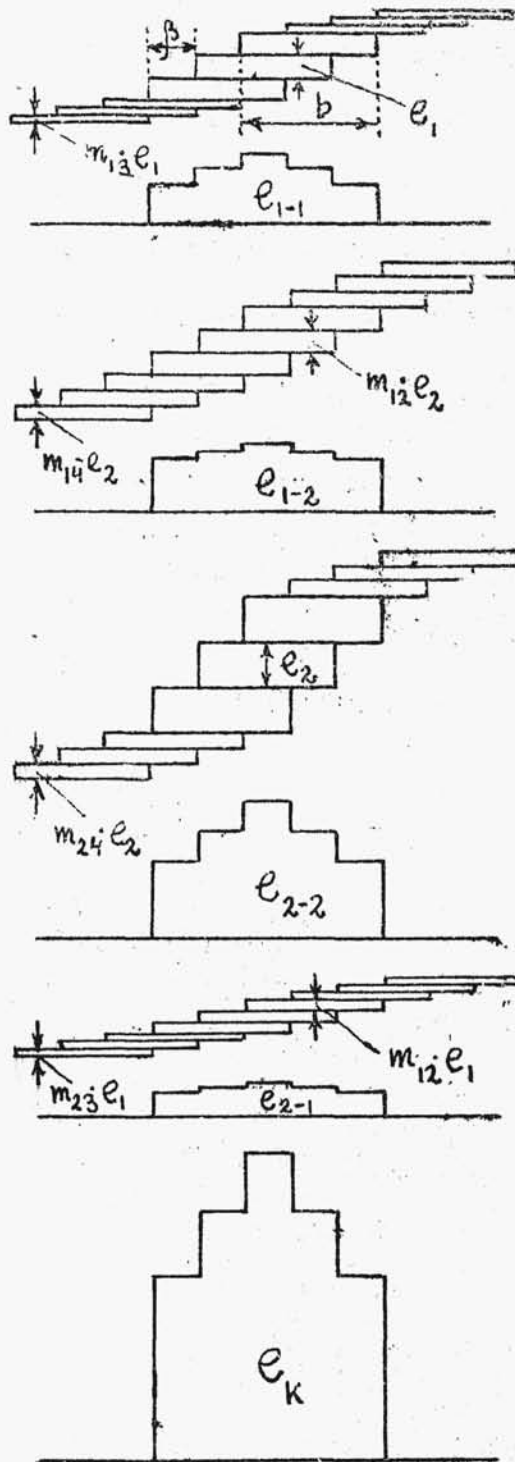
e_{22} - indukowana w przewodniku warstwy dolnej skutkiem zmian strumieni przewodników warstwy dolnej,

e_{21} - indukowana w przewodniku warstwy dolnej skutkiem zmian strumieni przewodników warstwy górnej,
rys.112.

Wszystkie te siły elektromotoryczne są zgodne co do fazy i wielkość elektromotorycznej siły komutacji $/e_k/$ jednego żłobka otrzymamy przez sumowanie sił wypadkowych.

Widzimy, że maksymalna siła komutacji przewodów warstwy górnej, powstała przez sumowanie wypadkowych sił e_{11} i e_{12} jest mniejsza od maksymalnej siły komutacji przewodów warstwy dolnej, powstałej przez sumowanie wypadkowych sił e_{22} i e_{21} .

Ta okoliczność jest przyczyną, że nie możemy otrzymać dobrej komutacji we wszystkich zwartych zwojniciach uzwojenia. Gdy chcemy poprawić komutację przy pomocy



Rys. 112.

np. biegunów zwrotnych to pole tych biegunów powinno być możliwie takie, aby skompensować średnie wartości sił komutacji warstwy górnej i warstwy dolnej.

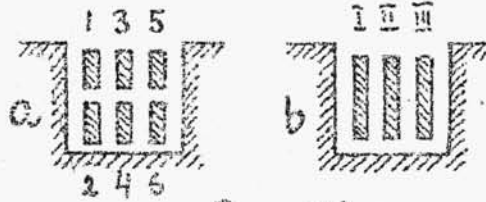
W uzwojeniach z poskokiem skróconym t.zn. kiedy

$$y_1 < \frac{K}{p} + 1$$

wykres siły komutacji $/e_k/$ jednego żłobka jest innego, charakteru niż wykres siły e_k przedstawiony na rys. 112, gdyż wypadkowe siły komutacji, powstałe w przewodach warstwy górnej i warstwy dolnej nie są z sobą w fazie. Obecnie uzwojenia te prawie nie są używane.

Komutacja prądu, jak wiemy, zachodzi równocześnie w przewodach górnej i odpowiadających im przewodach warstwy dolnej. Z tego powodu, dla uproszczenia możemy założyć,

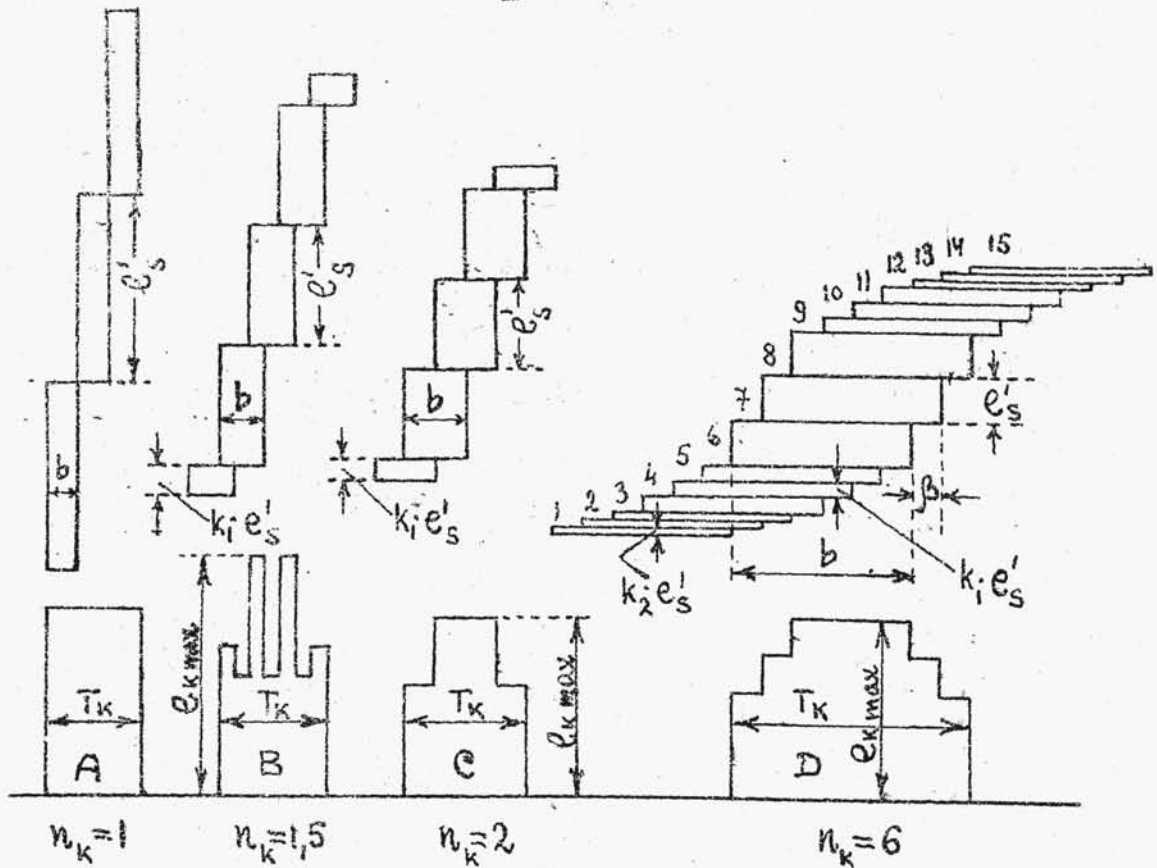
że przewódnik górnej warstwy jest jakby zwarty z przewódnikami warstwy dolnej, pod nim leżącym i zamiast żłobka "a" rozpatrywać żłobek "b", rys.113, z dwa razy mniejszą liczbą przewódników.



Rys. 113.

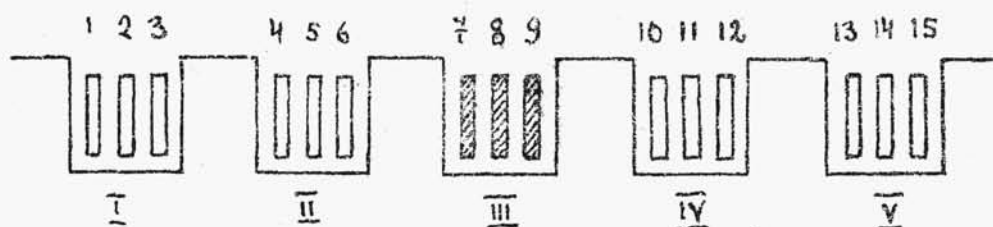
Na rys.114 mamy cały szereg wykresów sił elektromotorycznych komutacji dla tego uproszczonego uzwojenia.

Wykresy A, B, C i D odpowiadają tym przypadkom kiedy liczba działek komutatora, pokrywanych przez szczotkę odpowiednio równa się $n_k = 1 - 1,5 - 2$ i 6 .



Rys. 114.

Prostokąty 7, 8 i 9 /wykres D/ dotyczą elektromotorycznych sił samoindukcji $/e'_s/$, powstających w zwartych zwojnicach do których należą przewodniki 7, 8 i 9 żłobka III-go, rys.115,



Rys.115.

Siła elektromotoryczna komutacji jakiegokolwiek przewodnika, np.8-go, leżącego w żłobku III-im, rys.115, będzie większa od elektromotorycznej siły samoindukcji, spowodowanej zmianą pola własnego /odcinek e'_s na wykresie D, rys.114/, dlatego że dochodzą jeszcze wpływy elektromotorycznych sił indukcji wzajemnej przewodników 7-go i 8-go, leżących w tym samym żłobku /prostokąty 7 i 9 na wykresie D, rys.114/, jak też i żłobkach sąsiednich I, II, IV i V.

Wielkość wpływu sił elektromotorycznych przewodników znajdujących się w żłobkach II-im i IV-tym na każdy przewodnik żłobka III-go, rys.115 przedstawiają prostokąty 4,5,6,10,11 i 12, rys.114 - wykres D, o wysokości $k_1 e'_s$, przesunięte względem siebie o szerokość podziałki komutatorowej β , zaś wpływ przewodników żłobków I i V na przewodniki żłobka III-go przedstawiają prostokąty 1, 2,3,13,14 i 15 o wysokości $k_2 e'_s$.

Spółczynniki indukcji wzajemnej wyliczono dość wiadczalnie i dla tego uzwojenia $k_1 = 0,28$, a $k_2 = 0,13$.

Charakter zmienności elektromotorycznej siły komutacji dowolnego przewodnika, znajdującego się w okresie komutacji, dla przypadku gdy $n_k = 6$, przedstawia wykres D rys.114.

Maksymalna wartość elektromotorycznej siły komutacji w każdym przewodniku wynosi:

$$e_k \max = 3e_s' + 3k_1 e_s'$$

a w przypadku ogólnym

$$e_k \max = n_t e_s' + /n_k - n_t/k_1 e_s' \quad 106.$$

gdzie e_s' - siła elektromotoryczna samoindukcji w rozpa- trywanym przewodniku, rys.115, n_t - liczba wycinków ko- mutatora przypadająca na jeden żłobek, n_k - liczba wy- cinków komutatora pokryta przez jedną szczotkę.

Oznaczając $n_k - n_t = M$, mamy

$$e_k \max = n_t e_s' + Mk_1 e_s' = /n_t + Mk_1/e_s' \quad 107.$$

Gdy $n_k \geq n_t$ /zwarty jest jeden lub więcej niż jeden żłobek/ wtedy w ostatnim wzorze przyjmujemy $M = n_k - n_t$, a gdy $n_k < n_t$ /zwarty jest niecały jeden żłobek/ wtedy przyjmujemy $M = M' = n_k$; o ile n_k - wypada liczbą całkowitą, w przeciwnym wypadku wielkość M zao- krąglamy do najbliższej większej całkowitej liczby wielkości n_k , a wówczas maksymalna wartość elektromoto- rycznej siły komutacji wyniesie

$$e_{k \max} = M' e'_s$$

Wielkość e'_s wchodząca w powyższe wzory jest siłą elektromotoryczną samoindukcji powstałą w jednym z przewodników pokazanych na rys.115, które dla uproszczenia rozumowania, jak wiemy, zostały złożone z dwóch przewodników leżących w jednej pionowej warstwie żłobka, a więc w każdym poszczególnym przewodniku uzwojenia, przedstawionego na rys.111 indukuje się siła elektromotoryczna samoindukcji $e_s = \frac{e'_s}{2}$, wartość której określa wzór 105, skąd $e'_s = 2e_s$.

Wstawiając tę wartość do wzoru 107 mamy:

$$e_{k \max} = /n_t + Mk_1/2e_s$$

skąd po podstawieniu do ostatniego równania wzoru 105 otrzymamy dla przypadku ogólnego:

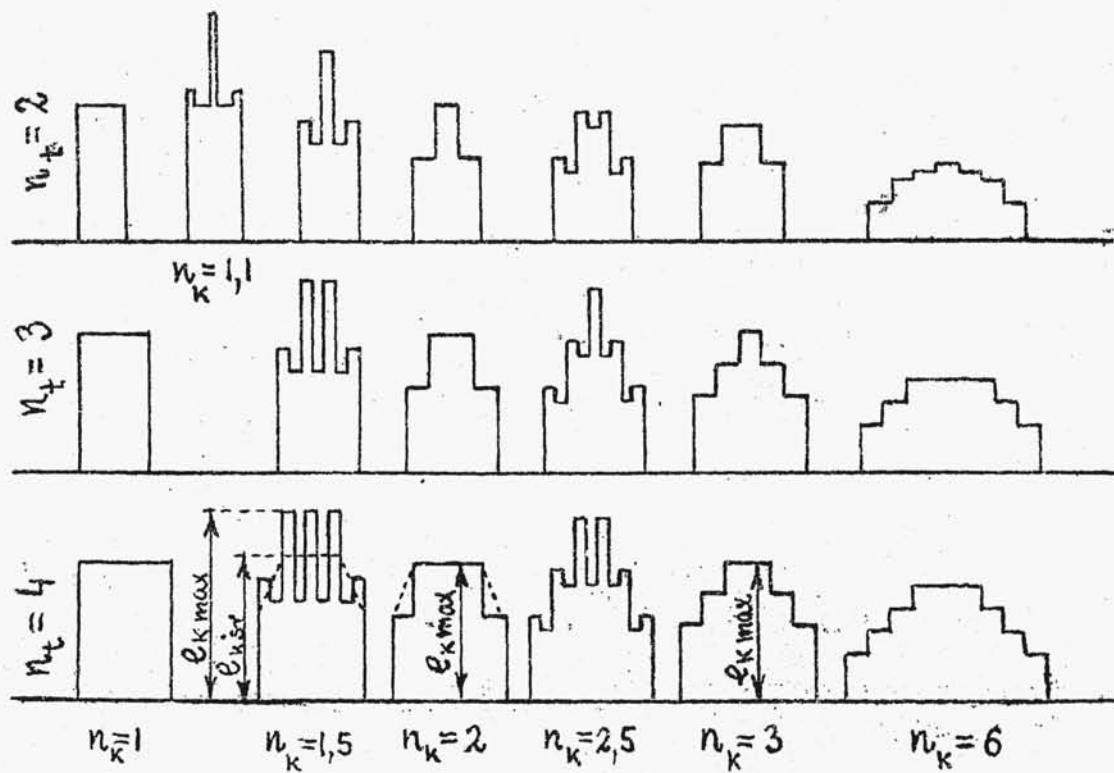
$$e_{k \max} = C \cdot 4 \cdot \pi \cdot l_z \cdot L \cdot U \cdot AP \cdot 10^{-8} \text{ woltów} \quad 108.$$

gdzie $C = \frac{n_t}{n_k} + \frac{M}{n_k} k_1 \leq 1$ - dla przypadku kiedy $n_k \geq n_t$, lub $C = \frac{M}{n_k} \geq 1$ - kiedy $n_k < n_t$, przytem w ostatnim wypadku, gdy n_k jest liczbą całkowitą $C=1$, a gdy M_k nie jest liczbą całkowitą $C > 1$.

Na rys.116 przedstawione są w ostatecznej formie wykresy elektromotorycznych sił komutacji dla pewnego uzwojenia w zależności od n_k i n_t .

Z rysunku tego widzimy, że przy powiększaniu szerokości szczotki zmniejsza się maksymalna wartość

siły komutacji /gdyż przez to wzrasta okres komutacji/
co wynika również z wyżej podanych wzorów. Gdy szczotką



Rys. 116.

pokrywa niecałkowitą ilość działek komutatora w wykresach sił komutacji pojawiają się zęby, które mają ujemny wpływ na komutację w tym znaczeniu, że nie jesteśmy w stanie całkowicie skompensować tego rodzaju sił elektromotorycznych żadnymi ze znanych sposobów. Przy zmniejszaniu szerokości szczotki wysokość tych zębów wzrasta a szerokość maleje. Gdy szczotka pokrywa całkowitą ilość działek komutatora zęby zamieniają się na linię stopniowaną.