

Rozdział V.

K O M U T A C J A.

1. Komutacja przy różnych szybkościach twornika i szerokości szczotki równej podziałce komutatorowej.

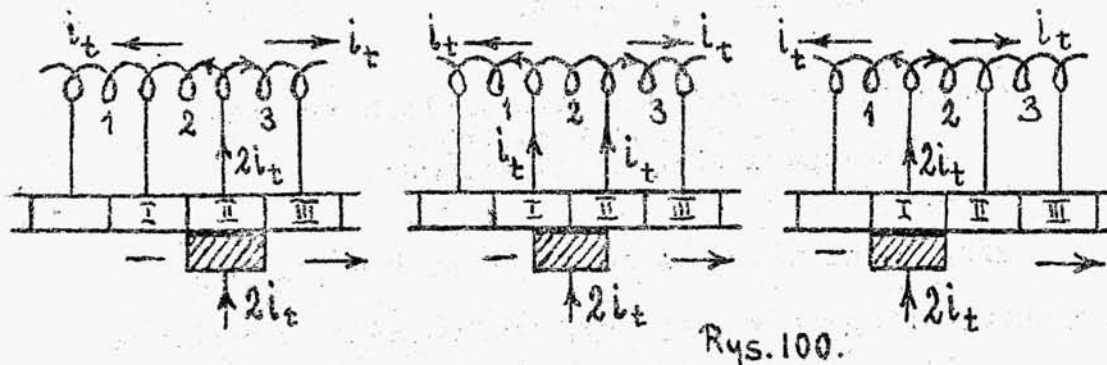
Przy ruchu twornika zmiana kierunku prądu w uzwojeniu następuje w zwojnicy, znajdującej się w strefie obojętnej. Tą zmianę w kierunku prądu w uzwojeniu twornika nazywamy k o m u t a c j ą.

Ponieważ szczotka powinna zwiercać właśnie tę zwojnicę, która znajduje się w strefie obojętnej, zatem komutacja prądu zachodzi w zwojnicy zwartej.

Na rys.100 mamy rozwinięte uzwojenie twornika pierścieniowego z rozwiniętym komutatorem /zakładamy, że szerokość szczotki b jest równa podziałce komutatorowej β /. Gdy szczotka, np. ujemna, stoi, w danej chwili na wycinku II komutatora, prąd $2i_t$ wchodzi przez nią do tego wycinka, następnie rozgałęzia się na obie części uzwojenia po wielkości i_t w każdej.

Pe przesunięciu się komutatora o pół wycinka

w prawo, zwojnica 2, należąca poprzednio do lewej gałęzi uzwojenia, zostanie zwartą przez szczotkę i jakby wyłączoną z uzwojenia /Tak się dzieje w uzwojeniu twornika pierścieniowego lub bębnowego typu równoległego. W uzwojeniu szeregowym przez szczotkę zwarte jest tyle zwojnie ile gałęzi równoległych posiada całe uzwojenie/.



Pe dalszem przesunięciu komutatora, gdy szczotka całkowicie zetknie się z działką I, zwojnica 2 przejdzie do prawej gałęzi uzwojenia.

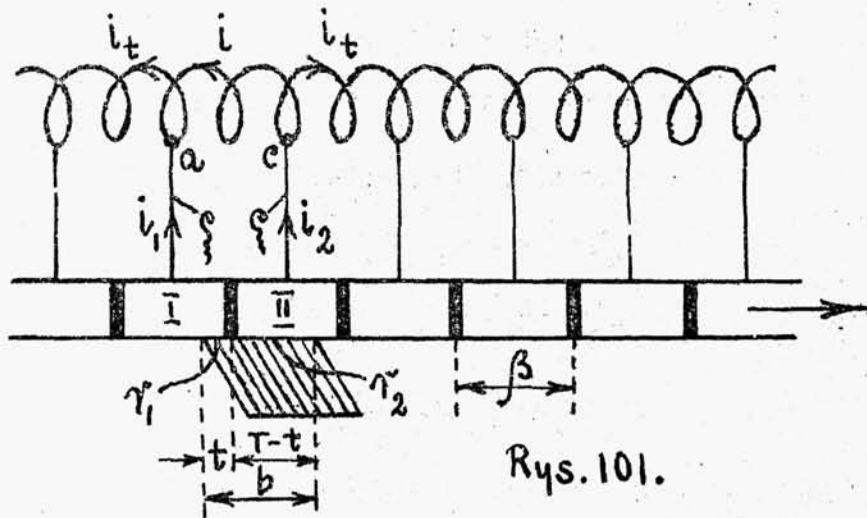
Okres komutacji w rozpatrywanej zwojnicy 2 zaczyna się od chwili kiedy prawy brzeg działki I dotknie lewego brzegu szczotki, a kończy się z chwilą kiedy lewy brzeg działki II całkowicie zsunie się ze szczotki, rys. 100.

W czasie komutacji z zwartej zwojnicy zachodzi zmiana prądu od wartości i_t do wartości $-i_t$.

Rozpatrzmy charakter zmienności prądu w zwojnicy zwartej w ciągu całkowitego okresu komutacji przy założeniu, że szerokość szczotki b jest równa podziałce komutatorowej β i że szybkość obwrotowa twornika jest

bardzo mała.

Na rysunku 101 mamy pokazane położenie, względem szczotek, twornika wraz z komutaterem po upływie czasu t od rozpoczęcia okresu komutacji. W zwojnicy zwartej prąd posiada jeszcze taki kierunek jaki miał przed rozpoczęciem komutacji.



Rys. 101.

Oznaczmy przez i_1 - prąd w nadbiegającym wycinku komutatora /I/, i_2 - prąd w odbiegającym wycinku komutatora /II/, i - prąd zwojnicy zwartej, r_1 - opór przejścia części szczotki stykającej się z działką I, r_2 - opór przejścia części szczotki, stykającej się z działką II, R_z - opór zwojnicy zwartej, ξ - opory przewodów, łączących zwojnicę z działkami komutatora.

Na podstawie I prawa Kirchhoffa w odniesieniu do punktu a możemy napisać

$$i_1 = i_t - i$$

a dla punktu c

$$i_2 = i_t + i \quad 81.$$

Pomijając opór zwojnicy zwartej R_z i opory przewodów łączących, jako bardzo małe w porównaniu z oporami przejścia, możemy, na podstawie II prawa Kirchhoffa dla obwodu zwojnicy zwartej, napisać

$$i_1 r_1 - i_2 r_2 = 0 \quad 82.$$

Rozwiązując ostatnie trzy równania, mamy

$$(i_t - i) r_1 - (i_t + i) r_2 = 0$$

$$i_t r_1 - i r_1 - i_t r_2 - i r_2 = 0$$

$$i_t (r_1 - r_2) - i (r_1 + r_2) = 0$$

skąd

$$i = i_t \frac{r_1 - r_2}{r_1 + r_2} \quad 83.$$

Opór stykowy części nadbiegającej r_1 jest odwrotnie proporcjonalny do czasu t jaki upłynął od początku komutacji do chwili rozpatrywanej.

Jeżeli przez T oznaczymy ogólny czas komutacji, a przez R - opór stykowy całej powierzchni szczotki, mamy następującą zależność

$$\frac{r_1}{R} = \frac{T}{t}$$

skąd

$$r_1 = R \frac{T}{t} \quad 84.$$

zaś

$$\frac{r_2}{R} = \frac{T}{T - t}$$

skąd

$$r_2 = R \frac{T}{T-t}$$

85.

Podstawiając te wartości w równanie 83 otrzymamy

$$\begin{aligned} i &= i_t \frac{R \frac{T}{t} - R \frac{T}{T-t}}{R \frac{T}{t} + R \frac{T}{T-t}} = \\ &= i_t \frac{T(T-t) - Tt}{T(T-t) + Tt} = i_t \left(1 - \frac{2t}{T}\right) \end{aligned} \quad 86.$$

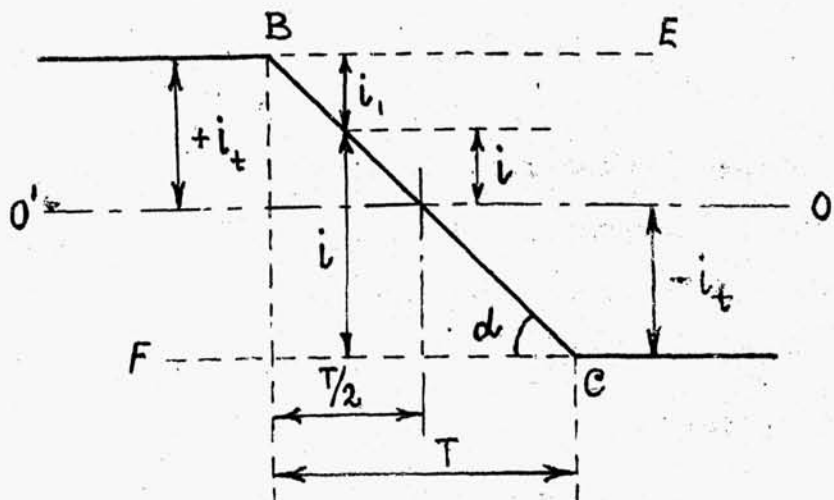
Jest to równanie linii prostej, charakteryzujące przebieg zmian prądu komutacji i .

Przy $t=0$ $i=i_t$

$t=\frac{T}{2}$ $i=0$

$t=T$ $i=-i_t$

Zależność między i i t przedstawiono na rys.102.



Rys. 102.

Odcinki między pochyłą prostą BC, a osią O'O' są wielkościami prądu /i/ w zwartej zwojnicy w każdej chwili w ciągu okresu komutacji.

Odcinki między pochyłą BC, a prostą BE wyrażają wielkości prądu /i₁/ w działce nadbiegającej /I/, a odcinki między pochyłą BC a prostą EC wyrażają wartości prądu w działce zbiegającej /II/ ze szczotki, w każdej chwili w ciągu okresu komutacji.

W przypadku komutacji prostoliniowej gęstość prądu we wszystkich punktach powierzchni stykowej szczotki z komutatorem, jak się zaraz przekonamy, jest wielkością stałą.

Ogólnie gęstością prądu nazywamy stosunek wielkości prądu przepływającego przez powierzchnię stykową do wielkości tej powierzchni, czyli

$$S = \frac{di}{dF} \quad 87.$$

Wyrażając wymiar nadbiegającej lub zbiegającej części szczotki, mierzony po obwodzie komutatora, przez $V_k \cdot dt$, gdzie: V_k - szybkość obwodowa, możemy wielkość powierzchni stykowej szczotki z komutatorem wyznaczyć w sposób następujący

$$dF = l \cdot V_k \cdot dt$$

gdzie l - długość szczotki wzdłuż tworzącej komutatora.

Gęstość prądu zatem będzie

$$S = \frac{1}{l \cdot v_k} \cdot \frac{di}{dt} = c \frac{di}{dt} = c \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad 88.$$

t.zn., że jest proporcjonalna do pochodnej prądu względem czasu, czyli do tangensa kąta, jaki tworzy styczna w danym punkcie krzywej zmian prądu w czasie, z prostą $0'0'$

Z rysunku 102 widzimy, że w przypadku komutacji prostoliniowej dla wszystkich punktów

$$\operatorname{tg} \alpha = \text{const.}$$

t.zn., że gęstość prądu na całej powierzchni stykowej szczotki z komutatorem w tym przypadku jest wszędzie jednakowa.

Obliczenia nasze dotyczyły obwodu zwojnicy zwartej bez uwzględnienia oporu samej zwojnicy $/R_z/$ i oporu $/\xi/$ przewodów, łączących zwojnicę z działkami komutatora. Po uwzględnieniu tych oporów równanie 82 przyjmie postać

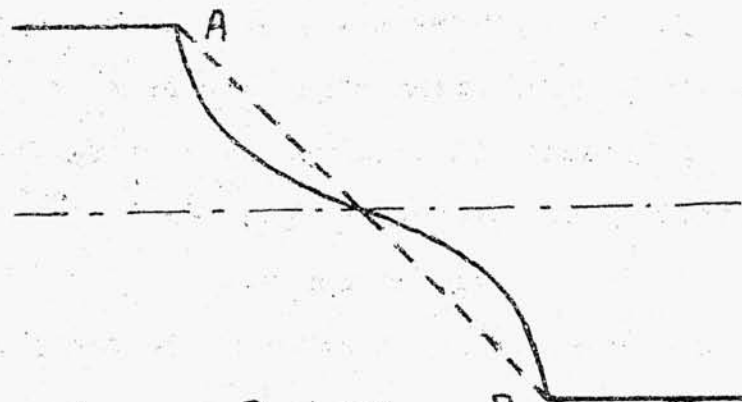
$$i_1 r_1 + i_1 \xi - i R_z - i_2 \xi - i_2 r_2 = 0 \quad 89.$$

Podstawiając w równanie ostatnie odpowiednie wartości na i_1 , i_2 , r_1 , r_2 podobnie jak w przypadku poprzednim, znajdziemy

$$i = i_t \frac{T - 2t}{T + \frac{R'}{R} (T - t) \frac{T}{t}} \quad 90.$$

gdzie $R' = R_z + 2\xi$

Otrzymane równanie nie jest już równaniem
linii prostej, lecz równaniem krzywej drugiego rzędu,
której wykres widzimy na rys. 103.



Rys. 103.

Krzywa tem mniej odchyłać się będzie od prostej
AB, czyli komutacja tem prawidłowiej będzie zachodzić im
mniejszy będzie stosunek $\frac{R'}{R}$ /Stosunek ten powinien za-
wierać się między 1 a 0/. Znaczy to, że powierzchnia
stykowa szczotki z komutatorem, a więc jej wymiary po-
przeczne oraz siła nacisku na komutator i gęstość prądu
muszą być dla danego uwzjoenia określone. Stosunek tych
oporów powinien być we wszystkich maszynach jednakowy,
a mianą jego jest do pewnego stopnia strata napięcia,
przy przejściu prądu między szczotką, a komutatorem, która
jak widać z tablicy na str. 39 waha się niewiele, np. dla
szczotek węglowych /dodatniej i ujemnej łącznie/ od 1,4
do 2 woltów.

Dla szczotek metalowych wartości są mniejsze /0,06 - 0,1 wolta/, bowiem szczotki te używane są do maszyny niskiego napięcia.

Im maszyna jest zbudowana na większy prąd, tem większe muszą być przekroje przewodów uzwojenia twornika czyli opór ich mniejszy i tem mniejszy musi być opór przejściowy, a więc tem więcej miękkie szczotki stosować należy /patrz str.221/.

Rozpatrywaliśmy dotychczas charakter zmienności prądu komutacji w założeniu, że szybkość obwodowa twornika jest bardzo mała. W rzeczywistości szybkość ta jest znaczna, a więc zmienność prądu komutacji będzie zachodzić szybko i tem szybciej im szybkość twornika jest większa.

Przy szybkich zmianach prądu komutacji, w zwartej zwojnicy indukuje się siła elektromotoryczna samoindukcji e_s , która działając w zwartym obwodzie zwojnicy wywoła w niej prąd i_s , zwany dodatkowym prądem komutacji.

Wielkość tej siły jest proporcjonalna do szybkości zmian prądu komutacji i wynosi:

$$e_s = -L \frac{di}{dt}$$

gdzie L - jest indukcyjnością zwojnicy zwartej.

Uwzględniając wpływ samoindukcji możemy równanie 82 napisać w formie ogólniejszej

$$i_1 r_1 = i_2 r_2 = e_s \quad 91.$$

a po podstawieniu odpowiednich wartości mamy

$$i_t (r_1 + r_2) - i (r_1 - r_2) = -L \frac{di}{dt}$$

skąd

$$i = i_t \frac{r_1 + r_2}{r_1 + r_2} + \frac{L \frac{di}{dt}}{r_1 + r_2} \quad 92.$$

Oznaczając

$$i_t \frac{r_1 + r_2}{r_1 + r_2} = i_g \quad \text{oraz} \quad \frac{L \frac{di}{dt}}{r_1 + r_2} = i_s$$

mamy

$$i = i_g + i_s \quad 93.$$

Widzimy, że gdy maszyna jest w ruchu prąd komutacji jest sumą dwóch prądów - jednego i_g , którego charakter zmienności jest prostoliniowy i drugiego i_s , powstałego od działania samoindukcji.

Wartość dodatkowego prądu komutacji, jak wiemy, jest równa:

$$i_s = \frac{L \frac{di}{dt}}{r_1 + r_2} = \frac{e_s}{r_s} \quad 94.$$

Wielkość tego prądu jest w stosunku prostym do wielkości elektromotorycznej siły samoindukcji e_s i odwrotnym do oporu r_s . Opór r_s jest wielkością zmienną i jest sumą dwóch, również zmiennych /zależnie od położenia szczotki

względem działek komutatora/ oporów stykowych zwartych przez szczotkę działek komutatora.

Na podstawie równań 84 i 85 możemy napisać:

$$\gamma_s = \gamma_1 + \gamma_2 = R \frac{T}{t} + R \frac{T}{T-t} \quad 95.$$

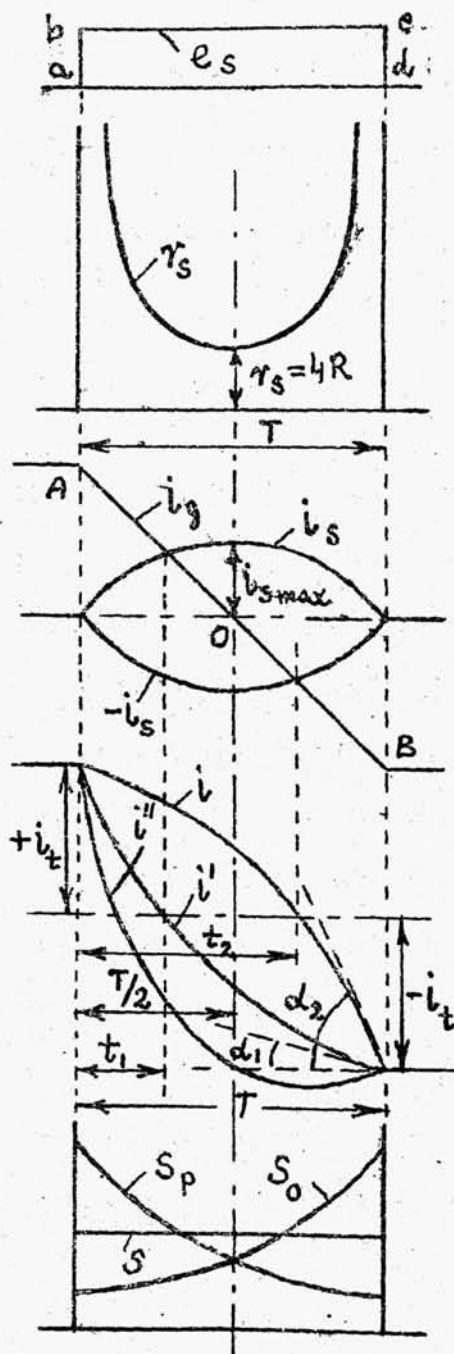
Przy stałej sile elektromotorycznej e_s mamy

przy	$t = 0$	.....	$r_s = \infty$	.....	$i_s = 0$
"	$t = \frac{T}{2}$	.....	$r_s = r_{s\min} = 4R$	.....	$i_s = i_{s\max}$
"	$t = T$	.....	$r_s = \infty$	.....	$i_s = 0$

Rys. 104 /krzywa r_s / przedstawia wykres oporu r_s w czasie komutacji oraz wykres odpowiednich zmian dodatkowego prądu komutacji i_s /krzywa i_s / dla stałej i dodatniej wartości siły elektromotorycznej samoindukcji.

Za dodatnią siłę samoindukcji przyjmujemy tę, która powstaje w zwartej zwojnicy skutkiem szybkiej zmiany prądu płynącego przez tę zwojnicę. Co do ujemnej wartości samoindukcji to nie będzie to już czysta samoindukcja, lecz pewna siła elektromotoryczna o kierunku przeciwnym do pierwszej, wywołana przez nas rozmyślnie jakiegokolwiek czynnikami postronnymi /patrz rozdz.VI/ właśnie w celu skompensowania siły samoindukcji i gdy kompensująca siła będzie większa od siły samoindukcji, wtedy w zwojnicy działa siła równa różnicy siły kompensującej i siły samoindukcji i ta różnica stanowić będzie ujemną wartość siły samoindukcji.

Przy ujemnych wartościach siły e_s , wykres dodatkowego prądu komutacji przedstawia krzywa $-i_s$.



Rys. 104.

Po zsumowaniu odpowiednich wartości prądu i_g oraz prądu i_s otrzymany przebieg zmienności całkowitego prądu komutacji według krzywej "i" dla przypadku gdy siła i_s posiada znak $/+ /$, oraz według krzywej "i'", gdy siła e_s ma znak $/- /$.

Całkowity prąd komutacji, zmieniający się według krzywej "i" osiąga wartość zero w chwili t_2 , przyczem

$$t_2 > \frac{T}{2}$$

czyli opóźnia się względem prądu komutacji prostoliniowej i dlatego komutację przy wartości $/+e_s/$ nazywamy opóźnioną, a przy wartości $/-e_s/$, kiedy prąd osiąga wartość zero po czasie t_1 , przyczem

$$t_1 < \frac{T}{2}$$

komutacją przyspieszoną./krzywa i'/'

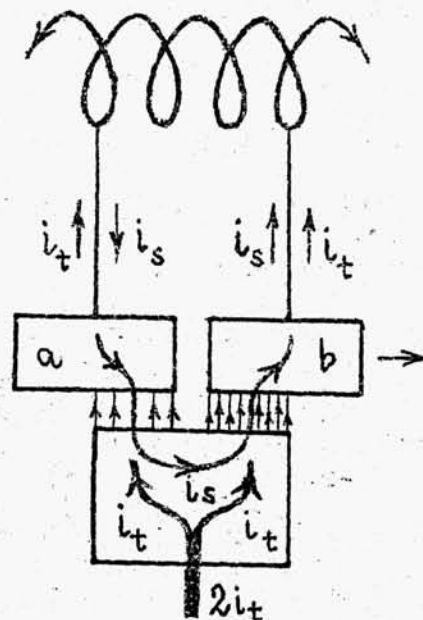
Gdy kompensująca siła elektromotoryczna będzie zbyt duża, to przebieg całkowitego prądu komutacji może się odbywać nawet według krzywej i''.

Prowadząc styczne do krzywej "i" widzimy, że kąty nachylenia tych stycznych do osi poziomej w różnych punktach krzywej są różne t.zn., że gęstość prądu $/S = e \cdot t \cdot d/$ w różnych punktach powierzchni stykowej jest różna. Największa gęstość prądu $/d_2/$ w przypadku komutacji opóźnionej istnieje pod działką II, zbiegającą ze szczotki, czyli w końcu okresu komutacji, a najmniejsza przy samym rozpoczęciu komutacji pod działką I. Przy komutacji przyspieszonej będzie odwrotnie.

Krzywe S_0 i S_p rys.104, przedstawiają zmianę gęstości prądu pod szczotkami dla komutacji opóźnionej i przyspieszonej. Przy komutacji prostoliniowej zmienność gęstości prądu wyrazi się pod postacią linii prostej poziomej S.

Siła elektromotoryczna samoindukcji, za cały okres komutacji, w założeniu komutacji prostoliniowej, jest wielkością stałą. Jest to zupełnie zrozumiałe, bowiem siła samoindukcji jest siłą reakcyjną t.zn., gdy prąd zanika, działa w jego kierunku i przez to opóźnia jego zanikanie, a gdy prąd wzrasta działa w kierunku przeciwnym do kierunku prądu. Gdy zaś prąd wzrasta / według prostej OB, rys. 104/ w kierunku przeciwnym do kierunku

poprzedniego / według prostej AO, rys. 104/, przyjętego przez nas np. za kierunek dodatni, wtedy siła samoindukcji ma kierunek taki sam jaki posiadała gdy prąd zmieniał się według prostej AO. A więc za cały okres komutacji siła elektromotoryczna samoindukcji ma ten sam kierunek i jest wielkością stałą, rys. 104 - linja e_s , gdyż $\frac{di}{dt} = \text{const.}$ / wykres - prosta linja AB/.



Rys. 105.

Na rys. 105 przedstawiona jest jedna zwarta przez szczotkę sekcja uzwojenia w chwili $t = \frac{T}{2}$ w przypadku komutacji opóźnionej i gdy twornik porusza się w kierunku na prawo. Gęstość prądu pod szczotką przedstawiają linje łączące szczotkę z działkami komutatora.

Gdyby nie było dodatkowego prądu komutacji, wywołanego

siłą elektromotoryczną samoindukcji, to przy położeniu szczotki pokazanym na rys. 105, prąd $2i_t$, dopływający do szczotki rozgałęziałby się na dwie równe części po wielkości " i_t " i gęstość prądu pod szczotką byłaby wszędzie jednaka.

Prąd dodatkowy i_g , ciekący się przez szczotkę powoduje to, że pod prawą krawędzią szczotki, gdzie prądy i_t i i_g mają ten sam kierunek, gęstość prądu jest większa niż pod krawędzią lewą, gdzie prądy i_t i i_g mają kierunki różne.

Gęstość prądu dochodzi do maximum, wtedy gdy ma nastąpić przerwa między prawą krawędzią szczotki, a działką "b". Wówczas na krawędzi szczotki wytwarza się znaczna ilość ciepła, przez co mocno rozgrzewa się krawędź szczotki i krawędź działki komutatora, a powstająca para metalu utrzymuje jeszcze przez pewien czas po przerwaniu połączenie elektryczne, tworząc iskrę. Krawędź szczotki nadpala się, a działka komutatora nadtapia się. W celu uniknięcia iskier pod szczotkami należy tak unormować gęstość prądu na styku szczotki z odpowiednią działką komutatora, aby gęstość ta, przy wysuwaniu się działki z pod szczotki, zmniejszała się stopniowo do zera.

Osiągamy to zapomocą wyżej wspomnianej siły kompensującej $/e_p/$, wzniecaniej w zwartej przez szczotkę zwojnicy jakimkolwiek sposobem ubocznym. Siła elektromotoryczna kompensująca musi mieć kierunek przeciwny do siła samoindukcji, aby znieść jej działanie /patrz rozdz.VI/.

Komutacja jest wtedy zadawalniająca, gdy prąd zmienia się według krzywych leżących pomiędzy krzywymi i i $-i'$, rys. 104; maszyna pracuje wówczas bez iskrzenia.

2. Obliczenie elektromotorcznej siły samoindukcji.

Siłę elektromotoryczną samoindukcji, w zwartej zwojnicy wywołuje zmiana strumienia magnetycznego, powstającego skutkiem zmiany prądu komutacji. Wielkość tej siły wyraża się wzorem

$$\mathcal{E}_s = -Z_s \frac{d\phi_s}{dt}$$

gdzie Z_s - liczba zwojów zwartej zwojnicy /zwojność zwojnicy/, ϕ_s - strumień magnetyczny, obejmujący wszystkie zwoje zwojnicy.

Ponieważ strumień ϕ_s wywołany jest zmianą prądu komutacji " i " zatem siła samoindukcji będzie proporcjonalna do szybkości zmian tego prądu, czyli

$$\mathcal{E}_s = -L \frac{di}{dt}$$

gdzie L - jest współczynnikiem proporcjonalności, zwanym indukcyjnością zwojnicy zwartej.

Znak minus określa tu reakcyjne działanie siły samoindukcji.