

dr inż. Przemysław SIEMIŃSKI  
[p.sieminski@simr.pw.edu.pl](mailto:p.sieminski@simr.pw.edu.pl)  
Politechnika Warszawska

dr inż. Jarosław MAŁKIŃSKI  
[jarmal@op.pl](mailto:jarmal@op.pl)  
Politechnika Warszawska

## **BADANIE WPŁYWU SZEROKOŚCI SKRAWANIA I PRĘDKOŚCIĄ POSUWU NA WARTOŚĆ SIŁ SKRAWANIA PODCZAS FREZOWANIA FREZAMI PALCOWYMI**

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki badań sił skrawania podczas frezowania frezami palcowymi na obrabiarkach CNC. Analizowano wpływ prędkości posuwu oraz szerokości i kierunku frezowania na wartości sił skrawania w kierunkach X i Y (przy stałej głębokości frezowania). Jest to robione celem badań wyznaczenie parametrów opisujących zależność posuwu i obciążenia narzędzia ww. siłami. Dzięki temu pojawia się możliwość automatycznego poprawiania kodu NC z użyciem symulacji obróbki w systemie 3D CAD, a to pozwoli na skrócenie czasu obróbki.

**Słowa kluczowe:** siła, badanie, frezowanie, CNC, kod NC

## **THE ANALYSIS OF CUTTING FORCES ON CNC MILLING MACHINE WITH ENDMILL TOOLS WHEN CHANGE THE FEED RATE AND WORKING ENGAGEMENT**

**Summary:** The article presents the results of the analysis of cutting forces on CNC milling machine. The cutting of material took place at constant cutting depth because we was analyzed rough milling only. The aim of the research was description the interaction between the feed rate and working engagement when the cutting forces is constant. Thanks to the fact, it appears an ability to easily modify the NC code with 3D CAD simulation of milling, so to shorten the processing time.

**Keywords:** force, testing, milling, CNC, NC code

### **1. Wprowadzenie**

Frezowanie jest jedną z najpopularniejszych metod kształtowania oprzyrządowania technologicznego oraz makiet i prototypów, a także części maszyn w obróbkach małoseryjnych. Ze względów technologicznych wytwarzanie danego przedmiotu zaczyna się od obróbki zgrubnej, a następnie prowadzone są obróbki kształtująca i wykończeniowa. Na frezarkach CNC obróbki zgrubne prowadzone są najczęściej frezami palcowymi. W systemach 3D CAM podczas opracowywania takich obróbek, technolog-programista określa strategię obróbki i geometrię narzędzia oraz wiele parametrów technologicznych. Najważniejszymi są prędkość skrawania, posuw oraz głębokość i szerokość skrawania. Po wygenerowaniu dla tych obróbek programów

obróbkowych (kodów NC), wyżej wymienione parametry są do nich wprowadzane.

Najczęściej obróbki zgrubne frezami palcowymi są realizowane połową szerokości narzędzia i ze stałą głębokością skrawania (jeśli pozwala na to kształt przedmiotu obrabianego). Jeśli stosuje się domyślne ustawienia systemu CAM, to każde robocze przejście narzędzia w obróbce zgrubnej jest opisane tą samą wartością posuwu, którą wprowadził programista. Jest to niezależne od aktualnie skrawanej szerokości lub głębokości skrawanej, czyli nie jest brane pod uwagę obciążenie narzędzia w danym miejscu obróbki. W większości systemów 3D CAM można dodatkowo określić osobne wartości posuwu dla wejść narzędzia w materiał i dla ruchów wgłębnych. Reszta ruchów roboczych jest traktowana w ten sam sposób.

Jeżeli obrabiana geometria jest bardziej skomplikowana, to obróbka zgrubna generuje ścieżki w taki sposób, że w narożach szerokość skrawania przekracza 50% średnicy narzędzia. Powoduje to podczas obróbki skokowy wzrost obciążenia narzędzia i może być powodem jego złamania. Natomiast wiele ostatnich przejazdów na danej warstwie odbywa się z szerokościami znacznie mniejszymi niż z założoną globalnie połową narzędzia. Te ścieżki są generowane w systemie CAM w celu pozostawienia dla obróbek wykończeniowych równego naddatku w postaci schodków oraz równego odsunięcia (offsetu) od docelowej geometrii. Takie dodatkowe przejścia „wyrównujące naddatek” w ramach obróbki zgrubnej są w wielu systemach 3D CAM realizowane tą samą prędkością posuwu, co główne przejścia założoną połową średnicą narzędzia. Skrawanie małą szerokością narzędzia (nawet rzędu kilku procent średnicy) przy niezmienniej wartości posuwu oznacza niepełne wykorzystywanie możliwości obróbki, a więc niepotrzebne wydłużenie czasu frezowania zgrubnego, co powoduje wzrost kosztów produkcji.

## **2. Możliwości poprawienia standardowej obróbki zgrubnej.**

Przedstawione powyżej problemy z wydajnością standardowych obróbek zgrubnych generowanych w systemach 3D CAM można by poprawić przez zastosowanie zmiany prędkości posuwu w zależności od aktualnie skrawanej szerokości materiału. Prawdopodobnie właśnie takie rozwiązanie jest od pewnego czasu wprowadzane do różnych komercyjnych systemów 3D CAM m.in. w Mastercam (od wersji X), Siemens NX CAM (bodajże od wersji 7.5) i kilku innych. Wymaga to jednak generowania programów obróbkowych w tych systemach. Samodzielny kod NC można natomiast automatycznie poprawiać (optymalizować pod względem wydajności obróbki) w module OptiPath znanego, ale i drogiego, systemu Vericut.

Innym rozwiązaniem problemu z wydajnością standardowych obróbek zgrubnych jest modyfikacja ścieżki narzędzia na etapie jej generowania w systemie 3D CAM. Takie rozwiązania są stosowane w różnych systemach m.in.: analiza kąta opasania narzędzia w systemie Surfcam (technologia TrueMill), podobna w systemie „ZW3D CAD/CAM” [10], czy ścieżki trochoidalne [11] (np. w obróbkach zgrubnych systemu EdgeCAM). Te systemy modyfikują ścieżki narzędzi w taki sposób, aby nie została przekroczona wartość

szerokości skrawania jaką ustalił programista (najczęściej w obróbkach zgrubnych jest to połowa średnicy freza). Przy obróbkach kształtów bardziej skomplikowanych (np. gniazda form) ze względów geometrycznych nie jest możliwe jednak wygenerowanie takich ścieżek, aby we wszystkich miejscach obróbka była stałą szerokością. Wtedy przedmiot obrabiany jest małymi szerokościami freza palcowego, co przy stałej wartości posuwu jest stratą czasu.

Wobec powyższego w niniejszym artykule zaproponowano metodę automatycznego poprawiania kodu NC z wykorzystaniem jednego z systemów 3D CAD. W systemie tym jest prowadzona symulacja obróbki skrawaniem, podczas której analizowana jest objętość skrawanego w jednostce czasu materiału. Symulacja obróbki odbywa się poprzez opracowany przez autorów program, który steruje wirtualnym środowiskiem systemu 3D CAD, podobnie jak przy wirtualnym nacinaniu uzębień stożkowych [7]. Symulacja wykorzystuje standardowe funkcje modelowania bryłowego (łącznie z odejmowaniem brył przy pomocy algebry Boole'a) oraz narzędzia do analizy geometrii. Sposób działania programu do tej symulacji został opisany w osobnym artykule [6].

Aby automatyczne poprawienie kodu NC było możliwe, niezbędne jest wyznaczenie zależności pomiędzy szerokością skrawania i prędkością posuwu podczas frezowania, w taki sposób, aby obciążenie narzędzia było jednakowe (przynajmniej w pewnym zakresie np. +/-10%). Posiadanie takiej zależności pozwoliłoby zastosować automatyczną metodę poprawiania wygenerowanego już kodu NC poprzez dopisywanie w niektórych blokach nowych wartości posuwu (np. o ile go zmniejszyć gdy szerokość skrawania przekracza połowę średnicy narzędzia, albo o ile go zwiększyć gdy szerokość skrawania jest mniejsza niż zadeklarowana). W tym celu program w niektórych miejscach rozdziela długie ścieżki liniowe ruchu roboczego na mniejsze i w niektórych dopisuje nową wartość posuwu.

### 3. Cel badań i założenia

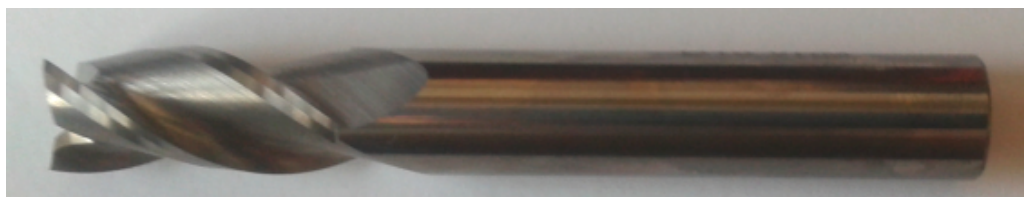
Celem badań było zbadanie i wyznaczenie zależności pomiędzy szerokością skrawania i prędkością posuwu podczas frezowania przy stałym obciążeniu narzędzia. Do tego określono następujące założenia:

- 1) modyfikacja kodu NC ma być stosowana do standardowych obróbek zgrubnych realizowanych typowymi frezami palcowymi tzn. ze stałą głębokością skrawania (ruchy robocze równoległe do płaszczyzny XY);
- 2) badania mają mieć zastosowanie do automatycznego poprawiania plików obróbkowych z kodami ISO (kodami G); na obecnym etapie do programu są wczytywane, analizowane i poprawiana wyłącznie linie zawierające funkcję G1 (interpolacja liniowa);
- 3) kod NC może być generowany w komercyjnych programach 3D CAM lub pisany przez programistę ręcznie;
- 4) zakłada się, że programista-technolog wprowadza poprawne parametry skrawania (głębokość skrawania, obroty wrzeciona definiujące prędkość skrawania, posuw) dla ww. obróbki zgrubnej konkretnego materiału realizowanej konkretnym frezem palcowym połową średnicą narzędzia; poprawne parametry skrawania oznaczają, że są wyznaczone wg zaleceń producentów narzędzia lub są wynikiem doświadczeń własnych technologa;
- 5) prowadzono badania wartości sił skrawania przy frezowaniu z następującymi wartościami posuwu: 50, 100, 150, 200 mm/min. dla połowy szerokości skrawania oraz dla frezowania pełnego;
- 6) program nie stosuje zmiany prędkości obrotowej wrzeciona;

Badania dotyczą obróbek zgrubnych, kiedy obróbka odbywa się raz przeciwbieżnie, a raz współbieżnie, przy czym do wyznaczenia średniej wartości siły skrawania pomijano chwilowy wzrost jej wartości przy wchodzeniu w materiał narzędzia w obróbce współbieżnej.

#### 4. Opis badań sił skrawania

Do badań użyto kilku frezów palcowych (trzępieniowych) wykonanych w całości z drobnoziarnistych węglików spiekanych (VHM), które zostały wyprodukowane przez firmę „Integra Tools” wg DIN 6527. Średnica robocza frezów wyniosła  $d=10$  mm. Narzędzia miały trzy ostrza skrawające, a ich długość całkowita wynosiła 70 mm, długość robocza 22 mm, średnica chwytu 10 mm (h6), kąt linii śrubowej  $\lambda=30^\circ$ , promieniowy kąt natarcia  $\gamma=10^\circ$ . Producent podaje, że mogą one skrawać stal konstrukcyjną o wytrzymałości na rozciąganie w zakresie  $R_m$  1100 – 1400 N/mm<sup>2</sup> i o maksymalnej twardości 45 HRC. Przykładowe zdjęcie takiego narzędzia pokazano na rys. 4.1.



Rys. 4.1 Widok jednego z frezów palcowych stosowanych do pomiarów sił skrawania

Materiałem obrabianym była zwykła stal konstrukcyjna St3 (o zawartości węgla ok. 0,22%, granicy plastyczności  $Re = 215$  MPa, granicy doraźnej wytrzymałości  $Rm = 375$  MPa oraz twardości HB 120) [PN-88/H-84020], której nowym oznaczeniem jest S215. Dla takiego materiału przy obróbce rowków o głębokościach równych połowie średnicy narzędzia ( $a_p = 5$  mm) oraz szerokościach skrawania realizowanych całym narzędziem, dla narzędzi jak wymieniono powyżej, producenci narzędzi zalecają stosować następujące maksymalne wartości prędkości skrawania  $v_c=60\div 80$  m/min [8], a nawet  $100\div 150$  m/min [5]. Inni producenci podają, że dla narzędzi w wersji niepowlekaney zmniejszyć prędkość skrawania o 25-30% [1]. W przypadku frezów w wersjach długich powinno się zmniejszyć prędkość skrawania o ok. 40%, a posuw o 20%. Zdecydowano przyjąć do badań prędkość skrawania o wartości  $v_c=40$  m/min, wobec tego prędkość obrotowa narzędzia powinna wynosić:

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot d} = \frac{40 \cdot 1000}{3.14 \cdot 10} = 1274 \text{ obr/min} \quad (4.1)$$

gdzie:

$d$  – średnica narzędzia [mm],

$v_c$  – prędkość skrawania [m/min],

$n$  – prędkość obrotowa narzędzia [obr].

Do badania sił skrawania zdecydowano się zastosować lekko zmniejszoną wartość prędkości obrotowej wrzeciona narzędziowego równą  $n=1000$  obr/min. Zalecana prędkość posuwu na ostrze dla tych typów obróbek wynosi  $f_z=0,030\div 0,039$  mm/ostrze [8], co oznacza, że „minutowa” wartość prędkości posuwu wyniesie:

$$v_f = n \cdot z \cdot f_z = 90 \cdot 117 \text{ mm/min.} \quad (4.2)$$

gdzie:

$v_f$  – prędkość ruchu posuwowego [mm/min],

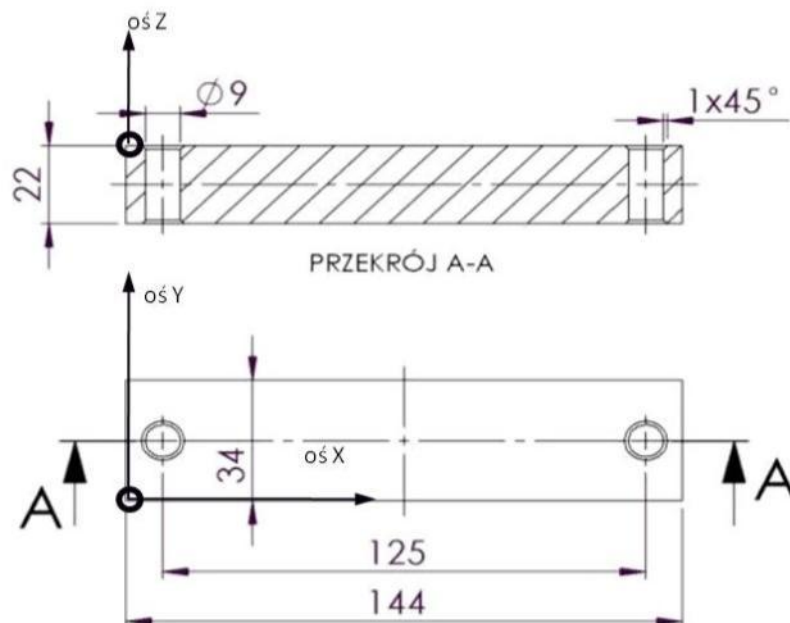
$n$  – prędkość obrotowa narzędzia [obr].

$z$  – liczba ostrzy skrawających

$n$  – prędkość obrotowa narzędzia [obr].

$f_z$  – prędkość ruchu posuwowego [mm/ostrze].

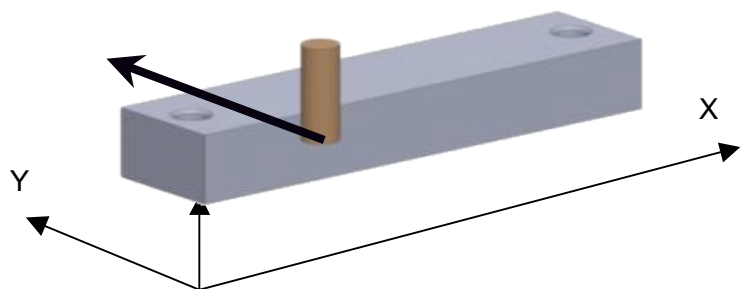
Przedmiot obrabiany podczas skrawania był wydajnie chłodzony z zewnętrznej wylewki cieczą na bazie wody. Na rys. 4.2 pokazano kształt próbek stosowanych do badań sił skrawania wraz z zaznaczonym układem osi i punktem zerowym do programowania obróbki. Natomiast na rys. 4.3 pokazano zastosowany kod NC, w którym kropkami oznaczono zmieniane parametry. Były to wartość współrzędnej X oznaczającą odległość od punktu zerowego punktu wejścia w materiał oraz wartość posuwu roboczego „F”.



Rys. 4.2 Kształt próbek stosowanych do badań sił skrawania wraz z zaznaczonym układem osi i punktem zerowym do programowania obróbki

```

MPF%001
N10 G90 G40
N20 G54 D200
N30 S1000 M3 T1
N40 G0 Z20
N50 X... Y-10
N60 Z-5
N70 G1 Y30 F...
N80 Z20
N90 M30
    
```

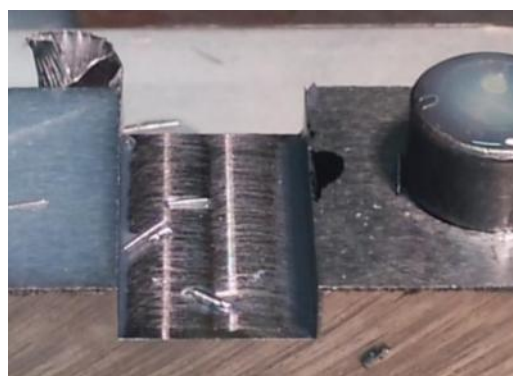


Rys. 4.3 Kod NC użyty do badań (kropkami oznaczono zmieniane parametry) oraz widok na symulację obróbki wykonaną w środowisku 3D CAD za pomocą programu rozwijanego przez autorów artykułu

Badania wykonano na pionowej, 3-osiowej frezarce AVIA FNF-40NA ze sterowaniem Pronum 640FC (rys. 4.4). Do pomiarów sił zastosowano siłomierz Kistler 9257BA, który został użyty przez Zakład Automatykacji, Obrabiarek i Obróbki Skrawaniem Instytutu Technik Wytwarzania Politechniki Warszawskiej ([www.cim.pw.edu.pl](http://www.cim.pw.edu.pl)). Z pomocą tego siłomierza realizowane były analizy sił skrawania podczas frezowania i toczenia [3]. W niniejszych badaniach przedmiot obrabiany zamontowano na siłomierzu przy pomocy dwóch śrub M8 (rys. 4.5).



Rys. 4.4 Frezarka AVIA FNF-30NA ze sterowaniem Pronum 640FC z zamontowanym siłomierzem Kistler 9257BA zastosowane do badań



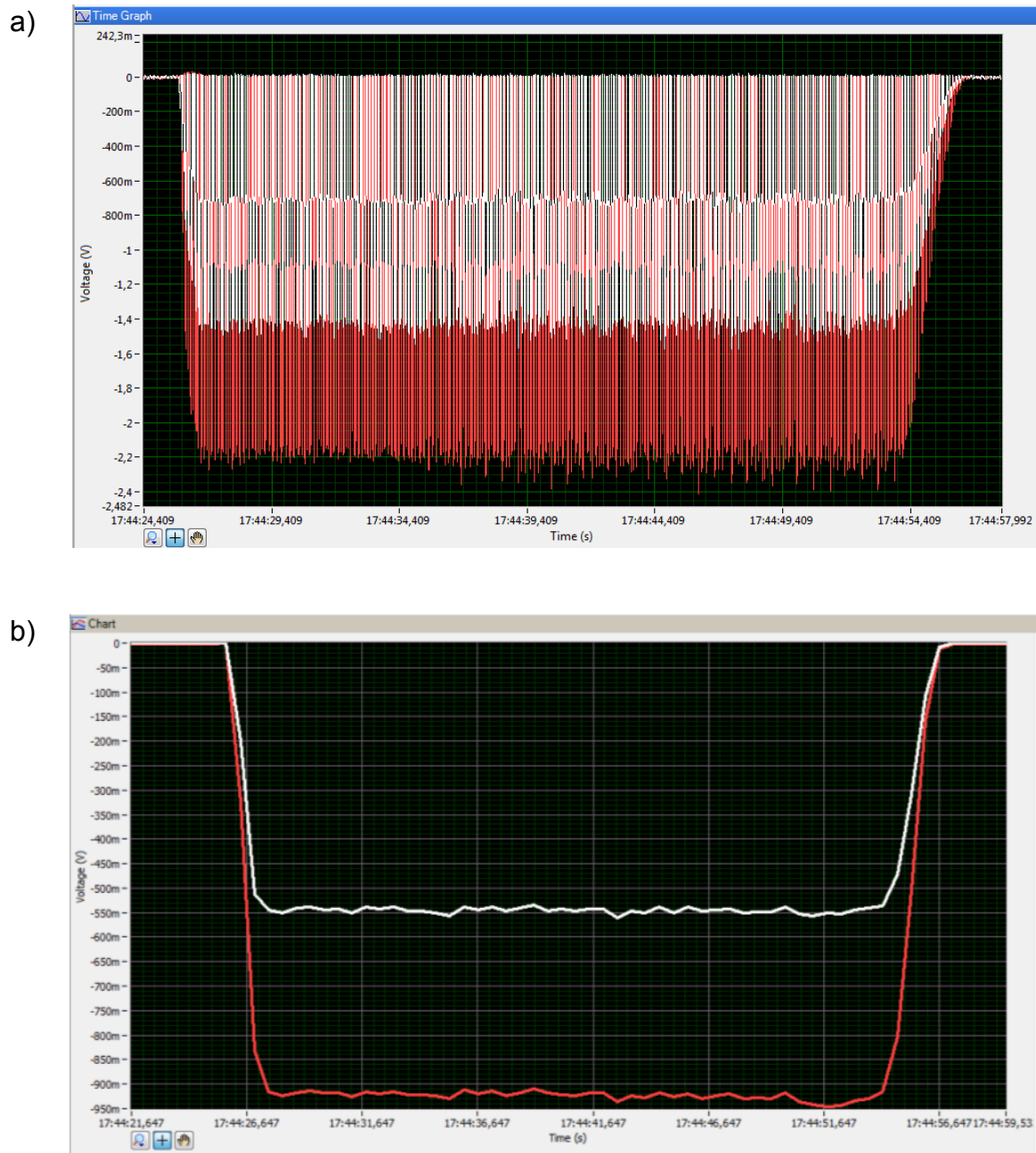
Rys. 4.. Widok na przedmiot obrabiany zamontowany na siłomierzu oraz zbliżenie na rowek wykonany frezem palcowym całą jego szerokością skrawania

Pomiary rejestrowano poprzez układ Kistler 5233A1 z zamontowanym wewnątrz filtrem 10 kHz. Rejestrację i obróbkę mierzonych sygnałów z siłomierza przeprowadzono za pomocą programu LabVIEW 2013 Signal Express na komputerze klasy PC poprzez 4-kanalową, 24-bitową kartę analogowo-cyfrową NI USB-9234 firmy National Instruments.

Uzyskiwane wartości sygnałów dla każdej z osi, ze względu na specyfikę obróbki (frezowanie), były bardzo zmienne (rys. 4.6a). Aby określić właściwe wartości siły skrawania zastosowano w oprogramowaniu rejestrującym dodatkowe filtry. Wykorzystano procedurę filtrowania zawartą w programie LabVIEW o nazwie „*amplitude and levels*”. Do obróbki sygnału zastosowano decymację (przekształcenie sygnału dyskretnego,

polegające na zachowaniu co m-tej próbki, a odrzuceniu pozostałych). Wygląd sygnału z rys. 4.6a po zastosowaniu filtrowania i decymacji przedstawiono na rys. 4.6b. Na podstawie tak uzyskanych wykresów ustalano wartość sił skrawania dla osi X i Y, a potem obliczano wartość wypadkową. Zebrane wyniki badania sił skrawania dla frezowania połową średnicy narzędzia przy różnych prędkościach posuwu przedstawiono na rys. 4.7.

Na podstawie przefiltrowanego sygnału określono średnią siłę skrawania (rys. 4.7). Następnie w celu zweryfikowania wyników pomiarów porównano je z wynikami obliczonymi analitycznie.

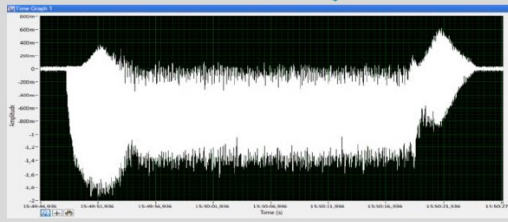


Rys. 4.6 Sygnał otrzymany podczas badań: a) mierzony przez układ pomiarowy (bliski rzeczywistemu), b) po zastosowaniu filtra „amplitude and levels” w programie LabVIEW

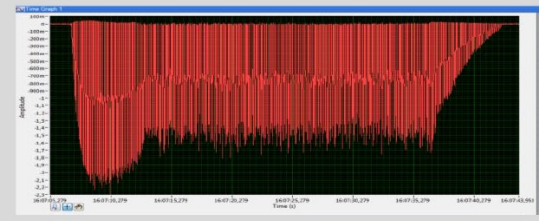
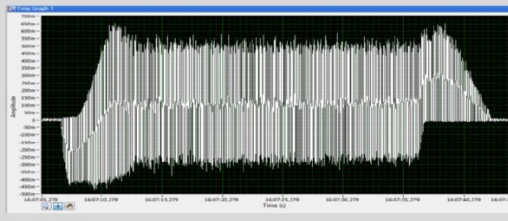
Nr próby, typ obróbki i jej parametry:

Wartości napięć w funkcji czasu uzyskane z siłomierza Kistler 9257BA, który został użyty przez Instytut Technik Wytwarzania Politechniki Warszawskiej. Wyniki są przeliczane wg przelicznika  $5mV=1N$ . dla osi X dla osi Y

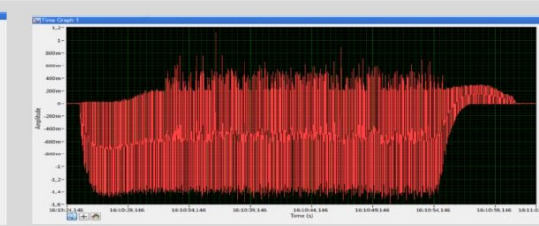
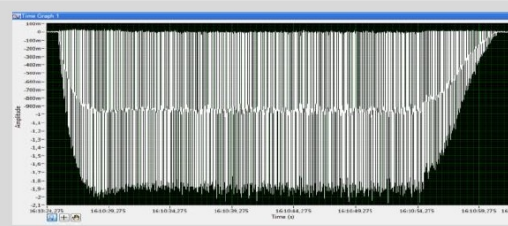
Próby: 1 (wykresy) i 2, 11, 12:  $a_e = 100\% d$  (frezowanie pełne)  $v_f = 50$  mm/min



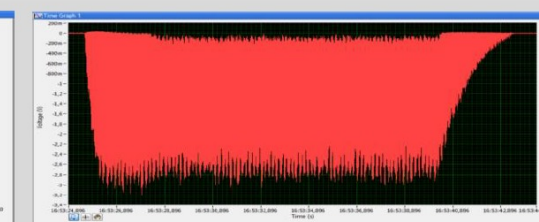
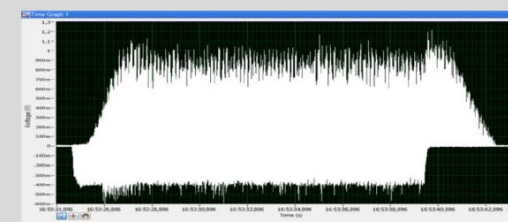
Próby: 3 (wykresy) i 5:  $a_e = 50\% d$  (frezowanie niesymetryczne)  $v_f = 50$  mm/min



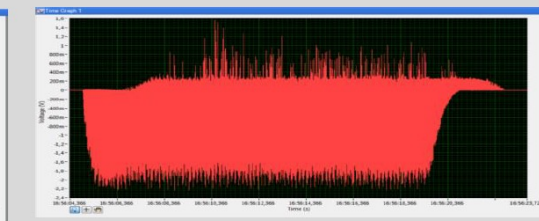
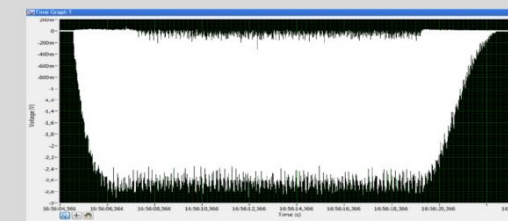
Próby: 4 (wykresy) i 6:  $a_e = 50\% d$  (frezowanie niesymetryczne przeciwbieżne)  $v_f = 50$  mm/min



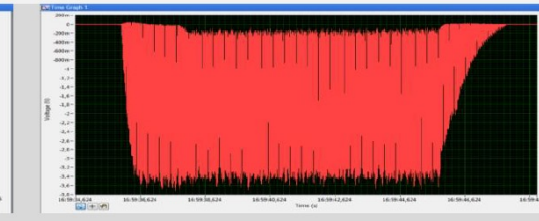
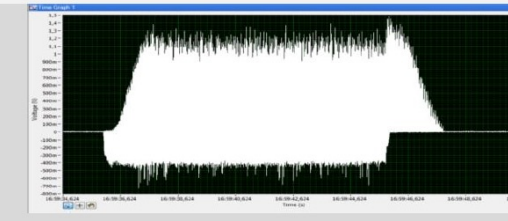
Próba 7:  $a_e = 50\% d$  (frezowanie niesymetryczne)  $v_f = 100$  mm/min



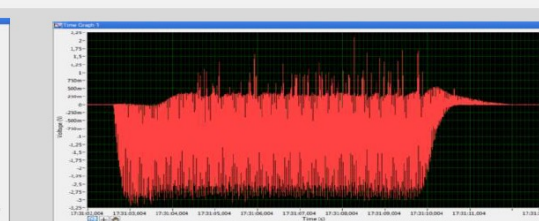
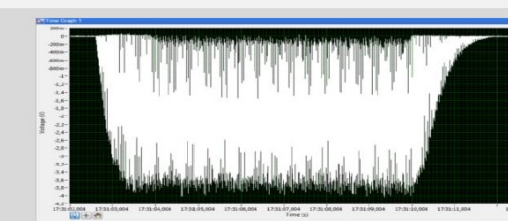
Próba 8:  $a_e = 50\% d$  (frezowanie niesymetryczne przeciwbieżne)  $v_f = 100$  mm/min



Próba 9:  $a_e = 50\% d$  (frezowanie niesymetryczne)  $v_f = 150$  mm/min

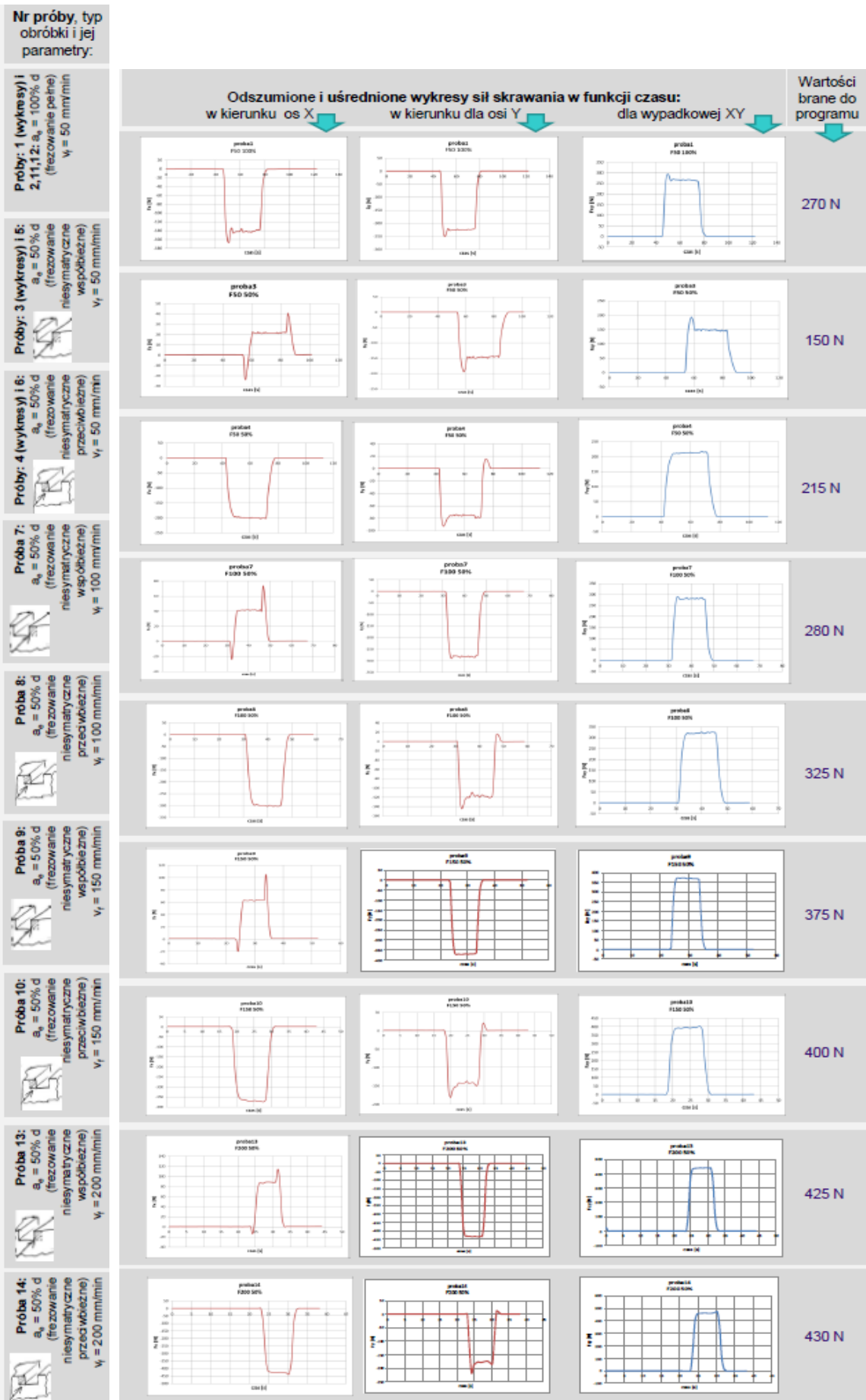


Próba 14:  $a_e = 50\% d$  (frezowanie niesymetryczne przeciwbieżne)  $v_f = 200$  mm/min



Rys. 4.7 Zebrane wyniki badania sił skrawania przy frezowaniu pełnym i połową średnicy narzędzia przy różnych prędkościach posuwu





Rys. 4.8 Zebrane wyniki uśrednionych wartości sił skrawania

## 5. Porównanie wyników badań z obliczeniami siły skrawania

Do obliczenia sił skrawania, posłużono się wzorami z „Poradnika mechanika“ [4], gdzie były dostępne parametry dla obrabianego materiału. W przypadku metod obliczeń podanych w podręczniku „Projektowanie obrabiarek“ [9] oraz „Poradnik frezera” [2] nie posiadano wystarczających danych potrzebnych do podanych tam wzorów. Wg metody opisaney w „Poradniku mechanika“ wzory na obliczenie sił przedstawiono poniżej a wyniki obliczeń zawarto w tab. 5.1.

$$F_1 = A \cdot k_{c1} \quad (5.1)$$

$$k_{c1} = \frac{k_{1.1}}{m_c} \cdot C_1 \cdot C_2 \quad (5.2)$$

gdzie:

$A$  – przekrój warstwy skrawanej

$k_{1.1}$  - wartość główna oporu właściwego skrawania

$m_c$  - stała materiałowa

$C_1$  - współczynnik korekcji wpływu prędkości skrawania

$C_2$  - współczynnik korekcji wpływu rodzaju obróbki

Tab. 5.1. Porównanie wyników badań sił skrawania z wynikami obliczeń

Dane	Wypadkowa siła skrawania	
	Badania doświadczalne	Obliczenia wg Poradnika mechanika
$a_e=100\% d$ $v_f=50\text{mm/min}$	270	425
$a_e=50\% d$ $v_f=50\text{mm/min}$	150	142
$a_e=50\% d$ $v_f=100\text{mm/min}$	280	252
$a_e=50\% d$ $v_f=150\text{mm/min}$	375	353
$a_e=50\% d$ $v_f=200\text{mm/min}$	425	448

Jak widać z porównania w przypadku frezowania połową średnicy freza  $a_e=50\%$  wyniki badań są dość zbliżone do obliczeń. Natomiast w przypadku frezowania całą średnicą  $a_e=100\%$  wyniki obliczeń dosyć znacznie odbiegają od wyznaczonych doświadczalnie. Widać też pewną zależność, jeżeli frezujemy połową średnicy freza otrzymujemy wartości sił mniej więcej o połowę mniejsze niż podczas frezowania całą średnicą freza. Przyjmując że normalnie narzędzie skrawa połową średnicy, wynika z tego że jeśli zacznie skrawać mniejszą częścią możemy zwiększyć prędkość ruchu posuwowego, a jeżeli większą częścią zmniejszyć prędkość posuwu aby zachować stałą w jednostce czasu objętość zbieranego materiału.

## 6. Wnioski

Przedstawione w artykule wyniki badań sił skrawania podczas frezowania frezami palcowymi na obrabiarkach CNC pokazują, że możliwe jest sterowanie wyłącznie wartością posuwu na obciążenie narzędzia (przy stałej głębokości frezowania). Jeśli uda się wyznaczyć parametry zależności posuwu i szerokości skrawania tak, aby obciążenie narzędzia będzie stałe, pozwoli to na automatyczne poprawianie kodu NC z użyciem symulacji obróbki w systemie 3D CAD, a to pozwoli na skrócenie czasu obróbki. Program sterujący systemem 3D CAD analizuje objętość wybieranego materiału w jednostce czasu. Jeśli objętość nagle się zwiększa, program zmniejsza posuw, natomiast gdy objętość się zmniejsza, program zwiększa posuw.

## Literatura

- [1] Dolfamex: materiały informacyjne producenta narzędzi skrawających oraz strona internetowa [www.dolfamex.com.pl](http://www.dolfamex.com.pl).
- [2] Górski E.: Poradnik frezera. Wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa 1999.
- [3] Jemielniak K., Nejman M., Śniegulska-Grądzka D.: Analityczne i numeryczne wyznaczanie granicy stabilności przy toczeniu. Inżynieria Maszyn nr 1/2012.
- [4] Poradnik mechanika. Tłum. Potrykus J. Wyd. REA SJ. Warszawa 2009.
- [5] Sandvik Coromant: materiały informacyjne producenta narzędzi skrawających: „Poradnik CoreKey 2009” i „Metal Cutting Technology Guide” oraz strona [www.sandvik.coromant.com](http://www.sandvik.coromant.com).
- [6] Siemiński P., Kamiński P.: Program do symulacji frezowania w środowisku systemu 3D CAD z możliwością poprawiania posuwów w kodzie NC. Plakat pokazywany w dniach 14-16.10.2014 r. na Międzynarodowym Kongresie „CAx Innovation” w Krakowie; jest dostępny do pobrania na stronie internetowej Stowarzyszenia ProCAx: [www.procax.org.pl](http://www.procax.org.pl).
- [7] Skawiński P., Siemiński P.: Badanie śladu współpracy i generowanie wykresów ruchowych spiralnych przekładni stożkowych w środowisku programów CAD. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Mechanika Tom 75. Rzeszów 2008.
- [8] Sutton Tools - materiały informacyjne z parametrami skrawania: [www.accessfasteners.com.au/pdf/Cutting%20Tools/Sutton\\_ApplicationGuide.pdf](http://www.accessfasteners.com.au/pdf/Cutting%20Tools/Sutton_ApplicationGuide.pdf)
- [9] Wrotny L.: Obrabiarki skrawające do metali. WNT, Warszawa 1979.
- [10] Wypysiński R.: Zależność przebiegu procesu skrawania od metody generowania ścieżki narzędzia CAM w ZW3D CAD/CAM. Mechanik nr 3/2013.
- [11] Zalewski A.: Obróbka trochoidalna na frezarkach CNC, Mechanik nr 4/2007.