Prof. dr inż. W. Kołek, mgr inż. R. Hagel, mgr inż. J. Kubek

Zakład Maszyn Elektrycznych

Wpływ własności szczotek oraz warunków zewnętrznych na przebiegi komutacyjne w maszynach prądu stałego

Streszczenie: Badania komutacji przeprowadzane w laboratorium dla różnych warunków pracy wskazują na dużą rolę szczotek w procesie komutacji. Zdejmowane w laboratorium przebiegi komutacyjne pozwalają stwierdzić zmiany indukcyjności i oporności czynnej obwodu zwartego, wykazują poza tym różnice pomiędzy teoretycznie obliczoną a rzeczywistą wartością czasu komutacji oraz współczynnika Hobarta. W dalszym ciągu rozpatruje się wpływ różnych warunków zewnętrznych na pracę szczotek na podstawie doświadczeń laboratryjnych.

Celem badań laboratoryjnych w dziedzinie komutacji jest m. in. zebranie danych, które pozwoliłyby na posługiwanie się metodą obliczeń opartą na wzorach empirycznych i dającą bardziej zgodne z rzeczywistością wyniki aniżeli metody posługujące się wzorami teoretycznymi wyprowadzonymi z uproszczonych założeń. Badania przeprowadzone w laboratorium dla różnych warunków pracy pozwalają na stwierdzenie w procesie komutacji bardzo dużej roli szczotki, mającej często decydujący wpływ na charakter przebiegu. W dalszym ciągu niniejszego artykułu zebrano kilka spostrzeżeń, jakie nasuwają się przy laboratoryjnych pomiarach przebiegów komutacyjnych w ramach pracy Katedry Maszyn Elektrycznych Politechniki Śląskiej nad zagadnieniem komutacji i szczotek.

1. **Zdejmowanie przebiegów komutacyjnych.** W teorii komutacji dużą rolę odgrywa obraz komutacji, tj. czasowy przebieg prądu pod szczotką. W pierwszych doświadczeniach przeprowadzanych głównie przez Arnolda używano do badań *oscylografu pętlicowego.* Obecnie posługujemy się *oscylografem katodowym,* który umożliwia przedstawienie na ekranie samego tylko przebiegu zmiany kierunku prądu, bez tych części obrazu, gdzie badany prąd ma już wartość stałą. Dzięki temu uzyskujemy przebieg komutacji dostatecznie rozciągnięty w kierunku osi czasu z wyraźnym zaznaczeniem wszystkich wpływów pochodzących od zmian pola głównego, biegunów pomocniczych i oddziaływania twornika, oddziaływania innych zwojów komutowanych równocześnie pod tą samą szczotką i pod

innymi szczotkami, rozkładu pola w strefie neutralnej, zmian oporności przejścia między szczotką i komutatorem. Nawet niewielkie zmiany natury mechanicznej (zmiany tarcia, docisku, powierzchni styku szczotek) wyraźnie wpływają na obraz komutacji, jednak te wpływy na obraz nie sięgają tak daleko, aby zmieniały zasadniczy charakter przebiegu, i dłuższa praktyka laboratoryjna w zakresie oscylografowania przebiegów komutacyjnych pozwala na eliminowanie różnych wpływów ubocznych i uzyskiwanie wiernych obrazów.

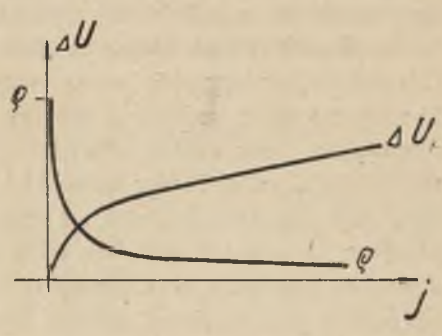
Otrzymane na ekranie oscylografu obrazy przebiegów prądu w zwartym zwoju twornika różnią się — czasem bardzo znacznie — od teoretycznych przedstawień tego procesu, spotykanych w podręcznikach. Odstępstwa występują zarówno przy komutacji przyspieszonej, jak i opóźnionej. Komutację zupełnie prostoliniową trudno uzyskać nawet w warunkach laboratoryjnych. Krzywa prądu komutowanego jest w niektórych miejscach zniekształcona przez ostre wyskoki (impulsy) prądu w komutowanym zwoju. Impulsy te pochodzą od pola głównego pulsującego w takt częstotliwości żłobkowej i zaznaczają się szczególnie wyraźnie przy większych obciążeniach.

2. **Zmiana indukcyjności w czasie komutacji.** Rysunek 1 przedstawia przebieg komutacji prawie prostoliniowej uzyskany w laboratorium na prądnicy prądu stałego 6,3 kW, 230 V, 1500 obr/min. Na oscylogramie tym — podobnie jak na większości oscylogramów — widzimy, że pod koniec okresu komutacji prąd przekracza wartość I_{tw}, a następnie dopiero zmniejsza się do tej wartości. Zjawisko to obserwujemy nie tylko przy komutacji prawie prostoliniowej i przyspieszonej, lecz nawet w wypadku komutacji wyraźnie opóźnionej. Szybkim zmianom prądu $\left(\frac{di}{dt}\right)$ towarzyszy powstawanie prądów wirowych, które powodują zmniejszenie współczynnika indukcyjności do wartości określanej w literaturze jako *indukcyjność końcowa*. To zmniejszenie współczynnika indukcyjności pociąga za sobą zmniejszenie opóźniającego działania napięcia reaktywnego, tak że w rezultacie przebieg zostaje przez pole biegunów pomocniczych przyspieszony.

Rys. 1. Komutacja prawie prostoliniowa. U=170 V, I=15 A, I_{bp}=17,5 A

3. **Zmiana oporności przejścia w czasie komutacji.** W chwili gdy prąd w komutowanym zwoju osiąga wartość $i = I_{tw}$, gęstość prądu na końcu zbiegającym szczotki spada do zera, po czym zmienia znak, jeśli prąd

w zwoju wzrasta. Rysunek 2 przedstawia zmienność oporności właściwej przejścia w funkcji gęstości prądu. Opór przejścia utrzymuje się prawdopodobnie przez pewien czas w swojej najwyższej wartości, jaką osiągnął w chwili, gdy gęstość prądu $j = 0$, zanim zacznie się zmniejszać. To gwałtowne powiększenie oporu przejścia pod koniec komutacji powoduje, że zmiana prądu $\left(\frac{di}{dt}\right)$ odbywa się wolniej, zmniejsza się wartość dodatkowych prądów zwarcia, a część ich zamyka się przez uzwojenie i przez obwód zewnętrzny, odciążając w ten sposób koniec zbiegający. Takie samoczynne zwiększenie się oporności przejścia szczotki powoduje zmniejszenie iskrzenia lub też wprost zapobiega mu.



Rys. 2. Zależność oporności właściwej przejścia oraz spadku napięcia kontaktu szczotkowego od gęstości prądu

Powyższe obserwacje pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków: a) niezgodność klasycznej teorii komutacji z rzeczywistością można tłumaczyć między innymi również i tą właściwością szczotek węglowych, że oporność właściwa przejścia ϱ nie jest dla nich wielkością stałą, lecz bliżej nieokreśloną funkcją gęstości prądu i szybkości jej zmiany; b) szczotka posiada tym korzystniejsze wartości im $\frac{\Delta U}{j} = \varrho$ dąży do większej wartości przy wartości j dążącej do zera.

4. **Czas komutacji.** Rzeczywisty czas komutacji stwierdzony na zdjęciu oscylograficznym różni się często znacznie od czasu teoretycznego, jaki wynika z podzielenia idealnej szerokości szczotki przez prędkość obwodową komutatora. Można przyjąć, że w warunkach komutacji prostoliniowej rzeczywisty czas komutacji wynosi $50 \div 60\,\%$ czasu teoretycznego. Często czas ten jest jeszcze krótszy. Oznacza to, że komutacja nie odbywa się pod całą szerokością szczotki, lecz tylko pod jej częścią, której wielkość zależy od obciążenia prądowego szczotki. Skrócenie czasu komutacji objawia się w opóźnieniu chwili rozpoczęcia się przepływu prądu z (do) nabiegającej szczotki do (z) następnej działki komutatora. To opóźnienie jest potrzebne na to, aby w nowoutworzonym styku powstały warunki przepływu prądu przez kontakt szczotkowy. Czas komutacji (rzeczywisty) rośnie ze wzrostem obciążenia. W pewnych warunkach zaobserwowano na przykład, że przy wzroście obciążenia z 5 *A* do 15 *A* czas komutacji wzrósł o 40%. Na czas komutacji mają zatem wpływ takie czynniki, jak: dodatkowe prądy zwarcia, prędkość obwodowa komutatora, docisk, materiał szczotkowy, drgania, temperatura, chemiczny i fizyczny stan powierz-

chni komutatora i szczotki. Mówiąc o rzeczywistym czasie komutacji, ma się na myśli pewną wartość średnią, gdyż czas ten ulega wahaniom skutkiem działania zmieniających się wpływów mechanicznych i elektrycznych na powierzchni styku szczotki.

5. **Współczynnik Hobarta.** Wszystkie równania na napięcie reaktywne lub indukcję biegunów pomocniczych zawierają współczynnik ζ. Wielkość ta nie jest stałą, związaną jedynie z wymiarami żelaza twornika i danymi uzwojenia, lecz zależy również od rzeczywistego pokrycia komutatora szczotką (β), od gatunku szczotki i jej doszlifowania. Ponieważ czas komutacji jest znacznie krótszy od tego, jaki można wyliczyć, opierając się na idealnej szerokości szczotki, więc czynna szerokość szczotki i rzeczywisty stosunek pokrycia jest mniejszy od obliczonego. Z tego powodu współczynnik ζ jest większy, aniżeli wynika z obliczenia na podstawie wzorów teoretycznych. Pomimo tych niedokładności obliczeń komutacja dobrze wykonanej maszyny prądu stałego funkcjonuje dobrze. Doświadczenie wyjaśnia, że każda maszyna wykazuje pewną strefę, w której granicach nie występuje iskrzenie. Przy określonym obciążeniu maszyny możemy zmieniać w pewnym obszarze pole komutacyjne przez przesuwanie szczotek lub zmianę prądu biegunów pomocniczych i pomimo tego szczotki nie będą w sposób widoczny iskrzyć. Trzeba jednak zaznaczyć, że strefa ta zmniejsza się znacznie, jeżeli już wystąpiło iskrzenie, ponieważ powierzchnia czynna szczotki została częściowo zniszczona.

6. **Dodatkowe prądy zwarcia.** Dodatkowe prądy zwarcia przy komutacji nieprostoliniowej powodują poszerzenie czynnej powierzchni szczotki (a zatem i zwiększenie czasu komutacji). Obserwując na ekranie oscylo-

Rys. 3. Komutacja opóźniona. $U = 124$ V, $I = 5{,}5$ A, $I_{bp} = 9$ A, $i_{max} = 480\%$. Szczotki lekko iskrzą

Rys. 4. Komutacja opóźniona. $I = 5{,}5$ A, $I_{bp} = 0$. Szczotki lekko iskrzą

grafu przebieg zmiany prądu w zwartym zwoju — np. przy osłabionych biegunach pomocniczych — widzimy, że prąd najpierw wzrasta, niekiedy wielokrotnie ponad wielkość prądu I_{tw} — a dopiero pod koniec komutacji nagle zmienia kierunek. Rysunki 3 i 4 przedstawiają przebieg komutacji.

silnie opóźnionej, gdzie dodatkowe prądu zwarcia płynące w komutowanym zwoju zmieniają zupełnie obraz komutacji. Maksymalna wartość prądu (i_{max}) w zwoju przy komutacji opóźnionej lub przyśpieszonej może osiągnąć nawet ośmiokrotną wartość prądu w gałęzi uzwojenia twornika (jeżeli pod szczotką wystąpi iskrzenie, to i_{max} trudno określić z powodu wahań).[1]

7. **Położenie strefy komutacyjnej.** Przy osłabionych biegunach pomocniczych strefa komutacyjna przesuwa się w kierunku końca zbiegającego szczotki; przeciwnie jest przy wzmocnionych biegunach pomocniczych. Położenie strefy komutacyjnej pod szczotką zależne jest poza tym od chwilowego stanu chemicznego i fizycznego powierzchni szczotek i komutatora (warstwy oporowe o dużym oporze przejścia na komutatorze).

8. **Krzywa potencjalna.** Szybkość procesu komutacji na końcu nabiegającym i zbiegającym jest zależna od stromości krzywej potencjalnej. Duże napięcia między końcami szczotki powodują duże dodatkowe prądy zwarcia, płynące w poprzek szczotki. Prąd i napięcie powodują miejscową jonizację kontaktu, charakteryzującą się dużą przewodnością. W tym wypadku odbiór prądu i komutacja odbywają się właśnie w tych zjonizowanych punktach szczotki niezależnie od kontaktu mechanicznego (powierzchni Hertza). Punkty takie występują tam, gdzie kierunki prądu dodatkowego i obciążenia są zgodne. W tej interpretacji dodatkowy prąd zwarcia płynący w poprzek szczotki jest na końcu nabiegającym pożyteczny, ponieważ toruje drogę prądowi obciążenia. Na końcu zbiegającym natomiast jest szkodliwy, gdyż przy rozwarciu obwodu jest przyczyną iskrzenia. Krzywa potencjalna powinna więc być na końcu nabiegającym stroma, na końcu zbiegającym zaś winna mieć przebieg płaski jak na rysunku 5. Położenie szczotki przedstawione jest na tym oscylogramie odcinkiem poziomym nad krzywą potencjalną.

Rys. 5. Krzywa potencjalna optymalna. $U = 145$ V, $I = 10{\cdot}5$ A, $I_{bp} = 5{,}5$ A. Wyższe harmoniczne zamknięte przez równolegle połączony kondensator 2 μF

9. **Docisk szczotki.** Na pracę szczotki i przebieg prądu w zwartym zwoju wywiera duży wpływ położenie i wielkość docisku szczotki. Rysu-

[1] W objaśnieniach do tego oscylogramu i następnych oznaczają: I — prąd obciążenia maszyny, I_{bp} — prąd w uzwojeniu biegunów pomocniczych, i_{max} — maksymalne wartości prądu w zwoju w czasie komutacji.

nek 6 przedstawia oscylogram prądu komutowanego otrzymany w warunkach normalnej pracy maszyny. Rysunek 7 zaś — ten sam przebieg przy dodatkowym dociskaniu całej powierzchni szczotki. Rysunek 8 ilustruje wpływ dodatkowego docisku wywieranego na koniec zbiegający szczotki, rysunek 9 — wpływ docisku końca nabiegającego.

Rys. 6. Komutacja w warunkach pracy normalnej

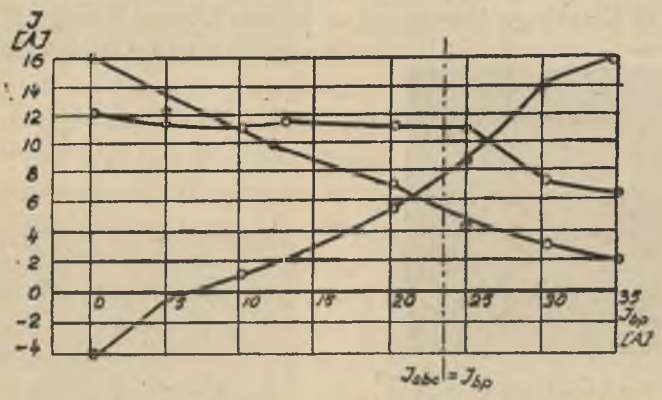
Rys. 7. Komutacja przy dodatkowym (zwiększonym) docisku na całej powierzchni szczotki

Rys. 8. Komutacja przy dodatkowym docisku szczotki na końcu zbiegającym

Rys. 9. Komutacja przy dodatkowym docisku szczotki na końcu nabiegającym

10. **Praca równoległa szczotek.** Szczotka obciążona jest nie tylko prądem płynącym w obwodzie zewnętrznym, lecz również prądami wyrównawczymi wywołanymi na skutek asymetrii oraz dodatkowymi prądami zwarcia, w rezultacie czego obciążenie szczotki może wielokrotnie przewyższyć przewidywaną dla niej granicę. Przy pracy równoległej wielu szczotek sytuacja jeszcze bardziej się pogarsza skutkiem nierównomiernego rozpływu prądu na poszczególne szczotki. Doświadczenia wykazały, że na zjawisko nierównomiernego rozkładu obciążenia pracujących równolegle szczotek ma wpływ nie tylko kontakt szczotkowy, lecz również gatunek szczotki oraz właściwe wzbudzenie biegunów pomocniczych. Przy równoległym połączeniu dwóch miedzianych przewodów o jednakowej długości prąd rozdziela się na nie w stosunku ich przekrojów, ponieważ

spadek napięcia jest proporcjonalny do gęstości prądowej. Przy szczotkach pracujących równolegle zależności te nie zachodzą. Droga przepływu prądu w każdej gałęzi równoległej składa się z kontaktu szczotki z komutatorem, z korpusu szczotki, połączenia kabelka z końcówką. Opór w kontakcie jest o wiele większy od oporu pozostałych części, tak że można przyjąć, iż prąd rozdziela się na poszczególne gałęzie równoległe (jakie stanowią poszczególne szczotki) zależnie od wielkości oporu przejścia. Na opór przejścia składa się z kolei opór cząstek kontaktujących oraz opór warstewki pokrywającej komutator, mającej bardzo niską przewodność właściwą. Nierównomierny rozkład prądu w szczotce jest wywołany nierównomiernym rozkładem cząstek kontaktujących w powierzchni Hertza. Ta szczotka, która takich cząstek ma najwięcej, będzie brać



Rys. 10. Wpływ wzbudzenia biegunów pomocniczych na pracę równoległą szczotek

na siebie prąd. Rozkład prądu na poszczególne szczotki będzie więc zależał nie tylko od wielkości powierzchni styku, lecz również i od gatunku szczotki. Zaobserwowano, że szczotka węglowa mająca więcej twardych kontaktujących części wykazuje mniejszą nierównomierność w rozkładzie prądu od szczotki grafitowej. Interesujące jest badanie wpływu biegunów pomocniczych na równomierność rozkładu prądu w szczotkach równoległych. Z uzyskanego doświadczalnie wykresu (rys. 10) przedstawiającego zależność prądu w trzech szczotkach pracujących równolegle od prądu wzbudzenia biegunów pomocniczych (przy stałym prądzie obciążenia) wynika, że jedynie wówczas gdy $I_{obc} = I_{bp}$ (oczywiście przy prawidłowo wykonanej maszynie) rozkład prądów jest mniej więcej jednakowy. Natomiast przy przewzbudzeniu i niedowzbudzeniu biegunów pomocniczych różnica między prądami w poszczególnych szczotkach zwiększa się i przy $I_{bp} = 0$ prąd w jednej szczotce zmienia nawet kierunek. Wytłumaczenia tego zjawiska można

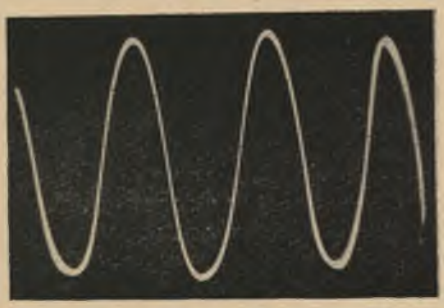
szukać w dwóch przyczynach: niejednakowym doleganiu szczotki do komutatora na całej powierzchni oraz w tym, że zmiana wzbudzenia biegunów pomocniczych wpływa na tempo komutacji opóźniając je czy przyspieszając, co z kolei powoduje powstawanie dodatkowych prądów zwarcia. Gdyby powierzchnie styku szczotek były idealnie równe i gdyby szczotki w całości dolegały jednakowo do komutatora, wówczas ten dodatkowy prąd zwarcia byłby zmuszony zamknąć się w poprzek szczotki. Ponieważ jednak warunek ten nigdy nie zachodzi, dlatego zamyka się on przez dwie szczotki, dodając się do prądu obciążenia w jednej, odejmując w drugiej. W rezultacie jedna szczotka obciążona jest większym prądem niż druga.

11. **Współpraca szczotek różnych biegunowości.** Często spotykamy zniekształcenia przebiegu komutacji w formie leżącej litery „S" (rys. 11). Pochodzą one od oddziaływania zwojów komutowanych pod szczotką przeciwnego znaku. Jeżeli zezwoje komutowane leżące pod różnymi szczotkami są sprzężone ze sobą przez strumienie rozproszenia, to przy nagłej zmianie prądu w jednym zezwoju indukuje się w drugim (z nim sprzężonym) zezwoju — będącym już np. w połowie okresu komutacji — SEM-na indukcyjności wzajemnej. Zachodzi to wtedy, gdy jedna ze szczotek pracuje tylko jednym końcem, np. zbiegającym. Wówczas zmiana prądu zachodzi nagle w końcowej fazie komutacji. Ta nagła zmiana prądu wyindukuje w cewce komutującej normalnie SEM-ną powodującą przepływ prądu w kierunku takim, w jakim prąd płynął przed komutacją, na skutek czego nastąpi wzrost prądu (dążącego już do zera) zezwoju normalnie komutującego. Po ustaniu oddziaływania indukcyjności wzajemnej zezwoju źle komutującego przebieg przyjmie normalny charakter.

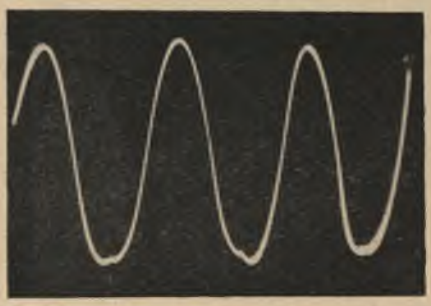
Rys. 11. Wpływ komutacji pod szczotką przeciwnej biegunowości. $I = I_{bp} = 15$ A

12. **Wpływ żłobkowania.** Na proces komutacji i pracę szczotki wywierają wpływ także i te elementy maszyny, które na pozór mało są z nim związane. Znany jest wpływ żłobkowania powodującego pulsowanie pola w szczelinie i indukowanie się w zwoju komutowanym SEM-nej o dużych częstotliwościach. Podczas wirowania twornika przechodzą pod biegunami na przemian zęby i żłobki, powodując periodyczne zmiany pola w szczelinie oraz wahanie strumienia biegunów pomocniczych i głównych w takt częstotliwości żłobkowej. Zmiana strumienia biegunów głównych i pomocniczych powoduje indukowanie w zwoju komutowanym SEM-nych (trans-

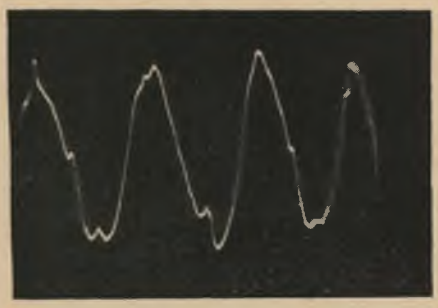
formacji), które wywołują przepływ dodatkowych prądów obciążających szczotki. Rysunek 12 przedstawia oscylogram pulsacji strumienia pod biegunem głównym prądnicy przy biegu jałowym (szczotki podniesione). W badanej maszynie szerokość głowy zęba (zredukowana na średnicę komutatora) była mniej więcej równa szerokości szczotki. Oscylogram na



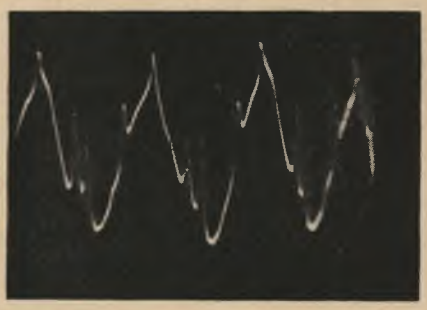
Rys. 12. Pulsacja strumienia w osi podłużnej. Bieg jałowy prądnicy. $I_{wzb} = 1{,}5$ A



Rys. 13. Pulsacja strumienia w osi podłużnej. $U = 196$ V, $I = I_{bp} = 10$ A, $I_{wzb} = 1{,}45$ A



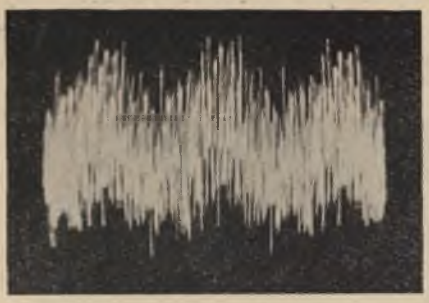
Rys. 14. Pulsacja strumienia w osi podłużnej. $I = 10$ A, $I_{bp} = 0$, $I_{wzb} = 1{,}3$ A



Rys. 15. Pulsacja strumienia w osi podłużnej. $I = 10$ A, $I_{bp} = 0$, $I_{wzb} = 0{,}7$ A

rysunku 13 ilustruje ten sam przebieg, lecz przy prądnicy obciążonej, a oscylogram na rysunkach 14 i 15 został zdjęty przy tym samym obciążeniu prądnicy, lecz bez wzbudzenia biegunów pomocniczych. Widoczne na oscylogramach zniekształcenia wzrastają w miarę pogarszania się komutacji. Powodem tych zmian jest występowanie przy złej komutacji dużych dodatkowych prądów zwarcia, wytwarzających strumień podłużny, nakładający się na strumień główny maszyny (wyższe harmoniczne można ograniczyć do wartości nieszkodliwych dla komutacji przez powiększenie szczelin pod biegunami głównymi i pomocniczymi). Należy jeszcze nadmienić, że pulsacje strumienia prócz tego, że działają szkodliwie na komu-

tację, powodują również pojawienie się składowych zmiennych w prądzie i napięciu, a więc są przyczyną strat powierzchniowych w nabiegunnikach.



Rys. 16. Składowa zmienna prądu stałego. $U = 150$ V, $I = 6{,}5$ A, $I_{bp} = 0$, $I = 3\%$

Dla przykładu zamieszczono na rysunku 16 oscylogram składowej zmiennej prądu stałego, zdjęty za pomocą prądnicy bez biegunów pomocniczych. Zmienność prądu wyrażona w % wynosi w tym wypadku 3%.

$$\Delta I = \frac{I_{zm}}{I_{st}} \cdot 100\%$$

Wszystkie rysunki i zdjęcia oscylograficzne zamieszczone w niniejszym artykule wykonano na prądnicy bocznikowej prądu stałego 6,3 kW; 230 V; 1500 obr/min.