ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1969

Seria: MECHANIKA z. 41 Nr kol. 261

JAN WÓJCIKOWSKI

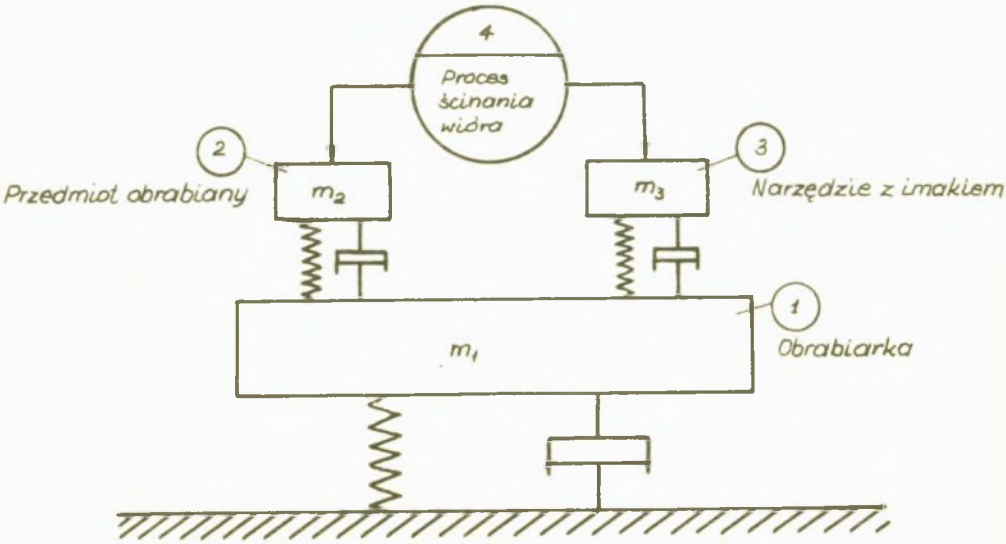
WPŁYW CECH DYNAMICZNYCH SIŁOMIERZY NA WYNIKI BADAŃ SIŁY SKRAWANIA PRZY TOCZENIU

Streszczenie: Opisano badania cech dynamicznych układu pomiarowego siły skrawania przy toczeniu. Układ składał się z czujnika pojemnościowego, generatora wysokiej częstotliwości, dyskryminatora fazowego i oscylografu strumieniowego. Badania wykazały, że siłomierz taki przedstawia układ oscylacyjny drugiego rzędu z tłumieniem. Podano cechy dynamiczne układu i wnioski o ich wpływie na błąd pomiaru składowej stałej i zmiennej siły skrawania.

Żywiołowy ostatnio rozwój badań naukowych na świecie znalazł oparcie nie tylko w stosowaniu nowych metod badań, ale w bardzo znacznej mierze w nowoczesnej aparaturze badawczej. W wielu przypadkach właśnie wynalazki w dziedzinie aparatury badawczej były źródłem rewelacyjnego postępu wielu dyscyplin naukowych. Dlatego doskonalenie aparatury badawczej uznać trzeba za sprawę istotnej wagi w rozwoju nauki.

Badania w szerokiej dziedzinie zagadnień związanych z obróbką skrawaniem wymagają bardzo zróżnicowanej aparatury. Jednym z podstawowych zagadnień w obróbce skrawaniem są badania wartości i charakteru zmiennych sił skrawania. Wyniki tych badań są następnie wykorzystywane w konstrukcji obrabiarek, konstrukcji narzędzi i przyrządów oraz technologii obróbki skrawaniem, jak również pogłębiają ogólną wiedzę z zakresu teorii skrawania.

Zmienność siły skrawania w czasie objawia się w postaci drgań w układzie obrabiarka-przedmiot-narzędzie. Model dynamiczny tego układu w przypadku toczenia można w przybliżeniu przedstawić jak na rys. 1.



Rys. 1. Model dynamiczny układu o-p-n dla toczenia

Jak z powyższego widać proces ścinania wióra jest elementem sprzężenia układu obrabiarka-przedmiot-narzędzie (O-P-N) i głównym źródłem sił pojawiających się w rozpatrywanym układzie.

Siła skrawania, towarzysząca procesowi ścinania wióra, będzie wymuszała drgania wszystkich wskazanych na rys. 1 elementów układu, te zaś z kolei, wskutek sprzężenia ze strefą skrawania, wpływać muszą na charakter zmienności samej siły skrawania. Źródłami drgań będą więc niektóre elementy składowe obrabiarki, a w szczególności jej napęd. Także przedmiot obrabiany, wskutek zmiennej sztywności i niewyważenia mas, wpływać będzie na drgania układu O-P-N. Również narzędzie i jego imak wniosą swój udział w łańcuch

O-P-N. Wreszcie sam proces tworzenia wióra przez skrawanie (strukturalnie zawsze niejednorodnego) materiału musi powodować zmienność siły skrawania. Wszystkie te zjawiska spotykają się w interesującej nas strefie przedmiot-narzędzie i oddziaływując wzajemnie na siebie powodują pulsację siły skrawania o skomplikowanym często przebiegu.

Dotychczas nie podano dopuszczalnych wartości parametrów drgań dla poszczególnych typów tokarek, czy rodzajów obróbki. Główną trudnością jest tutaj uzyskanie odpowiednio dokładnych pomiarów powstających zjawisk, jak również ich następne matematyczne ujęcie. Potrzeba badań dynamiki procesu skrawania jest więc wyraźna, co potwierdzają pojawiające się w ostatnich latach publikacje z tego zakresu [1, 2, 3, 4, 5, 6].

Badania wartości i zmienności siły skrawania przeprowadza się przez wprowadzenie w obwód układu 1-2-4-3 (rys. 1) odpowiednio skonstruowanego czujnika pomiarowego. Czujnik taki może być związany z członem 1, 2 lub 3. Najbardziej skuteczne okazało się wiązanie czujników pomiarowych z członem 3, jakkolwiek pomiary prowadzone tak usytuowanym czujnikiem mają charakter względny, ponieważ łoże obrabiarki, wobec którego interpretuje się wskazania czujnika, jest odkształcalne sprężyście.

Wprowadzenie w obwód sprzężonego układu 1 - 2 - 4 - 3 nowego elementu w postaci czujnika może jednak w bardzo znaczny sposób wpłynąć na interesujące nas przebiegi, występujące w strefie ścinania wióra. Jeżeli czujnik (lub układ czujnika w postaci suportu pomiarowego) będzie np. mało sztywny, to będzie on źródłem dodatkowego wzbudzania drgań sprzężonego obwodu 1 - 2 - 4 - 3 nawet do poziomu uniemożliwiającego poprawną obróbkę. Najlepiej zatem było by tak zbudować czujnik, aby możliwie najmniej lub wcale nie wpływał na własności dynamiczne układu 1 - 2 - 4 - 3, zabezpieczając w ten sposób poprawność obserwacji zjawisk powstających w obwodzie sprzężonym O-P-N.

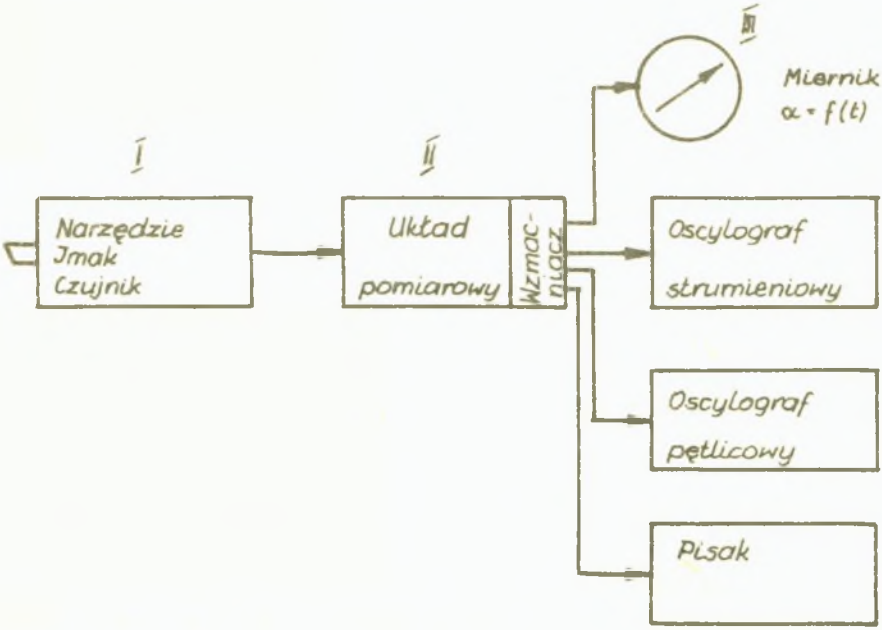
Teoretyka obróbki skrawaniem najbardziej interesuje badanie zjawisk występujących w samej strefie ścinania wióra, będzie on zatem dążył do uzyskania nieruchomego układu odniesienia dla swych pomiarów, co oznacza stosowanie możliwie maksymalnych sztywności członów, 1 - 2 - 3, to jest obrabiarki, przedmiotu i narzędzia. Wynika stąd, że czujnik włączony do takiego obwodu musi sam także charakteryzować się wysoką sztywnością. Stąd konieczność odpowiednio przemyślanego konstruowania czujników pomiarowych (lub ich układów), a także konieczność przebadania ich cech dynamicznych przed zastosowaniem do właściwych pomiarów zmienności siły skrawania.

Czujniki pomiarowe mają z reguły ograniczoną czułość, co często zmusza nas do stosowania dodatkowych wzmacniaczy pomiarowych dla uzyskania sygnału, dającego się obserwować na miernikach lub zapisać przy pomocy rejestratorów. Elektryczne metody pomiaru wielkości mechanicznych znalazły tu największe zastosowanie.

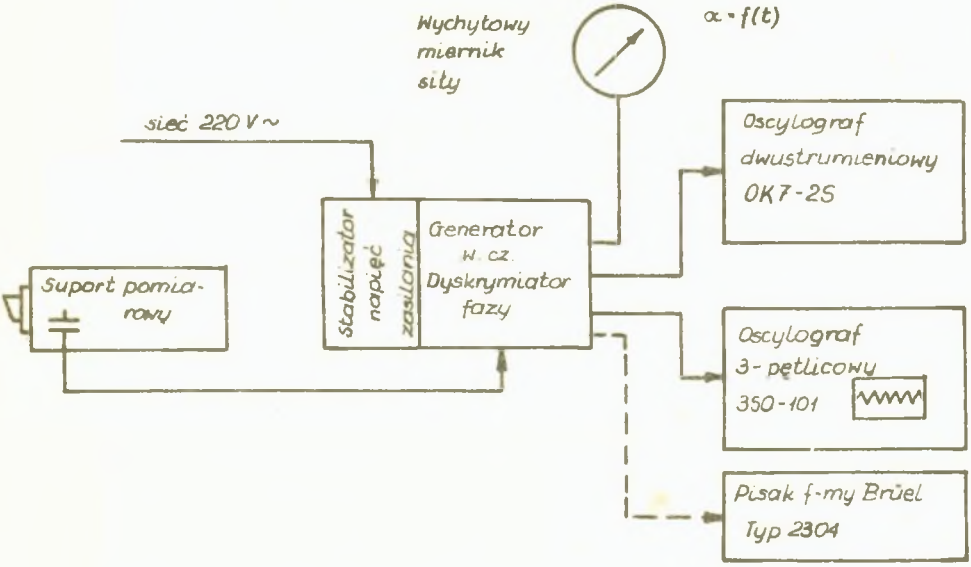
Schemat blokowy stosowanych obecnie układów mierniczych dla sił skrawania przy toczeniu można przedstawić jak na rys. 2.

Jeżeli układ mierniczy ma działać poprawnie, to jego elementy występujące po czujniku, nie mogą wnosić skażeń tego, co w czasie pomiarów odbierze czujnik. Wobec tego przed podjęciem badań zmienności siły skrawania istnieje konieczność określenia zdolności przenoszenia układu pomiarowego dla zorientowania się w rozmiarze błędów wskazań, jakie mogą się pojawić w określonych obszarach częstotliwości badanych sił skrawania.

Próbę określenia tych błędów podjęto dla typowego układu pomiarowego sił skrawania przy toczeniu, przedstawionego schematycznie na rys. 3. Układ ten oparty jest na działaniu czujnika pojemnościowego ze wzmacniaczem pomiarowym, zawierającym generator wysokiej częstotliwości i dyskryminator fazowy. Układ pomiarowy uzupełniają miernik wychyłowy, oscylograf strumieniowy i oscylograf pętlicowy.



Rys. 2. Schemat blokowy typowego układu pomiarowego sił skrawania przy toczeniu



Rys. 3. Układ pomiarowy siłomierza pojemnościowego

Badania [7] przeprowadzono dla trzech dających się wyodrębnić stanów wymienionego układu pomiarowego:

a) układ pomiarowy siłomierza pracuje, ale na ostrze noża zamocowanego w imaku siłomierza nie działa żadna siła zewnętrzna;

b) układ pomiarowy siłomierza pracuje i na ostrze noża zamocowanego w imaku siłomierza działa siła statyczna (obciążenie statyczne);

c) układ siłomierza pracuje i na ostrze noża zamocowanego w imaku siłomierza działa siła zmienna (obciążenie dynamiczne).

Badania grupy a) można określić jako badania ogólnej stabilności układu pomiarowego. Szczegółowe badania dotyczyły tutaj takich cech, jak stabilność cieplna, stabilność mechaniczna i stabilność elektryczna w określonych warunkach zasilania. Otrzymana wartość błędu względnego niestabilności dla pełnego wychylenia wskazówki miernika siły wyniosła dla tego siłomierza

$$\Delta_{nst_2} = \pm 2,3\%.$$

Stwierdzono, że po określonym czasie wygrzewania układu pomiarowego największy wpływ na wartość tego błędu ma poziom stabilizacji napięć zasilających wzmacniacz pomiarowy.

Badania grupy b) zmierzały do określenia charakterystyki statycznej wymienionego siłomierza przez wykreślenie krzywych wzorcowania przy ustalonej sztywności statycznej (j_s) noża i imaka nożowego. Określono także próg czułości całości układu siłomierza oraz błąd wnoszony przez histerezę pomiarową [11]. Wykazano także, jak znaczny wpływ na krzywe wzorcowania ma zastosowana metoda wzorcowania, szczególnie gdy obarczona jest zjawiskami histerezy. Po licznych próbach zastosowano oryginalną metodę wzorcowania siłą wypadkową w układzie pozbawionym tarć i luzów. Otrzymana w tych

warunkach wartość błędu względnego przy pomiarze sił skrawania o charakterze statycznym z uwzględnieniem błędu niestabilności (badania grupy a) wyniosła ostatecznie

$$\Delta_{pom.st.} = \pm 4\%.$$

Badania grupy c) doprowadziły do pełnego określenia charakterystyki dynamicznej siłomierza. Przy ustalaniu metody badań wykorzystano tutaj zalecenia podane w teorii regulacji [8] i dynamice [9]. Dla ustalenia charakterystyki amplitudowo-fazowej poddano układ pomiarowy badaniu sygnałem impulsowym i sinusoidalnym. Sygnał impulsowy realizowano udarem wykonywanym w sposób specjalny, zaś sygnał sinusoidalny generatorem mechanicznym, a dla wyższych częstotliwości generatorem elektronicznym.

Amplitudowo-częstotliwościową charakterystykę siłomierza przedstawiono na rys. 4. Częstotliwość rezonansowa tłumiona siłomierza wynosiła $\omega_r \approx 6280$ rd/s ($\sim$ 1000 Hz), a tłumienie względne $d \approx 0{,}18$. Stąd łatwo już wyliczyć wartość sztywności dynamicznej

$$j_d = j_s \sqrt{\left(1 - \frac{\Omega^2}{\omega_r^2}\right)^2 + \left(0{,}36\,\frac{\Omega}{\omega_r}\right)^2}$$

gdzie:

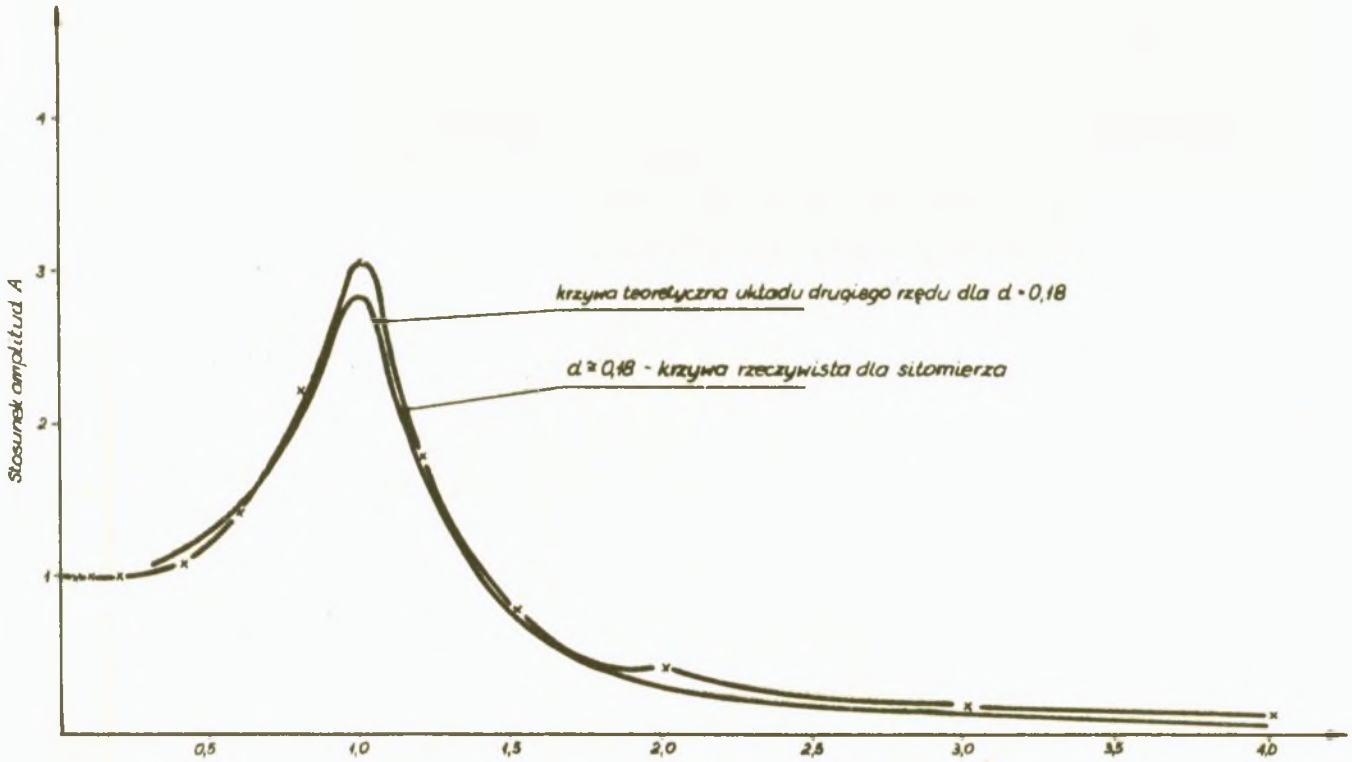
j_s - sztywność statyczna

Ω - częstotliwość siły wymuszającej.

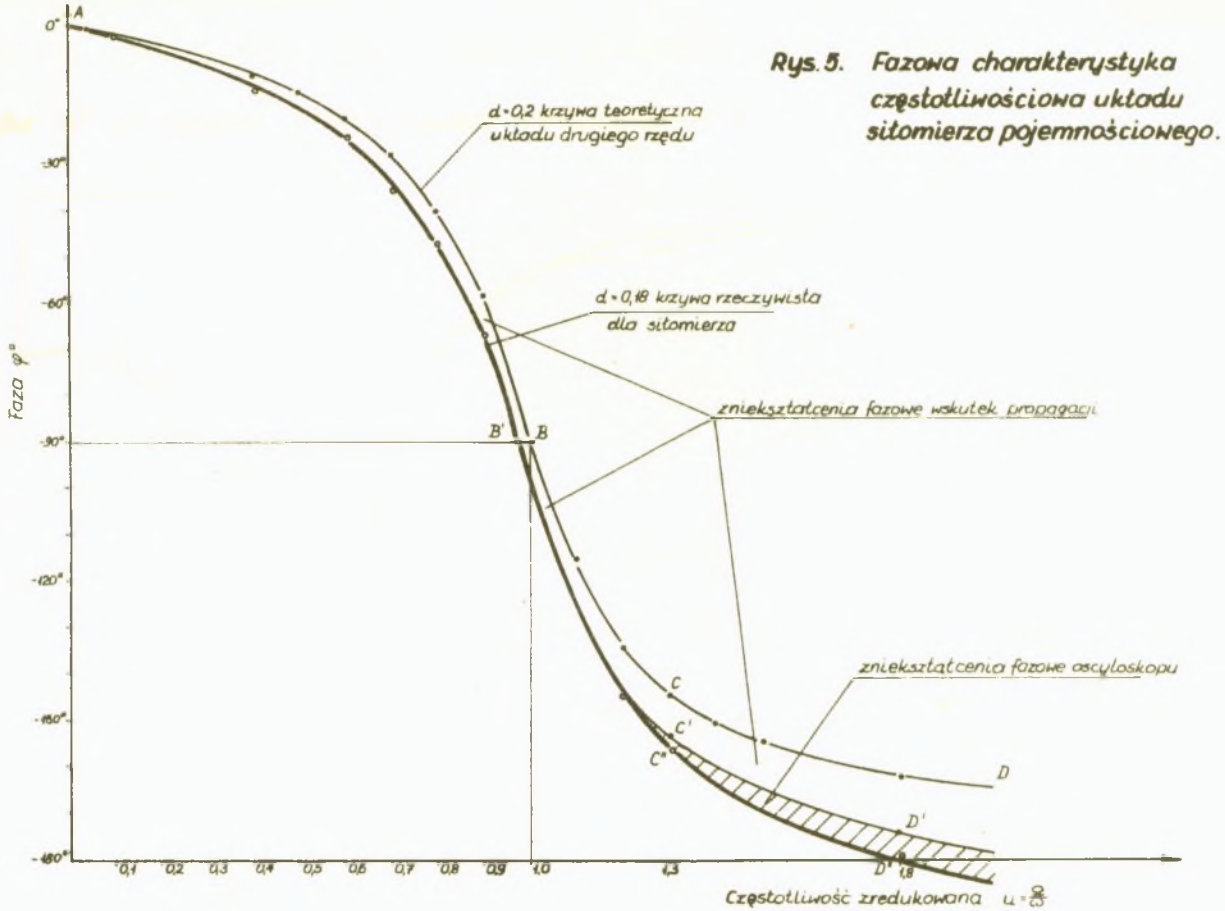
Fazową charakterystykę częstotliwościową siłomierza przedstawiono na rys. 5.

Następnie sporządzono wykres przepustowości siłomierza w płaszczyznie Nyquista i wyprowadzono zależność matematyczną transmitancji $H_{(s)}$ w postaci operatorowej

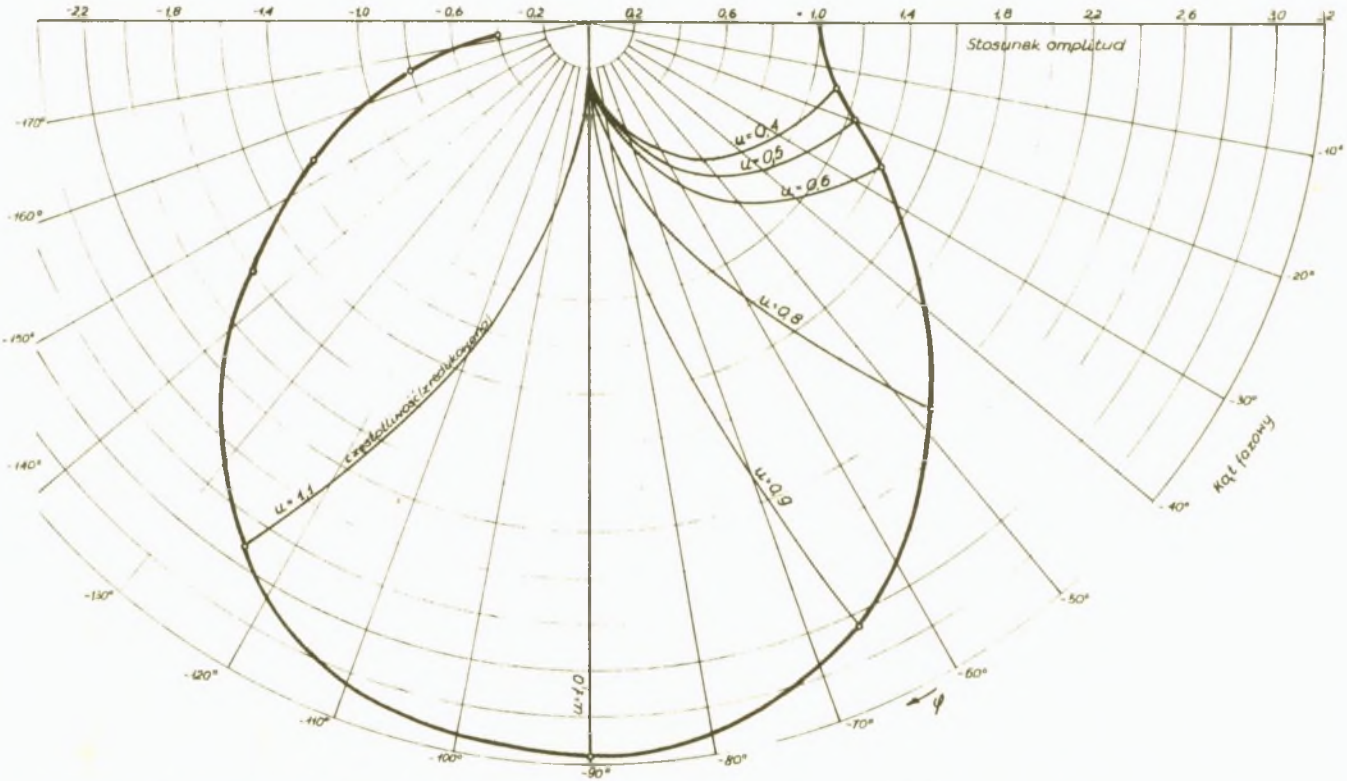
$$H_{(s)} = \frac{1 \cdot 0{,}29}{s^2 + 394s + 10^{-6}},$$



Rys. 4. Amplitudowa charakterystyka częstotliwościowa układu siłomierza pojemnościowego



Rys. 5. Fazowa charakterystyka częstotliwościowa układu siłomierza pojemnościowego



Rys. 6. Przepustowość układu siłomierza pojemnościowego w płaszczyznie Nyquista

gdzie:

s - parametr transformacji Laplace'a.

Tak więc siłomierz przedstawia układ dynamiczny drugiego rzędu z tłumieniem.

Wykres przepustowości przedstawiono na rys. 6.

Czas odpowiedzi t_{odp} siłomierza obliczono przyjmując dopuszczalny błąd $\pm$ 5% wartości ustalonej. Wynosi on

$$t_{odp} = \frac{\ln 0{,}05}{-2\pi\, d\, f_r} \approx 2{,}64 \text{ ms},$$

gdzie:

f_r - częstotliwość rezonansowa Hz.

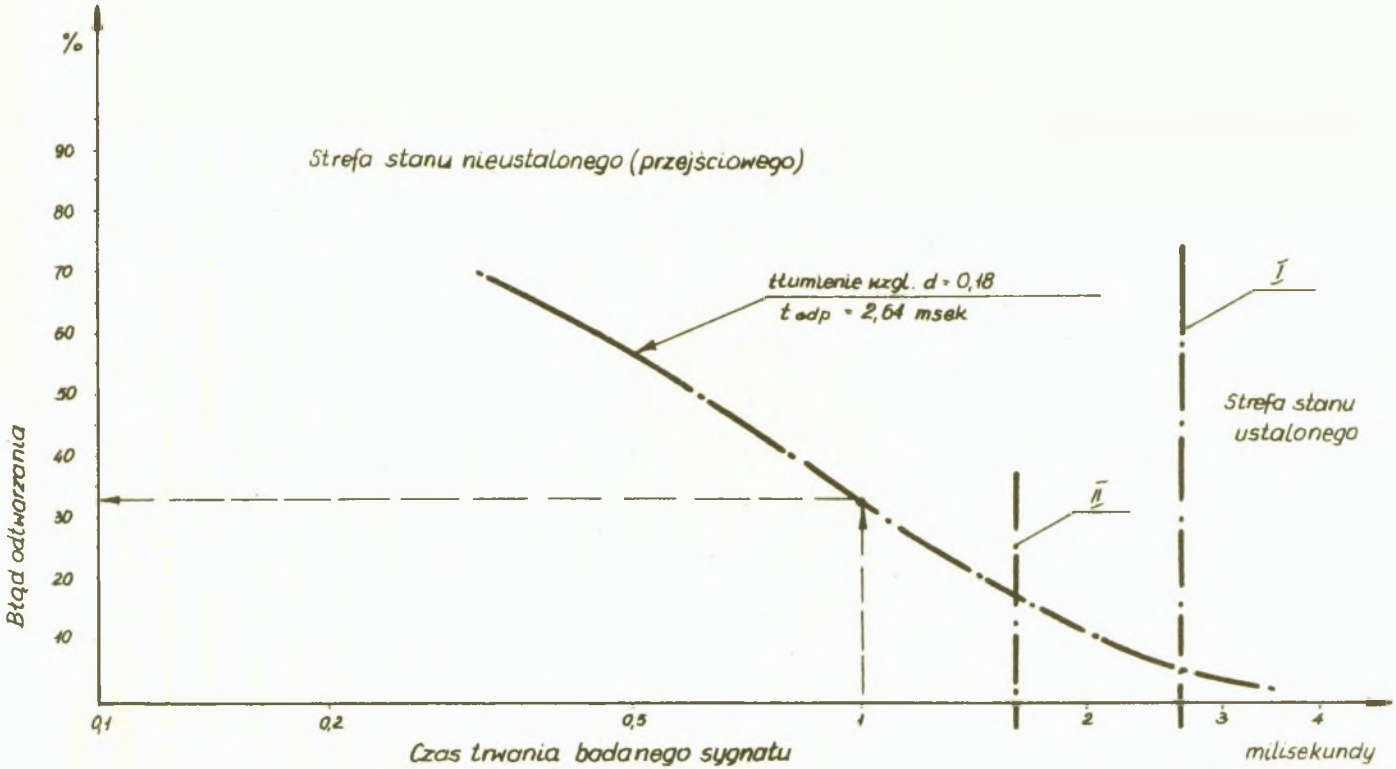
Jeżeli założyć, że błąd pomiaru zmiennej siły skrawania (błąd amplitudy), wprowadzany przez własności dynamiczne siłomierza, nie może przekroczyć na przykład 10%, to w oparciu o wykres przepustowości na rys. 6 można określić częstotliwość graniczną, do jakiej wolno stosować dany siłomierz.

W przypadku badanego siłomierza pojemnościowego częstotliwość ta wynosi

$$f_{gr} \approx 400 \text{ Hz}$$

o ile sygnał ma charakter sinusoidalny. Amplituda sygnału sinusoidalnego o częstotliwości na przykład 600 Hz będzie oczywiście także zmierzona przez ten siłomierz, jednak już z błędem ok. 40%.

Dla sygnałów różniących się od sinusoidalnego o dokładności pomiaru decyduje czas narastania mierzonego sygnału, zaś ten nie powinien być mniejszy od t_{odp} siłomierza. Dla określenia błędu pomiaru amplitudy sygnałów trwających krócej od t_{odp} badanego siłomierza pojemnościowego sporządzono wykres na rys. 7. Jak widać



Rys. 7. Błąd wnoszony przez czas trwania sygnału w msek. w stosunku do t_{odp} badanego układu siłomierza pojemnościowego

sygnał trwający na przykład 1 m s będzie wskazany przez siłomierz z błędem amplitudy już ok. 33%.

A zatem w oparciu o odpowiednio przygotowane wykresy będzie można stosunkowo szybko określić, z jakim błędem prowadzone są badania siły skrawania. Wartość tego błędu będzie - jak widać - różna w zależności od częstotliwości i czasu narastania badanej siły skrawania.

W n i o s k i

Przeprowadzone badania pozwalają na wysnucie bardziej ogólnych wniosków, dotyczących każdego siłomierza, stosowanego do badań siły skrawania przy toczeniu, o ile siłomierz taki przedstawia element oscylacyjny drugiego rzędu z tłumieniem. W pierwszym rzędzie prowadzący badania sił skrawania przy toczeniu musi zdecydować, czy interesuje go wyłącznie składowa stała (wartość średnia) siły skrawania, czy też składowa stała i zmienna tej siły. W obu przypadkach potrzebna jest oczywiście znajomość charakterystyki układu siłomierza.

W przypadku badania tylko składowej stałej siły skrawania wystarczy, jeśli układ siłomierza będzie poddany próbom w stanach wymienionych w pktach a i b. Prowadzi to do określenia pełnej charakterystyki statycznej układu pomiarowego, co po uwzględnieniu błędu interpolacyjnego [11] odczytywania wykresów wzorcowniczych da pojęcie o wartości błędu pomiaru siły skrawania. Biorąc pod uwagę rozwiązania techniczne obecnie stosowanych w kraju siłomierzy do badania wartości średniej (składowej stałej) siły skrawania oraz zakładając zastosowanie odpowiednich metod i urządzeń do wzorcowania przy pieczołowitej interpolacji wykresów wzorcowniczych można przyjąć, że dokładność tego rodzaju pomiarów można utrzymać w granicach

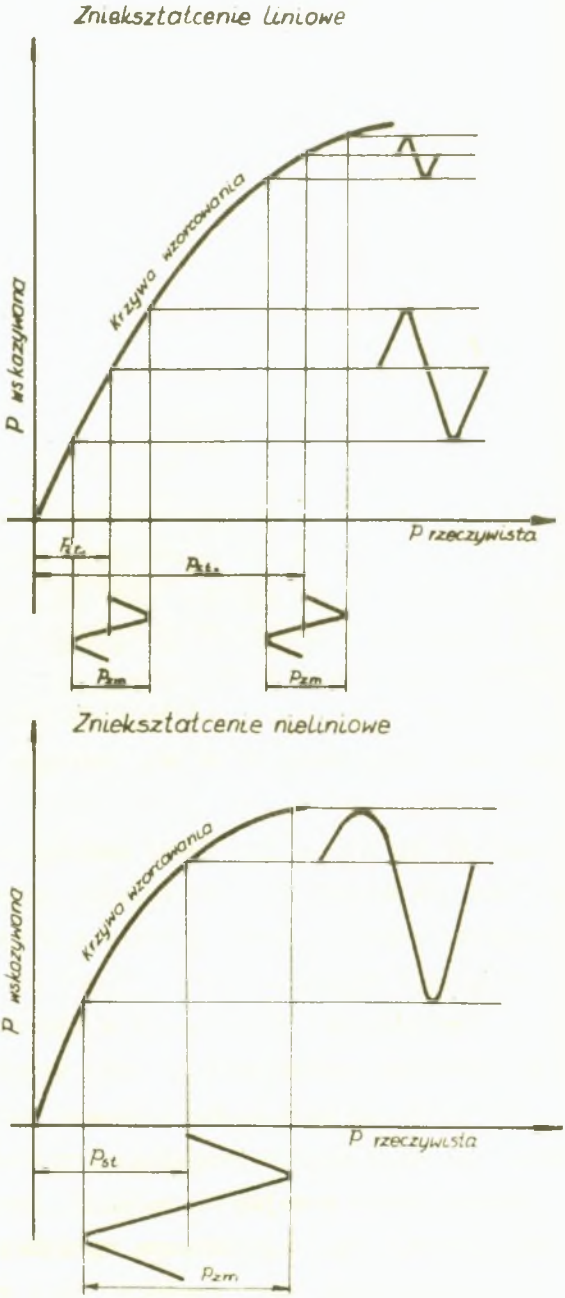
$$\Delta_{\Sigma st} = \pm 2 \div 4\%.$$

Jednakże czas trwania badanego sygnału (siły skrawania) musi być kilkakrotnie dłuższy od czasu odpowiedzi t_{odp} układu pomiarowego tak, aby pomiar dotyczył stanu ustalonego badanego zjawiska. Ponieważ zaś dany konkretny siłomierz poddany był badaniom tylko dla stanów podanych w punktach a i b, to oczywiście nie będzie znana szczegółowa wartość t_{odp}. Można jednak z dużym prawdopodobieństwem twierdzić, że jeżeli dla obróbki toczeniem czas trwania badanego sygnału będzie większy jak 1 s, to jest to wystarczający okres, aby układ pomiarowy i układ O-P-N osiągnęły przedział stanu ustalonego. Natomiast interpretowanie wskazań mierników lub zapisu rejestratorów dla okresu stanu przejściowego badanego zjawiska obarczone będzie bardzo poważnym błędem, a może nawet będzie niedopuszczalne (patrz rys. 7).

Ogólnie więc należy stwierdzić, że charakterystyka statyczna danego układu pomiarowego sił skrawania ważna jest wyłącznie dla stanów ustalonych przebiegu tejże siły.

W przypadku badania składowej stałej (wartości średniej) i składowej zmiennej (lub tylko składowej zmiennej) siły skrawania koniecznym jest układ siłomierza poddać badaniom w stanach wymienionych w punktach a, b i c, to znaczy należy określić błąd niestabilności oraz pełną charakterystykę statyczną i dynamiczną układu siłomierza. Jeżeli krzywe uzyskane w wyniku wzorcowania statycznego będą znacznie odbiegały od linii prostej, to siłomierz taki nie będzie nadawał się do pomiarów składowej zmiennej siły skrawania, ponieważ wprowadzi znaczne zniekształcenia liniowe i nieliniowe [10] badanych przebiegów w sensie pokazanym na rys. 8.

W przypadku prostoliniowego przebiegu krzywych wykresu wzorcowania statycznego należy przejść do badania charakterystyki dynamicznej układu siłomierza. Najprostszym sposobem jest użycie sygnału impulsowego, na przykład w postaci udaru wykonanego w sposób przemyślany. Zarejestrowany przez układ pomiarowy siłomierza



Rys. 8. Wpływ nieliniowości krzywej wzorcowania na wskazania

przebieg jego odpowiedzi na sygnał impulsowy daje możność łatwego określenia takich cech, jak:

- częstotliwość rezonansowa z tłumieniem (ω_r),
- logarytmiczny dekrement drgań (δ),
- czas trwania stanu przejściowego (t_{odp}),
- częstotliwość graniczna stosowania siłomierza (f_{gr}).

Liniowość charakterystyki dynamicznej układu pomiarowego siłomierza najlepiej sprawdzać działaniem sygnału sinusoidalnego, dobierając jego różne częstotliwości. Przy tej okazji należy zbadać charakterystykę fazową układu siłomierza. W oparciu o uzyskane dane należy następnie wykonać wykres przepustowości siłomierza (rys. 6), który daje informacje o zniekształceniach fazy i amplitudy w funkcji częstotliwości. Pozwala on zatem na dobranie takiego zakresu pasma przenoszenia siłomierza, aby błąd pomiaru składowej zmiennej siły skrawania utrzymać w określonych granicach, nie mniejszych jednak jak

$$\Delta_{\Sigma st} \approx \pm 4\%.$$

Na podstawie przeprowadzonych badań siłomierza pojemnościowego można stwierdzić, że praktycznie utrzymanie dokładności pomiaru składowej zmiennej siły skrawania w granicach błędu mniejszego jak $\pm$ 10% jest bardzo trudne.

Wszystko co powiedziano ważne jest dla przypadku, gdy badany przebieg siły skrawania charakteryzuje się jedną wyraźną częstotliwością o przebiegu bliskim sinusoidalnemu.

Jeżeli przebieg nie jest sinusoidalny, to pojawiają się jego wyższe harmoniczne, interferujące z sygnałem podstawowym, powodując pracę siłomierza w zakresie stanów nieustalonych. W takim przypadku jedynym wyjściem jest napisanie funkcji przejścia dla układu siłomierza, na przykład w postaci operatorowej $H_{(s)}$.

W oparciu o "słownik operatorowy" [8] można dla każdej funkcji operatorowej znaleźć odpowiadającą jej funkcję czasową, a wtedy dla dowolnego sygnału na wejściu i dowolnego czasu t można określić przebieg sygnału wyjściowego. Inaczej mówiąc, dla każdego przebiegu siły skrawania otrzymanego w zapisie, na przykład rejestratora, będzie można określić prawdziwą wartość siły skrawania działającej na nóż. Metoda ta, aczkolwiek teoretycznie poprawna, jest trudna i dlatego, jak na razie, nie znalazła zastosowania w interpretowaniu wyników badań zmienności siły skrawania przy toczeniu.

LITERATURA

[1] Berthold H.: Das Messen der Schnittkräfte beim Drehen, Maschinenbautechnik Nr 4/1961.

[2] Ferraresi D.: Dynamische Schnittkraftmessungen beim Drehen, Der Maschinenmarkt Nr 97/1961.

[3] Poletika M.F.: Prybory dla izmierenia sił riezania i krutiaščych momentow, Maszgiz 1963.

[4] Kegg R.L.: Cutting dynamics in machine tool chatter, Trans. ASME - Nr 4/1965.

[5] Mayer K.: Schnittkraftmessungen an der rotierenden Fräserschneide, Diss., Dokt.-Ing. Universität Suttgart 1968.

[6] Lissner H.J.: Einfluss der Schnittkraft auf die Gestaltabweichungen beim Zahnflankenschleifen, Maschinenbautechnik Nr 1/1969.

[7] Wójcikowski J.: Analiza dokładności wskazań siłomierza pojemnościowego do badania sił skrawania, Praca doktorska, Politechnika Śląska 1968.

[8] Gille J.C.: Serwomechanizmy, PWN Warszawa 1961.

[9] Ziemba S.: Analiza drgań t. I, PWN Warszawa 1957.

[10] Łapiński M.: Miernictwo elektryczne WNT Warszawa 1968.

[11] Metrologia, Nazwy i określenia PN/N-02050 - projekt.

ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИНАМОМЕТРА НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СИЛЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ

Р е з ю м е

Описано исследования динамической характеристики измерительной системы силы резания при токарной обработке. Система была составлена из: ёмкостного датчика, генератора высокой частоты, фазового дискриминатора и электронного осцилоскопа.

Исследования показали, что такой динамометр представляет собой колебательную систему второго ряда с затуханием. Подано динамическую характеристику измерительной системы и вывод о её влиянии на погрешность измерения постоянной и переменной составляющих силы резания.

INFLUENCE OF CUTTING FORCE DYNAMOMETERS UPON THE TEST RESULTS OF CUTTING FORCE BY TURNING

S u m m a r y

Tests were made in order to check the dynamic charakteristics of a set measuring the cutting force by turning. The tested set consists of capacity gage, high frequency generating unit, phase rectifier, and current oscillograph. The researches indicate that the tested dynamometer represents an oscillating system of the second order, with damping.

As results are given the dynamic charakteristics of the cutting force dynamometer, and in conclusion the influence of them upon errors of the measured constant and variable components of the cutting force.