



**POLITECHNIKA  
RZESZOWSKA**  
im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA



**WYDZIAŁ  
BUDOWY MASZYN  
I LOTNICTWA**  
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ

**Politechnika Rzeszowska**  
**Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa**

**Rozprawa Doktorska**  
**mgr inż. Damian Basara**

**Minimalizacja wpływu temperatury na powtarzalność charakterystyk  
końcowych części obrabianych na centrach numerycznych  
z wykorzystaniem kompensacji w czasie rzeczywistym**

**Promotor:**  
**dr hab. inż. Leszek Skoczylas, prof. PRz**

**Rzeszów 2023**



WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I AKRONIMÓW .....	5
WPROWADZENIE .....	7
1. BŁĘDY W PROCESACH OBRÓBKI NA OBRABIARKACH CNC .....	9
1.1. Różnorodność błędów obróbkowych .....	9
1.2. Źródła błędów termicznych obrabiarek.....	11
2. BADANIA I METODY MINIMALIZACJI BŁĘDÓW WYWOŁANYCH CZYNNIKAMI TERMICZNYMI .....	13
2.1. Pomiar temperatury na obrabiarkach CNC .....	13
2.2. Pomiar błędów termicznych i niepewność pomiarowa .....	14
2.3. Metody minimalizacji błędów termicznych.....	20
3. MOŻLIWOŚCI ROZBUDOWY UKŁADU STEROWANIA CNC O MODEL MATEMATYCZNY.....	31
3.1. Modele w procesach kompensacji błędów termicznych .....	31
3.2. Charakterystyka układu sterowania CNC .....	32
3.3. Możliwości wprowadzenia kompensacji termicznej w układach sterowania CNC .....	35
4. CEL I ZAKRES PRACY.....	41
5. BUDOWA I CHARAKTERYSTYKA STANOWISKA BADAWCZEGO.....	45
5.1. Założenia dotyczące przedmiotu badań .....	45
5.2. Ogólna charakterystyka stanowiska .....	48
5.3. Oprzyrządowanie do pomiaru dryftu termicznego TCP oraz geometrii obrabiarki .....	50
5.4. Oprzyrządowanie do pomiaru temperatury.....	52
6. BADANIA KONTROLNE OBRABIARKI.....	55
6.1. Analiza odkształceń termicznych kolumny wzorcowej .....	55
6.2. Niepewność pomiarów pozycji TCP sondą przedmiotową względem elementów referencyjnych.....	59
6.3. Badania dokładności pozycjonowania osi obrabiarki .....	65
6.4. Badania geometryczne obrabiarki wg wytycznych norm ISO .....	71
6.5. Badania z wykorzystaniem kolumny wzorcowej .....	73
6.6. Badania zmian temperatury podzespołów obrabiarki .....	83
7. MODELE MATEMATYCZNE PRZEMIESZCZEŃ TCP.....	89
7.1. Przebiegi zmian badanych wielkości w trakcie procesu obróbki.....	89
7.2. Użyte narzędzia statystyczne .....	92
7.3. Budowa modelu regresji liniowej dla zmiennej objaśnianej y.....	97

7.4. Budowa modelu regresji liniowej dla zmiennej objaśnianej x .....	107
7.5. Porównanie modeli zmiennej objaśnianej y w różnych scenariuszach danych objaśniających .....	119
8. PRAKTYCZNA KOMPENSACJA ZMIAN POŁOŻENIA TCP Z WYKORZYSTANIEM OPRACOWANEGO MODELU MATEMATYCZNEGO NA OBRABIARCE CNC .....	121
8.1. Weryfikacja możliwości predykcyjnych modelu .....	121
8.2. Implementacja kompensacji do systemu sterowania obrabiarki.....	123
8.3. Weryfikacja rozwiązania programowego z wykorzystaniem symulatora sterownika obrabiarki.....	127
8.4. Praktyczna weryfikacja proponowanego rozwiązania.....	131
PODSUMOWANIE .....	141
BIBLIOGRAFIA.....	147
ZAŁĄCZNIKI.....	157
STRESZCZENIE .....	171

## WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I AKRONIMÓW

$N$	- wielkość próby,
$n, n_{obs}$	- próbka populacji,
$M$	- średnia
$SD$	- odchylenie standardowe
$Mdn$	- mediana
$Min.$ i $Maks.$	- najniższa i najwyższa wartość rozkładu,
$R^2$	- współczynnik determinacji,
$R^2_{adj}$	- współczynnik determinacji skorygowany,
$Sk.$	- skośność,
$Kurt.$	- kurtoza,
$R$	- współczynnik korelacji Personna,
$\beta$	- współczynnik regresji,
$SE$	- błąd standardowy,
$t$	- statystyka testu $t$ ,
$p, Pr(> t )$	- wartość $p$ , reprezentuje wartość $p$ skojarzoną z wartością w kolumnie wartości $t$ modelu regresji,

### Akronimy

BHP	- Bezpieczeństwo i Higiena Pracy,
CMM	- współrzędnościowa maszyna pomiarowa (ang. Coordinate Measuring Machine),
CNC	- obrabiarka sterowana numerycznie,
FMS	- elastyczne systemy produkcyjne (ang. Flexible manufacturing systems).
IQR	- rozstęp międzykwartyłowy,
MKS	- układ współrzędnych maszyny,
NCDT	- bezdotykowy czujnik przemieszczeń,
NCK	- jądro sterowania numerycznego (ang. Numerical Control Kernel),
OUPN	- obrabiarka, uchwyt, przedmiot, narzędzie,

- PDTE - błędy zmieniające się w funkcji temperatury oraz położenia TCP w obrabiarce (ang. Position Dependent Temperature Error),
- PITE - błędy zmieniające się w funkcji temperatury (ang. Position Independent Temperature Error)
- PLC - programowalny sterownik logiczny (ang. Programmable Logic Controller),
- RMSE - pierwiastek kwadratowy z wartości średniej sumy kwadratów błędów prognozy,
- RTD - rezystancyjny detektor temperatury,
- TCP - centralny punkt narzędzia (ang. Tool Center Point),
- WKS - układ współrzędnych obrabianego przedmiotu.

## WPROWADZENIE

Ciągły rozwój techniki, nowe projekty wyrobów oraz doskonalenie już istniejących, wymuszają na producentach nie tylko wzrost wydajności produkcji, ale i zwiększoną dokładność obróbki. Dokładność obróbki to podstawowa cecha każdego procesu wytwarzania. Zależy od niej nie tylko jakość produkowanych wyrobów, ale również czas i koszty realizacji obróbki ponoszone przez przedsiębiorstwo. Szczególnie niekorzystny wpływ w tym obszarze mają pojawiające się braki i z tym związane złomowanie. Również, korzystniejszy przypadek związany z ponownym wykonaniem określonych zabiegów celem poprawy już obrobionych części zabiera czas i generuje dodatkowe koszty. Szczególnie jest to widoczne w produkcji lotniczej, gdzie zawężone tolerancje sprzyjają powstawaniu wadliwych wyrobów. Tak więc, utrzymanie określonej dokładności obróbki zapewnia powtarzalność wymiarową części a tym samym ich poprawność i bezpośrednio wpływa na efektywność produkcji. Spełnienie tych wymagań nie zawsze jest możliwe i wymusza ciągłe prowadzenie badań nad zjawiskami fizycznymi towarzyszącymi obróbce. Jednym z takich obszarów są zmiany temperatury. Wynikają one z wydzielającego się ciepła pochodzącego od jednostek napędowych czy występującego tarcia pomiędzy elementami wykonawczymi maszyn i urządzeń. W przypadku obróbki skrawaniem dużym źródłem ciepła jest samo kształtowanie wyrobów będące skutkiem oddziaływania narzędzia na przedmiot obrabiany. Do tego należy dołożyć jeszcze zmiany temperatury wynikające z otoczenia realizowanego procesu czy same warunki klimatyczne. Wszystkie te czynniki oddziałują na podzespoły składowe obrabiarki jak i sam przedmiot obrabiany wywołując ich zmiany wymiarowe wynikające z rozszerzalności cieplnej a tym samym wprowadzają błędy w procesach obróbki. Odmienność wymiarowa i kształtowa poszczególnych elementów składowych obrabiarki sprawia, że następuje ich nierównomierne wydłużenie. Skutkiem tego, wraz ze zmianą temperatury, przemieszczaniu podlegają punkty charakterystyczne obrabiarki (układy współrzędnych). Potwierdzają to prowadzone badania kontrolne, które pokazują, że wraz ze zmianą temperatury następuje przesunięcie punktu bazowego przedmiotu obrabianego w stosunku do punktu charakterystycznego narzędzia. Różnica ta w trakcie obróbki przenosi się na przedmiot obrabiany wprowadzając błędy obróbkowe. Istniejące na obrabiarence systemy kompensacji dotyczące zmian temperatury nie zapewniają wymaganej dokładności obrabiarki, co w przypadku dokładnej produkcji lotniczej stanowi poważny problem. Częściowym rozwiązaniem problemu jest częste ponawianie

bazowania obrabiarki. Nie rozwiązuje to problemu a dodatkowo jest uciążliwe i wydłuża cykl obróbki części.

Analiza rozwiązań prezentowanych w literaturze nadal wskazuje potrzebę przygotowania sposobu redukcji błędów spowodowanych odkształceniami termicznymi obrabiarek CNC do zastosowań produkcyjnych. Istniejące rozwiązania często charakteryzują się złożonością wybiegającą poza możliwości realizacji w warunkach produkcyjnych lub odnoszą się do badań laboratoryjnych. Wynika stąd realna potrzeba poprawy jakości produkcji poprzez zmniejszenia błędów spowodowanych wpływami termicznymi w trakcie realizacji procesów obróbczych, a zarazem stanowi o motywacji podjęcia prac w tym obszarze. Podejście prezentowane w niniejszej pracy bazuje na warunkach produkcyjnych i jest możliwe do realizacji bez ingerencji w konstrukcję jak i system sterowania CNC obrabiarki. Nie narusza tym samym warunków gwarancji środków produkcji jak i zasad bezpieczeństwa ich użytkowania. Wykorzystuje informację pozyskaną z przebiegu produkcji jak i możliwości wynikające z otwartości systemu sterowania obrabiarek CNC.



# 1. BŁĘDY W PROCESACH OBRÓBKI NA OBRABIARKACH CNC

## 1.1. Różnorodność błędów obróbkowych

Z poprawnością obróbki ściśle związane są pojęcia dokładności oraz błędu obróbki. W literaturze dokładność definiowana jest jako stopień zgodności gotowej części z wymaganiami geometrycznymi oraz wymiarowymi [39]. Rozpatrując ruch narzędzia w obrabiarce jako błąd należy rozumieć odchylenie położenia krawędzi skrawającej narzędzia lub centralnego punktu narzędzia (TCP), od teoretycznie wymaganej wartości zapewniającej wykonanie wyrobu o określonej tolerancji lub z określoną powtarzalnością. Patrząc z perspektywy budowy centrum obróbkowego można zauważyć, że podzespoły składowe takie jak łoża, kolumny, osie liniowe i/lub obrotowe, układy napędowe, układy pomiarowe, wrzeciona, oprzyrządowanie technologiczne itd., mogą generować składowe sumarycznego błędu. Jednym z najważniejszych czynników mających wpływ na dokładność obróbki jest również rozdzielczość systemu pozycjonującego obrabiarkę. Pozycjonowanie nigdy nie będzie dokładniejsze niż rozdzielczość układu pozycjonującego.

Ze względu na zmienność w czasie, błędy można podzielić na:

- dynamiczne,
- quasi-statyczne.

**Błędy dynamiczne** spowodowane są przez drgania obrabiarki, odkształcenia jej struktury wynikające ze zmiennych sił podczas skrawania [30], jak również błędy samego sterowania [40].

**Błędy quasi-statyczne** to te, które powodują niepożądane przemieszczenia między elementem obrabianym a narzędziem a ich charakter zmian w czasie jest powolny [69]. Źródłami tych błędów są zmiany geometryczne i kinematyczne obrabiarki, zmiana ciężaru własnego elementów obrabiarki (ubytek materiału podczas obróbki), czy indywidualne odkształcenia termiczne elementów układu OUPN (obrabiarka, uchwyt, przedmiot, narzędzie).

Błędy w obrabiarkach przekładające się na błędy obróbki można podzielić na:

- błędy geometryczne,
- błędy kinematyczne,
- błędy wywołane siłami skrawania,
- błędy termiczne,

- błędy innych źródeł.

**Błędy geometryczne** mają różne składniki oraz źródło pochodzenia. Prostoliniowość ruchu w danej osi, błędy płaskości błędy wzajemnego położenia osi, błędy równoległości, błędy położenia itp., to poszczególne składniki całościowego błędu geometrycznego. Powstają na etapie wykonywania elementów składowych obrabiarki, podczas ich montażu jak również w trakcie eksploatacji. Należy zaliczyć je do błędów quasi-statycznych oraz dynamicznych. Ich zmienność w czasie ściśle powiązana jest z warunkami eksploatacyjnymi. Przez warunki eksploatacyjne należy rozumieć intensywność użytkowania obrabiarki która ma wpływ na zużywanie się elementów współpracujących, jak również zmienność warunków termicznych oraz zmiany sił, które mają wpływ na odkształcenia poszczególnych podzespołów. Międzynarodowa norma ISO 230-1 [115], zawiera wytyczne które pozwalają ocenić dokładność obrabiarek pracujących bez obciążeń lub w warunkach obróbki wykańczającej z wykorzystaniem badań geometrycznych. W wielu przypadkach wytyczne tej normy stosowane są jako kryteria odbiorcze nowych maszyn lub stosowane jako narzędzia badawcze obrabiarek będących w eksploatacji [13, 39, 43, 44, 45, 62, 63].

**Błędy kinematyczne** obejmują błędy położenia liniowego, kąтового oraz błędy obrotu elementów składowych obrabiarki. Dotyczą błędów ruchów względnych co najmniej dwóch poruszających się elementów obrabiarki (np. osie), których zadaniem jest poruszać się zgodnie z założeniami funkcjonalnymi. W odniesieniu do obrabiarek CNC (Computerized Numerical Control), takie błędy mogą pojawiać się podczas realizacji algorytmów interpolacji ruchu liniowego, kołowego, profilowego, itp. [21, 47, 118].

**Błędy sił skrawania** w procesach obróbki powodują odkształcenia układu OUPN, co skutkuje niekorzystną zmianą położenia ostrza narzędzia względem części i przyczynia się do błędów obróbki [70]. W ostatnich czasach błędy te mają coraz większe znaczenie za sprawą rozwoju technik obróbki na twardo, gdzie siły skrawania mogą być duże. Obróbka ta prowadzona jest po obróbce cieplnej utwardzającej obrabiany materiał.

**Błędy termiczne** są jedną z głównych przyczyn powstawania błędów obróbki. Mają dwa główne źródła, wewnętrzne oraz zewnętrzne. Wewnętrzne obejmują czynniki cieplne pochodzące z integralnych elementów obrabiarki. Zewnętrzne wynikają ze zmian temperatury otoczenia obrabiarki oraz pochodzą z samego procesu skrawania. Czynniki termiczne przyczyniają się do odkształceń konstrukcji obrabiarki oprzyrządowania oraz uchwytu, co skutkuje niewłaściwym pozycjonowaniem TCP względem części. Sama

część obrabiana także podlega odkształceniom termicznym. Źródła literaturowe podają, że czynniki termiczne powodują 40-75% błędów wymiarowych oraz kształtowych obrabianych przedmiotów [12, 38, 103].

**Błędy innych źródeł** mogą pochodzić od oprzyrządowania obrabiarki. Narzędzia, ich zużycie, jakość wykonania, wpływają na ogólną niedokładność obrabianych elementów. Błędy mocowania w oprawkach i uchwytach także przyczyniają się do błędów obróbki. Są spowodowane niedokładnościami geometrycznymi elementów pozycjonujących, powierzchnią styku z obrabianym elementem, siłą mocowania, sztywnością, itp. Mogą spowodować przemieszczenie części w uchwycie i być istotnym źródłem błędów obróbki.

## 1.2. Źródła błędów termicznych obrabiarek

Analizując zagadnienia odkształceń termicznych obrabiarek CNC, źródła wpływów termicznych można podzielić na dwie podstawowe kategorie: źródła wewnętrzne oraz zewnętrzne. Do źródeł zewnętrznych zalicza się oddziaływanie środowiska w postaci zmian temperatury otoczenia, oddziaływanie promieni słonecznych bezpośrednio na elementy obrabiarki (świetliki hali produkcyjnej, klimatyzacja), oraz wydzielanie ciepła w procesie skrawania. Wewnętrzne źródła wpływów termicznych wynikają z przemiany części energii elektrycznej pochodzącej z sieci energetycznej w różnego rodzaju silnikach elektrycznych, serwach, napędach, pompach itp. W wyniku tej przemiany część energii wydzielana jest w postaci ciepła na obudowach urządzeń oraz elementach współpracujących (łożyska, prowadnice, przekładnie, itp.). Efektywność oraz lokalizacja źródeł ciepła w obrabiarkach jak również źródeł ciepła w ich otoczeniu są bezpośrednią przyczyną odkształceń cieplnych podzespołów obrabiarki. Przekłada się to bezpośrednio na dokładność pozycjonowania narzędzia względem części obrabianej.

Znaczenie poszczególnych źródeł ciepła pod kątem ich wpływu na dokładność obróbki może różnić się w zależności od konstrukcji rozpatrywanej obrabiarki, intensywności źródła ciepła, jak również procesu na niej realizowanego. Według autorów opracowania [67], to zmiany temperatury otoczenia oraz jej odchyłki są główną przyczyną powstawania błędów obróbki. Inni autorzy jako główne źródło ciepła i niekorzystnego wpływu na dokładność obróbki wskazują ciepło generowane przez układ wrzeciona oraz układy napędowe obrabiarki [103]. Kolejnym istotnym źródłem ciepła wskazywanym przez autorów jest sam proces skrawania. Szczególnie ma on duże znaczenie w ostatnich

latach, kiedy zauważalny jest trend obróbek z większymi prędkościami, prowadzący do wzrostu temperatur [2]. Autorzy publikacji [66] przeprowadzili analizę zachowania termicznego obrabiarki z udziałem oraz bez udziału chłodziwa obróbkowego. Wyniki wskazują widoczne różnice w błędach obrabiarki. Pozwala to wnioskować, że sposób realizacji procesu na obrabiarce ma istotny wpływ na jej ogólne zachowanie termiczne oraz uzyskiwaną dokładność.

## **2. BADANIA I METODY MINIMALIZACJI BŁĘDÓW WYWOŁANYCH CZYNNIKAMI TERMICZNYMI**

### **2.1. Pomiary temperatury na obrabiarkach CNC**

Istnieje wiele metod pozwalających określić rozkład temperatur na poszczególnych elementach składowych obrabiarki. Generalnie można je podzielić na metody stykowe i bezstykowe. Podział taki wynika ze sposobu instalacji detektora. Jedną z metod badania bezstykowego są termograficzne pomiary z wykorzystaniem technologii termowizyjnej [29, 42, 85, 95]. Metoda ta wykorzystuje zjawisko emisji fal elektromagnetycznych przez ciała o temperaturze wyższej niż 0°K. Intensywność oraz rozkład promieniowania uzależniony jest od temperatury oraz stanu powierzchni badanego obiektu. Pomimo swojej wszechstronności zastosowań, metoda ta może narażać wiele problemów związanych z samymi pomiarami. Aby uzyskać dokładne pomiary metodą termowizji, szczególnie w przypadkach, gdy temperatura badanego przedmiotu jest zbliżona do temperatury otaczających ją elementów, konieczna jest kompensacja urządzenia pomiarowego [42, 85]. Wiele kamer posiada auto-kompensacje po wprowadzeniu następujących parametrów: wartość temperatury otoczenia, emisyjność badanego obiektu, odległość pomiędzy kamerą a obiektem, wartość względnej wilgotności. Podanie tych parametrów może niekiedy być problematyczne, ponieważ ich określenie jest dość trudne. Jednym z bardziej istotnych przyczyn wykluczających tę metodę z pomiarów np. rozkładu temperatury w przestrzeni roboczej obrabiarki w trakcie obróbki (temperatura części, uchwytu, oprzyrządowania), są ograniczenia wynikające z zakłóceń takich jak światło odbite, chłodziwo, mgła chłodziwa, itp. Prawidłowy pomiar jest więc utrudniony. Pomimo powyższych niedogodności metody termowizyjne stosuje się często w badaniach rozkładów temperatur na wrzecionach, elektrowrzecionach, podporach łożysk czy śrubach pociągowych [67]. Jest to metoda bezpieczna i wygodna w pomiarach wykonywanych w środowisku niezakłóconym, gdy nie jest wymagane ciągłe monitorowanie rozkładu temperatur w przestrzeni roboczej obrabiarki podczas obróbki. Technologia termowizyjna sprawdza się bardzo dobrze do szybkiej diagnostyki serwisowej (szafy elektryczne, ocena stanu łożyska pod względem termicznym, itp.).

W obrabiarkach CNC najbardziej rozpowszechniły się metody pomiaru stykowego temperatury. Ze względu na charakterystykę zbliżoną do liniowej czujniki rezystancyjne (PT100, PT1000), są w dalszym ciągu stosowane do pomiaru temperatury [81]. W użytku

są także czujniki półprzewodnikowe (termistory), o ujemnym współczynniku temperaturowym (NTC) oraz o dodatnim współczynniku temperaturowym (PTC) [67]. Ze względu na przewodowy sposób podłączenia czujnika do przetworników analogowo cyfrowych narażone są one na zakłócenia elektryczne oraz zmiany rezystancji samych przewodów w wyniku wahań temperatury. Aby temu przeciwdziałać stosuje się obwody kompensacyjne oraz ekranowanie przewodów. Ze względu na technologię pomiaru, czujnik musi przylegać do mierzonej powierzchni i być odizolowany od wpływów zewnętrznych. Aby sprostać tym wymaganiom stosuje się specjalne obudowy lub otwory technologiczne na elementach które poddawane są pomiarowi. Pomiędzy czujniki a powierzchnie styku nakłada się pasty termoprzewodzące. Asortyment rozmiarowy jest praktycznie nieograniczony co pozwala stosować czujniki prawie w każdym miejscu.

Monitorowanie okresowe lub ciągłe temperatury części w trakcie procesów obróbki może być problematyczne. Przeszkodą z punktu widzenia pomiaru temperatury jest konieczność usuwania materiału i potencjalna kolizyjność czujnika z narzędziem obróbczym. Kolejnym problemem występującym na obrabiarkach ze stołem roboczym zainstalowanym na co najmniej jednej osi obrotowej jest trudność związana z poprowadzeniem okablowania do czujników stykowych. W takich sytuacjach rozsądnym rozwiązaniem jest stosowanie sond temperaturowych stykowych zintegrowanych z przetwornikiem sygnału pomiarowego na sygnał radiowy, instalowanych w oprawkach narzędziowych obrabiarki. Takie rozwiązanie zastosowano w pracy [4]. Do okresowego monitorowania temperatury części w trakcie obróbki wykorzystano sondę stykową typu termopara zainstalowaną na specjalnie przystosowanej do tego oprawce narzędziowej. Oprawka wyposażona była w układ przetwornika oraz nadajnika radiowego. Wadą tego rozwiązania jest konieczność przerywania obróbki w celu dokonania pomiaru temperatury.

## **2.2. Pomiary błędów termicznych i niepewność pomiarowa**

Proces powstawania błędów termicznych w obrabiarkach ma swój początek u źródła ciepła. W wyniku zjawisk wymiany ciepła takich jak przewodzenie, konwekcja, promieniowanie, powstaje pole temperatury stałe lub zależne od czasu, którego konsekwencją jest pole odkształcenia termicznego. Z kolei konsekwencją pola odkształcenia jest błąd termiczny. Z punktu widzenia wpływu na błąd termiczny bardziej

istotnym jest związek pomiędzy polem odkształceń a błędem termicznym niż polem temperatury a błędem termicznym [114]. Ze względu na trudności pomiaru mikro odkształceń, modele predykcyjne błędów termicznych w obrabiarkach opierają się głównie na określeniu zależności pomiędzy temperaturą mierzoną na powierzchni lub w okolicach obrabiarki a dryftem termicznym punktu narzędzia wykonawczego, mierzonego w określonym punkcie obrabiarki. W literaturze związanej z kompensacją błędów termicznych jako punkt narzędzia (TCP), rozumiane jest zazwyczaj punkt centralny znajdujący się na przecięciu osi wrzeciona oraz płaszczyzny czołowej narzędzia walcowego wykonawczego zainstalowanego we wrzecionie obrabiarki.

Według autorów opracowań [12, 38, 103], 40% - 75% błędów geometrycznych obróbki na obrabiarkach jest spowodowanych niekorzystnym wpływem zjawisk termicznych. Zmiany temperatury podzespołów obrabiarki oraz obrabianego przedmiotu powodują odkształcenia wynikające z rozszerzalności temperaturowej, co w konsekwencji prowadzi do przemieszczeń względnych elementów układu OUPN. Nie wszystkie przemieszczenia układu OUPN mogą przekładać się na błąd obróbki. W niektórych przypadkach mogą być wręcz korzystne. Istotnymi z punktu widzenia dokładności obróbki są te, które generują niekorzystnie odchylenie trajektorii ruchu TCP względem części obrabianej od wymaganej zapewniającej uzyskanie produktu finalnego o zadowalającej jakości.

Generalnie błędy termiczne w obrabiarkach można podzielić na dwie kategorie [69]:

- błędy zmieniające się w funkcji temperatury (PITE),
- błędy zmieniające się w funkcji temperatury oraz położenia TCP w obrabiarence (PDTE).

Dokładność obrabianego przedmiotu jest uzależniona od szybkości zmiany PITE w czasie w stosunku do czasu potrzebnego do wykonanie gotowego elementu na obrabiarence. Duże zmiany PITE w długim okresie czasu w detalach o stosunkowo krótkim czasie wytwarzania mają niewielki wpływ na dokładność obróbki. W odróżnieniu od PITE, PDTE powoduje błędy komponentu, jeśli zmiana pozycjonowania liniowego obrabiarki nie odpowiada zmianie pozycjonowania liniowego wymaganego z powodu rozszerzalności cieplnej obrabianego przedmiotu. Obecnie na rynku istnieje wiele rozwiązań służących do identyfikacji błędów obrabiarek [75, 99]. Wybór właściwego systemu pomiarowego nie jest oczywisty i zależy między innymi od źródeł wpływów termicznych wspomnianych wcześniej. Źródła wpływów zewnętrznych prowadzą

generalnie do powolnych zmian temperatury obrabiarek i wpływają na całą dokładność objętościową obrabiarki. Źródła wewnętrzne takie jak elektrowrzeciona, łożyska, śruby napędowe, itp., prowadzą do lokalnych odkształceń w konsekwencji generują lokalne przemieszczenia mające częściowy wpływ na dokładność objętościową obrabiarki [49, 50, 51]. Technologie pomiaru odkształceń termicznych w obrabiarkach CNC można podzielić na dwie podstawowe kategorie:

- pomiar dryftu termicznego punktu centralnego narzędzia obróbczego (TCP),
- pomiar odkształceń termicznych poszczególnych podzespołów obrabiarki.

Ostatnie 30 lat badań nad tematyką pomiarów błędów termicznych zaowocowało opracowaniem międzynarodowych standardów zawierających zasady pomiarów oraz parametrów określających zachowanie termiczne obrabiarek z wrzecionem głównym w warunkach nieobciążonych oraz w warunkach obróbki wykańczającej dla obrabiarek [117], centr obróbczych [126] oraz tokarek [127]. Cechą wspólną norm są trzy testy:

- test na odkształcenia termiczne spowodowane zmiennością temperatury otoczenia obrabiarki (ETVE),
- test na odkształcenia termiczne spowodowane obracającymi się wrzecionami (SHT),
- test na odkształcenia termiczne spowodowane poruszającymi się osiami liniowymi (AHT).

Elementem łączącym powyższe testy jest wykorzystanie do monitorowania dryftu narzędzia względem przedmiotu obrabianego trzpienia wzorcowego zainstalowanego we wrzecionie głównym oraz zwykle pięciu bezdotykowych przetworników przemieszczeń (NCDT). Bezdotykowe czujniki NCDT stosowane w tego typu pomiarach to: przetworniki wiropędowe, przetworniki pojemnościowe, konfokalne i laserowe czujniki przemieszczenia [131]. W przypadku gdy testy realizowane są na frezarkach lub centrach frezarskich czujniki zainstalowane są na stole obróbczym. Jeśli testy wykonywane są na tokarkach lub centrach tokarskich czujniki montowane są w oprawce narzędziowej. Test ETVE ma na celu oszacować wpływ zmian temperatury otoczenia na zachowania termiczne obrabiarki w przypadku, gdy wrzeciono główne pozostaje zatrzymane. Test SHT pozwala oszacować wpływ zmian temperatur wywołanych obracającym się wrzecionem głównym na dryft narzędzia. Test AHT wykorzystuje dwa zestawy czujników przemieszczeń umieszczone na końcach badanej osi liniowej wprowadzanej



w ruch oscylacyjny. Test ten pozwala uwidocznic dryft termiczny w dwóch polozeniach maszyny wywolany zmianami temperatur podczas ruchu badanej osi. W 2020 roku wydana zostala aktualizacja normy ISO230-3 [117]. Definiuje ona dodatkowo test na odkształcenia termiczne spowodowane ruchem osi obrotowych. Normy ISO [117, 126, 127] zawieraja istotna uwage mowiacą o tym, ze warunki testowania nie maja na celu symulowania normalnych warunków pracy. Ich zadaniem jest ulatwienie oceny zachowania termicznego obrabiarki i oszacowanie wpływu środowiska na dokladnosc obrabiarki. Odnoszac sie do rzeczywistych warunków wytwarzania, stosowanie chlodziw, mgly olejowej, sprężonego powietrza, itp., moze znacząco wpłynac na rzeczywiste zachowanie termiczne obrabiarki [66]. Analizujac literature zauwazyć można, ze metoda z wykorzystaniem trzpienia wzorcowego oraz sensorów przemieszczeń stosowana jest powszechnie [14, 20, 32, 35, 57, 59, 64, 71, 84, 93, 105, 107, 108].

Jedną z wad metod ETVE oraz SHT jest fakt, iz pomiar dryftu termicznego wykonywany jest w jednym ustalonym miejscu obrabiarki. Dryft termiczny obrabiarki moze być zalezny od polozenia osi obrabiarki, dlatego testy te powinno wykonywac sie w roznych miejscach co jest procesem czasochłonnym. W celu wyeliminowania tej wady autorzy pracy [17] opracowali metode z wykorzystaniem systemu do pomiarów geometrycznych oraz kinematycznych obrabiarek nazywanego potocznie w branzy przemysłowej „ballbar” (TDBB) [45]. Opracowana metoda pozwolila autorom na zweryfikowanie w stosunkowo szybki sposob zachowania termicznego obrabiarki w objętości wynikajacej z dlugosci TDBB.

Za pomoca interferometrów laserowych można wykrywac błędy polozenia liniowego oraz katowego osi poruszajacej sie po prowadnicach [3, 13, 46]. Autorzy pracy [23] wykorzystali interferometr do pomiaru błędu pozycjonowania obrabiarki. Przeprowadzone eksperymenty pozwolily stwierdzic, iz blad pozycjonowania zmienia sie w czasie i spowodowany jest zmianami temperatur zespołu napędowego (śruby, nakretki). W podobny sposob autorzy publikacji [113] wykorzystali interferometr laserowy do oceny zachowania termicznego zespołu napędowego stanowiska badawczego w zakresie błędów ruchu liniowego.

W celu oceny termicznego zachowania struktury obrabiarki CNC opracowano koncepcje pomiaru z wykorzystaniem interferometru laserowego oraz odpowiednio ukierunkowanej siatki wiązki laserowej [18]. Rozwiązanie pozwolilo autorom wykryc

przemieszczenia względne podzespołów obrabiarki, które zwykle nie są możliwe do oceny podczas pomiaru dryftu TCP.

Do pomiarów błędu objętościowego spowodowanego zjawiskami termicznymi wynikającego z ruchu osi liniowych oraz obracającego się wrzeciona, autorzy pozycji [74] zaproponowali wykorzystanie interferometru śledzącego. Takie rozwiązanie umożliwiło ocenę błędu pozycji 2D w tym przypadku w osiach Y i Z badanej obrabiarki. Pomimo, iż powyższe metody zostały zaprojektowane z myślą o przemyśle, to pomiar błędów termicznych powstających w trakcie procesów obróbki z ich wykorzystaniem jest praktycznie niemożliwy ze względu na obecność chłodziwa oraz wiórów w przestrzeni roboczej. Aby pomiar został zrealizowany poprawnie praktycznie w każdym przypadku konieczne jest przygotowanie obiektu badań w odpowiedni sposób, uwzględniając między innymi wymogi BHP. W przypadku wykorzystania interferometru laserowego, pręta kinematycznego, oprzyrządowania do pomiaru dryftu termicznego czy też głowicy R-test, niedopuszczalne jest aby w trakcie realizacji pomiarów podawać chłodziwo do przestrzeni w której realizowane są pomiary. Tego typu urządzenia nie są przystosowane do pracy w środowisku zanieczyszczonym [133].

Jednym z podstawowych urządzeń pomiarowych będących na wyposażeniu współczesnych obrabiarek CNC są sondy przedmiotowe (sondy dotykowe) [27]. Są one instalowane we wrzecionie obrabiarki. Pozwalają na wykrycie indukowanych termicznie przemieszczeń TCP względem części obrabianej lub bazy obróbkowej w maksymalnie trzech kierunkach [77, 104]. Sondy narzędziowe instalowane w obrabiarkach mogą także posłużyć jako narzędzie pomiarowe pozwalające ocenić zachowanie termiczne obrabiarki [36, 54, 137]. Zarówno sondy narzędziowe jak i przedmiotowe są urządzeniami zaprojektowanymi do użytkowania na obrabiarkach CNC w warunkach przemysłowych, co jest niezaprzeczalnym atutem podczas pomiarów. Wadą jest konieczność realizacji pomiarów pomiędzy cyklami obróbki.

Literatura [79] podaje, że niepewność pomiaru jest związana z parametrem, charakteryzującym rozrzut wyników, który można w uzasadniony sposób przypisać wartości mierzonej. Oznacza to, że wynik pomiaru jest przybliżeniem lub oszacowaniem wartości rzeczywistej, co wymusza oszacowanie jego niepewności. W odniesieniu do standardowych przyrządów pomiarowych służących do pomiaru przemieszczeń TCP z wykorzystaniem oprzyrządowania zewnętrznego takich jak interferometry laserowe, pręty kinematyczne (Ballbar), różnego rodzaju czujniki zegarowe, w/w parametr jest znany, ponieważ urządzenia te podlegają okresowemu wzorcowaniu.

Użytkowanie obrabiarek wyposażonych w sondy przedmiotowe lub sondy narzędziowe wymaga określenia niedokładności pomiaru systemu pomiarowego. Producenci tych urządzeń jako parametr który charakteryzuje ich dokładność, podają często powtarzalność jednokierunkową ( $2\sigma$ ). Jest to tylko jeden ze składników który ma wpływ na niepewność pomiaru. Istotnym z punktu widzenia pomiarów sondami przedmiotowymi czy narzędziowymi jest dokładność geometryczna, kinematyczna obrabiarki oraz powtarzalność pozycjonowania. Wynika to z faktu, że do pomiaru wykorzystywane są układy sterujące oraz pomiarowe obrabiarki. Nie istnieją normy mówiące o tym w jaki sposób wyznaczać niepewność pomiaru sondą przedmiotową w układzie sonda-obrabiarka. Istnieją jednak prace w których autorzy podejmowali tę tematykę. W publikacji [37], autorzy dokonali oceny niepewności pomiaru dla pionowej obrabiarki FV-580A wyposażonej w bezpośredni układ pomiarowy oraz sondę stykową OMP60. W swojej pracy przedstawili doświadczalną metodykę oceny niepewności pomiaru położenia punktu w przestrzeni oraz różnych cech geometrycznych takich jak średnica otworu, długość wzorca, itp. Metoda opracowana przez autorów opiera się na ogólnych wytycznych dotyczących wyrażania niepewności pomiaru zawartych w dokumencie [130]. W publikacji [8], autorzy w ramach prac badawczych prowadzonych w kontekście wdrożenia pomiarów realizowanych na obrabiarce CNC, jako alternatywy dla pomiarów CMM, przeprowadzili badania systemu pomiarowego składającego się z trzech typów sond pomiarowych. Badania odnoszą się do obrabiarki Okuma MU6300V. W ramach swoich badań wykorzystali wskaźnik R&R mówiący o powtarzalności oraz odtwarzalności mierzonych charakterystyk. Wykorzystanie sondy przedmiotowej czy narzędziowej w kontekście wykrywania przemieszczeń termicznych TCP przedstawili również autorzy prac [36, 54, 137].

Podjmując próbę wyznaczenia niepewności pomiaru położenia TCP, gdy pomiary wykonywane są w długim okresie czasu, należy mieć na uwadze, że uzyskane wyniki będą obarczone błędem termicznym. W publikacji [7], autorzy w celu usunięcia składowej błędu pochodzącej od zmian temperatury wykorzystali zabieg matematyczny. Efekt cieplny, usunęli obliczając średnią ruchomą w odpowiednim zakresie uzyskanych wyników. Tak uzyskane wyniki następnie odejmowane są od pierwotnych danych.

### 2.3. Metody minimalizacji błędów termicznych

Z powodu niekorzystnego wpływu zjawisk termicznych na wynik końcowy procesu obróbki, konieczna jest minimalizacja tych błędów. Aby osiągnąć ten cel w praktyce stosuje się wiele rozwiązań. Według źródeł literaturowych rozwiązania minimalizujące można przydzielić do jednej z czterech grup [82, 102]:

- metody eksploatacyjne,
- metody konstrukcyjne,
- metody stabilizacyjne,
- metody kompensacyjne.

- **Metody eksploatacyjne**

W przemyśle wśród użytkowników obrabiarek szeroko stosowaną jest tzw. metoda eksploatacyjna. Polega ona na rozgrzewaniu obrabiarki przed rozpoczęciem obróbek wykańczających. Najczęściej realizowane jest to przez specjalnie przygotowane programy sterujące których zadaniem jest przemieszczanie oscylacyjne osi roboczych obrabiarki, oraz utrzymywanie prędkości obrotowej wrzeciona na określonym poziomie. Ma to na celu ustabilizowanie temperatury całej maszyny.

- **Metody konstrukcyjne**

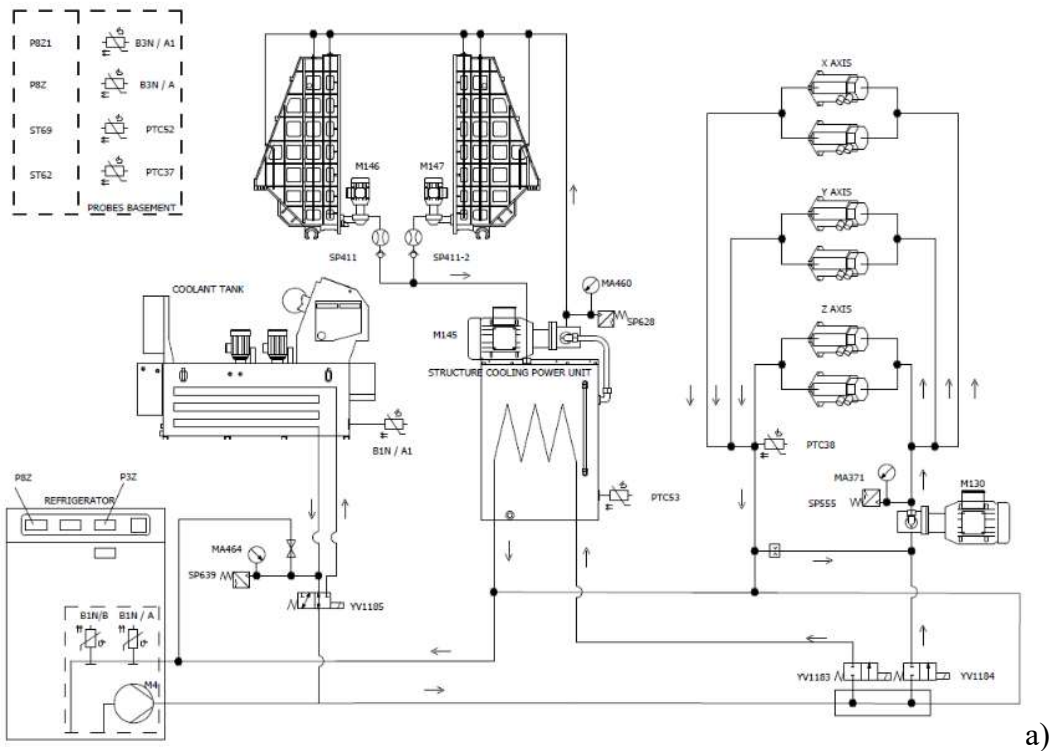
W rozwiązaniach konstrukcyjnych jednym z założeń jest takie podejście projektowe aby źródła ciepła były jak najdalej odsunięte lub odseparowane od korpusu maszyny. Ponieważ niemożliwym jest całkowite usunięcie procesów generujących ciepło z obrabiarki, dąży się równolegle do takiego projektu, gdzie odkształcenia termiczne znoszą się wzajemnie lub są symetryczne, przez co łatwiej je przewidywać [69]. Odpowiednio dobrane materiały do budowy obrabiarki mogą mieć pozytywny wpływ na jej zachowanie termiczne. Polimerobeton oprócz takich właściwości jak duża sztywność statyczna oraz dynamiczna, ma znacznie niższy współczynnik przenikalności cieplnej w stosunku do stali konstrukcyjnej czy żeliwa szarego [52]. Autorzy publikacji [48, 96] wykazali, że zastosowanie polimerobetonu na korpus obrabiarki poprawia między innymi jej właściwości termiczne. Błędy podziałki śrub napędowych suportu obrabiarki wywołane zjawiskami termicznymi, mogą stanowić dużą część błędu łańcucha kinematycznego osi sterowanej numerycznie [88, 89]. Często spotykanym rozwiązaniem

konstrukcyjnym w obrabiarkach precyzyjnych jest zastosowanie bezpośredniego układu pomiarowego położenia sań suportu działającego w układzie pętli sprzężenia zwrotnego [91]. Rejestracja pozycji w takim układzie odbywa się niezależnie od łańcucha kinematycznego, co umożliwia kompensację błędów podziałki śruby napędowej wynikającą z rozszerzalności cieplnej śruby.

- **Metody stabilizacyjne**

Podstawową ideą w metodach stabilizacyjnych jest stworzenie jednolitego pola termicznego oddziałującego na elementy obrabiarki. Aby osiągnąć ten cel w obrabiarkach stosuje się zarówno układy chłodzące, ogrzewające oraz transferujące generowane ciepło w odpowiednie miejsca [67]. Jednym z nośników ciepła wykorzystywanym w technice stabilizacji termicznej obrabiarek są płyny, rzadziej powietrze. W obrabiarkach chłodzone są głównie łożyska wrzeciona i stojany elektrowrzeciona oraz napędów, czasami nakrętki śrub kulowych, a w szczególnych przypadkach same śruby. W bardzo szczególnych przypadkach chłodzone są również korpusy i obudowy [69, 73]. Na rysunku 2.1 przedstawiono schemat ideowy układu stabilizacji termicznej z wykorzystaniem glikolu, obrabiarki CNC będącej obiektem badań niniejszej pracy. Celem takiego rozwiązania jest równy rozkład temperatur w poszczególnych elementach obrabiarki, przy czym temperaturą docelową do której układ stabilizacji dąży jest temperatura podstawy obrabiarki.

W publikacji [11] przedstawiono rozwiązanie natrysku olejem o kontrolowanej temperaturze na całą strukturę obrabiarki. Zadaniem systemu było uzyskanie stałego rozkładu temperatury. Autorzy pozycji [112] przedstawili metodę chłodzenia śruby tocznej przy użyciu sprężonego powietrza. Wyniki eksperymentu wykazały znaczną redukcję wzrostu temperatury oraz pokazały, że proces stabilizacji temperaturowej przebiega znacznie szybciej niż w przypadku niechłodzonej śruby.



**Rys. 2.1.** Układy stabilizacji temperatury centrum obróbczego: a) schemat ideowy układu stabilizacji temperatury (dokumentacja DTR obrabiarki), b) silnik osi liniowej z widocznym doprowadzeniem cieczy stabilizującej temperaturę, c) układ nawiewowy stabilizujący temperaturę przestrzeni ażurowych podstawy obrabiarki

- **Kompensacja termiczna**

Kompensacja błędów termicznych jest techniką polegającą na wprowadzeniu do układu sterowania obrabiarki wartości korygującej błąd wywołany zjawiskami termicznymi. Logicznie rozumując, aby możliwe było wprowadzenie wartości kompensujących należy najpierw oszacować lub zmierzyć ten błąd. Ogólnie można wyróżnić dwie metody umożliwiające kompensację błędów termo-zależnego położenia TCP:

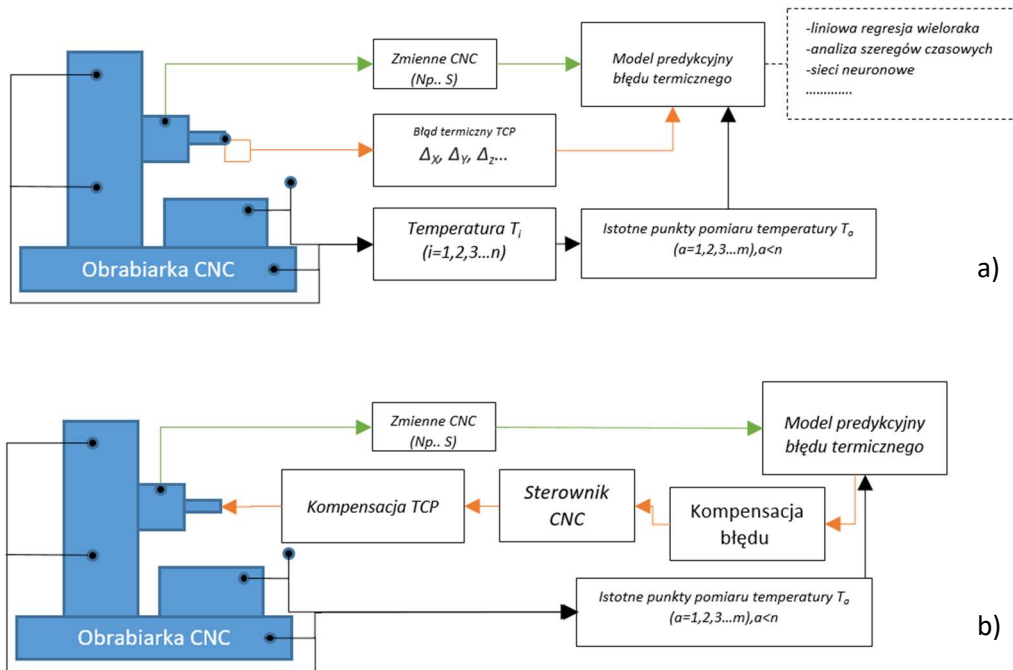
- kompensacja bezpośrednia,

- kompensacja pośrednia.

W metodzie bezpośredniej, przemieszczenia wynikające z błędów termicznych mierzone są w sposób przerywany (na przykład za pomocą sondy przedmiotowej), następnie do systemu sterowania CNC wprowadzane są korekty w celu ich skorygowania. Wadą tej metody jest konieczność przerywania obróbki w celu dokonania pomiaru. Aby pomiary były poprawne, należy dobrać określoną częstotliwość próbkowania. Prowadzi to do przerywania procesu, a w konsekwencji do niższej wydajności operacyjnej obrabiarki co z punktu widzenia przemysłu jest stratą [10].

W metodzie pośredniej błąd termiczny kompensowany jest w oparciu o pomiary wybranych parametrów. Dane te pozwalają na wyznaczanie eksperymentalnych modeli opisu zjawiska. Mogą to być modele liniowej oraz nieliniowej regresji, modele dynamiczne, adaptacyjne, sztucznych sieci neuronowych i innych [7, 22, 31, 33, 35, 36, 55, 60, 100, 102].

Uproszczony schemat procesu wyznaczania oraz kompensacji termicznej pokazano na rysunku 2.2. Zaletą takich metod kompensacji jest fakt, iż można je implementować w obrabiarkach będących już w eksploatacji. Czołowi producenci systemów sterowania obrabiarek udostępniają taką możliwość za pośrednictwem odpowiednich zmiennych do których można wprowadzić parametry kompensacyjne [134, 135]. W przypadku technologii kompensacji pośredniej błędów termicznych z wykorzystaniem danych temperaturowych, kluczowe jest ustalenie modelu opisującego błąd termiczny w odniesieniu do temperatury. Ze względu na budowę oraz sposób przenikania ciepła w obrabiarkach, w znacznej większości modele opisujące ten błąd będą funkcjami wielu zmiennych. Potwierdza to duża ilość publikacji zajmująca się analizą wielu zmiennych niezależnych [33, 35, 55, 60, 100, 102, 111]. Jedną z przyczyn niedokładności opracowywanych modeli, jest problem kolinearności danych temperaturowych [22]. Autorzy pracy [102] doszli do wniosku, że ważnym jest odpowiedni wybór punktów pomiarowych temperatury tzw. punktów wrażliwych. Wybór punktów wrażliwych, ma na celu uzyskanie najlepszego dopasowania modelu, efektów predykcyjnych jak i odporności modelu błędu termicznego w ramach najmniejszej liczby czujników temperatury [71].



**Rys. 2.2.** Zasada kompensacji błędów termicznych w obrabiarkach CNC. a) wyznaczenie błędu termicznego, b) kompensacja błędu termicznego

Przykładem wykorzystania selekcji optymalnych punktów temperaturowych oraz zastosowania metody regresji liniowej wielorakiej do opracowania modelu przemieszczeń termicznych TCP jest publikacja [55]. W pracy zaproponowano model błędu cieplnego dla obrabiarek CNC oparty na grupowaniu korelacji i analizie kolejnych modeli uzyskanych metodą regresji liniowych. Podczas kolejnych analiz modeli regresji, średni kwadrat reszt jest minimalizowany za pomocą wybranego algorytmu oceny. Publikacja zawiera analizę opracowaną dla dwóch typów obrabiarek, pionowego oraz poziomego centrum obróbczego trzyosiowego. W przypadku poziomego centrum obróbczego pierwotna ilość danych wejściowych temperaturowych została zredukowana z 14 do 4. W ramach analiz opracowane zostały dwa modele przemieszczeń TCP w kierunku osi Z. Współczynnik determinacji ( $R^2$ ), dla obu równań wyniósł kolejno 0,97 oraz 0,99 co oznacza, że poziom oszacowania błędu wynosi 97% i 99%. Stanowiło to doskonałą zgodność między zmierzonymi danymi a wartościami przewidywanymi przy użyciu modeli. Autorzy finalnie przetestowali opracowane modele przy użyciu nowych danych eksperymentalnych, dodatkowo zestawiając wynik z modelem odkształceń termicznych uzyskany metodami analizy inżynierskiej. Wykazali, że metody statystyczne pozwalają na przewidywania błędów termicznych na satysfakcjonującym poziomie.



W publikacji [60] autorzy opracowali model przemieszczeń tokarki karuzelowej również z wykorzystaniem regresji wielorakiej liniowej. Obiekt badań wyposażony został w 80 czujników temperatury. Badacze przeprowadzili trzy eksperymenty polegające na symulacji obróbki, rejestrując przemieszczenia termiczne i zestawiając je z wskazaniami czujników temperatury. W wyniku oceny inżynierskiej oraz analizy korelacyjnej, w celu opracowania modelu dryftu osi X, wybrano 46 czujników temperatury. W kolejnych etapach z wykorzystaniem metody grupowania korelacyjnego i wyszukiwania zmiennych w wyselekcjonowanych grupach, autorzy ostatecznie uzyskali model z wykorzystaniem czterech zmiennych temperaturowych. Uzyskany współczynnik determinacji na poziomie 0,98 świadczy o bardzo dobrym dopasowaniu wartości rzeczywistych przemieszczeń do przewidywanych modelem. Analizując tok postępowania autorów można zauważyć, iż zdecydowali się na wyeliminowanie danych temperaturowych których odchylenia są mniejsze niż 1°C. Uznali oni, że takie zmiany nie mają istotnego znaczenia i mogą być efektem zakłóceń.

Podobne podejście w modelowaniu odkształceń termicznych tokarki CNC zaprezentowali autorzy pracy [100]. Aby rozwiązać problem doboru optymalnej kombinacji zmiennych temperaturowych dla przygotowywanego modelu oraz skrócić czas obliczeń, zaproponowali analizę korelacji biwariantnej tau-b Kandella oraz korelacji Graya [101]. Optymalny model błędu termicznego został opracowany za pomocą analizy regresji wielokrotnej (MRA) w ogólnej formie liniowej przy użyciu podejścia mocnej regresji [98]. Jest ona alternatywą dla regresji realizowanej metodą najmniejszych kwadratów [9].

Zmienność punktów wrażliwych na temperaturę jest zjawiskiem przyczyniającym się do niedokładności predykcji oraz niskiej odporności modelu [72]. W celu rozwiązania tego problemu Liu oraz inni [35], zaproponowali metodę modelowania błędów termicznych o nazwie GR-SUE. W metodzie tej pierwszym krokiem jest wybór punktów wrażliwych na temperaturę z wykorzystaniem algorytmu relacji szarości [101]. Następnie stosując modelowanie z wykorzystaniem danych przekrojowych z szeregami czasowymi, w oparciu o ideę modelowania krokowego, tworzone są modele przemieszczeń termicznych [90]. Jako obiekt eksperymentu autorzy wykorzystali obrabiarkę CNC Leaderway-V450. W trakcie dziewięciu eksperymentów polegających na symulowaniu obróbki realizowanej z różnymi prędkościami obrotowymi wrzeczona o różnych porach roku, rejestrowane było przemieszczenie osi Z oraz zmiany temperatur w dziesięciu punktach obrabiarki. Celem porównania autorzy w ramach eksperymentu opracowali

modele metodą GR-SUE, alternatywnymi metodami GR-MLR oraz tradycyjną metodą regresji liniowej wielorakiej (T-MLR). Wyniki końcowe wykazały lepszą średnią dokładność predykcji dla modeli GR-SUE w porównaniu z pozostałymi metodami. Należy jednak zauważyć, iż autorzy zweryfikowali słuszność swojej metody tylko dla obróbki symulowanej.

Niewiele publikacji związanych z kompensacją błędów termicznych obrabiarki uwzględnia w swoich rozważaniach wpływ chłodziwa obróbkowego czy płynów eksploatacyjnych. Autorzy opracowania [7] zaproponowali system kompensacji adaptacyjnej błędów TCP oparty na modelu równań różniczkowych uwzględniających zmiany temperatury otoczenia, zmiany zależne od obciążenia obrabiarki oraz zmiany warunków obróbki, wynikające z użycia płynu obróbkowego. W celu zwiększenia dokładności kompensacji, model został rozszerzony o wyniki pomiarów na obrabiarce z wykorzystaniem artefaktu wzorcowego oraz sondy przedmiotowej. Informacje uzyskane z okresowych pomiarów wykorzystane zostały do adaptacji parametrów modelu w celu ciągłej minimalizacji wartości reszt błędów kompensacji.

Analizując literaturę można spotkać propozycje rozwiązania problemu odkształceń termicznych w obrabiarkach z wykorzystaniem informacji takich jak: prędkość obrotowa wrzeciona głównego, natężenia prądu silnika itp. [56]. Przykładem takiego rozwiązania jest publikacja [110], w której autorzy do opracowania modelu predykcji błędów termicznych wydłużenia wrzeciona frezarki CNC wykorzystali nie tylko dane temperaturowe. Uwzględnili także inne zmienne jak: prędkość obrotową wrzeciona, historyczna temperatura wrzeciona, historyczny błąd termiczny i opóźnienie między czasem obecnym a poprzednim. W celu pomiaru osiowych błędów termicznych w trakcie realizacji eksperymentów wykorzystany został bezstykowy system pomiaru narzędzi, NC4 firmy Renishaw [137]. W ramach badań autorzy opracowali model błędów przemieszczeń termicznych z wykorzystaniem metody regresji wielorakiej oraz sieci neuronowej uczonej metodami wstecznej propagacji błędów [107].

Jednym z niewielu rozwiązań kompensacji termicznej dryftu TCP, które zostało zaimplementowane i przetestowane w środowisku przemysłowym, jest rozwiązanie zaprezentowane przez Kuang-Chao Fan [54]. Autor opracował metodykę pozyskiwania danych dryftu TCP oraz zmian temperatury podzespołów obrabiarki w trakcie realizacji rzeczywistego procesu skrawania. Dane na temat przemieszczeń TCP uzyskiwał z wykorzystaniem sondy narzędziowej MP4 firmy Renishaw. Pomiaru wykonywane były pomiędzy cyklami frezowania. W momencie pomiaru dryftu rejestrowana była

temperatura podzespołów z użyciem przetwornika temperatury z układem scalonym (AD590), który wytwarza prąd wyjściowy proporcjonalny do wartości bezwzględnej temperatury. Po opracowaniu modelu liniowego przemieszczeń na podstawie zebranych danych, aby wdrożyć proces kompensacji na obrabiarce, autor użył do tego celu zaprojektowany przez siebie mikrokomputer. Zadaniem urządzenia było, na podstawie odczytywanych danych temperaturowych oraz zaimplementowanego modelu, obliczać i przekazywać dane kompensacyjne do sterownika CNC. Takie rozwiązanie pozwala automatycznie przesunąć początek układu współrzędnych maszyny w czasie rzeczywistym bez konieczności zatrzymywania przebiegu programu. Autor zwrócił uwagę na kilka problemów technicznych związanych z wdrożeniem rozwiązania. Dotyczą one zakłóceń na przewodach czujnika temperatury oraz aspekty techniczne związane z możliwością montażu samych czujników temperatury.

W publikacji [33] autorzy zaprezentowali metodę kompensacji poziomego 4-osowego centrum frezarskiego z wykorzystaniem modelu przemieszczeń indukowanych termicznie w oparciu o funkcję przejścia (transmitancji). Autorzy opracowali i zweryfikowali model w środowisku Matlab i Matlab Simulink. Dane wejściowe które posłużyły do opracowania modelu pochodziły z: 4 czujników RTD rejestrujących temperaturę istotnych podzespołów obrabiarki, pojemnościowych czujników NCDT odpowiedzialnych za rejestrację położenia TCP oraz z danych maszynowe o aktualnych obrotach wrzeciona głównego. Opracowany model zaimplementowany został w kontrolerze czasu rzeczywistego którego zadaniem było, na podstawie danych wejściowych, przysłać dane kompensacyjne do sterowania CNC. Zastosowanie modelu transmitancji pozwoliło autorom na zmniejszenie błędu TCP o 75%. Dodatkowo wyniki porównano z wcześniej opracowanymi modelami MRL, wykazując znacznie większą wiarygodność modelu transmitancji w tym przypadku.

W literaturze obejmującej problematykę odkształceń cieplnych obrabiarek, spotkać można propozycje rozwiązań wykorzystujących metody sztucznej inteligencji [1, 15, 31, 58, 83, 94, 107]. Modele uzyskiwane tą metodą nie tłumaczą fizyki zjawisk, a jedynie je naśladują [86]. Autorzy pracy [31], w celu kompensacji błędów termicznych na centrum tokarskim wykorzystali model oparty na sieci neuronowej. W celu oceny stanu cieplnego obrabiarki zainstalowano 16 czujników temperatury rejestrujących temperaturę wrzeciona, wrzeciennika, węzła łożyskowego przekładni śrubowo – tocznej osi X, łoża obrabiarki oraz temperaturę otoczenia. Jako dane uczące do opracowania modelu posłużyły dane temperaturowe z kluczowych pięciu czujników temperatury oraz czujnika

przemieszczeń w kierunku X obrabiarki odpowiedzialnego za błędy średnicowe na gotowym elemencie toczonym. Kompensacja w czasie rzeczywistym zrealizowana została z wykorzystaniem opracowanego modelu zaimplementowanego na komputerze PC. System przetwarzał dane temperaturowe uzyskane z czujników obrabiarki a następnie, po przetworzeniu przez model, przesyłał informacje zwrotne do układu sterującego serwomechanizmu. Wyniki eksperymentalne wskazują, że po zastosowaniu kompensacji błąd średnicy przedmiotu obrabianego zmniejszył się z około 27 $\mu\text{m}$  do 10 $\mu\text{m}$ .

Artefakty wzorcowe oraz sondy przedmiotowe mogą być z powodzeniem wykorzystywane do oceny błędów termicznych obrabiarki. Autorzy pracy [111], wykorzystali do badań wzorec wyposażony w dwie kule umocowane na płycie za pomocą prętów inwarowych. Odległości pomiędzy kulami w kierunkach X, Y, Z, skalibrowane zostały na maszynie CMM. Jako dane uczące dla modeli błędów termicznych (sieci neuronowe), zastosowane zostały rejestrowane cyklicznie co 30 minut, pozycje kul mierzone za pomocą sondy przedmiotowej oraz temperatury istotnych podzespołów obrabiarki. Trwające 5 godzin eksperymenty realizowane były na różnych poziomach obrotowych wrzeciona. Sposób pomiaru pozwolił autorom oszacować zarówno błąd termiczny położenia poszczególnych kul jak również błąd objętościowy termiczny.

Innym podejściem w kompensacji pośredniej jest wykorzystanie technik analizy numerycznej do analizy przepływu ciepła oraz odkształceń. Dzięki rozwojowi współczesnych komputerów możliwe jest rozwiązywanie złożonych modeli w krótkim czasie. Wzrasta znaczenie technik numerycznych takich jak analiza metodą elementów skończonych (MES), analizą metodą różnic skończonych (MRS) oraz ich połączeń w analizowaniu zagadnień termicznych (MERS). W praktyce modelowanie z wykorzystaniem metod numerycznych wymaga dużej wiedzy na temat geometrii obrabiarki (dokładny model), właściwości materiałów czy przepływów ciepła.

Jednym z przykładów połączenia metody MES oraz MRS jest publikacja [65], w której autorzy podjęli próbę oceny zachowania termicznego trzyosiowej frezarki. Zmiany temperatury pochodziły od ruchu osi liniowej. Analiza podzielona została na dwa etapy. Pierwszym krokiem była analiza trójwymiarowego rozkładu temperatur w dyskretnych punktach z wykorzystaniem metod MRS. W drugim etapie, wykorzystując metody MES, analizowano odkształcenia termiczne w dyskretnych punktach wykorzystując wcześniej

uzyskany model rozkładu temperatur. Wyniki symulacji zostały zweryfikowane zgodnie z metodami zawartymi w ISO 230-3 [117].

Pośrednia kompensacja termiczna w przytoczonych źródłach literaturowych obiecuje dobre wyniki w korekcji błędów. Większość z przytoczonych rozwiązań nie znalazła jednak swojego zastosowania w przemyśle. Niewielu autorów potwierdza skuteczność proponowanych metod podczas realizacji rzeczywistej produkcji. Akwizycja danych potrzebnych do opracowania modeli kompensacyjnych jest procesem czasochłonnym co może być powodem niechęci podejmowania prac nad tym tematem przez przedsiębiorstwa produkcyjne. Przedstawiona analiza literatury proponowanych rozwiązań jednoznacznie wskazuje, że w dalszym ciągu istnieje potrzeba opracowania taniego, niezawodnego oraz przystępnego sposobu redukcji błędów spowodowanych odkształceniami termicznymi obrabiarek sterowanych numerycznie. Rozwiązanie to dodatkowo powinno być możliwe do zrealizowania w warunkach produkcyjnych, bez głębokiej ingerencji w strukturę obrabiarki jak również w strukturę systemu sterowania, co czyni zagadnienie ciągle aktualnym.



### 3. MOŻLIWOŚCI ROZBUDOWY UKŁADU STEROWANIA CNC O MODEL MATEMATYCZNY

#### 3.1. Modele w procesach kompensacji błędów termicznych

W metodach pośredniej kompensacji błędów termicznych kluczowym jest wykorzystanie modelu opisującego błąd termiczny do skompensowania położenia TCP. W literaturze związanej z kompensacją błędów termicznych można spotkać szereg modeli tworzonych w oparciu o różnego rodzaju narzędzia. Spotykane metody to:

- regresja liniowa oraz nieliniowa,
- sieci neuronowe.

Najczęściej wykorzystywanymi modelami w technice kompensacji błędów termicznych w obrabiarkach są modele regresji w której występuje większa liczba zmiennych objaśniających [10, 14, 35, 54, 55, 64, 71, 100, 106]. Uogólnioną formę zapisu takiego modelu można przedstawić w postaci wielomianu zazwyczaj pierwszego stopnia:

$$\delta = \beta_0 + \beta_1 t_1 + \beta_2 t_2 + \dots + \beta_n t_n + E \quad (3.1)$$

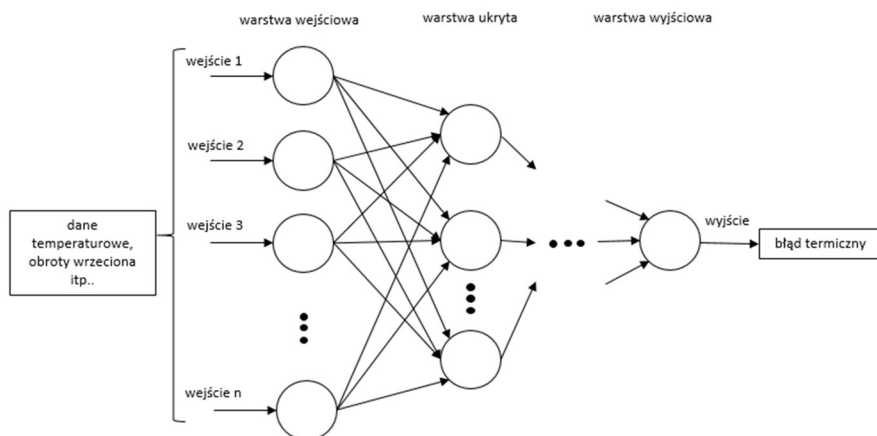
gdzie:  $\delta$  – przemieszczenie TCP,  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_n$  - współczynniki regresji z równania modelu,  $t_1, t_2, \dots, t_n$  - zmienne objaśniające lub funkcjami zmiennych objaśniających.  $E$  - składnikiem losowym.

Najczęściej w przypadku tego typu modeli zmienną objaśniającą ( $t_n$ ), jest temperatura, przyrost temperatury lub różnica pomiędzy temperaturami. Modele takie są chętnie stosowane ze względu na możliwość ekstrapolacji oraz nieskomplikowany i jawny zapis matematyczny co w znacznym stopniu ułatwia implementację takiego modelu w systemie sterowania obrabiarki.

Wśród opracowań związanych z kompensacją błędów termicznych można spotkać modele oparte na sieciach neuronowych [15, 58, 94, 107]. Klasyczna sieć neuronowa składa się z trzech warstw [86]:

- wejściowej,
- ukrytej,
- wyjściowej.

Na rysunku 3.1 przedstawiono przykładową strukturę sieci neuronowej kompensacji błędów termicznych.



**Rys. 3.1.** *Struktura sieci neuronowych dla kompensacji błędów termicznych*

Liczba neuronów w warstwie wejściowej zdeterminowana jest ilością badanych parametrów termicznych. Liczba neuronów w warstwie ukrytej uzależniona jest od stopnia skomplikowania rozważanego problemu. Na wyjściu otrzymuje się prognozę. Założeniem zastosowania sieci neuronowych w kompensacji błędów termicznych jest prognozowanie przemieszczeń TCP na podstawie danych wejściowych takich jak: temperatura podzespołów, obroty wrzeciona, pozycja wrzeciona itp. Aby ten cel osiągnąć należy taką sieć neuronową na podstawie w/w danych nauczyć. Proces gromadzenia danych jest zróżnicowany, może trwać od kilku do kilkunastu godzin. Po takim czasie uznaje się, że sieć jest w stanie przewidzieć prawidłowe wartości kompensacji błędów termicznych. Wynikiem uczenia sieci neuronowych jest niejawną postać funkcji, na podstawie której dokonywana jest korekcja położenia TCP. Niejawność postaci modelu ciągnie za sobą konsekwencje w postaci utrudnień w implementacji w systemie sterowania i wymaga w większości przypadków zastosowania zewnętrznych komputerów do realizacji obliczeń.

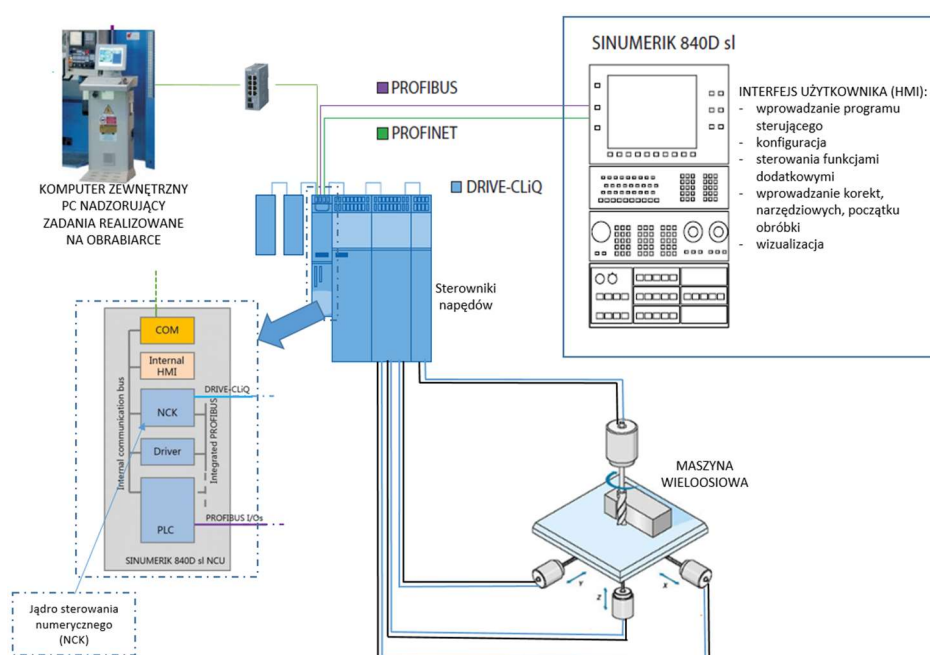
### **3.2. Charakterystyka układu sterowania CNC**

Podstawowym zadaniem obrabiarek CNC jest wykonywanie określonych zadań technologicznych poprzez realizację trajektorii ruchu narzędzia wykonawczego (frez, wiertło, nóż tokarski, itp.), względem elementu obrabianego. To w jaki sposób ma być realizowany ruch narzędzia, określone jest w programie obróbkowym a następnie realizowane przez część wykonawczą obrabiarki, czyli układ osi mechanicznych w połączeniu z napędami oraz sterownikiem CNC. Współczesne sterowania obrabiarek



realizowane są w dużej większości według koncepcji otwartego układu sterowania (ang. open equipment manufacturing - OEM), w formie rozproszonej. Charakteryzuje się ona modułową budową, rozbudowaną komunikacją sieciową, możliwością nadzorowania obrabiarki z poziomu komputerów zewnętrznych.

Na rysunku 3.2 przedstawiono przykładową architekturę maszyny sterowanej numerycznie opartej na sterowaniu Sinumerik 840D.



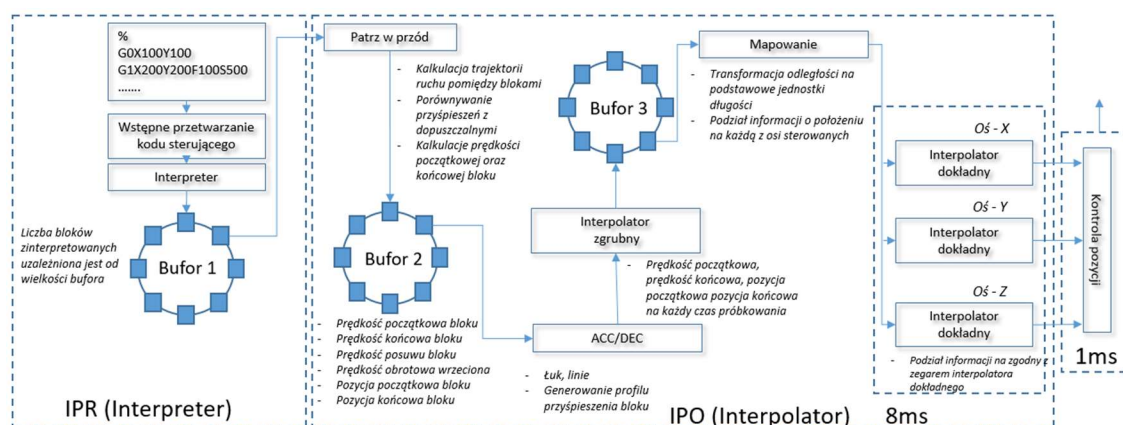
**Rys. 3.2.** Uproszczony schemat sterowania numerycznego w oparciu o sterownik Sinumerik 840D

Interfejs użytkownika (HMI, ang. Human-Machine Interface), jest modulem układu sterowania CNC za pośrednictwem którego operator obsługuje obrabiarkę. Ma on możliwość wprowadzania programów wykonawczych, parametrów mających wpływ na trajektorię ruchu np. korekcję narzędzia, ustalanie punktu początkowego obróbki w odniesieniu do obrabianej części, wywoływanie wymiany narzędzia, itp. W większości rozwiązań, w przemyśle za pośrednictwem HMI, możliwa jest wizualizacja aktualnego stanu maszyny, sygnalizowanie alarmów, możliwość zatrzymania jak również wznowienia pracy maszyny w dowolnym momencie.

Najczęściej stosowanym językiem do opisu trajektorii ruchu narzędzia jest „G-code” [128]. Jego podstawowa forma umożliwia opis ruchu narzędzia w formie odcinków oraz łuków. Uzupełnieniem podstawowego G-kodu są informacje technologiczne takie

jak: układ odniesienia, prędkość posuwu, rodzaj posuwu, jednostki odległości, prędkość obrotowa wrzeciona.

Proces wyznaczania przemieszczeń elementów wykonawczych maszyn wieloosiowych realizowany jest wieloetapowo i w przypadku dzisiejszych systemów sterowania CNC w większości przypadków wykorzystuje jądro systemu NCK typu ADCBI (sterowanie przyspieszaniem/hamowaniem przed interpolacją) [97]. Poszczególne etapy sterowania CNC realizowane są zgodnie z uproszczonym schematem blokowym zaprezentowanym na rysunku 3.3.



**Rys. 3.3.** Schemat blokowy typowej struktury NCK typu ADCBI z przepływami danych pomiędzy poszczególnymi modułami

Po załadowaniu programu sterującego jest on interpretowany przez interpreter. Na tym etapie wczytywane są niezbędne dane systemowe, dane użytkownika, kod sterujący czytany jest cyklicznie blok po bloku. Dla każdego z bloków realizowane są obliczenia oraz transformacje mające na celu określenie początkowej oraz docelowej pozycji narzędzia. Uwzględniane są korekty wprowadzone przez operatora (długość narzędzia, korekta promienia narzędzia). Następnie interpreter sprawdza czy wyliczone wartości położenia oraz prędkości nie przekraczają wartości granicznych. Wyliczone dane buforowane są w pamięci z której korzysta interpolator.

W bloku „Patrz w przód” będącym pierwszym blokiem interpolatora, tworzona jest trajektoria ruchu w przestrzeni trójwymiarowej. W przypadku gdy program składa się z wielu krótkich bloków opisujących małe przemieszczenia (np. obróbka powierzchni swobodnej opisanej krótkimi odcinkami), jest wykonywany algorytm mający na celu uniknięcie ograniczania lub zatrzymywania ruchu narzędzia pomiędzy blokami

zawierającymi krótki ruch narzędzia. Algorytm przetwarza odpowiednią ilość bloków w przód w celu dopasowania możliwie największej prędkości posuwu dla danego bloku.

W bloku przyspieszenia (ACC/DEC), dla trajektorii narzędzia tworzony jest profil prędkości stycznej do toru ruchu z uwzględnieniem ograniczeń wynikających z parametrów dynamicznych osi mechanicznych.

Interpolator zgrubny wykorzystując informacje o prędkości oraz trajektorii narzędzia, uwzględniając przemieszczenia kompensacyjne zawarte w danych maszynowych, określa pozycję docelową narzędzia dla każdej iteracji interpolacji. Wynikiem działania zgrubnego interpolatora jest tabela buforowana w pamięci. Zawiera ona informacje o pozycji, do której ma się przesunąć centralny punkt narzędzia w danym impulsie zegarowym interpolacji (IPO). Po pobraniu danych z bufora, moduł mapowania określa wartości przemieszczenia dla każdej z osi. Zadanie to realizowane jest także w takcie IPO.

Interpolator dokładny przygotowuje dane dla sterowników położenia, dzieląc drogę jaką dana oś ma przebyć podczas interpolacyjnego impulsu na przemieszczenia tej osi. Podział następuje w takcie impulsów zegara regulatora położenia, który jest wielokrotnie krótszy niż IPO.

Wartości przemieszczeń przesyłane są do napędów jako wartości zadane położenia. Układ napędowy wraz z zespołem mechanicznym tworzy oś mechaniczną maszyny wieloosiowej. Na podstawie zadanych sygnałów sterujących realizowane jest przesunięcie odpowiedniego elementu konstrukcyjnego wzdłuż prowadnic. Złożenie przesunięć osi maszyny wieloosiowej przekłada się na ruch w przestrzeni narzędzia wykonawczego.

### **3.3. Możliwości wprowadzenia kompensacji termicznej w układach sterowania CNC**

Możliwość adaptacji kompensacji termicznej położenia TCP w obrabiarce w dużym stopniu uzależniona jest od stosowanej platformy oraz już zaimplementowanych na niej rozwiązań wykorzystujących moc obliczeniową. Podejmując prace związane z implementacją kompensacji w systemie sterowania należy przeanalizować zagadnienia związane z wykonywaniem obliczeń modeli w czasie optymalnym dla poprawnej kompensacji oraz możliwością wprowadzenia wyliczonych korek do układu sterowania CNC obrabiarką.

Jednym z możliwych rozwiązań jest implementacja algorytmów obliczeń w programowalnym sterowniku logicznym (PLC), obrabiarki. O ile w momencie projektowania obrabiarki można uwzględnić taką możliwość, to gdy jest ona oddana do eksploatacji może to być utrudnione ze względu na inne funkcje realizowane przez oprogramowanie PLC. Często z przyczyn bezpieczeństwa lub chęci ochrony unikalnych rozwiązań, producenci obrabiarek blokują możliwość ingerencji w oprogramowanie PLC.

Wiele systemów sterowania CNC oferuje do dyspozycji otwarte protokoły komunikacyjne. Siemens, jako jeden z czołowych producentów udostępnia protokół OPC-UA (access my machine) [140], Fanuc udostępnia protokół Focas [143]. W obu przypadkach rozwiązania te za pośrednictwem interfejsu Ethernet umożliwiają dostęp do odczytu i zapisu informacji w czasie rzeczywistym. Odbywa się to za pośrednictwem komputera zewnętrznego lub z poziomu interfejsów wewnętrznych obrabiarki np. HMI opartego na dodatkowym komputerze PC (np. PCU50 Sinumerik). Takie rozwiązania komunikacyjne umożliwiają prowadzenie obliczeń służących do kompensacji niezależnie od PLC obrabiarki. Daje możliwość implementacji rozwiązań numerycznych np. w postaci algorytmów sieci neuronowych z wykorzystaniem języków programowania jak Python, C++, C#. Prowadzenie obliczeń na jednostce zewnętrznej PC umożliwia właściwie nieograniczone zastosowania w kontekście realizacji algorytmów obliczeniowych. Pamiętać należy jednak, że stosowanie takiej dodatkowej jednostki z punktu widzenia przemysłu niesie za sobą dodatkowe koszty związane zarówno z implementacją jak również z jego utrzymaniem (serwisowaniem).

Kolejnym zagadnieniem jest sposób wprowadzania wyliczonych korekt wynikających ze zmian temperatury. Rozpatrując schemat struktury NCK opisany w podrozdziale 3.2 (rys. 3.3), istnieje możliwość wprowadzenia wartości kompensacji w dwóch blokach funkcyjnych NCK. Ze względu na charakter wdrożeniowy niniejszej pracy opierający się na określonym systemie sterowania analizowane będą możliwości związane z sterownikiem Sinumerik 840D SL.

Ze względu na sposób działania bloku interpretera, w którym zapisywane są informacje o początkowej oraz końcowej wartości pozycji, zastosowana kompensacja w tym bloku pozwoli na wyznaczenie nowej pozycji początkowej lub końcowej uwzględniającej błąd. W tym rozwiązaniu nie ma możliwości korygowania pozycji w punktach pośrednich. Decydując się na takie rozwiązanie należy wziąć pod uwagę fakt, że interpretacja kodu NC realizowana jest z wyprzedzeniem a następnie dane buforowane

są dla interpolatora. Nie można jednoznacznie określić czasu, który upłynie od chwili wprowadzenia kompensacji w bloku interpretera do chwili realizacji ruchu narzędziem wykonawczym. Funkcja STOPRE [141], wywołana w G-kodzie, pozwala zatrzymać przetwarzanie kodu przez interpreter, do momentu w którym wszystkie bloki przed słowem STOPRE nie zostaną wykonane w biegu głównym programu. Zastosowanie tej funkcji pozwala bardziej precyzyjnie zaplanować moment wczytania korekcji do modułu interpretera. Z uwagi na quasi-stateczny charakter błędów termicznych, czyli takich, których wartość nie zmienia się lub zmienia się bardzo nieznacznie, implementacja kompensacji w bloku interpretera może być skuteczna przy odpowiednim dostosowaniu kodu sterującego obróbką.

Kolejnym blokiem funkcyjnym NCK umożliwiającym wprowadzenie korekcji temperaturowej jest interpolator zgrubny. Wprowadzenie korekt w tym bloku funkcyjnym NCK pozwala na uwzględnienie kompensacji dla kolejnych pozycji interpolowanych w takcie IPO. Odległości pomiędzy pozycjami wyznaczonymi dla kolejnych iteracji interpolacji są bardzo małe, dzięki czemu błędy zależne od pozycji mogą być kompensowane z dużą precyzją, na poziomie z jaką interpolator wyznacza kolejne bloki. Rozwiązanie to w porównaniu z przedstawionym powyżej (korekcja w bloku interpretera), pozwala na kompensacje w punktach pośrednich i zmniejsza opóźnienie pomiędzy momentem wprowadzenia korekty a jej zrealizowaniem przez narzędzie wykonawcze.

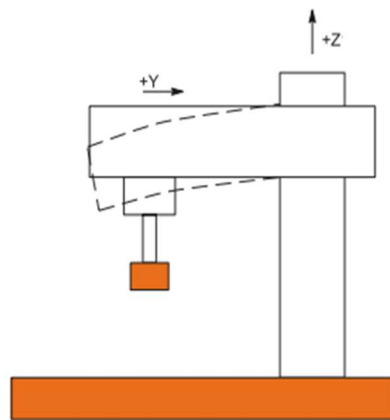
Czołowi producenci obrabiarek udostępniają opcje kompensacji w ramach interpolatora zgrubnego [134, 135]. Są to funkcje takie jak:

- kompensacja ugięcia,
- kompensacja temperaturowa,
- kompensacja wolumetryczna.

- **Kompensacja ugięcia**

Kompensacja ugięcia w obrabiarkach CNC jest metodą wykorzystywaną w przypadku gdy poruszające się osie funkcyjne obrabiarki nie są ustawione względem siebie zgodnie z wymaganiami funkcyjnymi, a w miarę odsuwania się od punktu zerowego błąd rośnie. Interpretację graficzną takiej sytuacji przedstawiono na rysunku 3.4. Zjawisko takie może występować w przypadku uginania się osi obrabiarki pod

ciężarem własnym zespołu lub z powodu zmian termicznych powodujących nierównomierne odkształcenia termiczne.



**Rys. 3.4.** Przykład ugięcia obrabiarki pod ciężarem własnym

Kompensacja ugięcia jest rodzajem kompensacji międzyosiowej korzystającej z tabeli międzyosiowych zależności. Danych kompensacyjnych błędu ugięcia nie można modyfikować gdy obrabiarka znajduje się w stanie NC-START (program obróbczy jest uruchomiony). Z tego względu metoda ta może być stosowana tylko do kompensacji błędów statycznych lub wolnozmiennych temperaturowych (dobowych).

- **Kompensacja wolumetryczna**

Kolejną metodą wprowadzania kompensacji w ramach interpolatora zgrubnego jest kompensacja wolumetryczna (VCS) [16, 142]. Rozwiązanie to pozwala skompensować położenie TCP w przestrzeni roboczej obrabiarki. Aby zapewnić poprawne działania tej metody konieczny jest pomiar wszystkich składowych błędów geometrycznych. Pomiar taki realizuje się najczęściej z wykorzystaniem interferometrów laserowych [13]. Wykorzystanie tej techniki w przypadku kompensacji błędów termicznych jest utrudnione. Modele błędów VCS muszą zostać opracowane na różnych poziomach temperatur kluczowych podzespołów obrabiarki a następnie muszą zostać wczytywane przy zaistniałych warunkach temperaturowych. Podobnie jak w przypadku kompensacji ugięcia modeli błędów VCS nie można modyfikować, gdy obrabiarka znajduje się w stanie NC-START.

- **Kompensacja temperaturowa**

Komercyjnym rozwiązaniem dostępnym w ramach interpolatora zgrubnego, w systemach sterowania Sinumerik 840D, jest kompensacja temperaturowa [135]. Kompensacja błędu termicznego w tym rozwiązaniu realizowana jest z wykorzystaniem funkcji aproksymującej funkcję błędu i ma następującą postać:

$$\Delta K(T, X) = K_0(T) + K_p(T) * (P - P_0) \quad (3.2)$$

gdzie:  $\Delta K(T, X)$  - wartość kompensacji temperaturowej osi w pozycji  $P$  i temperaturze  $T$ ,  $K_0(T)$  –niezależna od pozycji wartość kompensacji temperaturowej osi,  $P$ - aktualna pozycja osi kompensowanej,  $P_0$  - pozycja referencyjna osi kompensowanej,  $K_p(T)$ -współczynnik kompensacji temperaturowej położenia zależny od poziomu temperatury.

Jak można zauważyć, funkcja błędu 3.2, zawiera sumę błędów PDTE oraz PITE. Błąd PITE można zapisać jako zależność 3.3, natomiast błąd PDTE ma postać określoną równaniem 3.4.

$$\Delta K_{PITE}(T) = K_0(T) \quad (3.3)$$

$$\Delta K_{PDTE}(T, X) = K_p(T) * (P - P_0) \quad (3.4)$$

Blok NCK posiada informacje o aktualnym położeniu osi (parametr  $-P$ ). Z tego powodu, w celu zapewnienia pełnego funkcjonowania kompensacji, do NCK należy wprowadzić informację o wartości kompensacji niezależnej od pozycji  $K_0(T)$ , pozycji referencyjnej osi kompensowanej  $P_0$  oraz wartość współczynnika kompensacji temperaturowej  $K_p(T)$ . Założeniem rozwiązania, z powodu quasi-statycznego charakteru błędów termicznych, jest możliwość obliczania parametrów dla funkcji 3.2, w PLC, i wprowadzanie ich w określonych interwałach czasowych. W celu uniknięcia odpowiedzi skokowej układu na skokowe zmiany parametrów kompensacji temperaturowej, wartości kompensacji rozdzielane są na kilka cykli IPO przez wewnętrzny algorytm NCK w zależności od ustalonej maksymalnej wartości skokowej kompensacji. Jak wcześniej zauważono, użycie PLC do obliczeń parametrów kompensacyjnych może być niemożliwe z przyczyn technicznych. W takiej sytuacji należy rozważyć wykorzystanie protokołu komunikacyjnego [140], gdzie parametry kompensacyjne wyliczane w module zewnętrznym (np. PC) zostaną przesłane do NCK.

Kolejnym rozwiązaniem które umożliwia wyliczenie parametrów kompensacyjnych, może być wykorzystanie akcji synchronicznych [135]. Firma Siemens w swoich sterowaniach CNC udostępnia opcję specjalną akcji synchronicznych [136]. Rozwiązanie to pozwala zaprogramować natychmiastową reakcję układu sterowania na wydarzenie w czasie rzeczywistym (np. zmiana temperatury), w trakcie realizacji procesu obróbki. W ramach tego rozwiązania możliwe jest realizowanie działań matematycznych, obliczanie wielomianów, odczyt i zapis zmiennych systemowych, ustawienie alarmów na obrabiarce, niezależnie od przebiegu głównego programu. Aktywacja, uaktualnienie lub odwołanie akcji synchronicznej może być realizowane w taktie zegara interpolatora (IPO). Programowanie tych opcji dostępne jest z poziomu interfejsu HMI Sinumerik, lub z poziomu G-code, co jest dużym ułatwieniem z punktu widzenia użytkownika końcowego (programisty). Dotychczas analizowane źródła literaturowe nie prezentują kompleksowych rozwiązań z wykorzystaniem akcji synchronicznych w tym zakresie. Zaletą tego rozwiązania jest fakt, że parametry kompensacyjne mogą być powiązane z realizowanym procesem obróbczym i w zależności od potrzeb mogą być modyfikowane z poziomu programu obróbczego. Dodatkowo co jest bardzo istotne, nie wymagają ingerencji w PLC. Rozwiązanie to zostało wykorzystane w realizacji pracy.



#### 4. CEL I ZAKRES PRACY

Różnorodność rozwiązań konstrukcyjnych oraz mnogość prac badawczych prezentowanych w literaturze, dotycząca wpływu zmian temperatury na dokładność obróbki, świadczą o istotności problemu w procesach wytwarzania. Zapewnienie zadanej dokładności obróbki wymusza podejmowanie dodatkowych działań, które z kolei wpływają na czas i koszt obróbki. Są to dodatkowe kontrole międzyoperacyjne wrażliwych charakterystyk części obrabianych, stosowanie dodatkowego czy specjalnego oprzyrządowania, czy wreszcie częste kontrole dokładności samej obrabiarki. Podejmowane działania w mniejszym lub większym stopniu poprawiają przebieg procesu obróbki i przyczyniają się do wzrostu dokładności wyrobów. Nadal jednak nie rozwiązują całkowicie problemu niekorzystnego wpływu zmian temperatury na proces obróbki części, czyniąc tematykę ciągle aktualną. Również analiza literatury jednoznacznie wskazuje, że w dalszym ciągu istnieje potrzeba opracowania taniego, niezawodnego oraz przystępnego sposobu redukcji błędów spowodowanych odkształceniami termicznymi obrabiarek sterowanych numerycznie, możliwego do zrealizowania w warunkach produkcyjnych, niewymagającego głębokiej ingerencji w strukturę obrabiarki jak również w strukturę systemu sterowania.

Produkcja lotnicza w przedsiębiorstwie, w którym realizowany jest doktorat wdrożeniowy również boryka się z tym problemem. Pomimo wykorzystywania w produkcji zaawansowanych centrów obróbkowych wyposażonych w fabryczne systemy stabilizacji temperatury, nadzór nad obrabiarką i obserwacje przebiegu procesów wytwarzania wskazują nadal na niekorzystne termiczne przemieszczenia TCP które skutkuje błędami obróbki. Przeprowadzone analizy, zwróciły uwagę na istotność niektórych czynników wywołujących to zjawisko a jednocześnie nie uwzględnianych w badaniach prezentowanych w literaturze. Dotyczy to takich parametrów jak zmiany temperatury chłodziwa obróbkowego czy zmiany temperatury glikolu w obwodach stabilizacji temperaturowej elektrownicy obrabiarki jako czynników wpływających na niekorzystne przemieszczenia TCP. Zgłębienie zagadnienia wymaga jednak podjęcia prac badawczych stanowiących przedmiot niniejszej rozprawy. Mając na uwadze otwartość systemu sterowania obrabiarek CNC, pozwalającą na ingerencję we współrzędne przemieszczeń elementów obrabiarki, podjęto próby poprawy dokładności obróbki części poprzez minimalizację zmian położenia TCP względem punktu bazowego

przedmiotu obrabianego w trakcie realizacji procesu obróbki. Tak więc, podejmowana praca jest próbą rozwiązania problemu przemieszczeń TCP poprzez opracowanie sposobu minimalizacji wpływu zmian temperatury na stabilność obrabiarki CNC a tym samym poprawę dokładności obróbki. Badania bazują na informacjach pozyskanych z rzeczywistych warunków produkcyjnych, gdyż obrabiarka będąca obiektem badań jest w ciągłej eksploatacji na potrzeby produkcji seryjnej.

Prezentowane rozwiązania w literaturze bazują na dużej liczbie czujników. Dodatkowo ich rozmieszczenie wynika z autorskiego podejścia badawczego i nie podlega ograniczeniom. Mając na uwadze ograniczenia w odniesieniu do obrabiarki będącej przedmiotem badań postawiono następującą tezę:

Wykorzystanie fabrycznych punktów pomiaru temperatury jako sygnału wejściowego modelu błędu termicznego obrabiarki, umożliwi efektywną korektę współrzędnych programów NC poprawiając dokładność obróbki.

W związku z powyższym, celem pracy jest:

1. Wyszczególnienie istotnych parametrów informujących o korelacji zmian temperatury i przemieszczeń punktu charakterystycznego obrabiarki.
2. Zbudowanie modelu matematycznego przemieszczeń TCP względem punktu bazowego przedmiotu obrabianego bazującego na zmianach temperatury elementów składowych obrabiarki oraz wykorzystywanych środkach eksploatacyjnych.
3. Implementacja opracowanego modelu do systemu sterowania Sinumerik 840D SL z wykorzystaniem akcji synchronicznych.

Realizacja postawionego celu wymaga przygotowania stanowiska badawczego, przeprowadzenia badań oraz implementacji wyników do systemu sterowania obrabiarki, które stanowią o zakresie pracy. Przedstawia się on następująco:

1. Przeprowadzenie badań dokładnościowych obrabiarki będącej obiektem badań.
2. Przygotowanie oryginalnych procedur i niezbędnego oprzyrządowania służącego szybkiej kontroli podstawowych parametrów geometrycznych obrabiarki w celu okresowej szybkiej kontroli stanu technicznego.

3. Pomiary oraz rejestracja temperatur w trakcie eksploatacji obrabiarki celem poznania zakresów oraz charakterystyk zmian temperatur poszczególnych elementów oraz płynów eksploatacyjnych.
4. Pomiary i rejestracja zmian temperatury w trakcie przebiegu procesów obróbki w celu wychwycenia czynników wpływających na dryft TCP względem punktu zerowego części obrabianej.
5. Analiza istotności wpływu zmian rejestrowanych parametrów na zmiany położenia TCP.
6. Opracowanie matematycznego modelu kompensacji przemieszczeń TCP względem punktu bazowego części obrabianej.
7. Adaptacja modelu do systemu sterowania CNC.
8. Weryfikacja poprawności funkcjonowania proponowanych rozwiązań w systemie sterowania CNC.
9. Weryfikacja poprawności funkcjonowania opracowanego modelu w warunkach produkcyjnych na części testowej.



## **5. BUDOWA I CHARAKTERYSTYKA STANOWISKA BADAWCZEGO**

### **5.1. Założenia dotyczące przedmiotu badań**

W związku z tym, że prace badawcze prowadzone były na wybranym centrum obróbczym będącym w ciągłym użytku na potrzeby produkcji seryjnej, wszystkie prowadzone badania musiały zostać tak zorganizowane, aby w minimalnym stopniu zakłócać trwającą produkcję.

Założono, że pierwszy etap badań obejmował będzie ocenę stanu technicznego obrabiarki w zakresie parametrów wpływających na dokładność. W drugim etapie zostaną ocenione zachowania w odniesieniu do błędów pozycjonowania TCP w trakcie realizacji wybranego procesu technologicznego uwzględniając zmiany temperatur rejestrowanych przez dostępne sensory w obrabiarence.

Aby ocenić stan techniczny obrabiarki założono, że przeprowadzone zostaną pomiary zgodnie z wytycznymi norm ISO 230-1 [115], ISO230-2 [116], ISO 10791-1 [121] oraz ISO10791-3 [123]. Wynikający z norm zakres obejmuje:

- badania parametrów geometrycznych obrabiarki,
- badania dokładności oraz powtarzalności pozycjonowania osi roboczych.

Wyżej wymienione obszary badań wymagały odpowiedniego przygotowania. Wynikało to z zasad BHP obowiązujących w zakładzie, w którym realizowane były zadania. Oprócz wymagań BHP na czas realizowanych pomiarów konieczne było zdemontowanie elementów integralnych obrabiarki w celu umożliwienia stabilnego ustawienia interferometru laserowego oraz prowadzenia wiązki laserowej w przypadku pomiarów dokładności i powtarzalności pozycjonowania osi. Same badania musiały być prowadzone w środowisku czystym (wolnym od chłodziwa, olejów itp.). Jak wynika z doświadczeń autora, badania takie są czasochłonne, wraz z przygotowaniem obrabiarki zajmują one około 16-20 godzin. Powtarzanie cyklicznie takich badań wiązałoby się z zatrzymaniem produkcji seryjnej na długie okresy czasu co jest niedopuszczalne z punktu widzenia interesów spółki. Z tego względu zaistniała konieczność opracowania sposobu szybkiej oceny geometrycznej oraz parametrów nastawczych obrabiarki mających wpływ na dokładność obróbki. W związku z tym założono, że przygotowany zostanie program realizowany w trybie automatycznym, opierający się na pomiarach artefaktu wzorcowego w postaci zaprojektowanej na potrzeby badań kolumny

prostopadłościenniej. Kolumna ta zainstalowana zostanie na palecie wymiennej. Ze względu na to, że temperatura kolumny podczas realizacji pomiarów wewnątrz obrabiarki jest różna podczas cyklicznych pomiarów, konieczne jest również oszacowanie wpływu zmian temperatury kolumny na mierzone charakterystyki. W ramach prowadzonych pomiarów z wykorzystaniem kolumny wzorcowej założono, że sprawdzane będzie również położenie punktu zera maszynowego w czasie i jaki jest jego ewentualny zakres zmian dla poszczególnych osi liniowych obrabiarki. Takie założenia pozwoliły na w miarę sprawną realizację pomiarów bez znaczącego zakłócenia przebiegu produkcji.

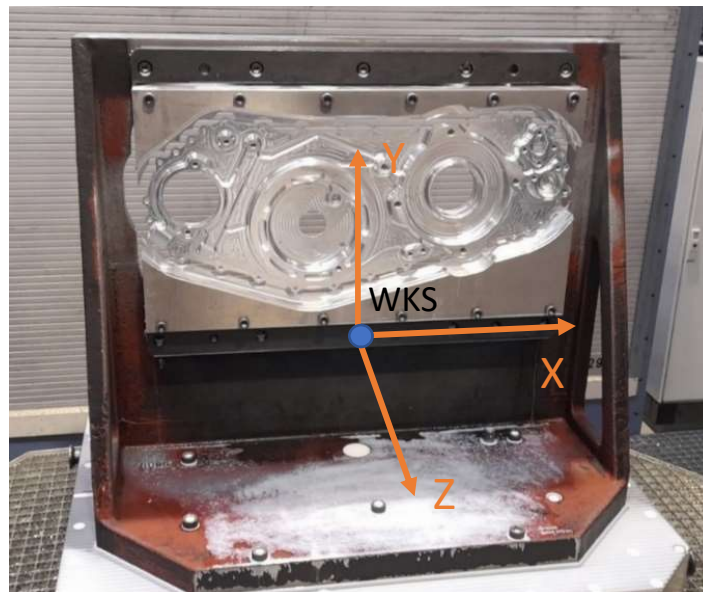
Podstawowym elementem realizowanych badań są pomiary temperatury na bazie których zbudowany będzie model matematyczny przemieszczeń TCP. Przyjęto, że badania bazować będą na istniejących układach pomiarowych obrabiarki, bez dodatkowej ingerencji w jej konstrukcję. Założenie to wynika z zachowania praw gwarancyjnych. Wykorzystywany system rejestracji temperatury to fabryczny zestaw dostarczany przez producenta maszyny.

Zadaniem narzędzia wykonawczego na obrabiarce CNC jest usuwanie materiału w celu uzyskania wyrobu gotowego o określonych charakterystykach geometrycznych. Narzędzie przemieszcza się według programu obróbczego definiującego jego ruch względem określonych układów współrzędnych mających swój początek w pewnych określonych punktach. Jedną z czynności przed rozpoczęciem obróbki na obrabiarkach jest ustalenie położenia punktu, przedmiotu obrabianego, w którym ma swój początek układ obróbczy przedmiotu obrabianego (WKS). Położenie punktu bazowego układu WKS można ustalić za pomocą sondy przedmiotowej w bazie pomiarowej, a następnie cyklicznie weryfikować to położenie w trakcie realizacji procesu obróbki i korygować w zależności od potrzeb. W warunkach idealnych każda kolejna weryfikacja położenia punktu bazowego nie powinna wskazywać odchyłki położenia TCP względem punktu bazowego obróbki. Wszelkie niepożądane przemieszczenia termiczne TCP względem punktu zerowego przedmiotu obrabianego, będą skutkowały błędami wzajemnego położenia narzędzia wykonawczego i części obrabianej. Z tego powodu zaistniała konieczność znalezienia zależności pomiędzy zmianami temperatury a zmianami położenia TCP względem punktu zerowego obrabianego przedmiotu w trakcie realizacji procesu obróbki. Aby prowadzone badania odpowiadały warunkom produkcyjnym założono, że dane temperaturowe będą pochodzić z istniejących już systemów pomiarowych obrabiarki, natomiast informacje na temat przemieszczeń TCP względem punktu bazowego będą rejestrowane na rzeczywistym procesie obróbki.

W związku z powyższym założono, że zakres badań przemieszczeń TCP względem punktu bazowego przedmiotu obrabianego będzie obejmował jeden wybrany proces obróbki pokrywy przekładni AGB (accessory gearbox), ustalonej i zamocowanej w określonym uchwycie obróbkowym który wykorzystywany jest powszechnie w ich wytwarzaniu.

Program sterujący procesem obróbki nie jest procesem zamrożonym i w trakcie akwizycji danych zachodzą jego zmiany ze względów optymalizacyjnych. Zmianom poddawane są takie parametry jak prędkości posuwu, obroty wrzeciona, strategia obróbki. Założono, że wymienione czynniki nie będą brane pod uwagę jako zmienne podczas badań.

Na rysunku 5.1 przedstawiono uchwyt obróbkowy z częścią typu pokrywa przekładni AGB, wraz z zaznaczonym położeniem układu WKS w otworze technologicznym będącym bazą pomiarową. Otwór technologiczny znajduje się na listwie bazującej półfabrykat w formie kostki prostopadłościennej o wymiarach: 720mm x 390mm x 65mm.



**Rys. 5.1.** Uchwyt obróbkowy wraz z częścią typu pokrywa przekładni AGB (accessory gearbox)

Pomimo, że obrabiarka na której prowadzono badania jest maszyną 5-osiową, to w analizowanym przypadku obróbka prowadzona jest w pozycjach zerowych osi obrotowych ( $A0^\circ$ ,  $B0^\circ$ ), bez użycia transformacji 5-osiowych. Dlatego też założono, że analizy wykonane będą jak dla obrabiarki 3 osiowej z podstawowym układem WKS, którego kierunki oraz zwroty są zgodne z układem MKS. Dodatkowo przyjęto, że w prowadzonych badaniach analiza dotyczyć będzie przemieszczenia TCP względem

punktu bazowego obróbki tylko w kierunkach X oraz Y. Wynika to z wniosków ze zrealizowanej dotychczas produkcji, gdzie obserwowane błędy wzajemnego położenia osi otworów funkcyjnych części obrabianej odnoszą się do tych właśnie osi.

Założono, że narzędziem wykorzystywanym podczas automatycznych pomiarów kolumny kalibracyjnej oraz dryftu TCP będzie sonda przedmiotowa RMP600 [138], wykorzystywana w trakcie produkcji. Takie założenie wymusiło ocenę niepewności pomiaru pozycji w różnych konfiguracjach pomiarowych z wykorzystaniem tej właśnie sondy.

## 5.2. Ogólna charakterystyka stanowiska

Ogólny widok stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 5.2. Centrum obróbcze mCm iTank 1600 produkcji włoskiej firmy mCm S.p.A., jest jedną z czterech bliźniaczych maszyn zainstalowanych w linii FMS w spółce, w której prowadzone były badania. Jest obrabiarką pięcioosiową w układzie poziomym TH (Table Head). Układ osi roboczych przedstawiony został na rysunku 5.3. Słup obrabiarki przemieszcza się na podstawie wzdłuż osi X. Głowica narzędziowa przemieszcza się pionowo wzdłuż osi Y. Głowica narzędziowa podpierająca wrzeciono realizuje ruch obrotowy osi A. Oś Z obrabiarki składa się z wózka, który przesuwają stół obrotowy – oś B, wzdłuż podstawy. Wszystkie główne osie liniowe obrabiarki (X, Y, Z), sterowane są przez serwomotory oraz śruby kulowe. Osie A oraz B napędzane są przez serwomotor oraz przekładnię. Każda oś liniowa wyposażona jest we własny liniał optyczny absolutny Heidenhain LC195S zapewniający bezpośredni pomiar położenia każdej z osi z rozdzielczością 0.001 $\mu$ m. W celu bezpośredniego pomiaru położenia kąтового osi obrotowych (A i B), producent zainstalował enkodery w osi obrotu.

Na osi obrotowej B instalowane są automatycznie wymieniane palety z uchwytami obróbkowymi. Uchwyty obróbkowe magazynowane są w magazynie wysokiego składowania i dostarczane do obrabiarki w razie konieczności za pomocą robota przemysłowego. Linia FMS zarządza oprogramowanie JFMX za pośrednictwem interfejsu Ethernet. Działanie obrabiarki kontrolowane jest przez kontroler CNC Sinumerik 840D SL [139]. System sterowania CNC bazuje na komputerze przemysłowym który za pomocą interfejsu Profibus oraz Profinet komunikują się systemem napędów Sinamics S120 i pulpitem operatora (rys. 5.2a). Połączony jest



również systemem zarządzającym linią FMS oraz rejestratorem temperatury podzespołów.



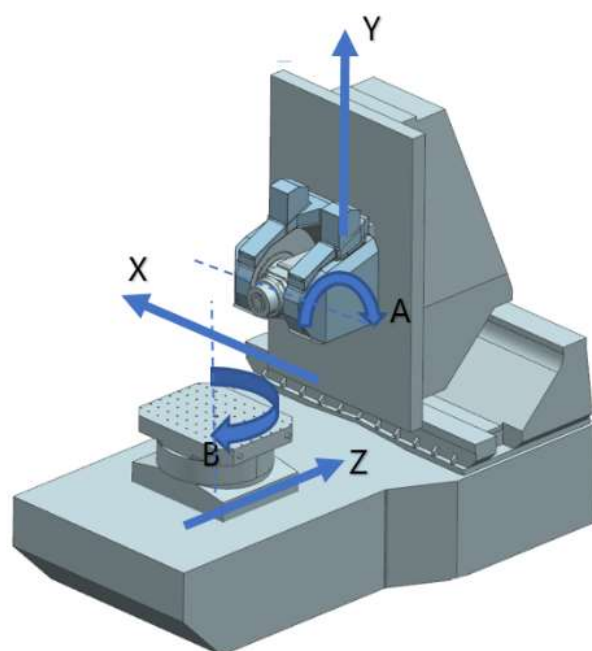
a)



b)

**Rys. 5.2.** *Ogólny widok obrabiarki mCm iTank1600. a) pulpit operatora, b) widok ogólny obrabiarki*

Obrabiarka wyposażona jest w system stabilizacji termicznej którego zadanie to utrzymywanie z założenia równego rozkładu temperatur w poszczególnych elementach funkcyjnych. Temperaturą docelową do której układ stabilizacji dąży to temperatura podstawy obrabiarki, która jest determinowana przez temperaturę otoczenia.



**Rys. 5.3.** Układ osi maszynowych obrabiarki mCm iTank1600

W celu zmniejszenia błędu pozycjonowania związanego z rozszerzalnością w osi wrzeciona producent wyposażył obrabiarkę w elektroniczny układ kompensacji długości wrzeciona zaimplementowany w PLC obrabiarki.

### **5.3. Oprzyrządowanie do pomiaru dryftu termicznego TCP oraz geometrii obrabiarki**

Do pomiaru przemieszczeń termicznych TCP wykorzystano sondę przedmiotową tensometryczną RMP600 firmy Renischaw [138], z zainstalowanym trzpieniem pomiarowym o długości 110 mm. Sonda podłączona jest do interfejsu RMI-Q (system transmisji radiowej). Według producenta powtarzalność jednokierunkowa ( $2\sigma$ ) w kierunkach prostopadłych do osi sondy (X, Y) z zainstalowanym trzpieniem 100 mm, wynosi 0,35  $\mu\text{m}$ . Programowanie ruchów pomiarowych w obrabiarence zrealizowano z wykorzystaniem cykli pomiarowych Sinumerik [139]. W celu zmniejszenie niedokładności pomiaru pozycji TCP sondą przedmiotową, wynikających z potencjalnych błędów powtarzalności mocowania sondy w stożku narzędziowym elektrowrzeciona, sonda została skalibrowana jako jednokierunkowa. W przypadku sondy jednokierunkowej, kierunek przełączania w osiach X oraz Y jest przy każdym pomiarze sondy aktualizowany przez obrót wrzeciona. Ruch posuwowy

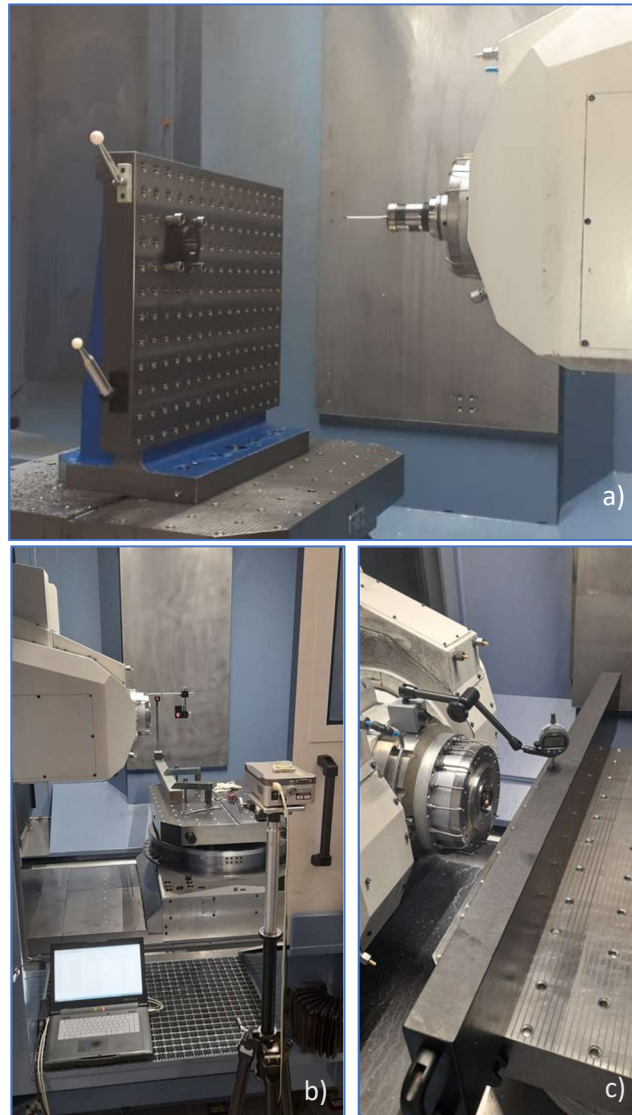
pomiarowy (dojazd do punktu styku z elementem mierzonym), realizowany był z prędkością 300 mm/min.

Pomiary geometryczne zgodne z normą ISO10791-1 [121], realizowano z wykorzystaniem:

- wzorca liniowego (rys. 5.4c),
- wzorca kąтового,
- cylindra wzorcowego,
- poziomnicy maszynowej,
- czujników zegarowych inkrementalnych.

Badania dokładności oraz powtarzalności pozycjonowania osi liniowych zgodne z normą ISO230-2 [116], przeprowadzono z wykorzystaniem interferometru laserowego RENISHAW XL (rys. 5.4b), zawierającego w zestawie interferometr laserowy RENISHAW XL-80, jednostkę kompensacyjną RENISHAW XC-80 oraz zestaw optyki do pomiarów liniowych. Do pomiaru osi obrotowych wykorzystano dodatkowo przystawkę RENISHAW XR20-W.

Badana obrabiarka znajduje się w ciągłej eksploatacji i narażona jest na incydenty w postaci kolizji w trakcie wdrożeń nowych produktów lub w trakcie realizacji procesów produkcji seryjnej. Po każdym takim incydencie konieczne jest sprawdzenie jej pod kątem poprawności parametrów geometrycznych. Badania takie z wykorzystaniem tradycyjnych wzorców przedmiotowych realizowane zgodnie z normą [121], są czasochłonne. W związku z tym opracowano autorską procedurę szybkiej kontroli wybranych parametrów obrabiarki. Automatyczna kontrola geometrii obrabiarki wykorzystywała specjalnie do tego celu zaadaptowaną kolumnę z powierzchniami wzorcowymi oraz kulami wzorcowymi (rys. 5.4a). Kolumna wzorcowa zainstalowana została na stałe na jednej z palet składowanych w magazynie uchwytów obróbkowych linii FMS. W razie konieczności pomiaru, paleta dostarczana jest do obrabiarki w celu realizacji zaplanowanego zadania kontroli. Akwizycja zebranych danych odbywa się w sposób automatyczny.

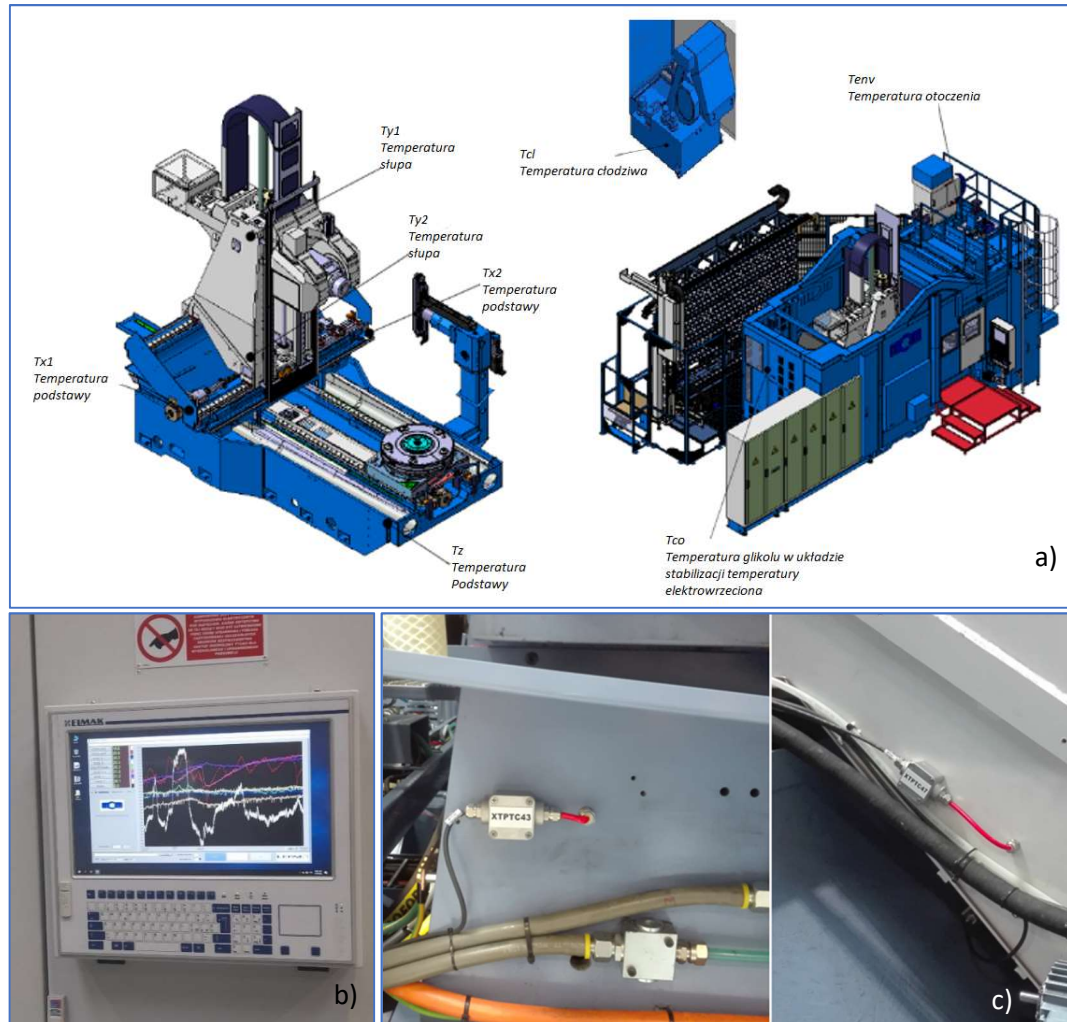


**Rys. 5.4.** Widok obrabiarki wewnątrz przestrzeni roboczej: a) pomiary z wykorzystaniem kolumny wzorcowej, b) pomiary z wykorzystaniem zestawu laserowego RENISHAW XL, c) pomiary z wykorzystaniem wzorca liniowego granitowego

## 5.4. Oprzyrządowanie do pomiaru temperatury

Pomiar temperatury elementów obrabiarki został zrealizowany w oparciu o czujniki RTD typu PT100 Kl. A wg IEC 60751 [129], rozmieszczone zgodnie z rysunkiem 5.5a. W celu kompensacji zmian rezystancji przewodów łączących sensor z przetwornikiem analogowo cyfrowym zastosowano połączenie trój-przewodowe. Czujniki temperatury zainstalowane są w otworach technologicznych (rys. 5.5c). Aby poprawić przewodność cieplną zastosowano pastę termo-przewodzącą pomiędzy czujnikiem a powierzchnią styku. Według danych katalogowych producenta, zastosowany zestaw do pomiaru temperatury, zapewnia pomiar z dokładnością  $\pm 0,1$  °C. Za rejestrację danych,

wyświetlanie w czasie rzeczywistym oraz przesyłanie do sterownika CNC odpowiedzialny jest komputer przemysłowy z zainstalowanym oprogramowaniem producenta obrabiarki (rys. 5.5b).



**Rys. 5.5.** a) Schemat rozmieszczenia czujników temperatury w obrabiarce (źródło: dokumentacja DTR obrabiarki), b) komputer przemysłowy odpowiedzialny za wyświetlanie danych temperaturowych podzespołów obrabiarki, c) sposób montażu czujników PT100 w obrabiarce

Autor pracy nie miał wpływu na lokalizację czujników temperatury, ponieważ system pomiarowy jest jedną z opcji wyposażenia centrum obróbczego. W połączeniu z systemem stabilizacji temperaturowej opisanej w podrozdziale 2.3 (rys. 2.1), jego pierwotnym założeniem funkcjonalnym było monitorowanie oraz informowanie o anomaliach pracy systemu stabilizacji temperaturowej obrabiarki. Funkcjonalność zestawu zawierała tylko możliwość przesyłania danych temperaturowych do sterownika CNC w celu ich późniejszego przetwarzania w trakcie realizacji programów obróbczych.

W trakcie realizacji badań z wykorzystaniem kolumny wzorcowej oraz w badaniach korelacyjnych wpływu temperatury na charakterystyki kluczowe części, w jednej z publikacji autora [4], wykorzystywana była sonda przylgowa typu termopara typ TP44.10 firmy Hexagon, zainstalowana w oprawce narzędziowej (rys. 5.6).



**Rys. 5.6.** Sonda stykowa TP44.10 firmy Hexagon do pomiaru temperatury

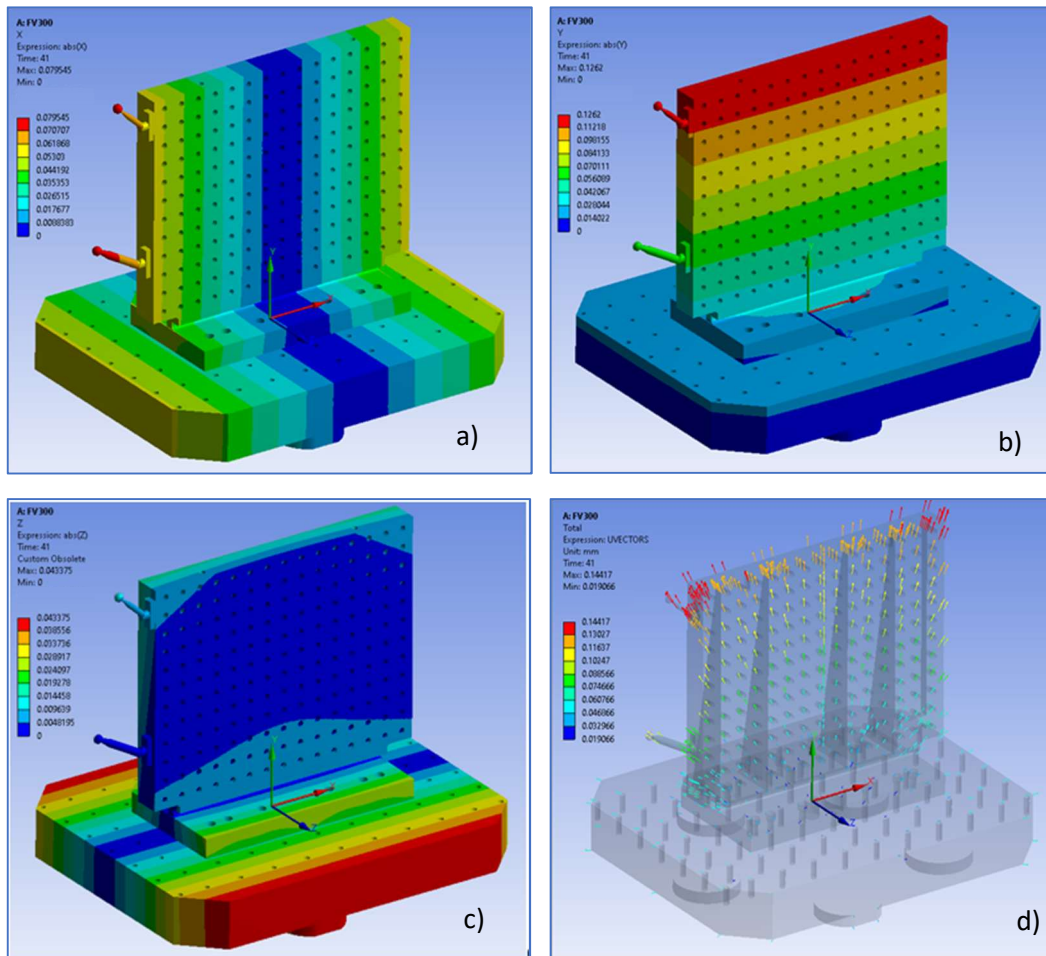
Pomiar realizowany był poprzez docisk końcówki pomiarowej w ustalonym czasie do badanego elementu. Informacje na temat poziomu zmierzonej temperatury zapisywane były w jednej ze zmiennych maszynowych. Dokładność pomiaru sondy po wprowadzeniu danych kalibracyjnych termopary wynosiła  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ .

## 6. BADANIA KONTROLNE OBRABIARKI

### 6.1. Analiza odkształceń termicznych kolumny wzorcowej

Wymiary charakterystyczne kolumny wzorcowej zostały zmierzone na maszynie współrzędnościowej w warunkach laboratoryjnych. W trakcie realizacji pomiarów temperatura kolumny wynosiła  $20^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ . W warunkach produkcyjnych nie ma możliwości utrzymania tak stabilnych parametrów termicznych. W związku z tym, że kolumna wykonana została z materiału JIS G5501 FC300, którego uśredniony współczynnik rozszerzalności cieplnej wynosi  $\alpha = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$ , będzie podlegała ona odkształceniom termicznym.

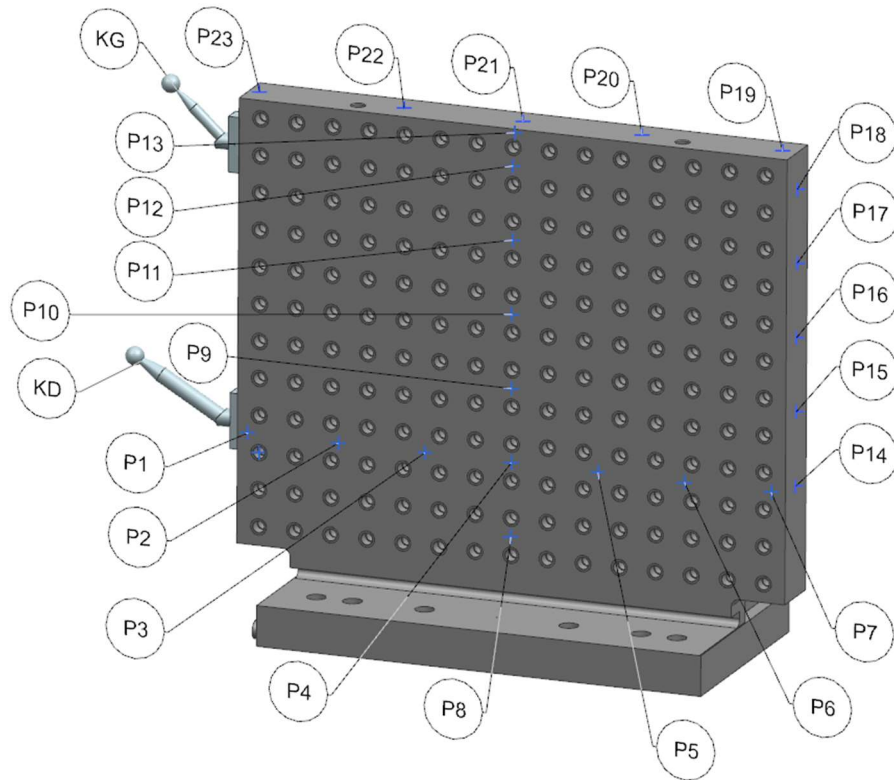
W celu oceny wpływu zmian temperatury na odkształcenia termiczne kolumny wzorcowej, przeprowadzono symulację MES z wykorzystaniem modułu Mechanical w oprogramowaniu Ansys Workbench 18.2. Kolumna wzorcowa przechowywana była w magazynie wysokiego składowania w temperaturze otoczenia. Nie oddziaływały na nią inne źródła ciepła. Z tego powodu dla symulacji odkształceń na poszczególnych poziomach temperatur przyjęto uproszczenie w postaci założenia stałości temperatury w całej objętości badanego obiektu. Symulację przeprowadzono w zakresie temperatury  $T_w=10^{\circ}\text{C}$  do  $T_w=30^{\circ}\text{C}$  co  $0,5^{\circ}\text{C}$  przy temperaturze odniesienia  $20^{\circ}\text{C}$ . Temperatura ta była równa temperaturze wzorcowania kolumny na maszynie współrzędnościowej. Parametry materiałowe elementów składowych kolumny wzorcowej przyjęto zgodnie z ich notami katalogowymi. Analizy przemieszczeń termicznych wykonywane były względem prostokątnego układu współrzędnych umieszczonego w punkcie referencyjnym palety, który jest jednocześnie punktem zera maszynowego dla osi liniowych X, Y, Z obrabiarki. Na rysunku 6.1 przedstawiono wyniki symulacji przemieszczeń dla poszczególnych kierunków głównych w temperaturze wzorca  $30^{\circ}\text{C}$  w celu uwydatnienia efektów. Zaprezentowano również wynik symulacji przemieszczeń termicznych w postaci U-wektorów które są wypadkowymi przemieszczeń cząstkowych  $\epsilon_X$ ,  $\epsilon_Y$ ,  $\epsilon_Z$ , w wybranych punktach.



**Rys. 6.1.** Mapa absolutnych przemieszczeń dla temp 30°C : a) w kierunku X ( $\epsilon_X$ ), b) w kierunku Y ( $\epsilon_Y$ ), c) w kierunku Z ( $\epsilon_Z$ ), d) w postaci U wektora.  $U = \epsilon_X + \epsilon_Y + \epsilon_Z$

Z punktu widzenia pomiarów kontrolnych na obrabiarce CNC, ważnym jest aby poznać jaka jest zależność przemieszczeń termicznych punktów: KG, KD, P1 do P23 – rozmieszczonych zgodnie z rysunkiem 6.2. Wynikiem symulacji oprócz wizualizacji, były tabele przemieszczeń cząstkowych  $\epsilon_X$ ,  $\epsilon_Y$ ,  $\epsilon_Z$  dla w/w punktów na określonych poziomach temperatury kolumny. Taka forma danych z punktu widzenia zastosowania do kompensacji późniejszych pomiarów jest kłopotliwa. Dlatego na podstawie uzyskanych danych symulacyjnych, opracowano modele przemieszczeń temperaturowych dla punktów referencyjnych.





**Rys. 6.2.** Rozmieszczenie punktów referencyjnych na kolumnie wzorcowej

Ze względu na charakter uzyskanych danych przyjęto ogólną postać równania liniowego:

$$\mathcal{E}(T) = \beta * T_W + b \quad (6.1)$$

gdzie:  $\mathcal{E}(T)[mm]$  – przemieszczenie w wybranym kierunku od temperatury,  $T_W[^\circ C]$  – temperatura wzorca,  $\beta, b$  – współczynniki równania.

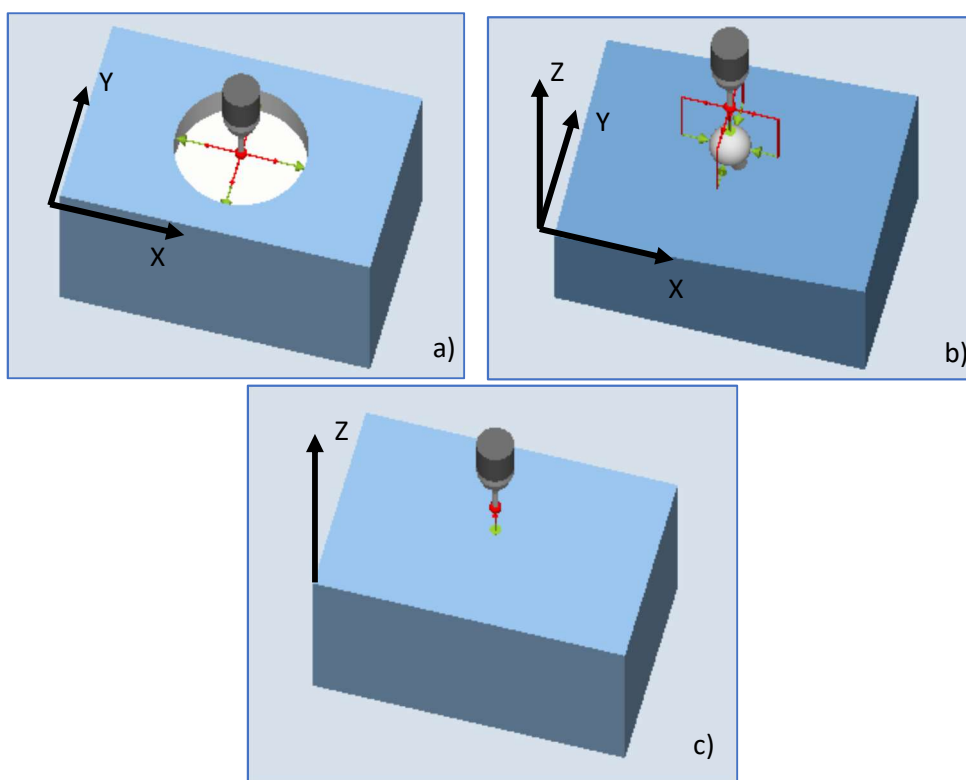
Uzyskane równania metodą najmniejszych kwadratów zostały przedstawione w tabeli 6.1. Współczynnik determinacji  $R^2$  dla opracowanych modeli przemieszczeń we wszystkich przypadkach był na poziomie większym niż 0,997 co stanowi bardzo dobre dopasowanie modelu do danych eksperymentalnych. Z otrzymanych równań wynika, że odkształcenia termiczne w kierunkach głównych ( $\mathcal{E}_X, \mathcal{E}_Y, \mathcal{E}_Z$ ), dla punktów P1 do P23 leżących na powierzchni kolumny nie będą miały negatywnego wpływu na wyniki pomiaru prostoliniowości oraz zależności kąto-owe. Na podstawie położenia punktu centralnego kuli KD, w późniejszym etapie badań, wyznaczane jest położenie zera maszynowego obrabiarki. Dla wyznaczenia położenie zera maszynowego w osi Y konieczne było uwzględnienie przemieszczeń termicznych  $\mathcal{E}_{YKD}$  w cyklu pomiarowym.

**Tab. 6.1.** Równania przemieszczeń termicznych wybranych punktów kolumny wzorcowej

$\mathcal{E}_X$	$\mathcal{E}_Y$	$\mathcal{E}_Z$
$\mathcal{E}_{XKG} = -0,0072T_W + 0,143$	$\mathcal{E}_{YKG} = 0,0125 T_W - 0,2507$	$\mathcal{E}_{ZKG} = -0,001 T_W + 0,0204$
$\mathcal{E}_{XKD} = -0,0079 T_W + 0,157$	$\mathcal{E}_{YKD} = 0,0069 T_W - 0,1371$	$\mathcal{E}_{ZKD} = -0,0004 T_W + 0,0087$
$\mathcal{E}_{XP1} = -0,0054 T_W + 0,108$	$\mathcal{E}_{YP1} = 0,0058 T_W - 0,1162$	$\mathcal{E}_{ZP1} = 0,0003 T_W - 0,0052$
$\mathcal{E}_{XP2} = -0,0036 T_W + 0,072$	$\mathcal{E}_{YP2} = 0,0058 T_W - 0,1168$	$\mathcal{E}_{ZP2} = 0,0004 T_W - 0,007$
$\mathcal{E}_{XP3} = -0,0018 T_W + 0,036$	$\mathcal{E}_{YP3} = 0,0059 T_W - 0,1178$	$\mathcal{E}_{ZP3} = 0,0004 T_W - 0,0087$
$\mathcal{E}_{XP4} = 9 \cdot 10^{-07} T_W - 2 \cdot 10^{-5}$	$\mathcal{E}_{YP4} = 0,0059 T_W - 0,1181$	$\mathcal{E}_{ZP4} = 0,0004 T_W - 0,0096$
$\mathcal{E}_{XP5} = 0,0018 T_W - 0,036$	$\mathcal{E}_{YP5} = 0,0059 T_W - 0,1178$	$\mathcal{E}_{ZP5} = 0,0004 T_W - 0,0087$
$\mathcal{E}_{XP6} = 0,0036 T_W - 0,0724$	$\mathcal{E}_{YP6} = 0,0058 T_W - 0,1168$	$\mathcal{E}_{ZP6} = 0,0004 T_W - 0,007$
$\mathcal{E}_{XP7} = 0,0054 T_W - 0,1089$	$\mathcal{E}_{YP7} = 0,0058 T_W - 0,1162$	$\mathcal{E}_{ZP7} = 0,0003 T_W - 0,0052$
$\mathcal{E}_{XP8} = 9 \cdot 10^{-07} T_W - 2 \cdot 10^{-5}$	$\mathcal{E}_{YP8} = 0,0044 T_W - 0,0884$	$\mathcal{E}_{ZP8} = 0,0005 T_W - 0,071$
$\mathcal{E}_{XP9} = 9 \cdot 10^{-07} T_W - 2 \cdot 10^{-5}$	$\mathcal{E}_{YP9} = 0,0074 T_W - 0,1479$	$\mathcal{E}_{ZP9} = 0,0003 T_W - 0,0058$
$\mathcal{E}_{XP10} = 8 \cdot 10^{-07} T_W - 2 \cdot 10^{-5}$	$\mathcal{E}_{YP10} = 0,0089 T_W - 0,177$	$\mathcal{E}_{ZP10} = 8 \cdot 10^{-7} T_W - 2 \cdot 10^{-5}$
$\mathcal{E}_{XP11} = 8 \cdot 10^{-07} T_W - 2 \cdot 10^{-5}$	$\mathcal{E}_{YP11} = 0,0104 T_W - 0,207$	$\mathcal{E}_{ZP11} = -9 \cdot 10^{-5} T_W + 0,0017$
$\mathcal{E}_{XP12} = 8 \cdot 10^{-07} T_W - 2 \cdot 10^{-5}$	$\mathcal{E}_{YP12} = 0,0119 T_W - 0,2375$	$\mathcal{E}_{ZP12} = 8 \cdot 10^{-7} T_W - 2 \cdot 10^{-5}$
$\mathcal{E}_{XP13} = 8 \cdot 10^{-07} T_W - 2 \cdot 10^{-5}$	$\mathcal{E}_{YP13} = 0,0125 T_W - 0,2509$	$\mathcal{E}_{ZP13} = -0,0004 T_W + 0,007$
$\mathcal{E}_{XP14} = 0,0057 T_W - 0,113$	$\mathcal{E}_{YP14} = 0,0058 T_W - 0,1154$	$\mathcal{E}_{ZP14} = 1 \cdot 10^{-5} T_W - 0,0003$
$\mathcal{E}_{XP15} = 0,0057 T_W - 0,1143$	$\mathcal{E}_{YP15} = 0,0073 T_W - 0,1457$	$\mathcal{E}_{ZP15} = -0,0002 T_W + 0,0043$
$\mathcal{E}_{XP16} = 0,0057 T_W - 0,114$	$\mathcal{E}_{YP16} = 0,0088 T_W - 0,1759$	$\mathcal{E}_{ZP16} = -0,0004 T_W + 0,008$
$\mathcal{E}_{XP17} = 0,0057 T_W - 0,114$	$\mathcal{E}_{YP17} = 0,0103 T_W - 0,206$	$\mathcal{E}_{ZP17} = -0,0006 T_W + 0,012$
$\mathcal{E}_{XP18} = 0,0057 T_W - 0,1143$	$\mathcal{E}_{YP18} = 0,0118 T_W - 0,236$	$\mathcal{E}_{ZP18} = -0,0008 T_W + 0,016$
$\mathcal{E}_{XP19} = 0,0055 T_W - 0,1104$	$\mathcal{E}_{YP19} = 0,0126 T_W - 0,2517$	$\mathcal{E}_{ZP19} = -0,0009 T_W + 0,017$
$\mathcal{E}_{XP20} = 0,0025 T_W - 0,0502$	$\mathcal{E}_{YP20} = 0,0126 T_W - 0,2518$	$\mathcal{E}_{ZP20} = -0,0006 T_W + 0,012$
$\mathcal{E}_{XP21} = 9 \cdot 10^{-7} T_W - 2 \cdot 10^{-5}$	$\mathcal{E}_{YP21} = 0,0126 T_W - 0,2519$	$\mathcal{E}_{ZP21} = -0,0006 T_W + 0,011$
$\mathcal{E}_{XP22} = -0,0025 T_W + 0,050$	$\mathcal{E}_{YP22} = 0,0126 T_W - 0,2518$	$\mathcal{E}_{ZP22} = -0,0006 T_W + 0,013$
$\mathcal{E}_{XP23} = -0,0055 T_W + 0,110$	$\mathcal{E}_{YP23} = 0,0126 T_W - 0,2517$	$\mathcal{E}_{ZP23} = -0,0009 T_W + 0,017$

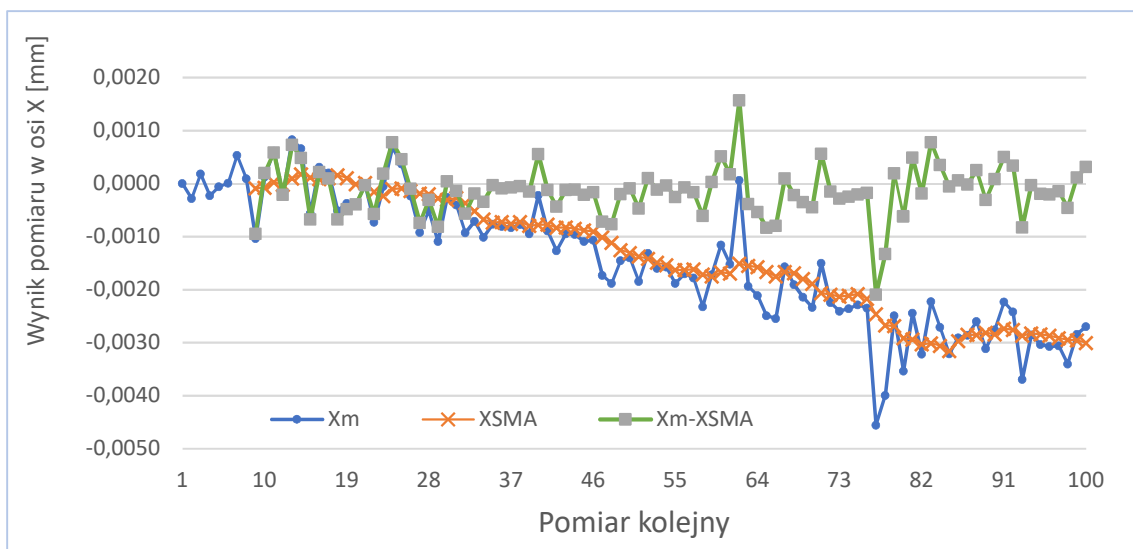
## 6.2. Niepewność pomiarów pozycji TCP sondą przedmiotową względem elementów referencyjnych

W celu oceny niepewności pomiarów sondą RMP600 na badanej obrabiarce przeprowadzono eksperymenty. Oceniono trzy warianty wyznaczania pozycji sondą przedmiotową. Na rysunku 6.3 przedstawiono schematycznie metodykę pomiarów. Wariant pierwszy pomiarowy polegał na cyklicznych pomiarach pozycji środka pierścienia wzorcowego w płaszczyźnie XY obrabiarki. Realizowany był zgodnie ze schematem czteropunktowego pomiaru pozycji otworu o średnicy 16 mm przy wykorzystaniu cyklu CYCLE977 (rys. 6.3a). Drugi wariant pomiarowy polegał na cyklicznych pomiarach położenia punktu centralnego kuli wzorcowej o średnicy 20 mm w osiach X, Y, Z obrabiarki. Realizowany był zgodnie ze schematem pięciopunktowego pomiaru pozycji kuli przy wykorzystaniu cyklu CYCLE997 (rys. 6.3b). Trzeci wariant pomiarowy polegał na cyklicznych pomiarach pozycji płaszczyzny w kierunku prostopadłym do osi Z obrabiarki. Realizowany był zgodnie ze schematem jednopunktowego pomiaru pozycji przy wykorzystaniu cyklu CYCLE978 (rys. 6.3c).

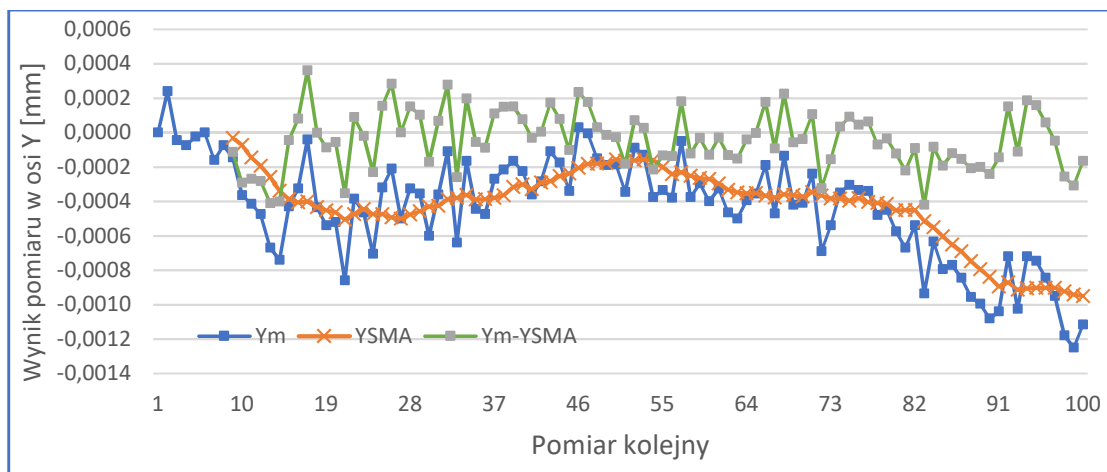


**Rys. 6.3.** Schematy pomiarów wykorzystane do oceny niepewności pomiaru sondą przedmiotową: a) 4 - punktowy pomiar środka otworu, wariant Wp1, b) 5 - punktowy pomiar punktu centralnego kuli wzorcowej, wariant Wp2, c) 1-punktowy pomiar płaszczyzny w osi Z, wariant Wp3

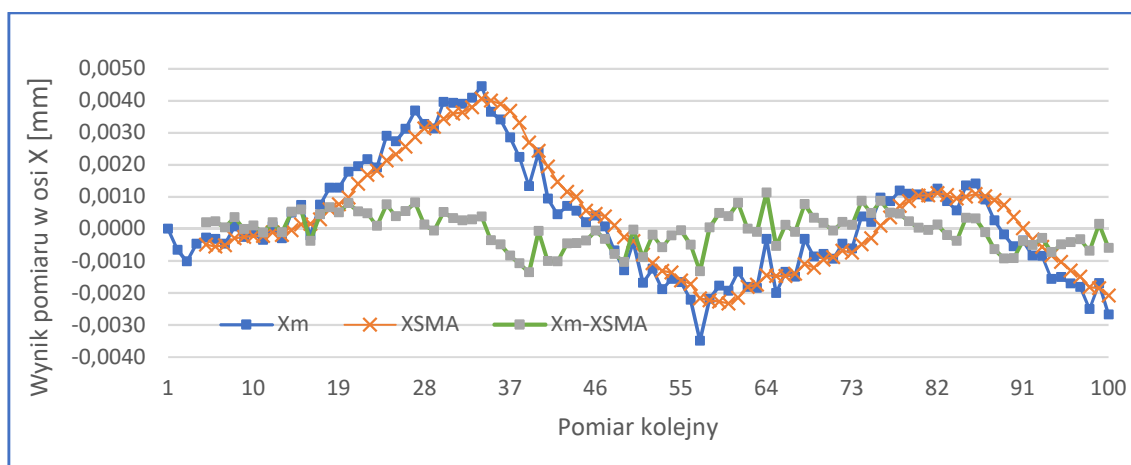
Aby zasymulować rzeczywiste warunki pomiarów w produkcji, pomiędzy poszczególnymi cyklami pomiarowymi, wykonywano wymianę narzędzia. Zabieg ten miał na celu wprowadzić błędy zamocowania sondy w stożku wrzeciona jako jeden z elementów wpływających na błąd pomiaru. Pomiedzy każdym z pomiarów realizowano cykl oczyszczania mierzonego artefaktu (płukanie chłodziwem) w celu zasymulowania rzeczywistych warunków obróbki. Dla każdego wariantu wykonano 100 pomiarów w okresie około czterech godzin. W trakcie takiego okresu czasu może nastąpić dryft termiczny TCP względem mierzonego wzorca. Na podstawie przebiegu danych zmierzonych  $X_m$ ,  $Y_m$ ,  $Z_m$  zilustrowanych kolorem niebieski na rysunkach od 6.4 do 6.9 w których zauważalne są odchylenia wartości mierzonych z określoną tendencją oraz na podstawie informacji zawartych w źródłach literaturowych [7, 80], przyjęto, że jest to dryft termiczny TCP względem mierzonego elementu. Aby usunąć ten efekt, obliczono średnią ruchomą nieważoną, w sposób cykliczny postępujący z przedziału optymalnej liczby punktów, a następnie odejmowano ją od pierwotnie uzyskanych wyników. Uzyskane wyniki zostały przedstawione w formie graficznej na rysunkach 6.4 do 6.9 w postaci przebiegów  $X_m$ -XSMA,  $Y_m$ -YSMA oraz  $Z_m$ -ZSMA oznaczonych na wykresach kolorem zielonym. Następnie podzielono je na trzy równe części po  $n=31$  pomiarów w serii. Dopiero dla tak uzyskanych danych przeprowadzono dalsze obliczenia.



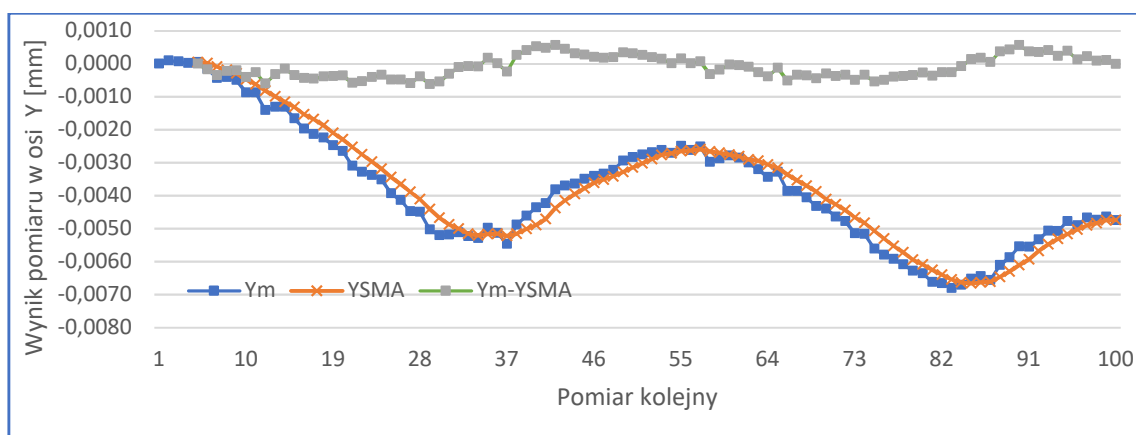
**Rys. 6.4.** Wyniki pomiarów pozycji punktu centralnego pierścienia wzorcowego metodą 4-punktową dla osi X obrabiarki, wariant Wp1



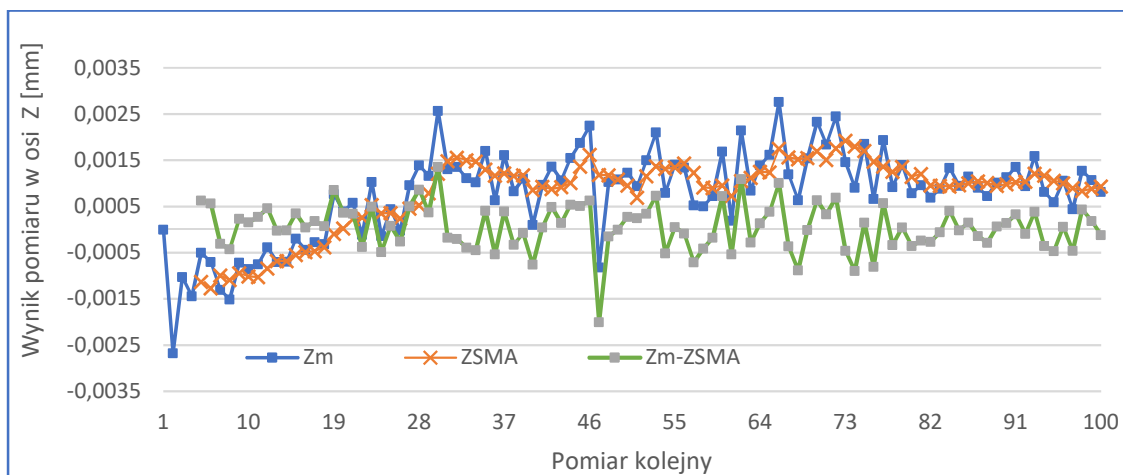
**Rys. 6.5.** Wyniki pomiarów pozycji punktu centralnego pierścienia wzorcowego metodą 4-punktową dla osi Y obrabiarki, wariant Wp1



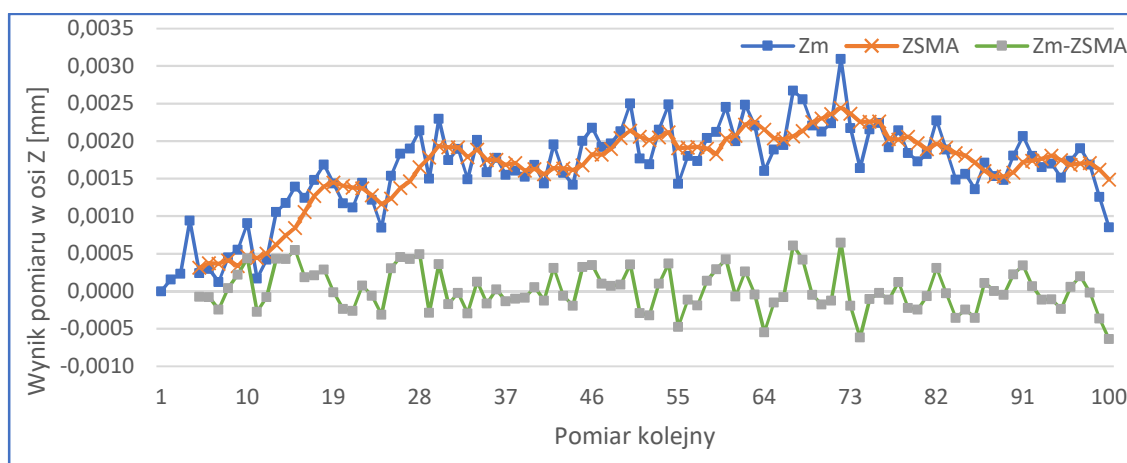
**Rys. 6.6.** Wyniki pomiarów pozycji kuli wzorcowej metodą 5-punktową dla osi X obrabiarki, wariant Wp2



**Rys. 6.7.** Wyniki pomiarów pozycji kuli wzorcowej metodą 5-punktową dla osi Y obrabiarki, wariant Wp2



**Rys. 6.8.** Wyniki pomiarów pozycji kuli wzorcowej metodą 5-punktową dla osi Z obrabiarki, wariant Wp2



**Rys. 6.9.** Wyniki pomiarów pozycji płaszczyzny w osi Z metodą 1-punktową, wariant Wp3

Niepewność rozszerzoną pomiaru pozycji wyznaczono z zależności:

$$U = k * u_c \quad (6.1)$$

gdzie:  $u_c$  – niepewność standardowa złożona,  $k$  – współczynnik rozszerzenia.

Współczynnik  $k = 2$  ( $p = 95\%$ ), został przyjęty zgodnie z EA-4/02 [130].

Złożona niepewność została obliczona z zależności [37, 130]:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_R^2} \quad (6.2)$$

gdzie:  $u_A$  – niepewność standardowa,  $u_R$  – niepewność wynikająca z rozdzielczości układu.

Niepewność standardowa  $u_A$  została obliczona ze wzoru [37, 130]:

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (6.3)$$

gdzie:  $n$  – liczba pomiarów w serii,  $i$ - numer pomiaru,  $x_i$  – wynik kolejnych obserwacji w serii,  $\bar{x}$  – średnia arytmetyczna, przy czym dane użyte do obliczeń dotyczą zmiennych z usuniętym efektem dryftu termicznego.

Niepewność wynikająca z rozdzielczości układu pomiarowego  $u_R$  została oszacowana metodą B [37, 130]. Przyjęto prostokątny rozkład prawdopodobieństwa  $a$  za wartość rozdzielczości a przyjęto 0,0001 mm; jest to wartość nie powodująca zmiany wyniku cyklu pomiarowego. Wartość  $u_R$  wyliczono ze wzoru:

$$u_R = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (6.4)$$

Miarą niepewności pojedynczego pomiaru jest estymator odchylenia standardowego, które estymowane jest przez wielkość zdefiniowaną wzorem:

$$S = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (6.5)$$

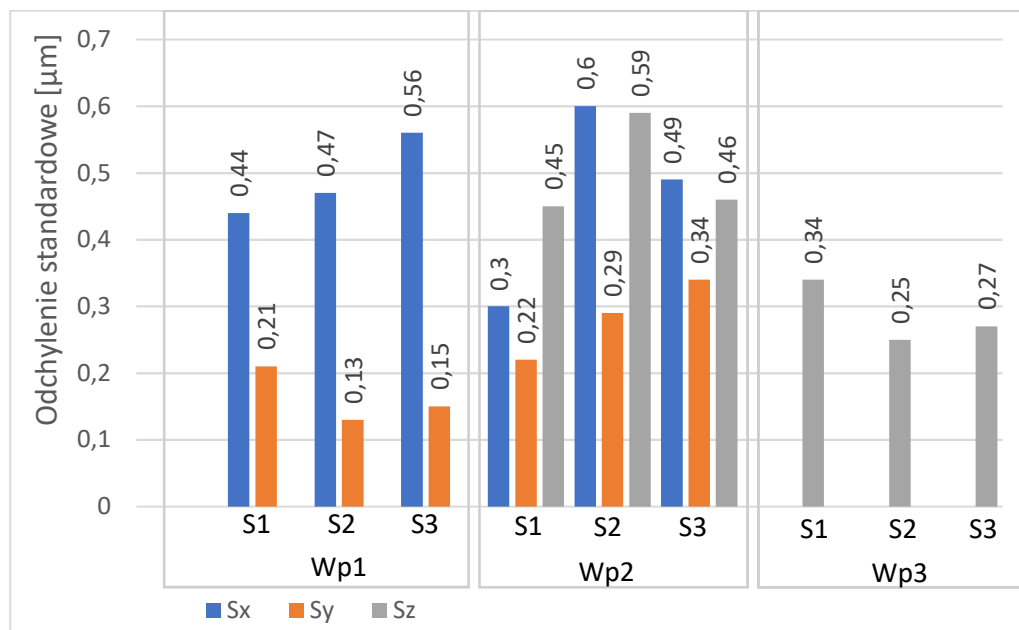
gdzie:  $n$  – liczba pomiarów w serii,  $i$ - numer pomiaru,  $x_i$  – wynik kolejnych obserwacji w serii,  $\bar{x}$  – średnia arytmetyczna, przy czym dane użyte do obliczeń dotyczą zmiennych z usuniętym efektem dryftu termicznego.

W tabeli 6.2 przedstawiono otrzymane wyniki dla złożonej niepewności pomiaru odnoszącej się do średniej wartości zmierzonej oraz niepewności pojedynczego pomiaru.

**Tab. 6.2.** Niepewność pomiaru rozszerzona oraz pojedynczego pomiaru pozycji sondą przedmiotową

	Seria	$U_x[\mu\text{m}]$	$U_y[\mu\text{m}]$	$U_z[\mu\text{m}]$	$S_x[\mu\text{m}]$	$S_y[\mu\text{m}]$	$S_z[\mu\text{m}]$
4-punktowy pomiar środka pierścienia wzorcowego (pomiar w osiach X, Y). Wariant: Wp1	1	0,19	0,14	-	0,44	0,21	-
	2	0,21	0,12	-	0,47	0,13	-
	3	0,24	0,13	-	0,56	0,15	-
5-punktowy pomiar punktu centralnego kuli wzorcowej (pomiar w osiach X, Y,Z). Wariant: Wp2	1	0,16	0,14	0,2	0,3	0,22	0,45
	2	0,24	0,15	0,25	0,6	0,29	0,59
	3	0,21	0,17	0,21	0,49	0,34	0,46
1-punktowy pomiar punktu (pomiar w osi Z). Wariant: Wp3	1	-	-	0,16	-	-	0,31
	2	-	-	0,15	-	-	0,25
	3	-	-	0,15	-	-	0,27

Cykle pomiarowe w obrabiarkach dają możliwość wybrania, ile razy dany pomiar ma być powtarzany a wartość wynikowa takiego cyklu to średnia arytmetyczna kolejnych powtórzeń. Wartość niepewności rozszerzonej zależy od liczby pomiarów i maleje wraz z rosnącą ich liczbą. W praktyce podczas pomiarów pozycji sondą przedmiotową nie wykonuje się dużej ilości pomiarów tej samej charakterystyki. Wynika to między innymi z kwestii ekonomicznych, ponieważ głównym zadaniem obrabiarki jest usuwanie nadmiaru materiału. Dlatego też w odniesieniu do dalszych analiz jako miarę niepewności otrzymanych wyników pomiarów pozycji z wykorzystaniem sondy przedmiotowej w badanej obrabiarce przyjęto odchylenie standardowe estymowane wzorem 6.5. Na rysunku 6.10, przedstawiono zestawienie przyjętych miar niepewności dla poszczególnych serii oraz wariantów pomiarowych.



**Rys. 6.10.** Niepewność pojedynczego pomiaru dla poszczególnych serii oraz wariantów pomiarowych

Analizując wariant Wp1, zauważalne jest, że odchylenie standardowe  $S_y$  we wszystkich seriach pomiarowych jest znacznie mniejsze niż  $S_x$ . Podobna sytuacja zauważalna jest w przypadku wariantu Wp2. W związku z tym wnioskować można, że pojedyncze pomiary wykonywane w układzie badanej obrabiarki oraz badanej sondy, będą wykazywały większą precyzję w osi Y niż w osi X. Ostatecznie jako miarę niepewności metody pomiarowej dla każdego z wariantów przyjęto wskaźniki o największej wartości spośród



poszczególnych serii, przy czym poziom ufności przyjęto na poziomie  $p=0,95$ . Wartości wskaźników przedstawiono w tabeli 6.3.

**Tab. 6.3.** *Niepewność metody pomiarowej dla poszczególnych wariantów pomiarowych*

	$\pm\Delta_x$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\pm\Delta_y$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\pm\Delta_z$ [ $\mu\text{m}$ ]
<i>Wp1</i>	1,12	0,42	-
<i>Wp2</i>	1,2	0,68	1,18
<i>Wp3</i>	-	-	0,68

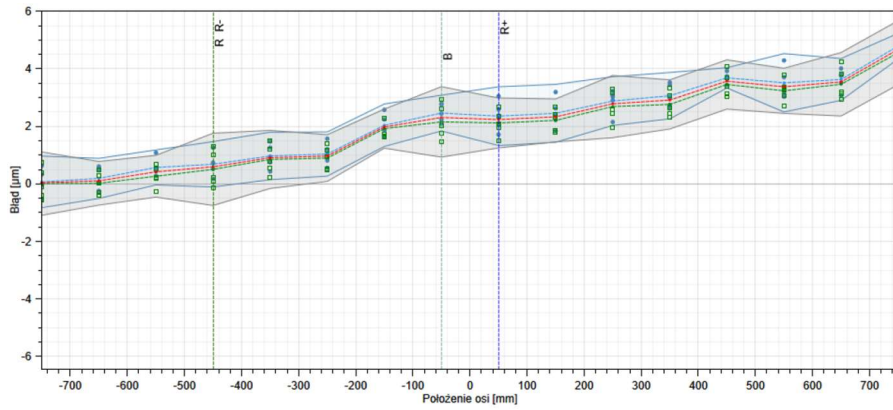
### 6.3. Badania dokładności pozycjonowania osi obrabiarki

Dokładność oraz powtarzalność pozycjonowania osi obrabiarki przebadano z wykorzystaniem interferometru laserowego RENISHAW XL-80 oraz przystawki RENISHAW XR20-W. Badania przygotowane zostały w oparciu o wytyczne normy ISO230-2 [116]. Podczas pomiarów zastosowano kompensację długości fali światła laserowego ze względu na temperaturę, ciśnienie i wilgotność powietrza. W celu skompensowania błędu rozszerzalności cieplnej zastosowano czujnik temperatury zainstalowany na palecie obróbkowej. Przed rozpoczęciem pomiarów obrabiarka została włączona na około 6 godzin (wszystkie układy elektryczne oraz hydrauliczne aktywne), w celu ustabilizowania termicznego. Stosowane układy pomiarowe w obrabiarence oparte są na liniałach szklanych dla którego współczynnik rozszerzalności cieplnej wynosi  $8,0 \mu\text{m}/\text{m} \text{ } ^\circ\text{C}$ .

W realizacji pomiarów stosowano następujące wytyczne:

- odstęp pomiędzy mierzonymi punktami w przypadku osi liniowych wynosił 100 mm,
- odstęp pomiędzy mierzonymi punktami w przypadku osi B oraz A wynosił  $30^\circ$ ,
- dla każdego położenia wykonane zostało 10 najazdów,
- prędkość ruchu posuwowego ustalona została na  $f=15000\text{mm}/\text{min}$ ,
- postój na każdym najeździe ustalono na 4 s.

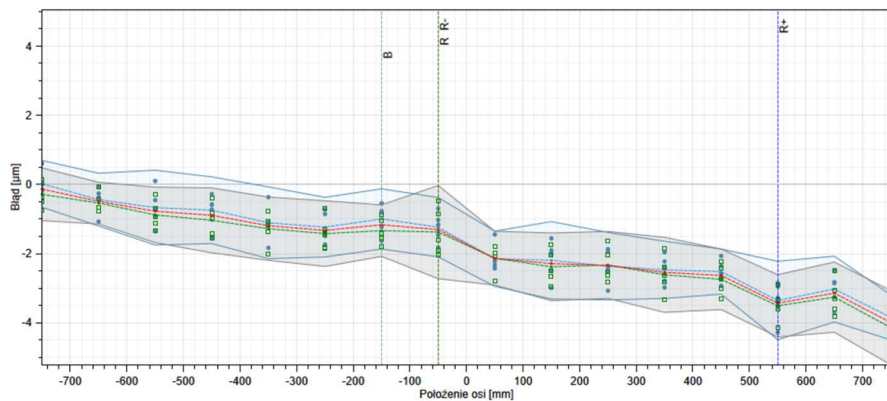
Na rysunkach 6.11 do 6.20, przedstawiono uzyskane wyniki w formie graficznej. Wygenerowane zostały one w oprogramowaniu Carto Explore firmy Renischaw PLC. Wskaźniki widoczne w obszarze rysunków obliczone są zgodnie z wymaganiami normy [116]. Pomiary zostały zrealizowane w odstępie 6 miesięcy.



Nazwa	(+) $\mu\text{m}$	(-) $\mu\text{m}$	(Bidir) $\mu\text{m}$
Błąd pozycjonowania (A)	6,1	6,8	6,8
Powtarzalność pozycjonowania (R)	2,0	2,5	2,5
Systematyczny błąd pozycjonowania (E)	4,7	4,6	4,8
Reversal (B)			0,3
Mean reversal (B Mean)			0,2
Zakres średniego, dwukierunkowego błędu pozycjonowania (M)			4,6



Rys. 6.11. Dwukierunkowa dokładność i powtarzalność pozycjonowania w osi X, pomiar 1



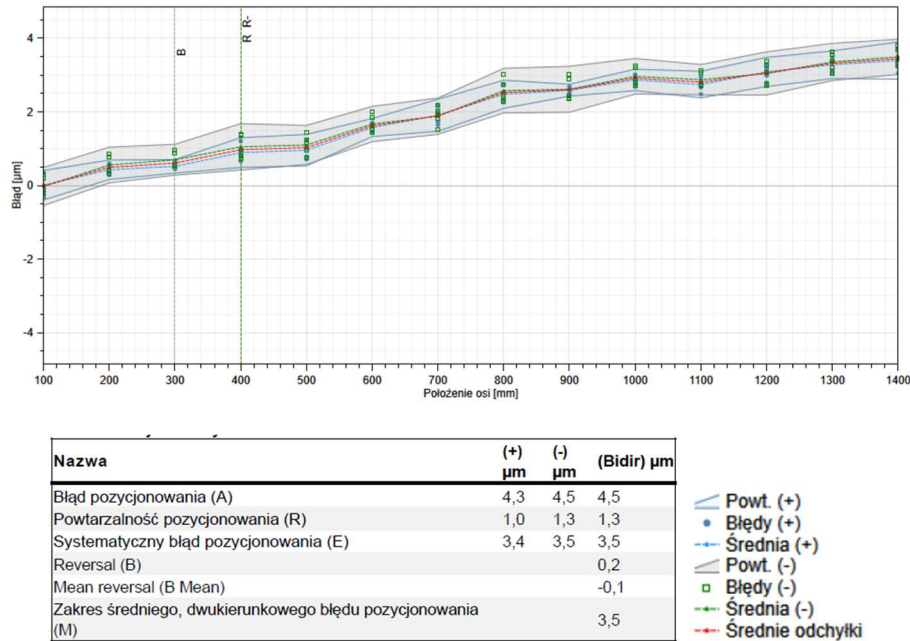
Nazwa	(+) $\mu\text{m}$	(-) $\mu\text{m}$	(Bidir) $\mu\text{m}$
Błąd pozycjonowania (A)	5,2	5,7	5,9
Powtarzalność pozycjonowania (R)	2,3	2,7	2,7
Systematyczny błąd pozycjonowania (E)	3,9	3,9	4,2
Reversal (B)			0,3
Mean reversal (B Mean)			0,2
Zakres średniego, dwukierunkowego błędu pozycjonowania (M)			3,9



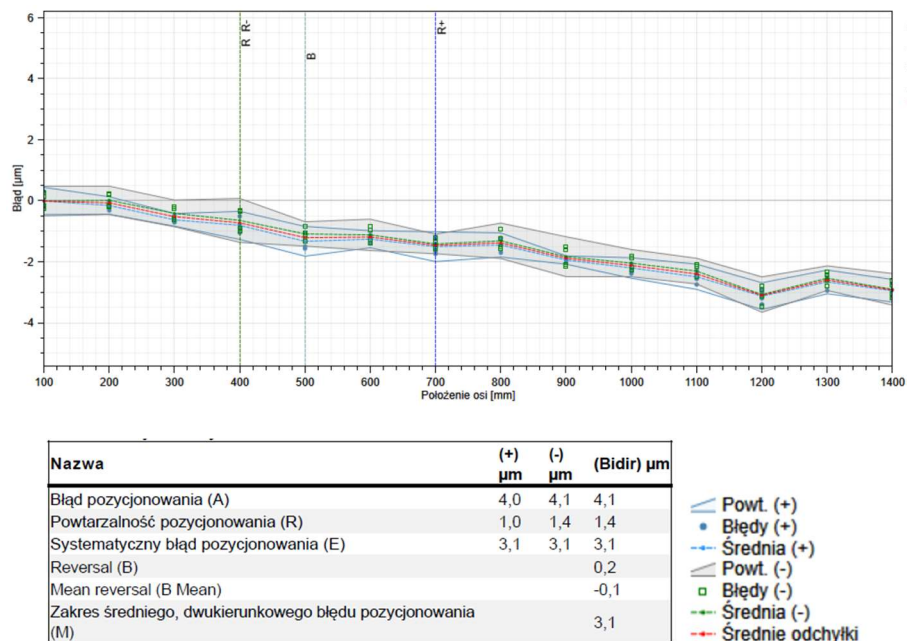
Rys. 6.12. Dwukierunkowa dokładność i powtarzalność pozycjonowania w osi X, pomiar 2

Jak wynika z rysunku 6.11 oraz 6.12, spadek dokładności pozycjonowania osi X układu się w sposób zbliżony do linii prostej. Im dalej od punktu początkowego pomiaru tym średnie odchyłki są większe. Dwukierunkowa dokładność pozycjonowania w przypadku pomiaru pierwszego (rys. 6.11), wyniosła  $6,8 \mu\text{m}$ , natomiast dwukierunkowa powtarzalność pozycjonowania wyniosła  $2,5 \mu\text{m}$ . W przypadku pomiaru drugiego

(rys. 6.12), dwukierunkowa dokładność pozycjonowania wyniosła 5,9  $\mu\text{m}$  natomiast dwukierunkowa powtarzalność pozycjonowania wyniosła 2.7  $\mu\text{m}$ .



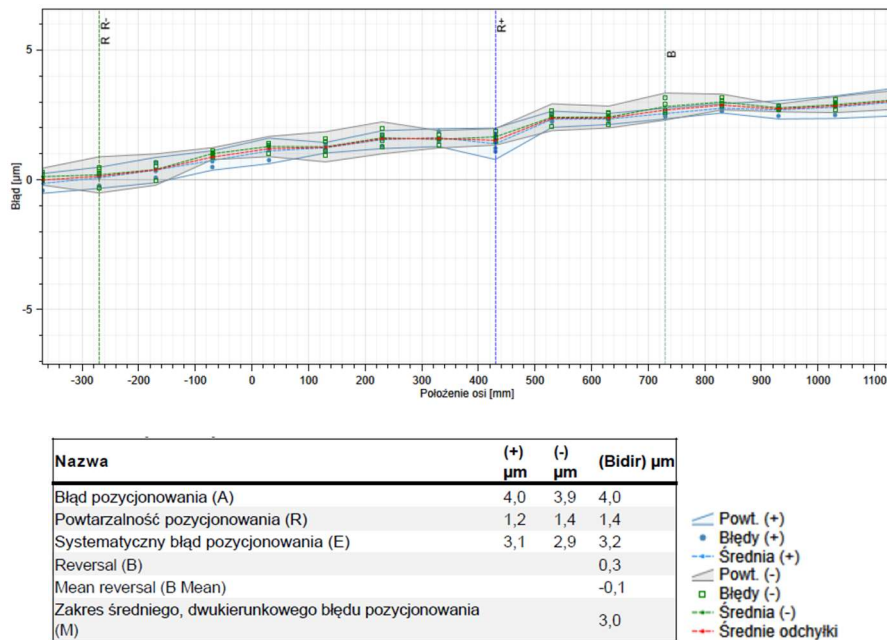
Rys. 6.13. Dwukierunkowa dokładność i powtarzalność pozycjonowania w osi Y, pomiar 1



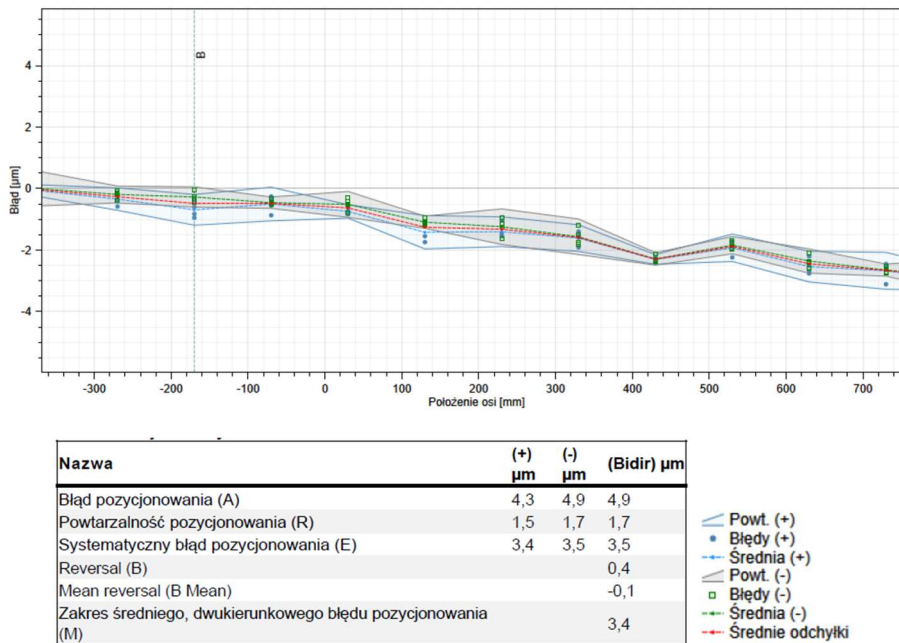
Rys. 6.14. Dwukierunkowa dokładność i powtarzalność pozycjonowania w osi Y, pomiar 2

Z rysunku 6.13 oraz 6.14 wynika, że spadek dokładności pozycjonowania osi Y układa się w sposób zbliżony do linii prostej. Im dalej od punktu początkowego pomiaru tym średnie odchyłki są większe. Dwukierunkowa dokładność pozycjonowania w przypadku pomiaru pierwszego (rys. 6.13), wyniosła 4,5  $\mu\text{m}$ , natomiast dwukierunkowa

powtarzalność pozycjonowania wyniosła 1,3  $\mu\text{m}$ . W przypadku pomiaru drugiego (rys. 6.14), dwukierunkowa dokładność pozycjonowania wyniosła 4,1  $\mu\text{m}$  natomiast dwukierunkowa powtarzalność pozycjonowania wyniosła 1,4  $\mu\text{m}$ .



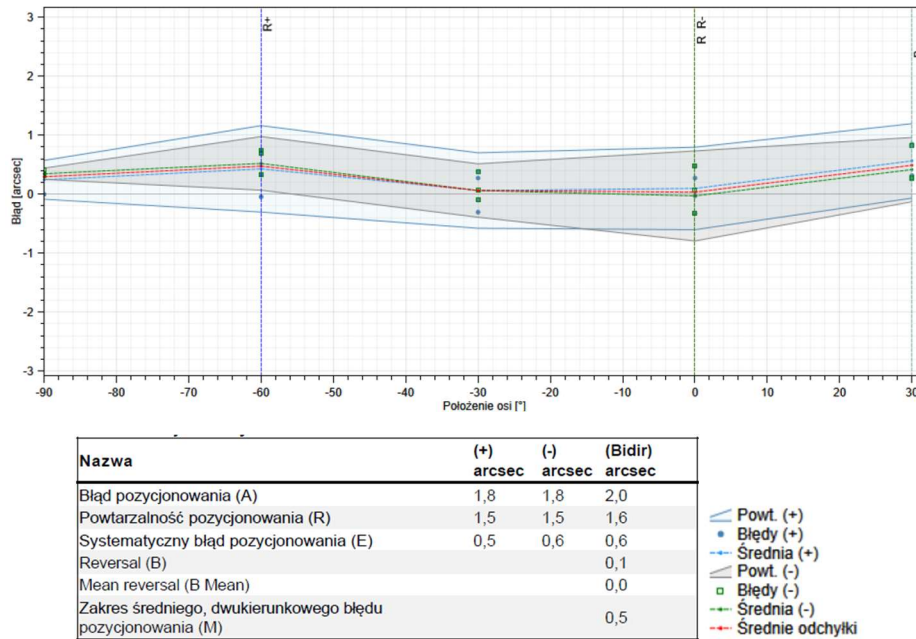
Rys. 6.15. Dwukierunkowa dokładność i powtarzalność pozycjonowania w osi Z, pomiar 1



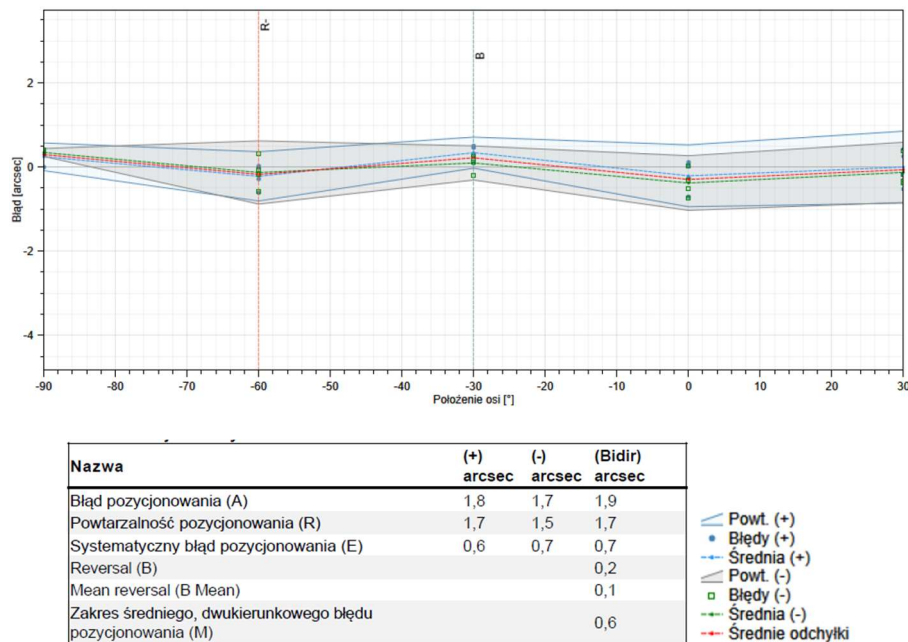
Rys. 6.16. Dwukierunkowa dokładność i powtarzalność pozycjonowania w osi Z, pomiar 2

Z rysunku 6.15 oraz 6.16 również wynika, że spadek dokładności pozycjonowania osi Z układa się w sposób zbliżony do linii prostej. Im dalej od punktu początkowego

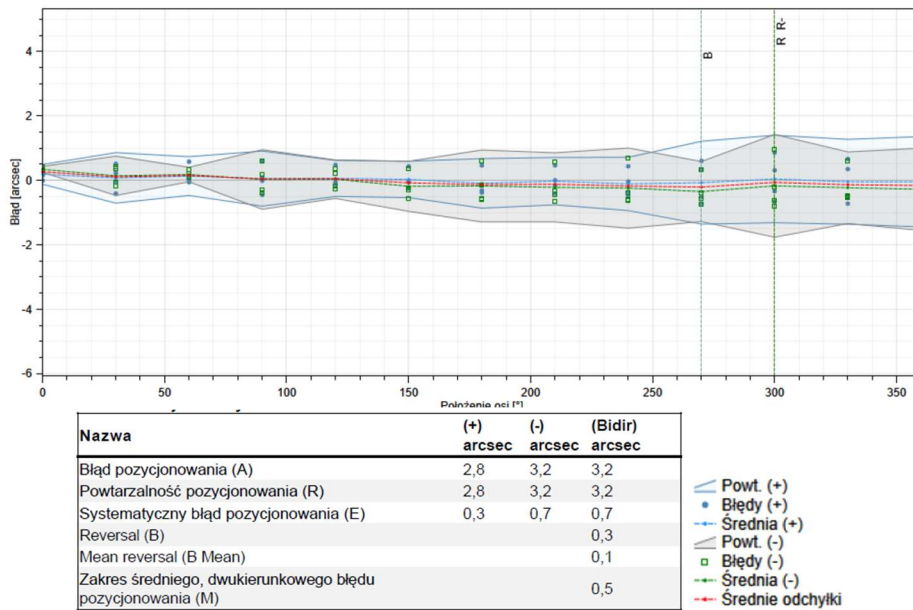
pomiaru tym średnie odchyłki są większe. Dwukierunkowa dokładność pozycjonowania w przypadku pomiaru pierwszego (rys. 6.15), wyniosła 4  $\mu\text{m}$ , natomiast dwukierunkowa powtarzalność pozycjonowania wyniosła 1,4  $\mu\text{m}$ . W przypadku pomiaru drugiego (rys. 6.16), dwukierunkowa dokładność pozycjonowania wyniosła 4,9  $\mu\text{m}$  natomiast dwukierunkowa powtarzalność pozycjonowania wyniosła 1,7  $\mu\text{m}$ .



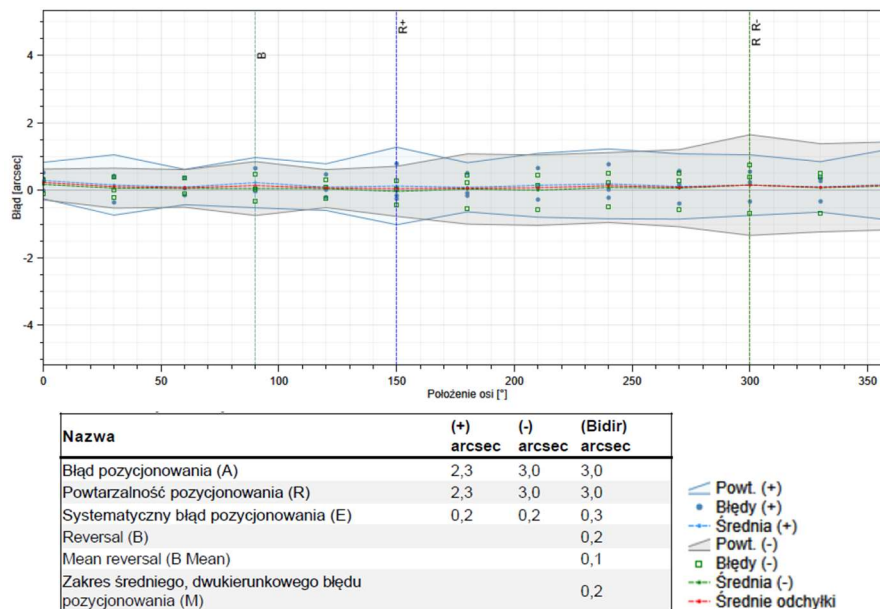
Rys. 6.17. Dwukierunkowa dokładność i powtarzalność pozycjonowania w osi A, pomiar 1



Rys. 6.18. Dwukierunkowa dokładność i powtarzalność pozycjonowania w osi A, pomiar 2



Rys. 6.19. Dwukierunkowa dokładność i powtarzalność pozycjonowania w osi B, pomiar 1



Rys. 6.20. Dwukierunkowa dokładność i powtarzalność pozycjonowania w osi B, pomiar 2

Pomiary osi obrotowych nie wykazały odchyłek od normy. W najgorszym przypadku błąd pozycjonowania dla osi A (rys. 6.17-18) wyniósł 2 arcsec, natomiast dla osi B, 3,2 arcsec. Tak dobre wyniki dla obrabiarki znacznych gabarytów spowodowane były między innymi stabilnością temperatury otoczenia (stabilizacja temperatury na hali), oraz temperatury obrabiarki, która w trakcie pomiarów według wskazań stacji kompensacyjnej interferometru laserowego wahała się od 19.5C° do 20.3 C°. Zakres zmian temperatury dla czujnika materiału umieszczonego na palecie obróbkowej 19.3C° do 19.8 C°. Wysoka dokładność pozycjonowania na badanej obrabiarce wynika z zastosowania liniiów

optycznych w osiach X, Y, Z, jak również enkoderów optycznych w osiach A oraz B zainstalowanych w osi obrotu z pominięciem przekładni. Należy również zaznaczyć, że po zainstalowaniu obrabiarki w miejscu docelowym przez producenta przed oddaniem do użytku na potrzeby produkcji, stworzone zostały mapy błędów dla poszczególnych osi. Następnie zostały one zaimplementowane w sterowaniu CNC, aby skompensować niedokładności. W przypadku osi liniowych, w zastosowanym układzie regulacji położenia badanej obrabiarki, błędy pochodzące od zmian temperatury śruby toczonej zostają skompensowane przez układ pomiarowy. Istotnym jest, że w tym przypadku, kompensacji nie podlega błąd wynikający z przemieszczenia się liniału wraz z punktem jego zamocowania względem korpusu obrabiarki pod wpływem oddziaływań cieplnych. Taki błąd będzie jednym ze składników błędu mierzonym w punkcie bazowym obróbki. Charakterystyczne nachylenie linii średniego błędu pozycjonowania dla osi liniowych jest wynikiem różnicy temperatury układu pomiarowego w momencie jego pomiarów w odniesieniu do temperatury w jakiej był kalibrowany przez producenta obrabiarki w chwili odbioru. Takie zachowanie jest charakterystyczne dla tego typu układów i wynika głównie ze współczynnika rozszerzalności cieplnej zastosowanego enkodera liniowego oraz sposobu jego zamocowania [19, 109]. Dwukierunkowa powtarzalność pozycjonowania raportowana zgodnie z wymaganiami normy, to maksymalna wartość spośród poszczególnych punktów pomiarowych. Można zauważyć, że najgorzej spośród osi liniowych z punktu widzenia powtarzalności pozycjonowania wypadła oś X, najlepiej natomiast oś Y. Podobne wyniki z punktu widzenia niepewności pomiarów pozycji sondą przedmiotową zostały odzwierciedlone podczas badań prezentowanych w podrozdziale 6.3.

#### **6.4. Badania geometryczne obrabiarki wg wytycznych norm ISO**

Badania geometryczne przeprowadzono zgodnie z wytycznymi normy ISO10791-1 [121] oraz ISO 10791-3 [123]. Do przeprowadzenia pomiarów konieczne było zastosowanie wzorca liniowego, kąтового, wzorca walcowego instalowanego w stożku wrzeciona oraz czujnika zegarowego inkrementalnego. Otrzymane wyniki zaprezentowano w tabeli 6.4. Pomiary wykonano dwukrotnie w odstępie sześciomiesięcznym. W ramach testów geometrycznych zmierzono błędy ruchu osi

liniowych w zakresie błędów prostoliniowości, prostopadłości oraz odchyłek rotacyjnych.

**Tab. 6.4.** Wyniki pomiarów błędy ruchu osi liniowych

Norma	Parametr	Pomiar	Wynik pomiaru [mm]	Objaśnienie
ISO10791-1 -G1	$E_{YX}$	1	0.008	Odchyłka prostoliniowości ruchu w osi X płaszczyzna YX. Na odcinku 800 [mm]
		2	0.007	
	$E_{ZX}$	1	0.004	Odchyłka prostoliniowości ruchu w osi X płaszczyzna ZX. Na odcinku 800 [mm]
		2	0.005	
ISO10791-1 G2	$E_{YZ}$	1	0.004	Odchyłka prostoliniowości ruchu w osi Z płaszczyzna YZ. Na odcinku 800 [mm]
		2	0.005	
	$E_{XZ}$	1	0.003	Odchyłka prostoliniowości ruchu w osi Z płaszczyzna XZ. Na odcinku 800 [mm]
		2	0.004	
ISO10791-1 G3	$E_{XY}$	1	0.002	Odchyłka prostoliniowości ruchu w osi Y płaszczyzna XY. Na odcinku 500 [mm]
		2	0.003	
	$E_{ZY}$	1	0.002	Odchyłka prostoliniowości ruchu w osi Y płaszczyzna ZY. Na odcinku 500 [mm]
		2	0.003	
ISO10791-1 G4	$E_{CX}$	1	0.01/1000	Odchyłka rotacyjna osi X w płaszczyźnie XY prostopadłej do osi wrzeciona. Na odcinku 1600 [mm]
		2	0.01/1000	
	$E_{AX}$	1	0.01/1000	Odchyłka rotacyjna osi X w płaszczyźnie YZ równoległej do osi wrzeciona (roll) . Na odcinku 1600 [mm]
		2	0.01/1000	
ISO10791-1 G5	$E_{AZ}$	1	0.02/1000	Odchyłka rotacyjna osi Z w płaszczyźnie YZ równoległej do osi wrzeciona (pitch). Na odcinku 1600 [mm]
		2	0.02/1000	
	$E_{CZ}$	1	0.01/1000	Odchyłka rotacyjna osi Z w płaszczyźnie XY prostopadłej do osi wrzeciona (roll) . Na odcinku 1600 [mm]
		2	0.01/1000	
ISO 10791-1 – G6	$E_{AY}$	1	0.01/1000	Odchyłka rotacyjna osi Y w płaszczyźnie YZ prostopadłej do osi wrzeciona. Na odcinku 1400 [mm]
		2	0.01/1000	
	$E_{CY}$	1	0.01/1000	Odchyłka rotacyjna osi Y w płaszczyźnie XY równoległej do osi wrzeciona. Na odcinku 1400 [mm]
		2	0.01/1000	
ISO 10791-1 - G7	$P_{YX}$	1	0.004	Odchyłka prostopadłości między ruchem w osi Y a ruchem w osi X. Na odcinku 500[mm]
		2	0.005	
ISO 10791-1 - G8	$P_{YZ}$	1	0.004	Odchyłka prostopadłości między ruchem w osi Y a ruchem w osi Z. Na odcinku 500[mm]
		2	0.005	
ISO 10791-1 - G9	$P_{XZ}$	1	0.006	Odchyłka prostopadłości między ruchem w osi X a ruchem w osi Z. Na odcinku 500[mm]
		2	0.007	
ISO 10791-3 - AG1	$S_{YZ}$	1	0.002	Odchyłka równoległości pomiędzy osią wrzeciona w pozycji poziomej ( $A=0^\circ$ ) a ruchem osi Z w płaszczyźnie pionowej YZ. Na odcinku 300[mm]
		2	0.003	
	$S_{ZX}$	1	0.003	Odchyłka równoległości pomiędzy osią wrzeciona w pozycji poziomej ( $A=0^\circ$ ) a ruchem osi Z w płaszczyźnie poziomej ZX. Na odcinku 300[mm]
		2	0.002	



Sprawdzono również odchyłki pomiędzy osią wrzeciona a ruchem osi Z w płaszczyznach głównych. Wyniki pomiaru nie wskazują na nieprawidłowości z punktu widzenia normy oraz wytycznych producenta, mieszczą się w założonych tolerancjach. Należy zwrócić uwagę na to, że wartości poszczególnych odchyłek podanych w tabeli to suma wartości bezwzględnych największej ujemnej i największej dodatniej odchyłki. Tak podany wynik nie pozwala na szerszą interpretację mówi tylko o zakresie w jakim mieści się dany błąd.

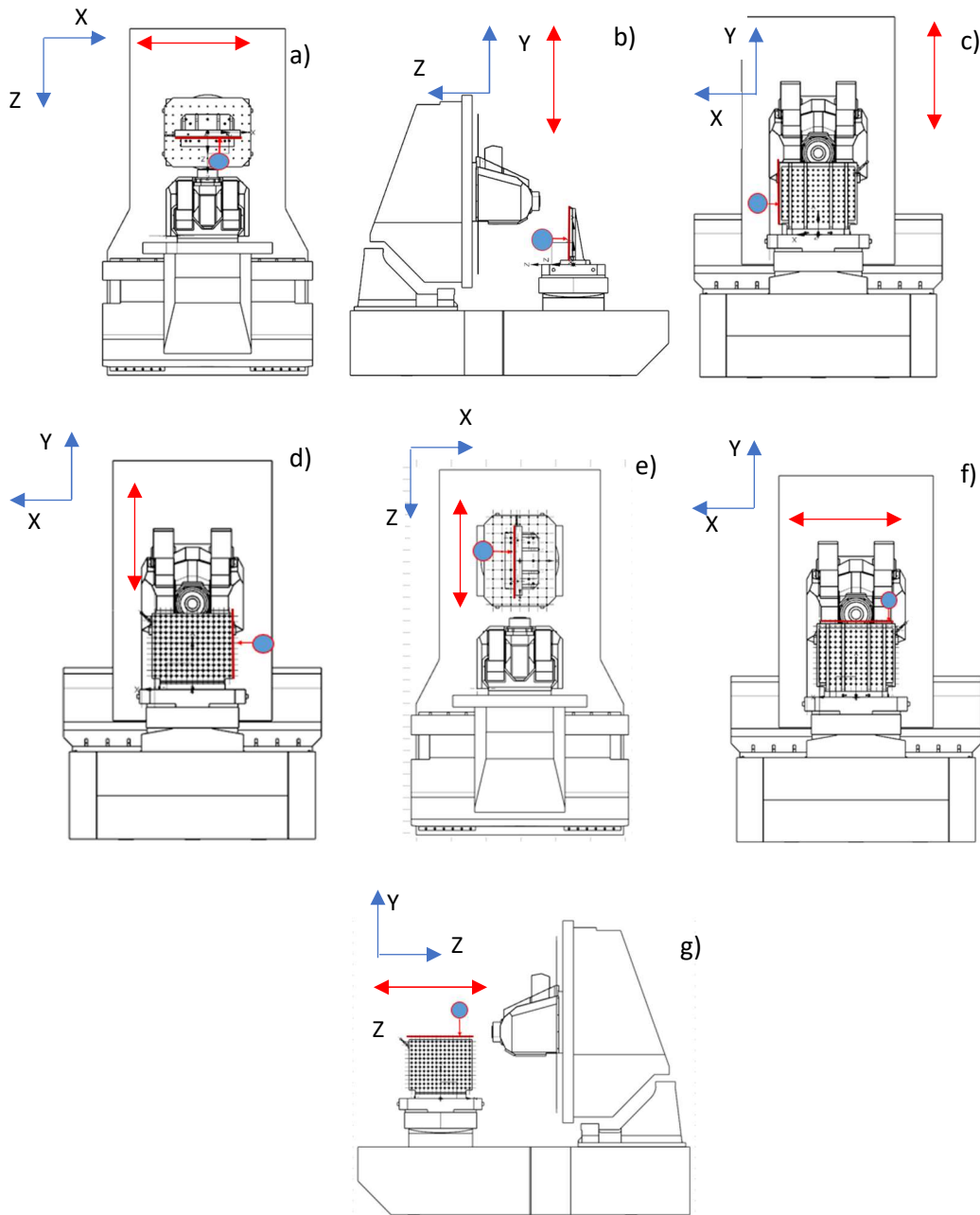
## **6.5. Badania z wykorzystaniem kolumny wzorcowej**

Badania geometryczne prowadzone z wykorzystaniem wzorców liniowych oraz tradycyjnego oprzyrządowania typu czujnik zegarowy czy poziomnica maszynowa mają następujące wady z punktu widzenia użyteczności warsztatowej:

- pomiary są czasochłonne,
- raporty z zakresu ruchu liniowego oraz rotacji opracowane zgodnie z wymaganiami normy ISO10791-1 [121] oraz ISO 10791-3 [123], dają tylko pogląd na maksymalne odchyłki badanych charakterystyk,
- ocena odkształceń spowodowanych zmianami termicznymi czy zużyciem obrabiarki na podstawie raportów w długiej perspektywie czasu jest utrudniona,
- do realizacji pomiarów konieczny jest wykwalifikowany personel oraz odpowiednie przygotowanie obrabiarki.

W związku z w/w zaprojektowano autorską procedurę pomiarową, której zadaniem jest kontrola wybranych parametrów geometrycznych oraz ustawczych obrabiarki. Przez parametry ustawcze należy rozumieć poprawność położenia punktu zera układu maszynowego. Pomiary przeprowadzane są, w odniesieniu do wzorca w postaci kolumny wzorcowej oraz kul wzorcowych z wykorzystaniem sondy przedmiotowej RMP600 oraz cykli pomiarowych Sinumerik. Jako opcję, program pomiarowy posiada możliwość skompensowania parametrów ustawczych obrabiarki dotyczących położenie zera maszynowego. Ponadto wylicza i skompensuje położenia rzeczywistych osi obrotu względem zera maszynowego pod warunkiem, że spełnione zostały określone kryteria geometryczne. Informacje na temat opracowanego rozwiązania oraz wpływu na wskaźniki produkcyjne zostały przedstawione w publikacjach [3, 76].

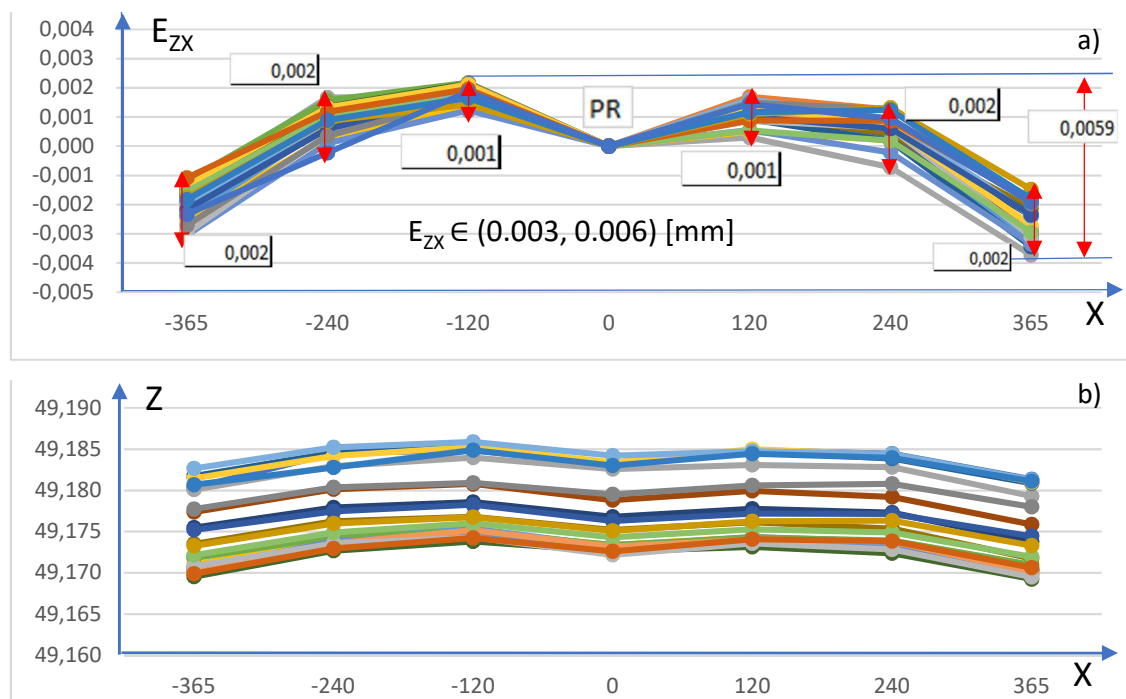
Na rysunku 6.21 przedstawiono schematycznie sposób pomiaru charakterystyk geometrycznych w oparciu o kolumnę wzorcową.



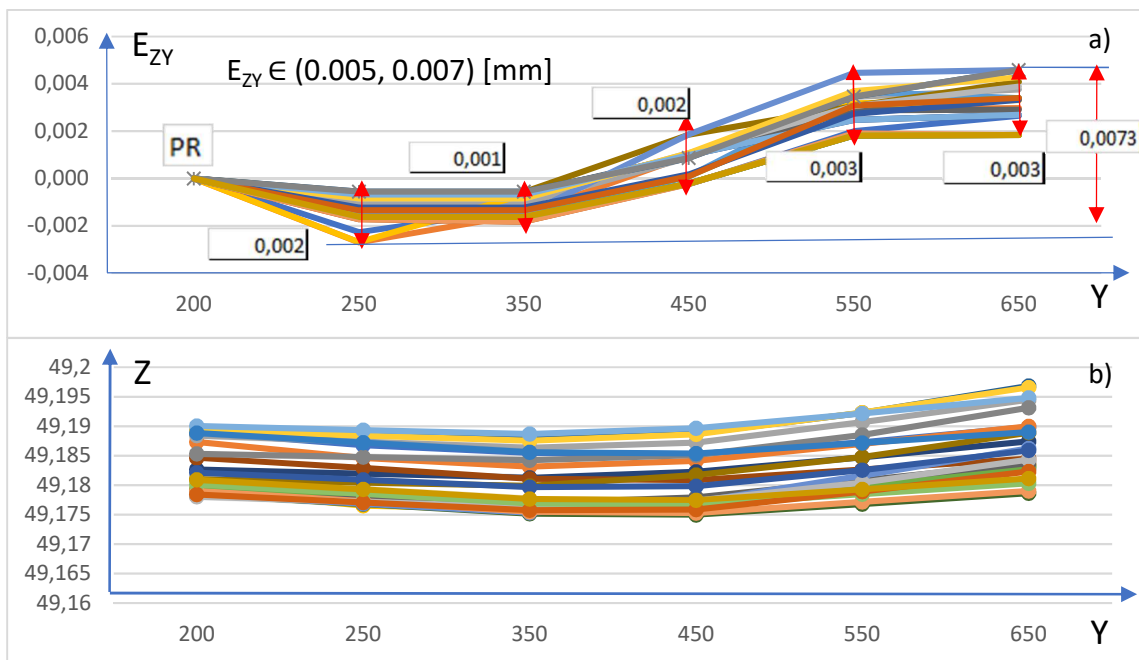
**Rys. 6.21.** Schematyczna ilustracja pomiarów geometrycznych w oparciu o kolumnę wzorcową:  
 a) pomiar prostoliniowości ruchu osi X względem wzorca w płaszczyźnie ZX, b) pomiar prostoliniowości ruchu osi Y względem wzorca w płaszczyźnie ZY, c) pomiar prostoliniowości ruchu osi Y względem wzorca w płaszczyźnie XY,  $B0^\circ$ , d) pomiar prostoliniowości ruchu osi Y względem wzorca w płaszczyźnie XY,  $B180^\circ$ , e) pomiar prostoliniowości ruchu osi Z względem wzorca w płaszczyźnie XZ, f) pomiar prostoliniowości ruchu osi X względem wzorca w płaszczyźnie YX, g) pomiar prostoliniowości ruchu osi Z względem wzorca w płaszczyźnie YZ

Poszczególne etapy pomiarów zostały tak zaprojektowane, aby częściowo odzwierciedlały instrukcje zawarte w normach ISO 10791-1 oraz ISO 10791-3. Pomiary dotyczą prostoliniowości ruchu osi głównych liniowych oraz odchyłki równoległości pomiędzy osią wrzeciona w pozycji poziomej ( $A=0^\circ$ ) a ruchem osi Z w płaszczyźnie poziomej ZX oraz YZ. Wynik pomiarów umożliwia ocenę czy odkształcenia termiczne obrabiarki względem wzorca w trakcie jej eksploatacji mają charakter zginania termicznego, wydłużenia termicznego czy obu naraz. Nie należy otrzymanych wyników pomiarów interpretować tak jak to jest wskazane w normie [121], ponieważ kolumna wzorcowa zamocowana jest na stałe do palety i błędy ruchu liniowego będą zawierały również błędy wynikające z pochylania się stołu roboczego np. w wyniku wpływów termicznych.

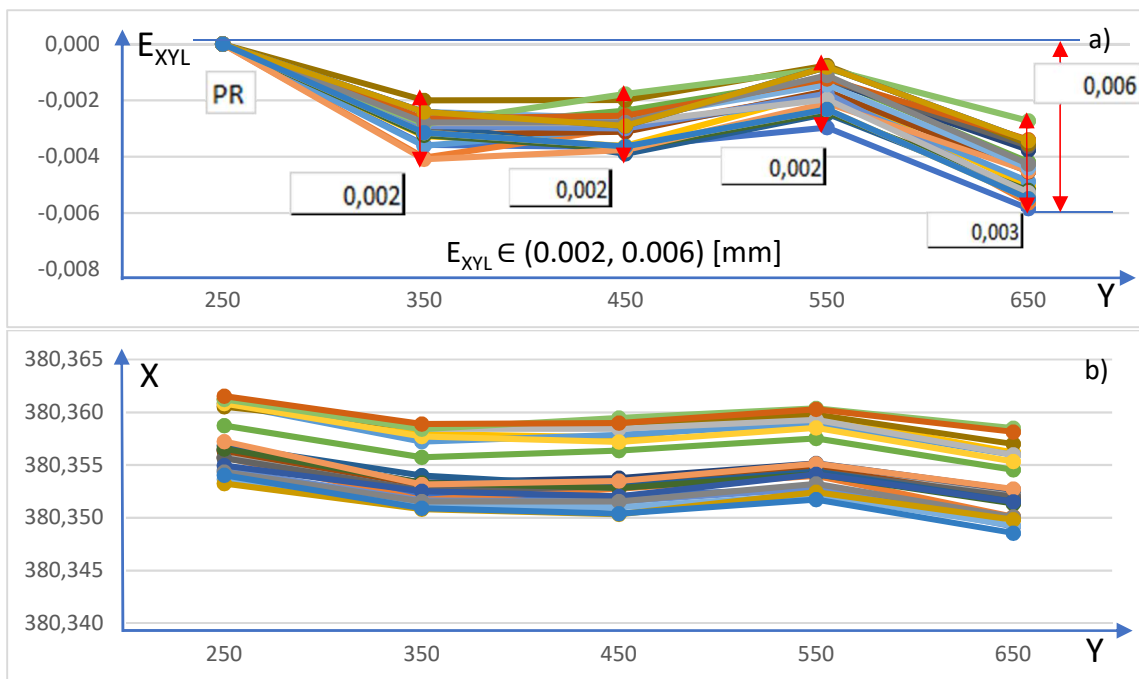
Na rysunkach 6.22 do 6.28 przedstawiono wyniki dwudziestu pięciu różnych pomiarów, które realizowały były pomiędzy zadaniami zaplanowanymi dla produkcji seryjnej. Każdy z pojedynczych pomiarów realizowany był raz w tygodniu. Tak realizowane pomiary wykonywane były w zróżnicowanych warunkach termicznych elementów obrabiarki i mieściły się w zakresie temperaturowym Wt2 (tab. 6.5). Wykresy liniowe reprezentują wyniki pomiarów w punktach charakterystycznych wzorca.



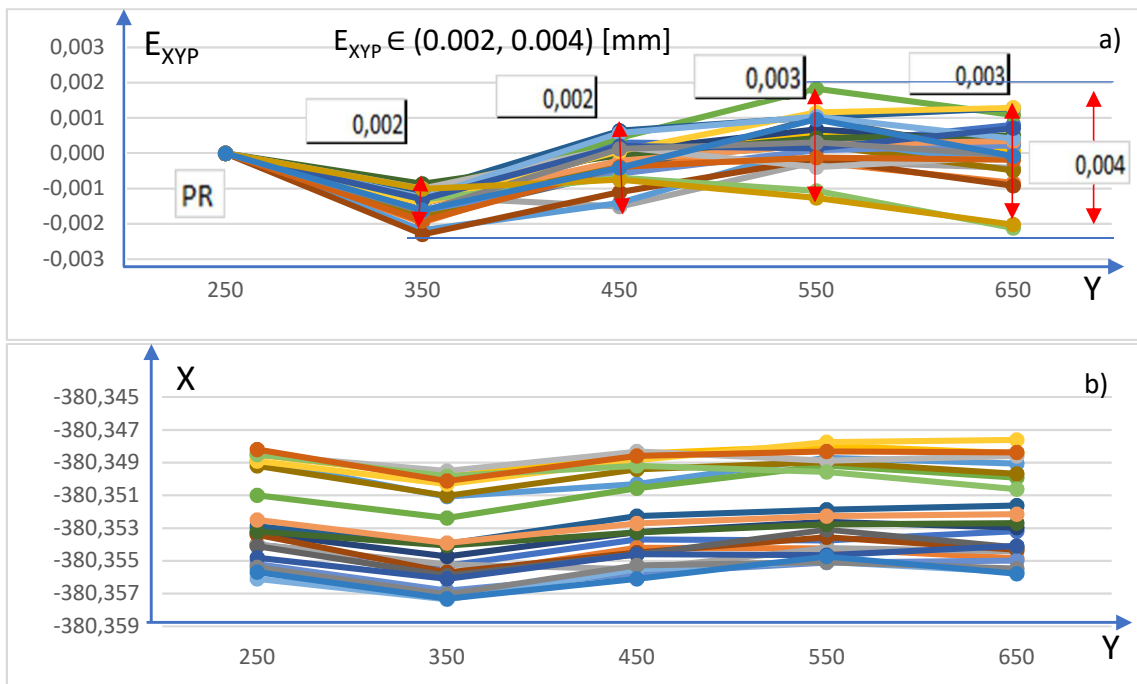
**Rys. 6.22.** Odchyłka prostoliniowości ruchu w osi X płaszczyzna ZX. Raport graficzny z pomiaru z wykorzystaniem kolumny wzorcowej, pomiar realizowane zgodnie ze schematem a – rys. 6.21. a) wartość odchyłki zwizualizowana jako pomiar względny względem punktu PR, b) wartość odchyłki podana jako wynik pomiaru w układzie maszynowym względem zera maszynowego



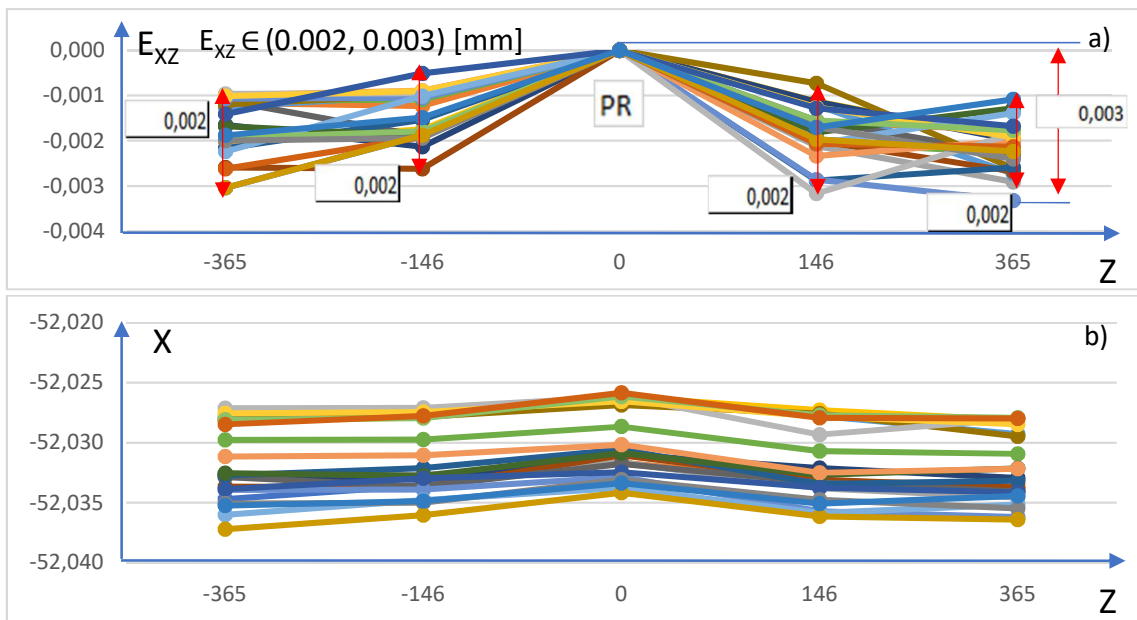
**Rys. 6.23.** Odchyłka prostoliniowości ruchu w osi Y w płaszczyźnie ZY. Raport graficzny z pomiaru z wykorzystaniem kolumny wzorcowej, pomiar realizowane zgodnie ze schematem b – rys. 6.21. a) wartość odchyłki zwizualizowana jako pomiar względny względem punktu PR, b) wartość odchyłki podana jako wynik pomiaru w układzie maszynowym względem zera maszynowego



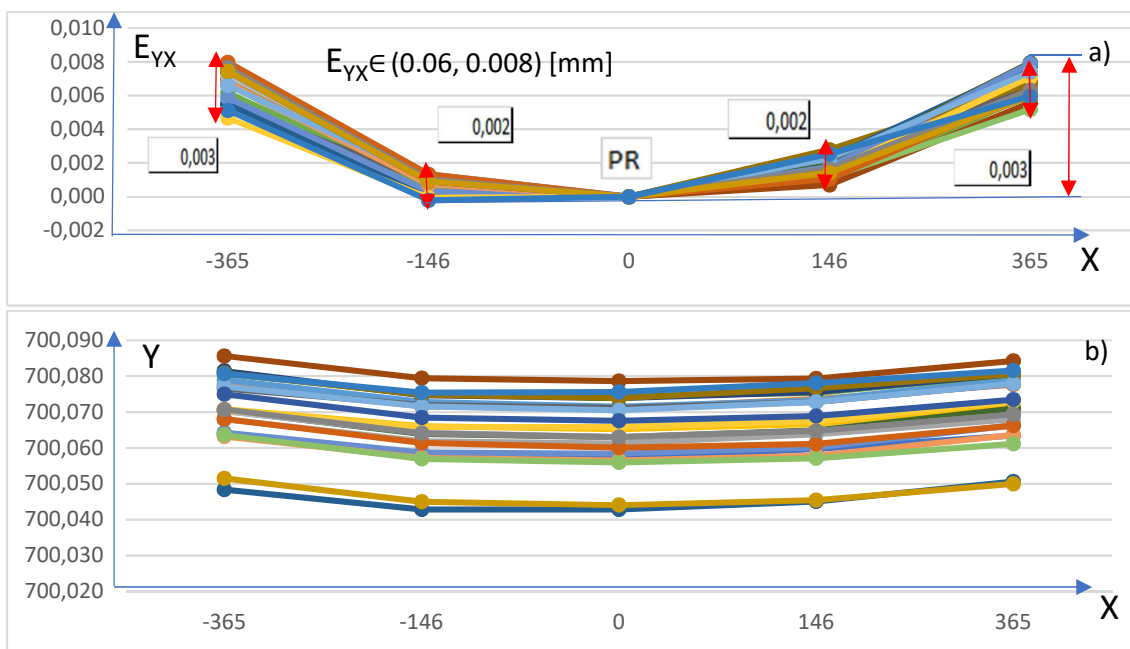
**Rys. 6.24.** Odchyłka prostoliniowości ruchu w osi Y w płaszczyźnie XY. Raport graficzny z pomiaru z wykorzystaniem kolumny wzorcowej, pomiar realizowane zgodnie ze schematem c – rys. 6.21. a) wartość odchyłki zwizualizowana jako pomiar względny względem punktu PR, b) wartość odchyłki podana jako wynik pomiaru w układzie maszynowym względem zera maszynowego



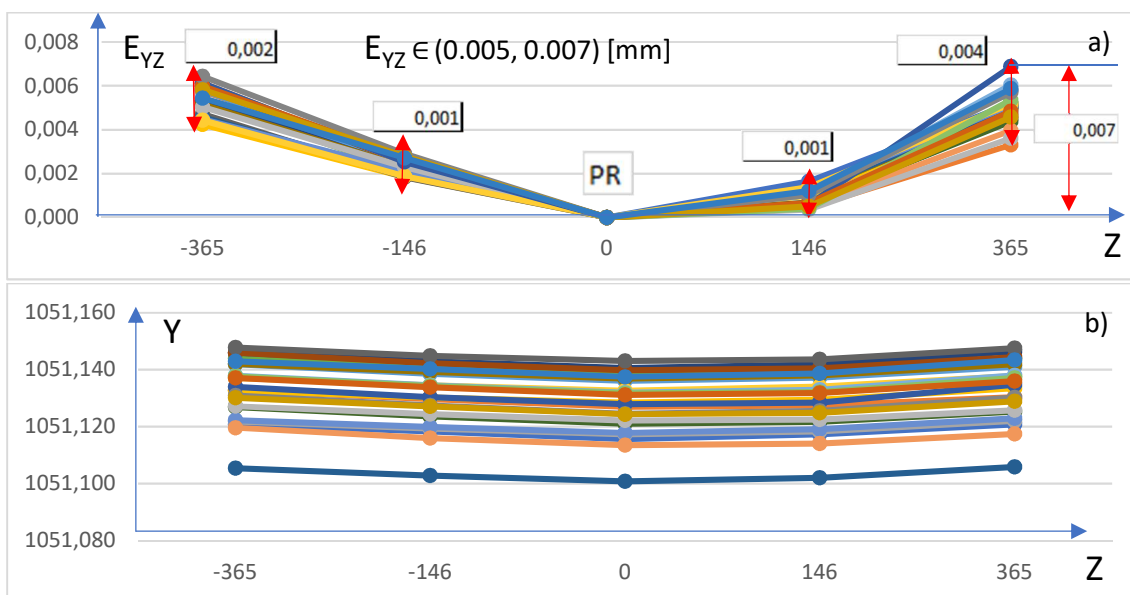
**Rys. 6.25.** Odchyłka prostoliniowości ruchu w osi Y w płaszczyźnie XY. Raport graficzny z pomiaru z wykorzystaniem kolumny wzorcowej, pomiar realizowane zgodnie ze schematem d - rys 6.21. a) wartość odchyłki zwizualizowana jako pomiar względny względem punktu PR, b) wartość odchyłki podana jako wynik pomiaru w układzie maszynowym względem zera maszynowego



**Rys. 6.26.** Odchyłka prostoliniowości ruchu w osi Z w płaszczyźnie XZ. Raport graficzny z pomiaru z wykorzystaniem kolumny wzorcowej, pomiar realizowane zgodnie ze schematem e - rys 6.21. a) wartość odchyłki zwizualizowana jako pomiar względny względem punktu PR, b) wartość odchyłki podana jako wynik pomiaru w układzie maszynowym względem zera maszynowego



**Rys. 6.27.** Odchyłka prostoliniowość ruchu w osi X płaszczyzna YX. Raport graficzny z pomiaru z wykorzystaniem kolumny wzorcowej, pomiar realizowane zgodnie ze schematem f - rys 6.21. a) wartość odchyłki zwizualizowana jako pomiar względny względem punktu PR, b) wartość odchyłki podana jako wynik pomiaru w układzie maszynowym względem zera maszynowego



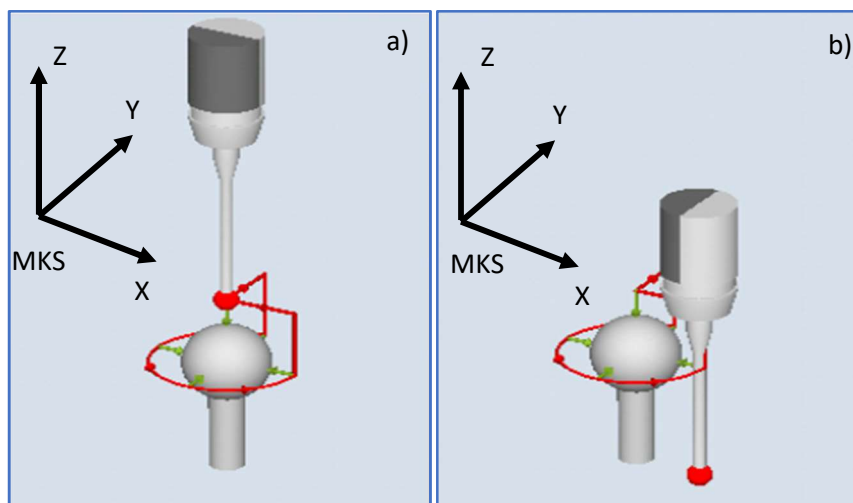
**Rys. 6.28.** Odchyłka prostoliniowość ruchu w osi Z płaszczyzna YZ. Raport graficzny z pomiaru z wykorzystaniem kolumny wzorcowej, pomiar realizowane zgodnie ze schematem g - rys 6.15. a) wartość odchyłki zwizualizowana jako pomiar względny względem punktu PR, b) wartość odchyłki podana jako wynik pomiaru w układzie maszynowym względem zera maszynowego

Na każdym z wykresów oś pozioma przedstawia współrzędne położenia punktu kontrolowanego w układzie współrzędnych maszynowych. Wyniki każdego ze schematów pomiaru zostały zilustrowane na dwa sposoby na osi pionowej. Górny zestaw charakterystyk to pomiar względem punktu referencyjnego oznaczonego jako PR. Przy każdym z punktów pomiarowych naniesiona jest wartość zarejestrowanego rozrzutu względem punktu PR dla  $N=25$  pomiarów. Dolny zestaw charakterystyk przedstawia rzeczywistą wartość współrzędnej punktu na wzorcu zmierzoną w układzie maszynowym. Wszystkie wyniki pomiarów skompensowane zostały względem temperatury kolumny wzorcowej podczas pomiaru zgodnie z tabelą 6.1.

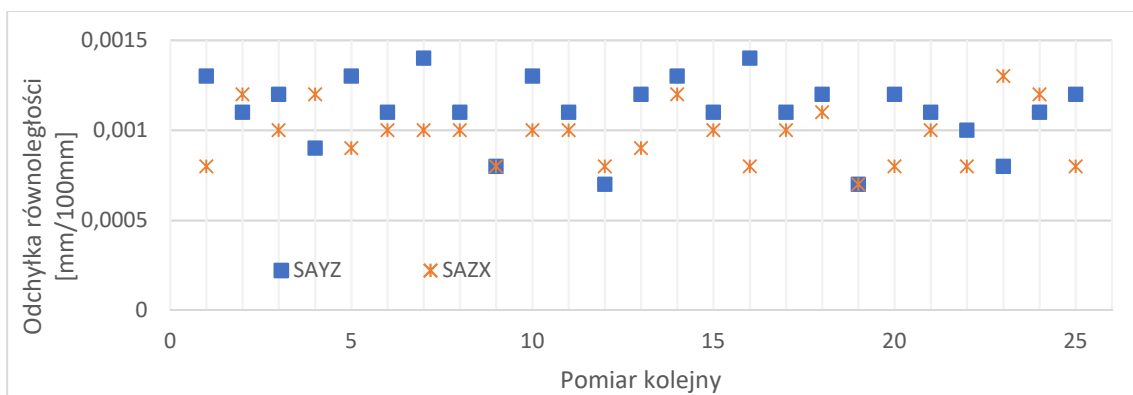
Sposób prezentacji wyników pozwala na zwizualizowanie w jakim stopniu mierzony kształt wzorca jest odtwarzany oraz jakie wartości przyjmują ewentualne odchyłki. Analizując przebiegi krzywych ilustrujących wyniki pomiaru względem punktu referencyjnego PR, można zauważyć, że ich kształt jest zbliżony a wartości odchyłek w poszczególnych punktach pomiarowych mieszczą się w zakresie od 0,001mm do 0,004mm. Widoczne są przesunięcia w poszczególnych osiach maszynowego układu współrzędnych a największe wartości występują w kierunku osi Y. Można więc stwierdzić, że odkształcenia korpusu obrabiarki względem wzorca spowodowane zmianami temperatury nie mają istotnego wpływu na zmiany prostoliniowości ruchu poszczególnych osi liniowych oraz nie wpływają na ich zależności kątowe w sposób zauważalnie istotny.

W ramach automatycznej kontroli parametrów geometrycznych oceniana była także równoległość osi wrzeciona względem płaszczyzn głównych obrabiarki. Podczas pomiarów oś A obrabiarki znajdowała się w pozycji  $A = 0^\circ$ . Ocena odchyłek kątowych w poszczególnych płaszczyznach była realizowana w oparciu o pomiar kuli wzorcowej zamocowanej na kolumnie, według metody Renishaw AxiSet TM [139]. Metoda polega na dwukrotnym pomiarze położenia kuli wzorcowej dwiema różnymi częściami tej samej końcówki pomiarowej. Pierwszy pomiar odbywa się tradycyjnie, kulką znajdującą się na końcu trzpienia pomiarowego. Podczas tego pomiaru następuje ustalenie bazy. Podczas drugiego pomiaru tej samej kuli wzorcowej wykorzystywana jest część walcowa trzpienia, znajdująca się jak najbliżej miejsca jego zamocowania w sondzie i jest pomiarem realizowanym względem pierwszego. Ten sposób pomiaru pozwala uzyskać informację na temat położenia kuli wzorcowej w płaszczyźnie XY układu MKS w dwóch różnych położeniach osi Z obrabiarki. Jednocześnie uwidocznia błędy równoległości osi

wrzeciona w stosunku do ruchu osi Z. Na rysunku 6.29 przedstawiono schematycznie metodykę pomiaru. W przypadku prowadzonych pomiarów wykorzystano został trzpień pomiarowy długości 110 mm. Pozwoliło to zmierzyć odchyłki równoległości osi wrzeciona na długości około 100 mm w płaszczyznach YZ oraz ZX w układzie MKS obrabiarki. Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku 6.30 w postaci odchyłek względnych położenia osi wrzeciona pomiaru częścią walcową trzpienia pomiarowego względem pomiaru bazującego. Dzięki temu można je porównywać do pomiarów realizowanych zgodnie z wytycznymi normy ISO 10791-3 - AG1. Odchyłkę w płaszczyźnie YZ oznaczono jako *SAYZ*, natomiast w płaszczyźnie ZX oznaczono jako *SAZX*.



**Rys. 6.29.** Schemat pomiaru błędu równoległości osi wrzeciona metodą Renishaw AxiSet™ 139: a) pomiar ustalający bazę, b) pomiar względny częścią walcową trzpienia pomiarowego

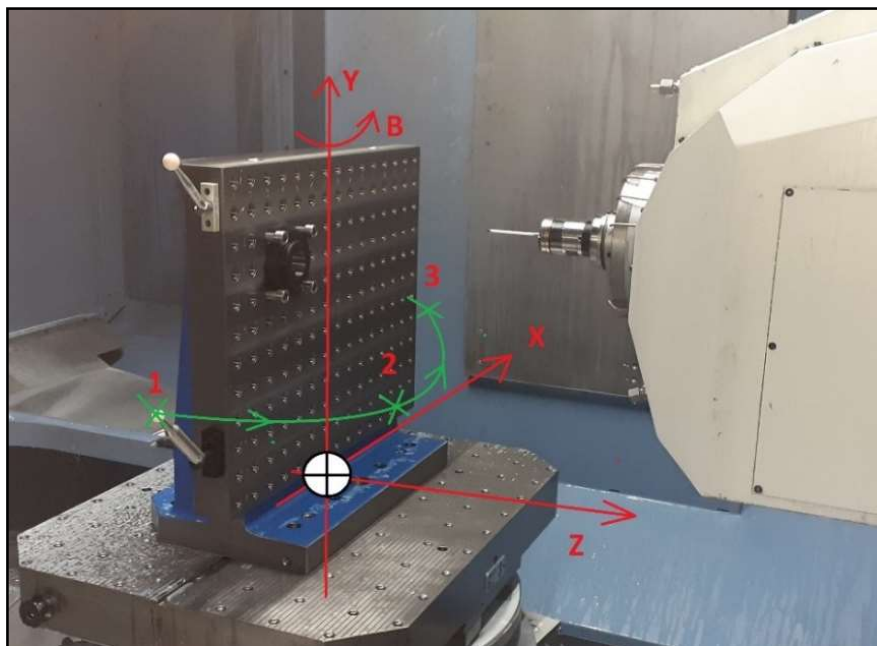


**Rys. 6.30.** Wyniki pomiarów odchyłek równoległości pomiędzy osią wrzeciona w pozycji poziomej ( $A=0^\circ$ ) a ruchem osi Z w płaszczyźnie poziomej ZX oraz YZ w MKS obrabiarki, uzyskane metodą Renishaw AxiSet™



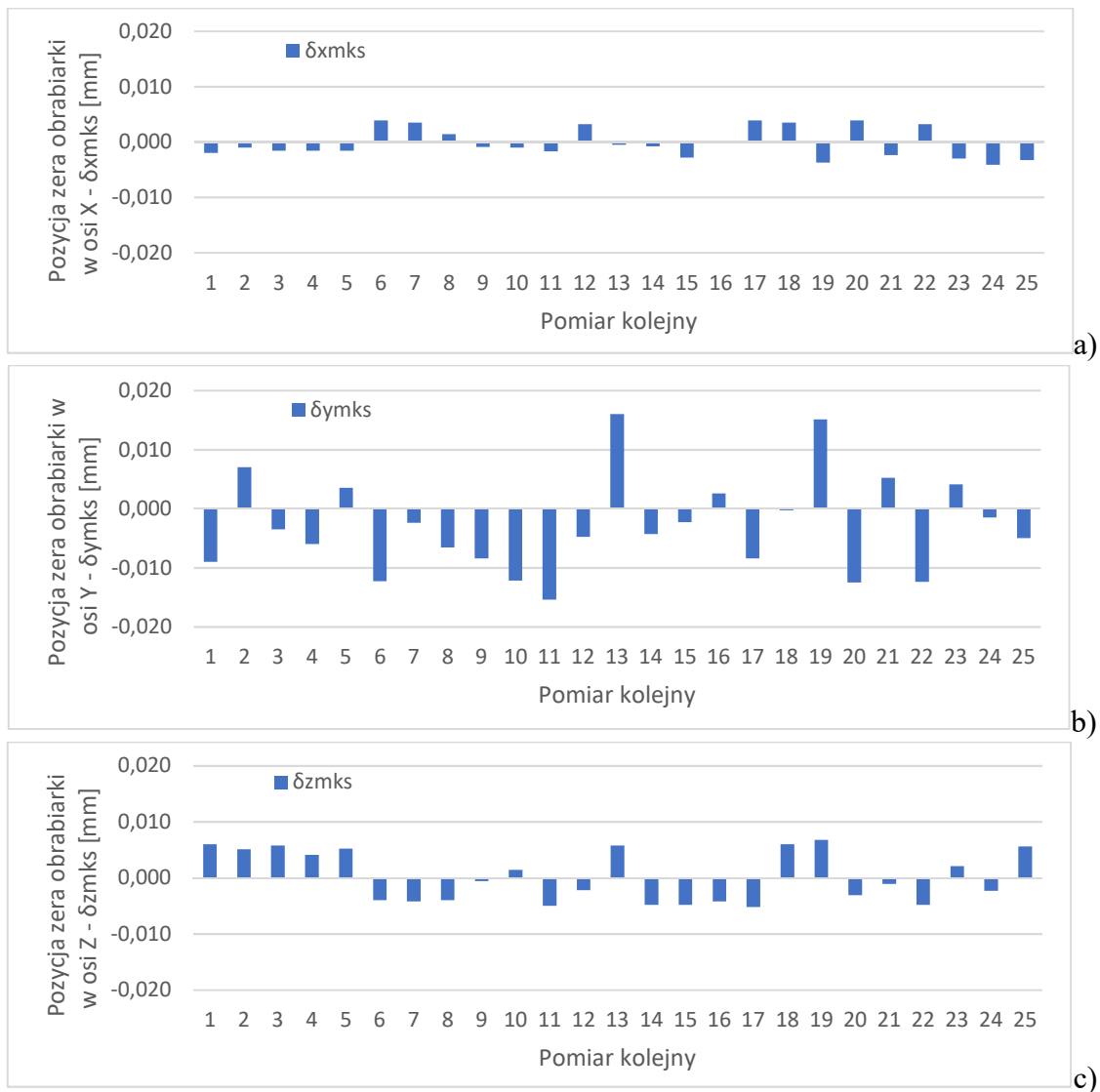
Przedstawione dane na rysunku 6.30 wskazują, że zmiany temperatury podzespołów obrabiarki nie wpływają w sposób istotny na zmianę kąta nachylenia osi wrzeciona w płaszczyznach głównych ZX oraz YZ. Otrzymane wyniki mają niższą wartość niż otrzymane metodą zgodną z normą ISO 10791-3 - AG1 (tab. 6.3). Niższe wartości uzyskanych wyników metodą Renishaw AxiSet™ można wytłumaczyć tym, że pomiar w przypadku sondy realizowany był na długości 100mm, natomiast w przypadku metody ISO 10791-3 - AG1 realizowany był na długości 300mm.

Kolejnym z parametrów mającym wpływ na powtarzalność obróbki jest zmienność położenia punktu zera maszynowego układu współrzędnych (MKS). Zgodnie z założeniami konstrukcyjnymi oraz funkcyjnymi badanej obrabiarki początek układu współrzędnych MKS znajdują się na przecięciu płaszczyzny stołu obróbczego (palety), z osią obrotu B obrabiarki. Producent obrabiarki przewidział procedurę weryfikacji oraz ustawiania zerowych położzeń dla każdej z sterowanych osi. Jest ona czasochłonna w realizacji. Z tego względu w ramach testów z wykorzystaniem kolumny wzorcowej zrealizowano pomiar położenia punktu zera MKS z wykorzystaniem metody pomiarowej zaadaptowanej z technik pomiarów współrzędnościowych. Sposób pomiaru polega na wyznaczeniu środka części teoretycznego łuku zatoczonego przez ruch kuli wzorcowej który wymuszony jest ruchem obrotowym osi B. Pomiary trzech punktów na zataczanym łuku odbywają się kolejno w pozycji  $B0^\circ$ ,  $B90^\circ$ ,  $B180^\circ$  (rys. 6.31).



**Rys. 6.31.** Schemat pomiaru położenia punktu zera MKS w osiach liniowych X, Y, Z obrabiarki

Pozwala to na wyznaczenie położenia środka obrotu palety w osi X oraz Z MKS względem aktualnego zera maszynowego a przez to, aktualnego położenia punktu zera maszynowego w tych osiach. Punkt zera MKS w osi Y wyznaczany jest na podstawie uśrednionej pozycji kuli w trzech punktach pomiarowych z uwzględnieniem temperatury wzorca, która mierzona jest z wykorzystaniem sondy stykowej TP44.10 (rys. 5.6), oraz równania  $\varepsilon_{YKD}$  dla przemieszczeń termicznych kuli (tab. 6.1) Odchyłki położenia punktu zera MKS w poszczególnych osiach oznaczone zostały jako  $\delta x_{mks}$ ,  $\delta y_{mks}$  oraz  $\delta z_{mks}$ . Otrzymane wyniki pomiarów przedstawiono chronologicznie w postaci histogramów na rysunku 6.32.



**Rys. 6.32.** Odchyłki położenia punktu zera MKS: a) w osi X, b) w osi Y, c) w osi Z

Z wykresów wynika, że w trakcie realizacji pomiarów odchyłek położenia punktu zera MKS dla osi X, Y oraz Z, suma pomiędzy wartościami bezwzględnymi najmniejszej oraz największej odchyłki wyniosła kolejno 0,008mm dla osi X, 0,032mm dla osi Y, oraz 0,011mm dla osi Z. Stosunkowo niewielkie odchyłki położenia zera maszynowego w osi X tłumaczyć należy termo-symetryczną budową obrabiarki względem płaszczyzny ZX. Przesunięcia zera maszynowego w osi Z również charakteryzowały się niewielką wartością. Wynika to z fabrycznej kompensacji długości wrzeciona obrabiarki. Zarejestrowane odchyłki w osi Y są dużo większe w porównaniu do odchyłek w osi X oraz Z. Ich przyczyną, biorąc pod uwagę badania geometryczne z wykorzystaniem kolumny wzorcowej, w dużej mierze jest rozszerzalność cieplna o charakterze wydłużenia liniowego elementów składowych obrabiarki.

## **6.6. Badania zmian temperatury podzespołów obrabiarki**

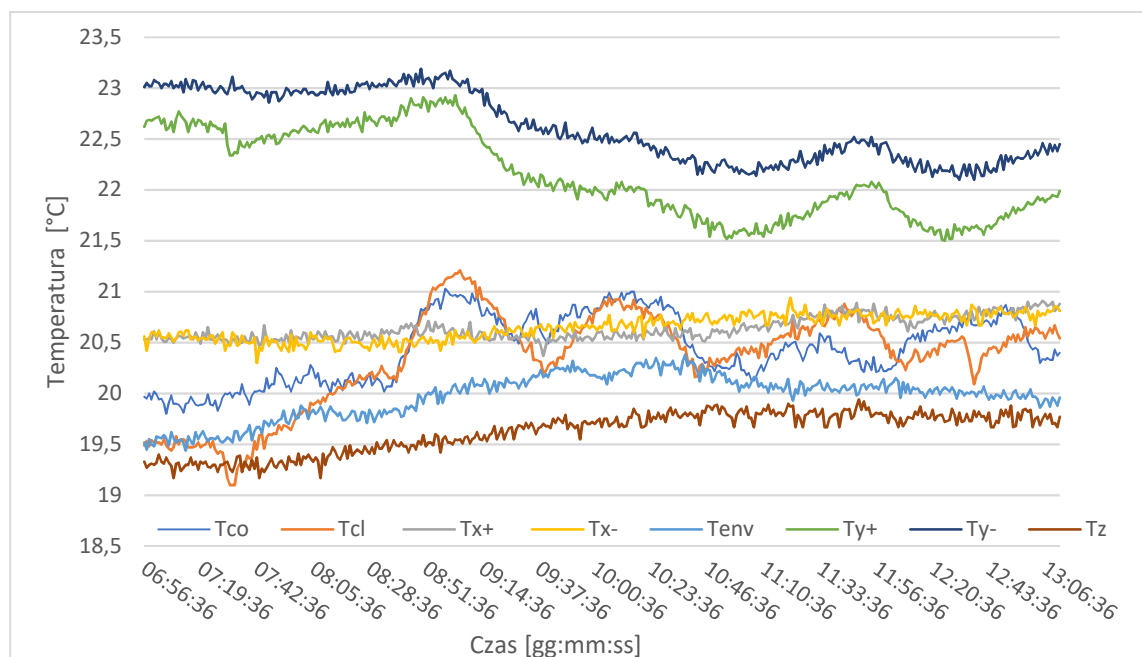
Obrabiarka będąca obiektem badań wyposażona została przez producenta w system pomiarowy temperatury, którego pierwotnym zadaniem jest rejestrowanie temperatur w kluczowych jego zdaniem miejscach. W połączeniu z układem nadzorującym zaimplementowanym w PLC, system informuje o ewentualnych awariach układu stabilizacji temperaturowej obrabiarki. W ramach badań wprowadzono dodatkową funkcjonalność systemu w postaci wysyłania danych temperaturowych do sterownika CNC, tak aby dane te dostępne były do wykorzystania w ramach realizacji algorytmów kompensacji temperaturowej.

Aby usystematyzować nazewnictwo stosowane w dalszej części pracy wprowadzono następujące oznaczenia wartości temperatur dla poszczególnych czujników:

- $T_{co}$  - temperatura glikolu krążącego w układzie stabilizacji temperatury elektrowrzeciona, pomiar realizowany w zbiorniku dystrybucyjnym na magistrali powrotnej,
- $T_{cl}$  - temperatura chłodziwa, pomiar realizowany w zbiorniku głównym chłodziwa obróbkowego,
- $T_{x1}$ ,  $T_{x2}$  - temperatura podstawy, po której porusza się oś Y,
- $T_{env}$  - temperatura otoczenia obrabiarki,
- $T_{y1}$ ,  $T_{y2}$  - temperatura słupa po której porusza się oś Y, pomiar wykonywany w dolnej oraz górnej części słupa,

- $T_z$  – temperatura podstawy obrabiarki.

Orientacyjne rozmieszczenie czujników temperatury zostało zilustrowane na rysunku 5.5a. Na rysunku 6.33 przedstawiono przykładowy przebieg zmian temperatury w czasie, gdy obrabiarka realizowała zadanie produkcyjne. Czas próbkowania oraz rejestracji wartości poziomów temperatur odbywał się co 60 sekund.



**Rys. 6.33.** Przebieg zmian temperatury elementów obrabiarki w trakcie realizacji przykładowego procesu obróbczego

Niektóre krzywe ilustrujące zmiany temperatury poszczególnych elementów obrabiarki, mają charakter przebiegu zbliżony do sinusoidalnego. Taki charakter wynika z działania systemu stabilizacji temperatury, który z założenia jest odpowiedzialny za utrzymanie równego jej rozkładu w poszczególnych podzespołach obrabiarki. Zjawisko to widoczne jest zwłaszcza dla czujników  $T_{co}$ ,  $T_{cl}$ ,  $T_{y1}$ ,  $T_{y2}$ , w momencie załączania się chłodziarki lub grzałki układu stabilizacji.

W celu wstępnego poznania zakresu oraz charakteru zmian temperatury obrabiarki przeprowadzono pomiary długoterminowe. Czas w którym rejestrowane były poziomy temperatury obejmował w przybliżeniu okres 1100 godzin. Tabela 6.5 zawiera dane statystyczne dla dwóch wariantów analizy. Wariant WT1, obejmuje zakres danych temperaturowych zebranych w stanie normalnej pracy obrabiarki, w trakcie jej rozgrzewania jak również w trakcie anomalii systemu stabilizacji temperaturowej sygnalizowanych w systemie. Drugi wariant WT2 to zakres danych temperaturowych

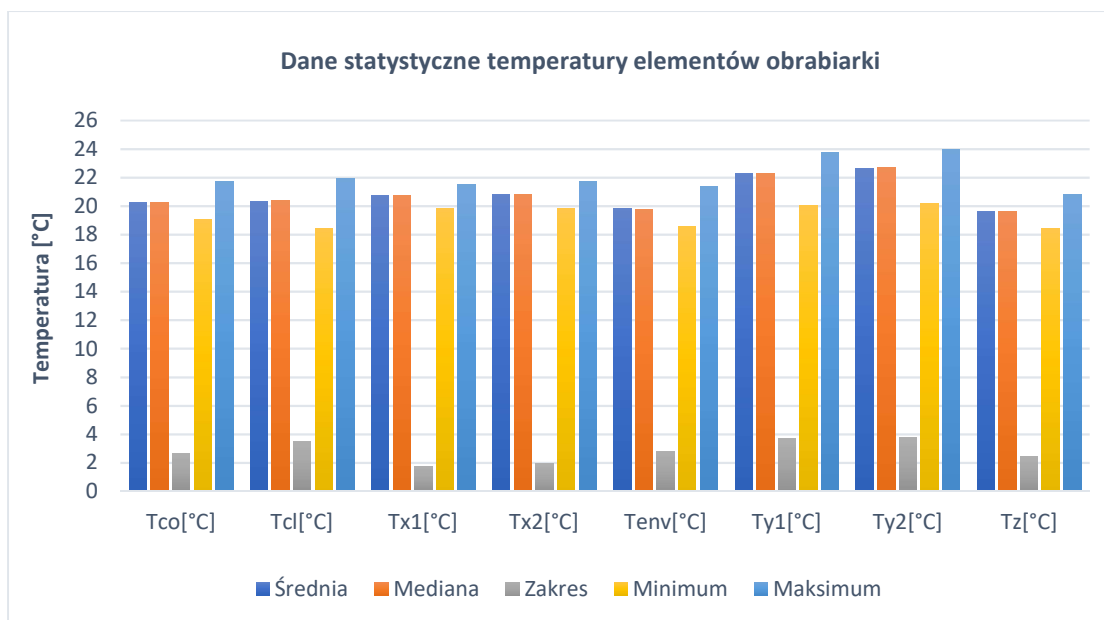
pozyskanych w okresie poprawnej pracy. Porównując oba warianty (WT1, WT2), widoczna jest znaczna różnica pomiędzy zakresami zmian temperatur w tych okresach dla poszczególnych czujników. Szczególnie niekorzystnie wypada wariant WT1 z punktu widzenia eksploatacji obrabiarki oraz jej niestabilności termicznej. Ponieważ anomalie systemu stabilizacji temperatury sygnalizowane są przez obrabiarkę i traktowane są jako awaria oraz badana obrabiarka z założenia pracuje w systemie 24/7 w linii FMS a rozgrzewki maszyny są rzadkie i objęte odpowiednią procedurą wewnętrzną w firmie, dane z takich okresów nie będą uwzględniane w dalszych analizach.

**Tab. 6.5.** Dane statystyczne temperatur elementów obrabiarki

		$T_{co}[^{\circ}C]$	$T_{cl}[^{\circ}C]$	$T_{x1}[^{\circ}C]$	$T_{x2}[^{\circ}C]$	$T_{env}[^{\circ}C]$	$T_{y1}[^{\circ}C]$	$T_{y2}[^{\circ}C]$	$T_z[^{\circ}C]$
WT1	Średnia	20,29	20,32	20,72	20,78	19,82	22,24	22,58	19,65
	Mediana	20,24	20,35	20,73	20,8	19,77	22,22	22,58	19,62
	Zakres	<b>5,15</b>	<b>5,77</b>	<b>5,64</b>	<b>4,77</b>	<b>6,4</b>	<b>8,44</b>	<b>8,12</b>	<b>4,71</b>
	Minimum	18,48	18,06	18,74	18,8	18,35	18,79	18,97	18,42
	Maksimum	23,63	23,83	24,38	23,57	24,75	27,23	27,09	23,13
WT2	Średnia	20,28	20,33	20,77	20,83	19,8	22,31	22,66	19,65
	Mediana	20,24	20,37	20,77	20,83	19,79	22,32	22,68	19,65
	Zakres	<b>2,68</b>	<b>3,5</b>	<b>1,72</b>	<b>1,93</b>	<b>2,82</b>	<b>3,72</b>	<b>3,79</b>	<b>2,42</b>
	Minimum	19,07	18,46	19,83	19,8	18,56	20,04	20,18	18,42
	Maksimum	21,75	21,96	21,55	21,73	21,38	23,76	23,97	20,84

Na rysunku 6.34, w celu lepszego zwizualizowania zmian temperatury z poszczególnych czujników, przedstawione zostały dane statystyczne wariantu WT2 w formie słupkowej. Dla wszystkich czujników zauważalne jest to, że wartości średnie oraz ich mediany są na bardzo zbliżonych poziomach. Świadczy to o tym, że rozkład zarejestrowanych wartości temperatur jest symetryczny i oscyluje wokół wartości średniej. Średnia temperatura chłodziwa w badanym okresie wyniosła 20.4°C i oscylowała w granicach +/- 1,75°C. Najbardziej stabilne parametry termiczne wskazywały czujniki  $T_{x1}$ ,  $T_{x2}$ . Największą zmienność oraz średni poziom temperatury zarejestrowany został dla obu czujników  $T_{y1}$ ,  $T_{y2}$  rejestrujących temperaturę słupa po której porusza się oś Y. W górnej części słupa umiejscowione są dwa serwonapędy odpowiedzialne za przemieszczania elektrowrzeciona oraz osi obrotowej A w kierunku

+/- Y układu maszynowego. W przypadku tych czujników zmiany temperatury wynikały z intensywności pracy osi Y oraz reakcji układu stabilizacji termicznej na wzrost temperatury w tym zespole.



**Rys. 6.34.** Wizualizacja danych statystycznych zmian temperatury wariantu WT2

Realizacja badań na obiekcie rzeczywistym wiąże się z rejestracją wartości obciążonych zakłóceniami. Wynika to z faktu, że każdy sygnał rzeczywisty analogowy lub dyskretny jest zawsze złożeniem składowej zdeterminowanej (sygnału użytecznego), oraz składowej losowej (szumu) [92]. Analizując przebiegi czasowe poszczególnych zmian temperatur (rys 6.33), widoczne są zakłócenia w postaci szumów naniesionych na przebieg główny. Zakłócenia mogą być spowodowane między innymi wpływem zmiennego pola elektromagnetycznego na przewody łączące przetwornik analogowo cyfrowy z czujnikiem temperatury PT100. Kuang-Chao Fan [54], jako jedyny z niewielu autorów podejmujących problematykę kompensacji temperaturowej w obrabiarkach zwrócił uwagę na ten problem prowadząc badania w warunkach produkcyjnych. W związku z tym konieczne jest zastosowanie odpowiedniej metody umożliwiającej usunięcie zakłóceń, które mogą przyczynić się do gorszych wyników predykcyjnych jak również niestabilności działania kompensacji. Problem ten dotyczy również wyników zmian temperatury rejestrowanych w ramach niniejszej pracy. W doborze narzędzia matematycznego do wygładzania przebiegu zmian temperatury kierowano się możliwością jego zastosowania offline, możliwością modyfikacji parametrów

wpływających na wygładzenie, jak również prostotą zapisu matematycznego umożliwiające wprowadzenia obliczeń np. do akcji synchronicznych obrabiarki celem realizacji w czasie rzeczywistym. Dostępne programy takie jak Excel, R czy Matlab posiadają takie narzędzia matematyczne, lecz wymagają już zarejestrowanych danych. W celu usunięcia zakłóceń zastosowano więc uśrednienie wykładnicze [61], realizowane zgodnie ze wzorem:

$$y(n) = \alpha \cdot x(n) + (1 - \alpha) \cdot y(n - 1) \quad (6.2)$$

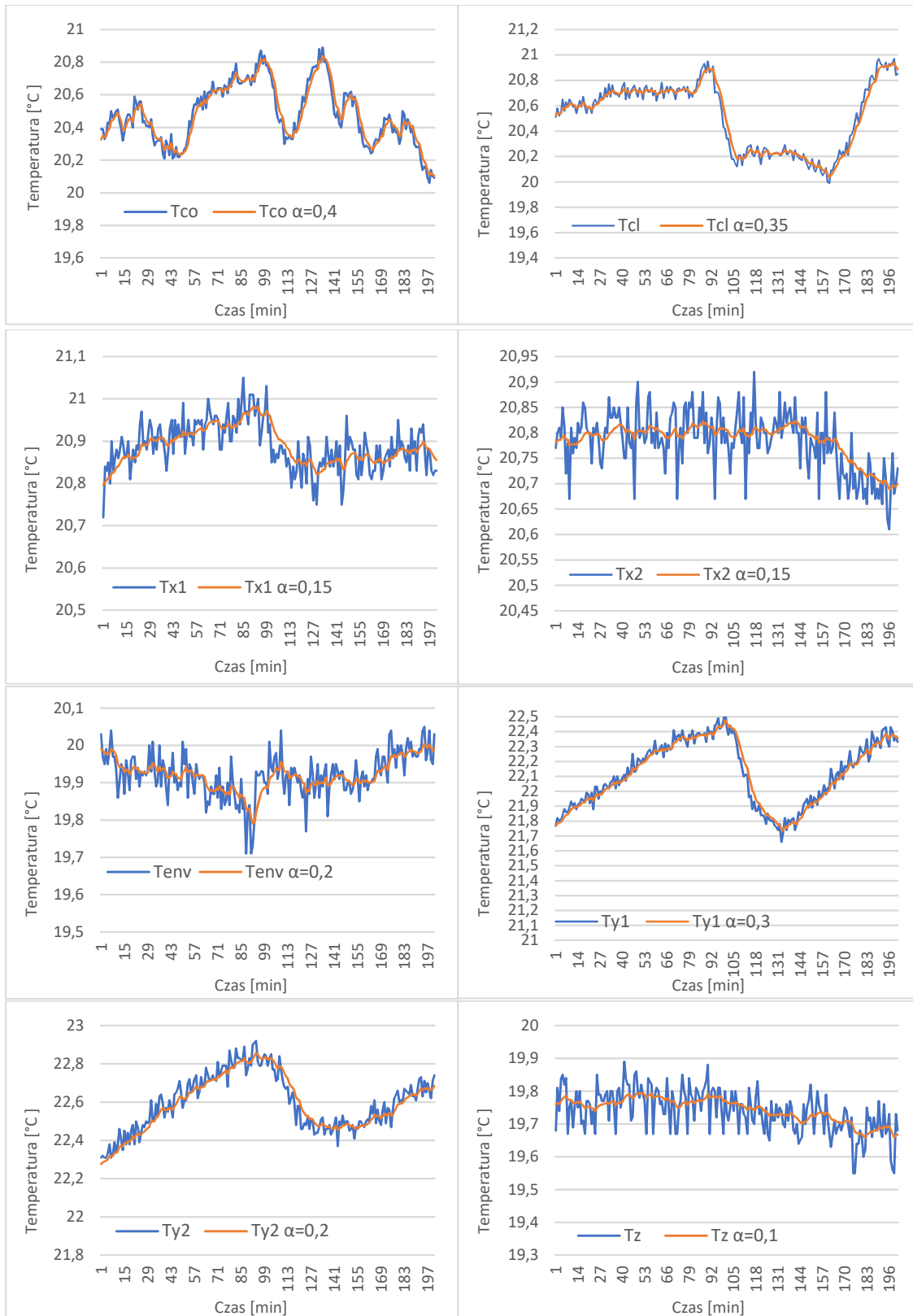
gdzie:  $y(n)$  – bieżącą próbką wyjściową uśrednioną,  $y(n - 1)$  – poprzednią próbką wyjściową systemu uśredniającego,  $\alpha$  – stała stanowiąca współczynnik wagowy (wygładzenia), przybierający wartości z przedziału  $\alpha \in (0,1)$ .

Przy doborze współczynnika wygładzenia  $\alpha$ , przyjęto kryterium polegające na wizualnej ocenie zgodności przebiegów czasowych zmian temperatury wygładzonego przebiegu (na różnych poziomach  $\alpha$ ), z przebiegiem oryginalnym [92]. W tabeli 6.6 przedstawiono zestawienie ostatecznie przyjętych współczynników  $\alpha$ .

**Tab. 6.6.** *Współczynniki tłumienia  $\alpha$  wskazań czujników temperatury*

<i>Czujnik temperatury</i>	<i>Tco</i>	<i>Tcl</i>	<i>Tx1</i>	<i>Tx2</i>	<i>Tenv</i>	<i>Ty1</i>	<i>Ty2</i>	<i>Tz</i>
$\alpha$	0.4	0.35	0.15	0.15	0.2	0.3	0.2	0.1

Na rysunku 6.35 przedstawiono porównanie wybranych wycinków wygładzonych oraz oryginalnych przebiegów zmian temperatur dla przyjętych współczynników  $\alpha$ .



**Rys. 6.35.** Rzeczywiste i wygładzone przebiegi zmian temperatury



## 7. MODELE MATEMATYCZNE PRZEMIESZCZEŃ TCP

### 7.1. Przebiegi zmian badanych wielkości w trakcie procesu obróbki

W celu opracowania modelu przemieszczeń TCP w zależności od zmian temperatury podzespołów obrabiarki oraz płynów eksploatacyjnych, wprowadzono cykliczne pomiary położenia punktu charakterystycznego. Pomiary realizowane były w osi X oraz Y, gdyż te kierunki mają znaczenie dla ewentualnych błędów obróbki części. Punktem charakterystycznym jest punkt zawieszenia układu WKS, będący układem odniesienia, względem, którego realizowane były z założenia przemieszczenia narzędzi wykonawczych na podstawie programu sterującego NC. Punkt zawieszenia układu WKS zlokalizowany był w otworze bazowym zgodnie z rys. 5.1 (podrozdział 5.1). Pomiary realizowane były za pomocą sondy przedmiotowej zgodnie z 4 punktowym wariantem wyznaczania środka otworu (rys. 6.3a). W sumie przeprowadzono 42 eksperymenty polegające na okresowych pomiarach położenia punktu bazowego w trakcie realizacji procesu obróbki seryjnej. Pomiary realizowane były w kluczowej części procesu tzn. w trakcie realizacji operacji wykańczających. Operacje wykańczające w większości przypadków polegały na wykonywaniu otworów o wąskiej tolerancji położenia względem siebie. W każdym badaniu uzyskano od 13 do 15 pomiarów. Różnica w liczbie pomiarów w poszczególnych badaniach wynika z powodu występowania grubych błędów w pomiarach pozycji. Przyczyną grubych błędów (0.1mm i większych), były wióry które pomimo każdorazowego automatycznego czyszczenia otworu bazowego przed pomiarem, nadal pozostawały i sporadycznie powodowały błędy pomiaru. Z tego właśnie powodu niektóre z wyników zostały wstępnie odrzucone. Pomiary pozycji odbywały się w nieregularnych interwałach czasowych i wynikały z technologicznych możliwości wprowadzenia pomiaru w trakcie realizacji procesu. Wyniki pomiaru zmian położenia TCP względem punktu bazowego obróbki rejestrowane były jako błędy położenia zgodnie z zależnościami:

$$\Delta x(p_k) = x(p_k) - x(p_0) \quad (7.1)$$

$$\Delta y(p_k) = y(p_k) - y(p_0) \quad (7.2)$$

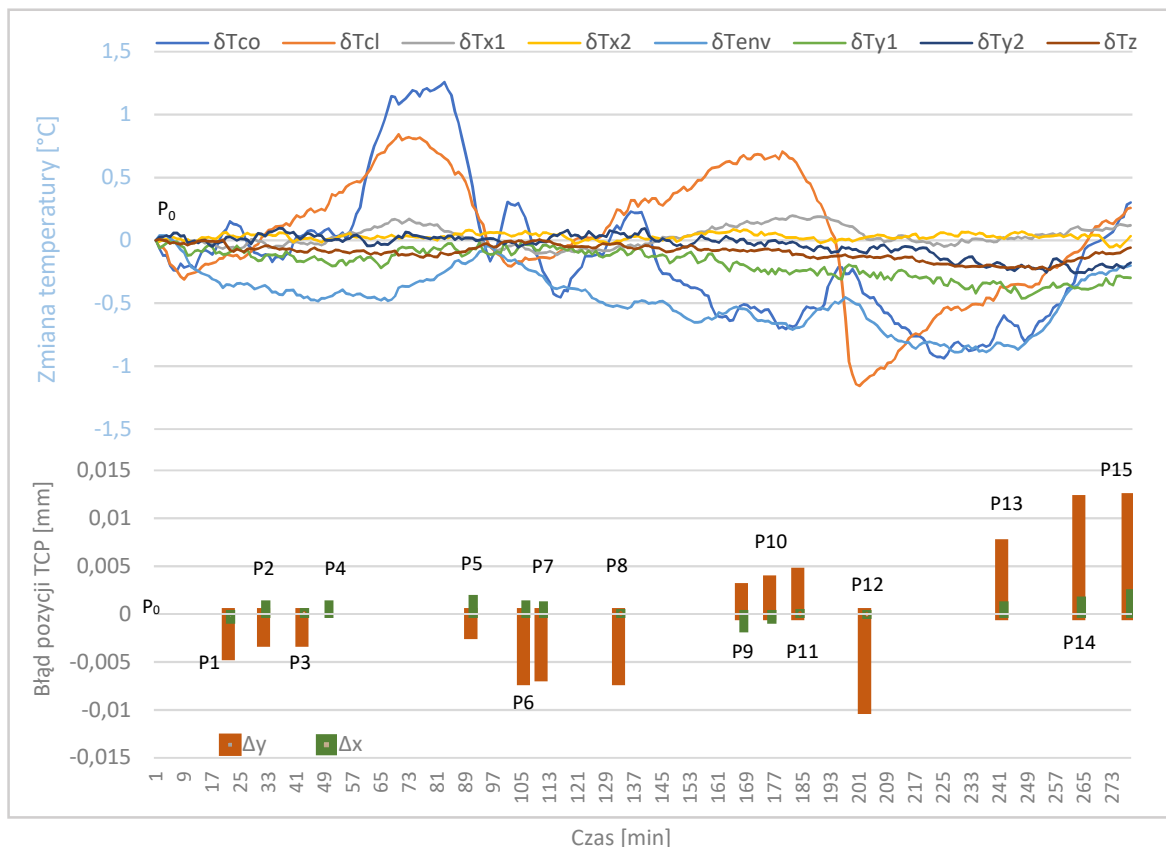
gdzie:  $x(p_0)$ ,  $y(p_0)$ - pozycja początkowa TCP względem punktu bazowego w osi X oraz Y zmierzona w momencie  $p_0$ ,  $x(p_k)$ ,  $y(p_k)$  - wartość pomiaru przemieszczenia TCP względem punktu bazowego,  $\Delta x(p_k)$ ,  $\Delta y(p_k)$  - błąd położenia TCP względem punktu bazowego.

Wyniki pomiaru zmian temperatury rejestrowane były w podobny sposób zgodnie z zależnością:

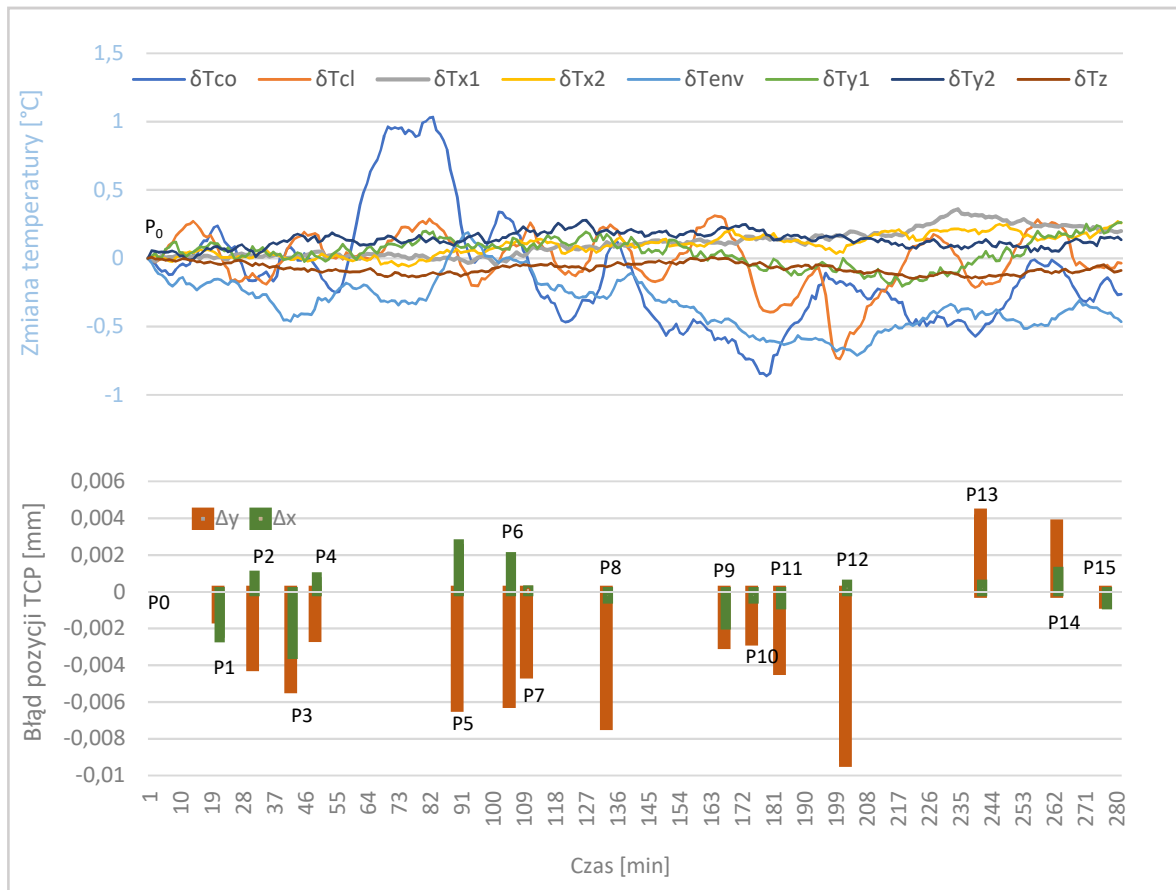
$$\delta T_i(p_k) = T_i(p_k) - T_i(p_0) \quad (7.3)$$

gdzie:  $T_i(p_0)$  - wartość temperatury początkowej zarejestrowana w momencie  $p_0$ ,  $T_i(p_k)$  - wartość temperatury,  $\delta T_i(p_k)$  - zmiany (przyrost), temperatury dla czujników  $i = T_{co}, \dots, T_z$ .

Na rysunku 7.1 oraz 7.2 przedstawiono dwa przykładowe przebiegi badanych charakterystyk spośród 42, które wykorzystano do przygotowania matematycznego modelu przemieszczeń. W każdym z pojedynczych badań pomiar  $P_0$  to pomiar początkowy. Na wykresach słupkowych przedstawiono uzyskane wartości błędu położenia TCP. Na wykresach liniowych przedstawiono zmiany temperatury w czasie.



**Rys. 7.1.** Przebieg zmian temperatury oraz błędu pozycji TCP w trakcie realizacji procesu obróbki wybranego procesu



**Rys. 7.2.** Przebieg zmian temperatur oraz błędu pozycji TCP w trakcie realizacji procesu obróbki dla wybranego procesu

W obu prezentowanych przypadkach widoczne jest, że dominującymi przemieszczeniami TCP względem punktu bazowego są przemieszczenia w osi Y.

## 7.2. Użyte narzędzia statystyczne

Analizy przeprowadzono przy użyciu języka R Statistical (wersja 4.1.1; IDE RStudio v. 1.04.1717, R Core Team, 2021) dla Windows 10 x64 (kompilacja 19044) [6]. Lista użytych pakietów podczas analizy zamieszczona została w załączniku nr 2.

Opis badanego zbioru oraz wyciągnięcie podstawowych wniosków i uogólnień na temat próby przeprowadzono za pomocą statystyk opisowych. W tym celu użyto metody wbudowanej *describeBy()* pakietu *psych*.

Każdorazowo przy wyliczaniu modelu regresji metodą najmniejszych kwadratów, korzystano z funkcji *lm()*. Wyniki analizy regresji raportowano w postaci tabel zawierających wyliczone statystyki modelu. W kolumnie oznaczonej  $\beta$ , raportowane były wyliczone współczynniki regresji dla zmiennej objaśniającej. W kolumnie oznaczonej  $t$  prezentowano statystykę zwracaną przez test t-Studenta. W połączeniu z kolumną  $Pr(>|t|)$ , wskazuje ona na zdolność prognozowania każdej zmiennej objaśniającej indywidualnie. Hipoteza zerowa przeprowadzanego testu t-Studenta zakładała, że wartość współczynnika będącego mnożnikiem danej zmiennej objaśniającej jest równa 0. W przypadku, gdy obliczona wartość prawdopodobieństwa prezentowana w kolumnie  $Pr(>|t|)$  była większa niż ustalona istotność statystyczna oznaczało to, że nie było podstaw do odrzucenia  $H_0$ , i relacje pomiędzy wyliczonym współczynnikiem a zmienną objaśniającą są przypadkowe. W takiej sytuacji należy rozważyć usunięcie analizowanej zmiennej objaśniającej z modelu, ponieważ jest ona statystycznie nieistotna.

W adnotacjach pod każdą z tabel statystyk analizy regresji raportowano statystykę  $F$  zwracaną przez test  $F$  w drodze analizy wariancji. Test ten weryfikuje następujące hipotezy:

$H_0: \beta_i = 0$ , cały zespół zmiennych objaśniających uznajemy za nieistotny dla modelu a sam model nieistotny statystycznie.

$H_1: \beta_i \neq 0$ , cały zespół zmiennych objaśniających uznajemy za istotny dla modelu a sam model istotny statystycznie.

Statystyka ta podlega rozkładowi F-Snedecora z  $k$  oraz  $n - (k + 1)$  stopniami swobody. W stopniach swobody  $k$ , oznacza ilość zmiennych objaśniających w modelu, natomiast  $n$  oznacza ilość obserwacji. Wyznaczoną na podstawie statystyki testowej wartość  $p$  porównuje się z poziomem ufności  $\alpha$ :

jeżeli  $p \leq \alpha$ ; odrzucana jest hipoteza  $H_0$  przyjmując  $H_1$ ,

jeżeli  $p > \alpha$ ; nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy  $H_0$ .

Jakość dopasowania opracowanego modelu matematycznego do zebranych danych empirycznych oceniano przy pomocy współczynnika determinacji  $R^2$ :

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (7.4)$$

gdzie:  $Y_i'$  - wartości przewidywane na podstawie równania regresji,  $Y_i$  - wartości rzeczywiste zaobserwowane,  $\bar{Y}$  - średnia arytmetyczna zbioru wartości zaobserwowanych,  $n$  - liczba obserwacji.

Ze względu na to, że prowadzone analizy dotyczyły dwóch lub więcej zmiennych objaśniających, obliczano również współczynnik determinacji skorygowany  $R_{adj}^2$ , w którym wprowadzana jest poprawka ze względu na liczbę obserwacji oraz zmiennych objaśniających:

$$R_{adj}^2 = \frac{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y_i')^2}{n-k}}{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n-1}} \quad (7.5)$$

gdzie:  $Y_i'$  - wartości przewidywane na podstawie równania regresji,  $Y_i$  - wartości rzeczywiste zaobserwowane,  $\bar{Y}$  - średnia arytmetyczna zbioru wartości zaobserwowanych,  $n$  - liczba obserwacji,  $k$  - liczba współczynników w równaniu regresji.

Współczynnik determinacji oraz determinacji skorygowany, przyjmują wartości z przedziału  $\langle 0, 1 \rangle$ . Im wartość wyliczonego współczynnika jest bliższa wartości 1, tym model jest lepiej dopasowany do danych rzeczywistych. Przyjęto, że jeśli współczynnik przyjmuje wartość  $R_{adj}^2 > 0,85$  oraz  $R^2 > 0,85$ , to model jest bardzo dobrze dopasowanym do danych empirycznych.

Jako miarę błędów (reszt) wyznaczonych modeli przyjęto pierwiastek kwadratowy z wartości średniej sumy kwadratów błędów prognozy:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n}} \quad (7.6)$$

gdzie:  $n$  - liczba obserwacji,  $\hat{Y}_i$  - wartości przewidywane na podstawie równania regresji,  $Y_i$  - wartości rzeczywiste zaobserwowane.

W prowadzonych analizach poziom istotności  $\alpha$  przyjęto na ogólnym stosowanym w naukach technicznych poziomie  $\alpha = 0.05$  co oznacza, że w prowadzonych testach statystycznych wartość  $p$  oraz  $Pr(>|t|)$  przyjmują wartość 0,05 jako graniczną.

Analiza regresji liniowej, zarówno model prosty (z jednym predyktorem) jak i model wieloraki (z kilkoma predyktorami) ma następujące założenia [5, 26, 53]:

- założenie zależności liniowej pomiędzy predyktorami a zmienną objaśnianą,
- założenie odpowiedniej ilości obserwacji,
- wariancja reszt, składnika losowego jest taka sama dla wszystkich obserwacji (homoscedastyczność),
- reszty mają rozkład zbliżony do rozkładu normalnego,
- brak współliniowości pomiędzy predyktorami.

**Założenie liniowości** zostało sprawdzone poprzez analizę wykresu rozrzutów pomiędzy predyktorami a zmienną zależną wraz z analizą współczynnika korelacji pomiędzy nimi. Wizualizacja oraz oszacowanie współczynników korelacji przedstawiono w postaci macierzy korelacji. W tym celu zastosowano metodę *chart.Correlaton()* pakietu *PerformanceAnalytics*. Wszystkie zmienne badano na skali ilorazowej. Współczynnik korelacji obliczono za pomocą metody r-Pearsona wyrażonej wzorem:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (7.7)$$

gdzie:  $n$  – liczebność próbki,  $\bar{x}$  – wartość średnia zmiennej  $X$ ,  $\bar{y}$  – wartość średnia zmiennej  $Y$ .

Współczynnik korelacji  $R$  przyjmuje wartości z przedziału pomiędzy  $(-1 \div 1)$ . Korelacja liniowa dodatnia wskazuje, że wzrost wartości jednej cechy pociąga za sobą wzrost średnich wartości drugiej. Korelacja ujemna wskazuje odwrotną zależność. Im wartość bezwzględna współczynnika bliższa jedności tym korelacja jest silniejsza.

**Obecność homoscedastyczności** danych w modelu regresji zbadano za pomocą testu Goldfeld-Quandt'a przy użyciu metody *gqtest()* z pakietu *lmtest*. Test Goldfelda-Quandta [53], porównuje wariancje dwóch podmodeli podzielone przez określony punkt przerwania. Hipotezy testu Goldfeld-Quandt'a określone są w sposób następujący:

$H_0$  - brak heteroscedastyczności w modelu regresji,

$H_1$  - Zaobserwowano zjawisko heteroscedastyczności w modelu regresji.

**Normalność rozkładu** oszacowano na podstawie rozkładu reszt na wykresie kwantyl -kwantyl (Q-Q), wraz z uwzględnieniem wartości skośności oraz kurtozy [24, 28].

Dodatkowo zbadano normalność za pośrednictwem testów Shapiro-Wilka. Hipotezy w tym teście określone są w następujący sposób:

$H_0$  - próba pochodzi z populacji o rozkładzie normalnym,

$H_1$  - próba nie pochodzi z populacji o rozkładzie normalnym.

**Współliniowości predyktorów** sprawdzono za pomocą współczynników inflacji wariancji. W tym celu użyto metody  $vif()$  pakietu *car*. Współczynnik  $vif$  wyrażony jest wzorem:

$$vif_i = \frac{1}{1-R_i^2} \quad (7.8)$$

gdzie:  $R_i^2$  – współczynnik determinacji wielorakiej pomiędzy danym predyktorem a pozostałymi predyktorami w modelu,  $i$  - zmienna objaśniana predyktor w modelu.

Wartości współczynnika  $vif < 5$ , traktowane jest jako wartości bez wyraźnych zjawisk współliniowości pomiędzy predyktorami [5, 25].

**Ilość obserwacji** przypadających na jedną zmienną została zbadana za pomocą oszacowania liczby obserwacji na każdy wyraz równania regresji oraz porównania do wartości progowej (10-20 obserwacji na wyraz), [26]. Ilość obserwacji na wyraz równania regresji obliczano zgodnie ze wzorem:

$$Obs = \frac{n}{k+1} \quad (7.9)$$

gdzie:  $n$  – ilość obserwacji,  $k$ -ilość wyrazów w równaniu regresji.

## Opis próby

Zależność pomiędzy błędem położenia TCP względem punktu bazowego a zmianami temperatur wyznaczono jako model regresji liniowej w oparciu o ogólny wzór 3.1. Podczas poszczególnych analiz kierowano się metodyką solidnej regresji [98, 100]. Zakres danych eksperymentalnych wykorzystanych do opracowania modeli przedstawiono w rozdziale 7.1. Komplet danych zawiera załącznik 3.

Analizowany zbiór danych zawierał 623 obserwacje oraz składał się z 10 zmiennych. Zmienne  $\Delta x$  oraz  $\Delta y$  to zmienne objaśniane natomiast pozostałe zmienne to zmienne objaśniające (predyktory). Miary rozkładu zmiennych na skali przedziałowej, ilorazowej zaprezentowano w tabeli 7.2.

**Tab. 7.2.** Statystyki opisowe rozkładu zmiennych ( $N=623$ )

Zmienna	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>Mdn</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Roz.</i>	<i>Sk.</i>	<i>Kur.</i>
$\delta T_{co}$ , [°C]	-0,41	0,605	-0,36	-1,75	1,75	3,5	0,23	-0,014
$\delta T_{cl}$ , [°C]	-0,05	0,392	-0,08	-2,05	1,45	3,5	0,09	0,87
$\delta T_{x1}$ , [°C]	0,09	0,143	0,07	-0,44	0,85	1,29	0,77	1,84
$\delta T_{x2}$ , [°C]	0,05	0,091	0,05	-0,35	0,49	0,84	0,45	2,05
$\delta T_{env}$ , [°C]	-0,17	0,595	-0,18	-2,38	1,62	3,4	0,25	0,93
$\delta T_{y1}$ , [°C]	0,13	0,457	-0,03	-1,87	2,18	4,06	0,89	1,77
$\delta T_{y2}$ , [°C]	0,15	0,350	0,06	-1,49	1,84	3,33	0,70	2,46
$\delta T_z$ , [°C]	-0,10	0,244	-0,09	-1,04	0,86	1,9	0,37	1,67
$\Delta y$ , [mm]	-0,0003	0,0061	-0,0001	-0,03	0,032	0,062	-0,18	1,55
$\Delta x$ , [mm]	-0,001	0,0025	-0,0006	-0,0067	0,0065	0,01316	-0,05	-0,38

Analizując dane w tabeli 7.2, uwagę zwraca stosunkowo duży rozrzut dla  $\Delta y$  (0,062mm), który w odniesieniu do badań wstępnych realizowanych na kolumnie wzorcowej jest dwa razy większy niż zarejestrowane zmiany położenia TCP względem zera MKS obrabiarki (rys. 6.32 b). Jak później stwierdzono w drodze analizy tak duży rozrzut tłumaczyć należy obecnością obserwacji odstających które mogły powstać w wyniku wpływu zanieczyszczeń otworu bazowego w trakcie pomiaru pozycji TCP względem punktu bazowego na uchwycie obróbczym w trakcie realizacji procesów obróbki.

W celu unifikacji składowych modelu, etykiety predyktorów przekodowano dodając do etykiety temperatury  $t$  indeks kolejnej zmiennej w zbiorze zgodnie z tabelą 7.3.

**Tab. 7.3.** Przekodowanie zmiennych zbioru dla celów implementacji modelu regresji

Etykiety pierwotne	Notacja zmiennych w modelu regresji
$\Delta x$	$x$
$\Delta y$	$y$
$\delta T_{co}$	$t1$
$\delta T_{cl}$	$t2$
$\delta T_{x1}$	$t3$
$\delta T_{x2}$	$t4$
$\delta T_{env}$	$t5$
$\delta T_{y1}$	$t6$
$\delta T_{y2}$	$t7$
$\delta T_z$	$t8$



### 7.3. Budowa modelu regresji liniowej dla zmiennej objaśnianej $y$

Zastosowanie modelu regresji jest poprzedzone spełnieniem listy założeń, które zostały wymienione w podrozdziale 7.2.

- **Założenie liniowości zależności**

Jeśli istnienie zależności innej niż liniowa nie jest oczywiste, bądź gdy nie jest ona widoczna na wykresie rozrzutu, przyjmuje się postać liniową zależności pomiędzy zmiennymi. Można stwierdzić, że jeżeli teoretycznie lub empirycznie nie można zaobserwować występowania nieliniowej zależności pomiędzy zmiennymi przyjmujemy zależność liniową. Na głównej przekątnej rysunku 7.3 zwizualizowano rozkłady zmiennych w postaci histogramów. W górnym trójkącie podano wartości współczynników korelacji R-Pearsona (7.7), wraz z czynnikiem jego istotności (\*\*\*)  $<0.001$ , \*\*  $<0.01$ , \*  $<0.05$ ). Dolny trójkąt macierzy pozwalał na powiązanie zależności pomiędzy zmiennymi w postaci wykresu rozrzutu par zmiennych wraz z linią dopasowania o kolorze czerwonym. W oparciu o dane na rysunku 7.3 założenie co do liniowości można uznać za spełnione, ponieważ dane zorganizowane w widoczne liniowe skupiska, położone są wzdłuż linii dopasowania. Nie zaobserwowano równomiernych rozproszeń zmiennych wzdłuż całej powierzchni.

Z punktu widzenia ogólnej znajomości budowy badanej obrabiarki oraz rozmieszczenia czujników temperatury istniały podstawy, po dokonaniu oceny inżynierskiej, do wstępnego odrzucenia niektórych predyktorów z równania regresji. Ze względu na fakt, że słup osi  $Y$  wyposażony jest w system, którego zadaniem jest utrzymywanie równomiernego rozkładu temperatury w tym podzespole, można więc założyć, że predyktory  $t6$  oraz  $t7$  będą ze sobą silnie skorelowane.

Analizując rys. 7.3, można zauważyć, iż współczynnik korelacji R- Pearsona pomiędzy zmiennymi  $t6$  oraz  $t7$  wynosi 0,93 ( $p < 0.001$ ), co stanowi potwierdzenie poprawności powyższego rozumowania. W takim przypadku należało rozważyć usunięcie jednego z predyktorów z modelu regresji, ponieważ mogą wnosić te same informacje. Czujnik temperatury odpowiadający predyktorowi  $t7$  znajduje się u podstawy słupa osi  $Y$  i z punktu widzenia konstrukcyjnego zmiana temperatury rejestrowana przez ten czujnik będzie miała bezpośredni wpływ na zmianę położenia TCP.



- **Założenie co do wystarczającej ilości obserwacji per czynnik**

Liczba obserwacji (*Obs*), przypadająca na jedną składową modelu wynosiła 69.2. Przekracza to minimalną wartość 10-20 dla zastosowania modelu regresji.

W związku z tym, że dalsze założenia sprawdzane są w oparciu o model. Zbudowano więc model metodą najmniejszych kwadratów oznaczając go jako *mod-I<sub>y</sub>*. Model uwzględniał wszystkie osiem predyktorów oraz 623 obserwacje. W tabeli 7.4 zaprezentowano statystykę modelu *mod-I<sub>y</sub>*. W oparciu o predyktory *mod-I<sub>y</sub>* wyliczono współczynnik wariacji inflacji w celu oceny potencjalnej kolinearności pomiędzy zmiennymi objaśniającymi w modelu. Otrzymane wyniki przedstawiono w tabeli 7.5.

**Tab. 7.4.** Dopasowanie współczynników ośmioczynnikowego modelu *mod-I<sub>y</sub>* regresji liniowej dla zmiennej objaśnianej *y*

	<i>y</i>			
	$\beta$	<i>SE</i>	<i>t</i>	<i>Pr(&gt; t )</i>
<i>Stała</i>	-0,0006934	0,0001877	-3,695	< <b>0,001</b>
<i>t1</i>	-0,0006934	0,0003160	-8,385	< <b>0,001</b>
<i>t2</i>	0,0028994	0,0003557	8,152	< <b>0,001</b>
<i>t3</i>	0,0083708	0,0014099	9,311	< <b>0,001</b>
<i>t4</i>	0,0052541	0,0013896	5,937	<b>0,002</b>
<i>t5</i>	-0,0000787	0,0003378	-0,233	0,81
<i>t6</i>	0,0010936	0,0006151	1,778	0,076
<i>t7</i>	-0,0138638	0,0007390	-18,759	< <b>0,001</b>
<i>t8</i>	-0,0024068	0,0007922	-3,038	0,0025

Adnotacja:  $N=623$ ,  $R^2 = 0,76$ ,  $R^2_{adj} = \mathbf{0,75}$ ,  $F(8, 614) = 241,1$ ,  $p < \mathbf{0,001}$ ,  $RMSE = \mathbf{0,0032}$

Z danych tabeli 7.4 wynika, że zbudowany model *mod-I<sub>y</sub>* wyjaśnia w 75% ( $R^2_{adj} = 0,75$ ), zmienności przemieszczeń TCP w osi Y, natomiast predyktor *t5* oraz *t6* są statystycznie nieistotne. *RMSE* dla tak opracowanego modelu wyniósł 0,0032mm.

**Tab. 7.5.** Wyniki testu wariacji inflacji (*vif*) dla zmiennych modelu *mod-I<sub>y</sub>*

<i>Predyktor</i>	<i>vif</i>
<i>t1</i>	2,3
<i>t2</i>	1,77
<i>t3</i>	3,8
<i>t4</i>	1,74
<i>t5</i>	2,22
<i>t6</i>	<b>8,7</b>
<i>t7</i>	<b>7,29</b>
<i>t8</i>	2,24

Test wariancji inflacji (tab. 7.5) wykazał, iż predyktory  $t7$  oraz  $t8$  wykazują współliniowość ponieważ wyliczony współczynnik  $vif > 5$ .

W tabeli 7.6 zaprezentowano statystykę modelu  $mod-2_y$  po usunięciu poszczególnych predyktorów. Usuwanie predyktorów odbywało się metodą krokową uwzględniając uwarunkowania konstrukcyjne jak również istotności statystyczne poszczególnych czynników oraz wskaźniki  $vif$  w dopasowanym modelu  $mod-1_y$ .

**Tab. 7.6.** Dopasowanie współczynników sześcioczynnikowego modelu  $mod-2_y$  regresji liniowej

	$y$			
	$\beta$	$SE$	$t$	$Pr(> t )$
Stała	-0,00075	0,00018	-4,078	< 0,001
$t1$	-0,00260	0,00031	-8,409	< 0,001
$t2$	0,00294	0,00035	8,299	< 0,001
$t3$	0,00932	0,00131	7,136	< 0,001
$t4$	0,00455	0,00133	3,413	< 0,001
$t7$	-0,01283	0,00043	-29,802	< 0,001
$t8$	-0,00268	0,00068	-3,925	< 0,001

Adnotacja:  $N = 623$ .  $R^2 = 0.757$ .  $R^2_{adj} = 0.754$ .  $F(6, 616) = 320.3$ ,  $p < 0.001$ ,  $RMSE = 0,0032$

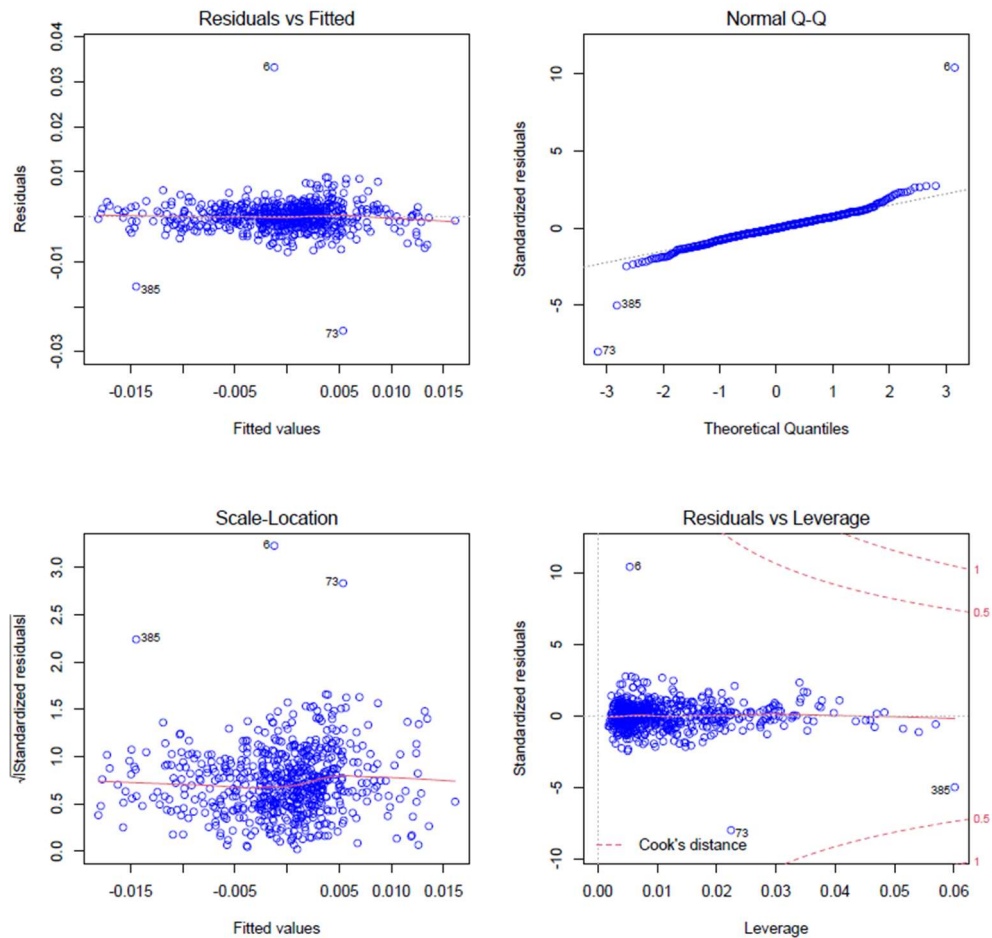
Z tabeli 7.6 wynika, że wszystkie czynniki  $mod-2_y$  są istotne statystycznie ( $Pr(>|t|) < 0.05$ ), a współczynnik determinacji skorygowany pomimo usunięcia predyktorów  $t5$ ,  $t6$  nie zmienił się znacząco w stosunku do  $mod-1_y$  i wyniósł  $R^2_{adj} = 0,75$ . Oznacza to, że  $mod-2_y$  pomimo usunięcia czynników w 75% wyjaśnia zmienność przemieszczeń TCP w osi Y.  $RMSE$  dla tak opracowanego modelu wynosi 0,0032 mm.

Wizualizację diagnostyk modelu regresji  $mod-2_y$  przedstawiono na rysunku 7.4. Przedstawia on reszty modelu na cztery różne sposoby. Wykres reszty vs. dopasowanie (Residuals vs Fitted), służy do sprawdzania założeń zależności liniowej. Linia dopasowania nie różni się znacząco od prostej poziomej. Numery najbardziej odstających reszt zaznaczono na wykresie.

Wykres normalności kwartył-kwartył (Normal Q-Q), służy do sprawdzania czy reszty posiadają rozkład normalny. Z danych wykresu wywnioskowano odmiennosć reszt od linii prostej dla obu ogonów.

Wykres lokalizacji skali (Scale-Location), służy do sprawdzania jednorodności wariancji reszt (homoscedastyczności). Pozioma linia z równomiernie rozłożonymi

punktami jest dobrym wskaźnikiem homoscedastyczności. Jak wynika z wykresu, reszty modeli  $mod-2_y$  nie cechowały się zaburzeniem homoscedastyczności.



**Rys. 7.4.** Diagnostyki regresji modelu  $mod-2_y$  ( $N = 623$ )

Wykres Reszty vs. Wpływ (Residuals vs Leverage), służy do identyfikowania wpływowych przypadków, czyli wartości ekstremalnych które mogą mieć wpływ na wyniki regresji po włączeniu lub wyłączeniu z analizy. Obecność wartości odstających może wpływać na interpretację modelu, poprzez zwiększenie błędu reszt ( $RMSE$ ). Obserwacje, których standaryzowane reszty są większe niż 3 w wartości bezwzględnej, są możliwymi wartościami odstającymi [26].

- **Doprecyzowanie modelu bazowego**

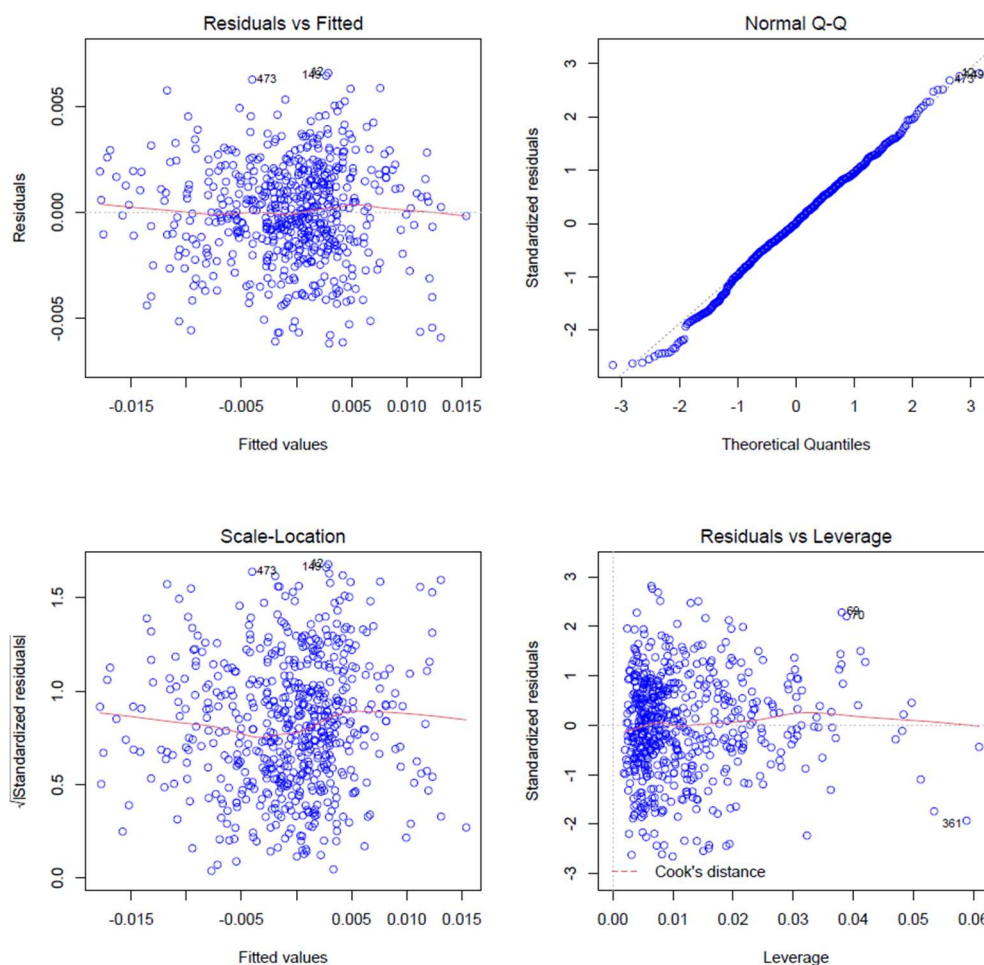
Doprecyzowanie modelu wykonano metodą krokowego usunięcia obserwacji na podstawie wskaźników diagnostycznych zgodnie z rysunkiem 7.4. Ogólnie przeprowadzono osiem kroków. Dla każdego kroku generowane były wykresy

diagnostyki regresji modelu. Finalnie usunięto 24 obserwacje zgodnie z rekomendacjami wykresów diagnostyki. Listę usuniętych numerów obserwacji podano w tabeli 7.7.

**Tab. 7.7.** Postępy krokowego doprecyzowania modelu względem rozkładów reszt

Krok	Numery wyeliminowanych obserwacji	N po eliminacji
Krok 1	6, 73, 385	620
Krok 2	287, 286, 318	617
Krok 3	501, 526, 603	614
Krok 4	364, 22, 14	611
Krok 5	141, 84, 339	608
Krok 6	85, 141, 146	605
Krok 7	530, 139, 318	602
Krok 8	364, 289, 11	599

Po dokonaniu procedury doprecyzowania, finalne wykresy diagnostyki dla modelu przedstawione zostały na rysunku 7.5.



**Rys. 7.5.** Diagnostyki regresji modelu finalnego ( $N = 599$ )

Zgodnie z danymi rysunku 7.5 odnotowano poprawę rozkładów reszt dla wszystkich wykresów. Linii dopasowania wykresów Residuals vs. Fitted, Scale-Location pozostały nadal poziome, położone symetrycznie względem rozkładów reszt. Znacznie zmniejszyła się odległość reszt od linii punktowanej na wykresie Normal Q-Q. Nie odnotowano reszt wykraczających poza przedział  $[-3;3]$  na wykresie Residuals vs. Leverage. Uznano, że taki model może być uznany za finałowy, gdy spełni założenia regresji liniowej.

Zbiór danych dla finałowego modelu zawierał 599 obserwacji oraz składał się z 6 zmiennych. Miary rozkładu zmiennych na skali przedziałowej, ilorazowej zaprezentowano w tabeli 7.8.

**Tab. 7.8.** Statystyki opisowe rozkładu zmiennych na skali przedziałowej ( $N=599$ )

Zmienna	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>Mdn</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Roz.</i>
<i>t1</i>	-0,40	0,61	-0,36	-1,75	1,75	3,50
<i>t2</i>	-0,05	0,48	-0,08	-2,05	1,44	3,49
<i>t3</i>	0,09	0,17	0,07	-0,44	0,85	1,29
<i>t4</i>	0,06	0,12	0,05	-0,35	0,49	0,84
<i>t7</i>	0,16	0,46	0,06	-1,49	1,84	3,33
<i>t8</i>	-0,10	0,24	-0,09	-1,05	0,78	1,82
<i>y</i>	-0,00053	0,006	-0,00016	-0,01856	0,01523	0,03379

- **Normalność rozkładu**

Wyniki testu normalności Shapiro-Wilka wraz z wartościami skośności i kurtozy zmiennych modelu ostatecznego przedstawiono w tabeli 7.9.

**Tab. 7.9.** Statystyki testu normalności wraz z miarami kształtu i symetrii rozkładów zmiennych modelu finałowego ( $N=599$ )

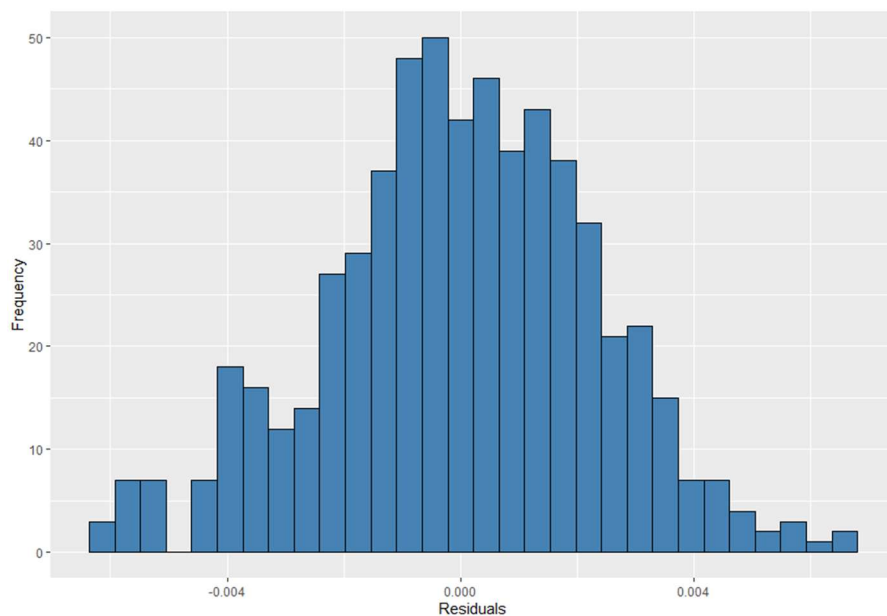
Zmienna	<i>Sk</i>	<i>Kurt.</i>	<i>W</i>	<i>p</i>
<i>t1</i>	0,23	0,04	0,98	<0,001
<i>t2</i>	0,03	0,82	0,98	<0,001
<i>t3</i>	0,66	1,65	0,96	<0,001
<i>t4</i>	0,45	2,04	0,95	<0,001
<i>t7</i>	0,61	2,35	0,90	<0,001
<i>t8</i>	0,25	1,40	0,97	<0,001
<i>y</i>	-0,32	0,24	0,98	<0,001

Dla wszystkich zmiennych test normalności wykazał odmienności rozkładów od normalnych ( $p < 0,05$ ) w odniesieniu do testu Shapiro-Wilka. Dodatkowymi wskaźnikami świadczącymi o rozkładzie zmiennych są wyniki skośności i kurtozy. W

oparcie o przyjętą konwencję rozkładu zmiennych o bezwzględnej wartości skośności poniżej „2,0”, oraz kurtozie poniżej „7,0”, uważa się, że zmienne takie posiadają rozkłady normalne [24, 28]. Wartości skośności i kurtozy dla zmiennych modelu finałowego nie przekraczały wartości granicznych, w związku z czym uznano rozkład zmiennych modelu finałowego za normalny.

- **Normalność rozkładu reszt**

Różnice pomiędzy wartościami zmiennej objaśnianej a wartościami wynikającymi z modelu w klasycznej metodzie najmniejszych kwadratów powinny być zbliżone do rozkładu normalnego. Najwięcej reszt powinno skupiać się wokół zerowych różnic. Na rysunku 7.6 przedstawiono rozkład reszt opracowanego modelu.



**Rys. 7.6.** Rozkład reszt modelu ostatecznego regresji dla „y”

W celu uzyskania jednoznacznej odpowiedzi przeprowadzono testy normalności rozkładu których wyniki zostały przedstawione w tabeli 7.10.

**Tab. 7.10.** Wyniki testów na zgodność rozkładu reszt modelu y z rozkładem normalnym

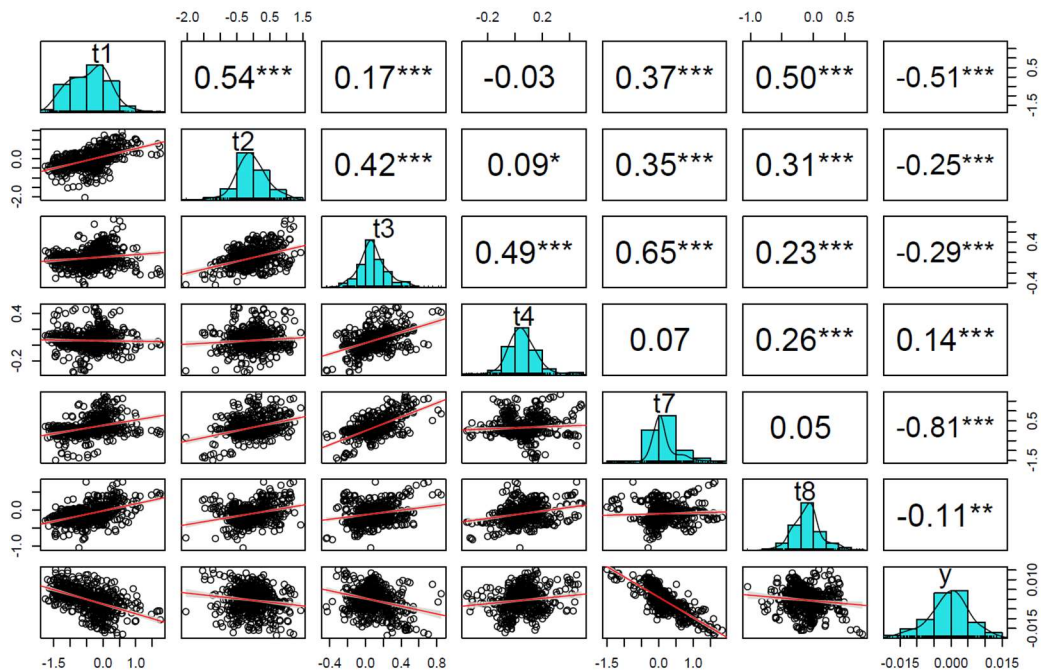
Test	Statystyka	p
Shapiro-Wilk	0.9961	0.5742
Kolmogorov-Smirnov	0.0408	0.6346
Anderson-Darling	0.4055	0.3502



Na podstawie otrzymanych wyników w tabeli 7.10 stwierdzono, że nie ma podstawy do odrzucenia hipotezy zerowej przeprowadzonych testów o braku rozkładu normalnego dla analizowanych danych.

- **Założenie liniowości zależności**

Macierz korelacji zmiennych modelu finałowego przedstawiono na rysunku 7.7.



**Rys. 7.7.** Macierz korelacji pomiędzy zmiennymi badanymi dla modelu ostatecznego regresji liniowej  $y$  ( $N=599$ )

W oparciu o dane z rysunku 7.7 założenie co do liniowości można uznać za spełnione, ponieważ dane zorganizowane w widoczne liniowe skupiska, położone są wzdłuż linii dopasowania. Nie zaobserwowano równomiernych rozprożeń zmiennych wzdłuż całej powierzchni.

- **Założenie braku współliniowości**

Wyniki testu wariacji inflacji dla modelu finalnego przedstawiono w tabeli 7.11.

**Tab. 7.11.** Wyniki testu wariacji inflacji (vif) dla zmiennych modelu finalnego „y”

Przydatnik	vif
t1	2,23
t2	1,71
t3	3,25
t4	1,6
t7	2,54
t8	1,64

Z danych tabeli 7.11 wynika, że dla wszystkich zmiennych współczynniki  $vif$  nie przekraczają wartości 5.0 co świadczy o braku współliniowości pomiędzy zmiennymi.

- **Założenie co do wystarczającej ilości obserwacji per czynnik**

Po przeprowadzonych korektach liczba obserwacji przypadająca na jedną składową modelu ( $Obs$ ), wynosiła 85,57. Nadal przekracza to minimalną wartość 10-20 dla zastosowania modelu regresji.

- **Założenie homoskedastyczności składnika losowego**

Przeprowadzono test Goldfelda-Quandt z odrzuceniem około 20% wszystkich obserwacji (fraction =120). Pozwolił na osiągnięcie następujących wyników: GQ(233, 232)=0.63,  $p=0.999$  z  $H_1$ : „wariancja wzrastała od segmentu 1 do 2”. Ponieważ wartość  $p > 0.05$ , nie ma wystarczających dowodów, aby stwierdzić, że heteroskedastyczność jest obecna w składniku losowym (resztach), opracowanego modelu.

- **Wyniki dopasowania modelu finalnego dla  $y$**

Po przeprowadzeniu przekształcenia na etapie usuwania obserwacji zgodnie z rekomendacjami wykresów diagnostycznych, zmianie uległy statystyki dopasowania modelu finalnego dla przemieszczeń TCP w osi Y.

Ostateczne statystyki dopasowania modelu przedstawiono w tabeli 7.12.

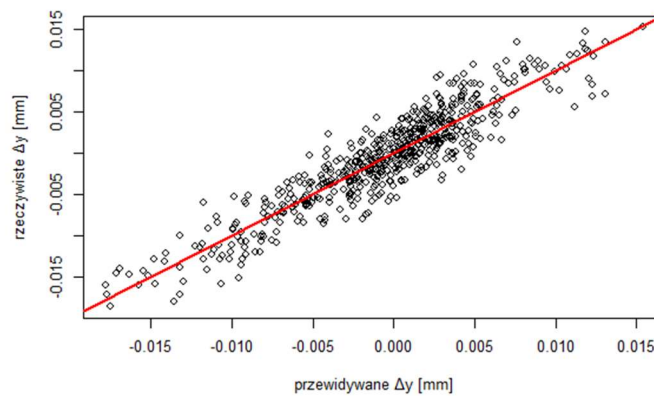
**Tabela 7.12.** Dopasowanie współczynników modelu regresji liniowej

	$y$			
	$\beta$	$SE$	$t$	$Pr(> t )$
<i>Stała</i>	-0,00083	0,0001357	-6,086	<b>&lt;0,001</b>
<i>t1</i>	-0,00292	0,000232	-12,603	<b>&lt;0,001</b>
<i>t2</i>	0,003239	0,0002621	12,357	<b>&lt;0,001</b>
<i>t3</i>	0,009784	0,0009928	9,855	<b>&lt;0,001</b>
<i>t4</i>	0,002756	0,000986	2,795	<b>0,005</b>
<i>t7</i>	-0,01256	0,0003276	-38,341	<b>&lt;0,001</b>
<i>t8</i>	-0,00179	0,0005174	-3,456	<b>&lt;0,001</b>

Adnotacja:  $N=599$   $R^2 = 0.86$ .  $R^2_{adj}=\mathbf{0,854}$ .  $F(6, 592)= 548,8$ .  $p <0,001$ .  $RMSE = 0,0022$

Z tabeli wynika, że wszystkie czynniki modelu finalnego są istotne statystycznie ( $Pr(>|t|) < 0.05$ ). Statystyka  $F$  wskazująca na zdolność prognozowania całego modelu regresji wynosi 548,8. Ponieważ wartość  $p$  powiązana ze statystyką  $F$  jest mniejsza niż ustalony poziom istotności oznaczało to, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy  $H_1$ .

Należy więc uznać cały zespół zmiennych objaśniających za istotny dla modelu. Dla końcowego modelu współczynnik determinacji skorygowany wynosi  $R_{2adj}=0,85$ . Oznacza to, że model finalny w 85% wyjaśnia zmienność przemieszczeń TCP w osi Y. Wykres wartości rzeczywistych w odniesieniu do przewidywanych dla N=599 obserwacji uwzględnionych w modelu ostatecznym przedstawiono na rysunku 7.8. RMSE dla tak opracowanego modelu zmniejszył się w stosunku do mod-1y oraz mod-2y i wynosi 0,0022mm.



**Rys. 7.8.** Wartości rzeczywiste w odniesieniu do przewidywanych dla modelu finalnego y ( $N=599$ )

W oparciu o dane tabeli 7.12, model przemieszczenia TCP w osi Y względem punktu bazowego obróbki układu WKS w zależności od zmian temperatur podzespołów oraz płynów eksploatacyjnych można opisać wzorem:

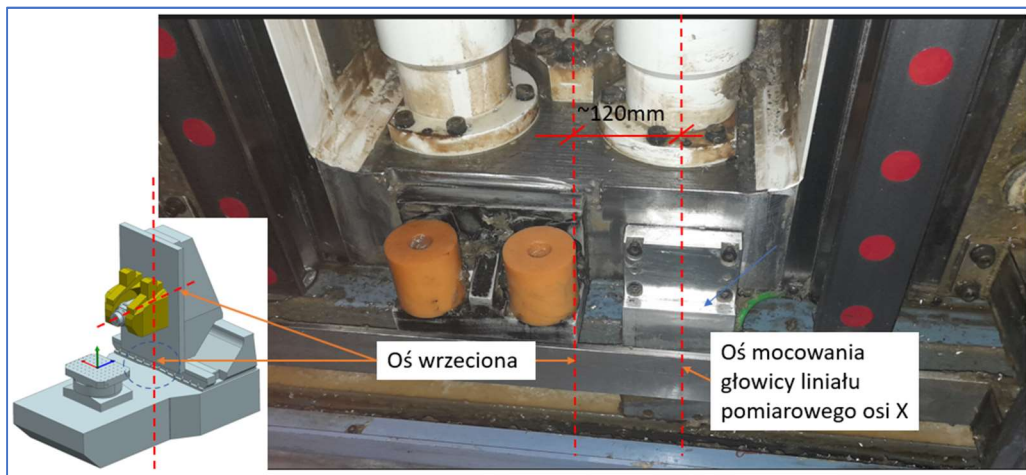
$$\begin{aligned} \Delta y = & -8 \cdot 10^{-4} - 2,92 \cdot 10^{-3} \cdot \delta T_{co} + 3,24 \cdot 10^{-3} \cdot \delta T_{cl} + 9,78 \cdot 10^{-3} \cdot \delta T_{x1} + \\ & + 2,76 \cdot 10^{-3} \cdot \delta T_{x2} - 1,25 \cdot 10^{-2} \cdot \delta T_{y2} - 1,79 \cdot 10^{-3} \cdot \delta T_z \end{aligned} \quad (7.10)$$

Tak opracowany model  $\Delta y = f(\delta T_{co}, \delta T_{cl}, \delta T_{x1}, \delta T_{x2}, \delta T_{y2}, \delta T_z)$  uznano za możliwy do zaimplementowania w systemie sterowania obrabiarki.

#### 7.4. Budowa modelu regresji liniowej dla zmiennej objaśnianej x

Ze względu na to, że kolumna po której porusza się oś Y oraz wrzeciono, stabilizowana jest termicznie za pomocą układu cyrkulacji, zakłada się symetryczny rozkład temperatury w płaszczyźnie ZY obrabiarki. Z tego powodu w trakcie poprawnej pracy układu stabilizacji, zmiany temperatury słupa osi Y nie powodują przemieszczeń

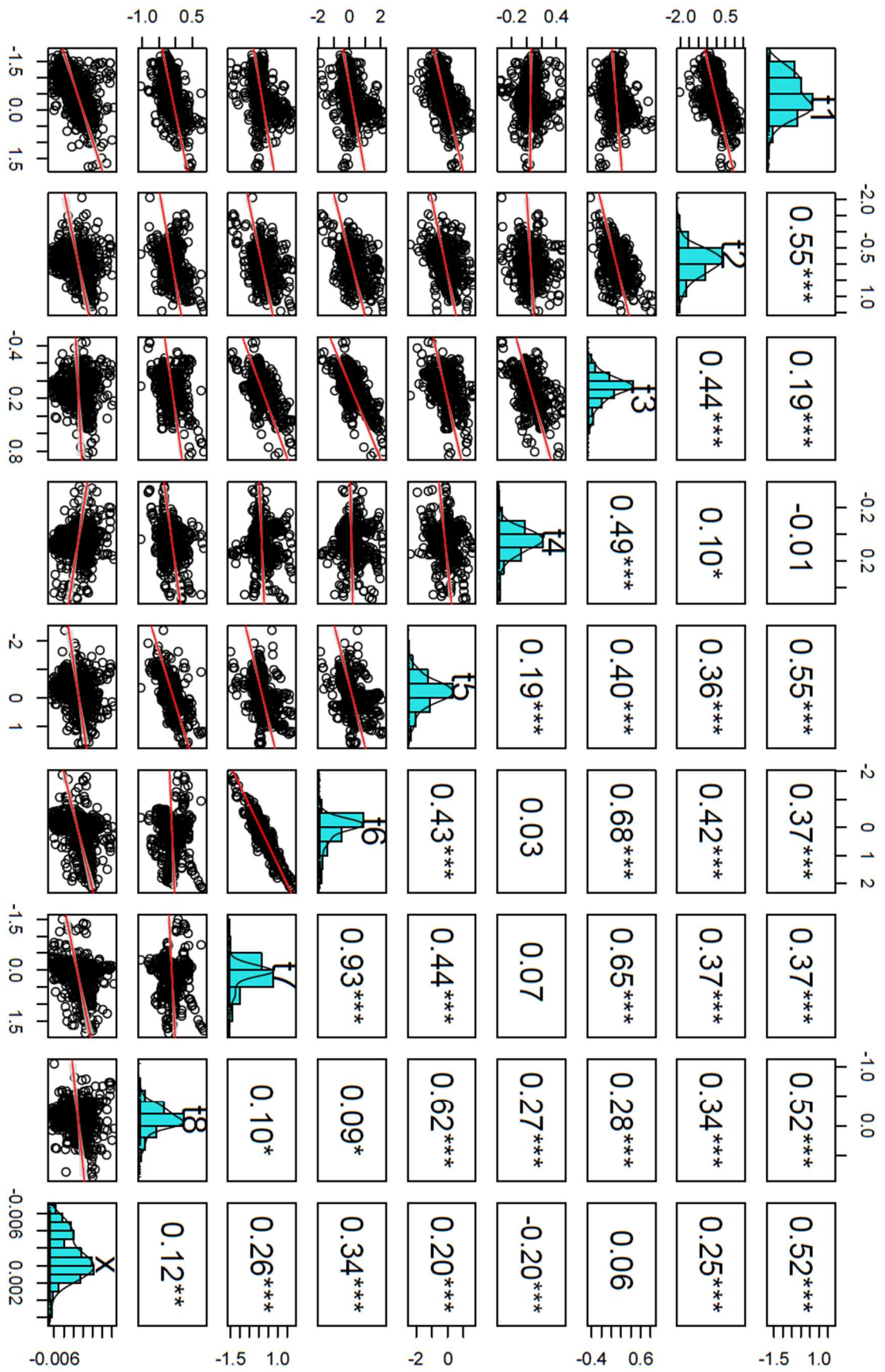
kątowych osi wrzeciona w płaszczyźnie XZ. Powyższe stwierdzenia można uzasadnić wynikami badań wstępnych w zakresie równoległości osi wrzeciona względem płaszczyzn głównych obrabiarki w zróżnicowanych warunkach temperaturowych (rys. 6.24). Nie wskazywały one na przemieszczenia kątowe osi wrzeciona. Jednym z czynników mogących mieć wpływ na przemieszczenia TCP w osi X jest sposób zamocowania wózka liniału osi Y. Na rysunku 7.9 zilustrowano sposób mocowania wózka głowicy pomiarowej liniału osi X znajdującego się u podstawy osi Y w pobliżu sensora temperatury  $T_{y2}$  do rejestracji zmian temperatury odpowiadającej zmiennej  $t_7$ . Widoczne jest wzajemne przesunięcie osi na odległość 120mm, które w wyniku zmian temperatury będzie powodowało błędne odczyty rzeczywistej pozycji TCP w osi X. W związku z powyższym oraz mając na uwadze informacje zawarte w macierzy korelacji między zmiennymi na rysunku 7.10, należy rozważyć usunięcie z równania regresji zmiennej  $t_6$ , ponieważ jest silnie skorelowana ze zmienną  $t_7$ . Należy również rozważyć usunięcie zmiennej  $t_3$ , ponieważ nie wykazuje istotnego poziomu korelacji ze zmienną objaśnianą  $x$ .



**Rys. 7.9.** Sposób mocowania wózka pomiarowego osi X w badanej obrabiarce

- **Założenie liniowości zależności**

Z rysunku 7.10 wnioskować można, że założenie co do liniowości można uznać za spełnione, ponieważ dane zorganizowane w widoczne skupiska, położone są wzdłuż linii dopasowania. Nie zaobserwowano równomiernych rozproszeń zmiennych wzdłuż całej powierzchni. Uzyskanie modelu końcowego odbyło się analogicznie jak w przypadku budowy modelu regresji dla  $y$ .



Rys. 7.10. Macierz korelacji pomiędzy zmiennymi badanymi dla modelu regresji liniowej  $x$

- **Założenie co do wystarczającej ilości obserwacji per czynnik**

Liczba obserwacji przypadająca na jedną składową modelu (*Obs*) wynosi 69,2. Przekracza to minimalną wartość 10-20 dla zastosowania modelu regresji.

W związku z tym, że dalsze założenia są sprawdzane w oparciu o model, zbudowano model oznaczając go jako *mod-I<sub>x</sub>*. W modelu tym wstępnie uwzględniono wszystkie predyktory oprócz *t3*, ponieważ nie wykazywał on korelacji ze zmienną objaśnianą *x* (rys. 7.10).

W tabeli 7.13 zaprezentowano statystykę modelu *mod-I<sub>x</sub>*.

**Tab. 7.13.** Dopasowanie współczynników ośmioczynnikowego modelu *mod-I<sub>x</sub>* regresji liniowej

	<i>x</i>			
	$\beta$	<i>SE</i>	<i>t</i>	<i>Pr(&gt; t )</i>
<i>Stała</i>	$4,512 \cdot 10^{-5}$	$1,185 \cdot 10^{-4}$	0,381	0,7
<i>t1</i>	$2,525 \cdot 10^{-3}$	$1,902 \cdot 10^{-4}$	13,277	<0,001
<i>t2</i>	$-5,218 \cdot 10^{-4}$	$2,162 \cdot 10^{-4}$	-2,413	0,01
<i>t4</i>	$-2,949 \cdot 10^{-3}$	$7,250 \cdot 10^{-4}$	-4,068	<0,001
<i>t5</i>	$-4,557 \cdot 10^{-4}$	$2,160 \cdot 10^{-4}$	-2,110	0,035
<i>t6</i>	$2,597 \cdot 10^{-3}$	$3,640 \cdot 10^{-4}$	7,133	<0,001
<i>t7</i>	$-2,413 \cdot 10^{-3}$	$4,714 \cdot 10^{-4}$	-5,120	<0,001
<i>t8</i>	$-7,354 \cdot 10^{-4}$	$4,931 \cdot 10^{-4}$	-1,491	0.1363

Adnotacja:  $N=623$ ,  $R^2 = 0,386$ ,  $R^2_{adj}=0,379$   $F(7, 615)= 55,28$ ,  $p <0.001$ ,  $RMSE= 0,002$

Wykazano w niej, że zbudowany model *mod-I<sub>x</sub>* wyjaśnia w 38% zmienność przemieszczeń TCP w osi X. Predyktor *t8* w prezentowanym układzie zmiennych jest statystycznie nieistotny. *RMSE* dla tak opracowanego modelu wyniósł 0,002mm.

Test wariancji inflacji (tab. 7.14), wykazuje, że predyktory *t7* oraz *t6* wykazują współliniowość (współczynnik *vif*>5).

**Tab. 7.14.** Wyniki testu wariancji inflacji (*vif*) dla zmiennych modelu *mod-I<sub>x</sub>*

<i>Predyktor</i>	<i>vif</i>
<i>t1</i>	2,04
<i>t2</i>	1,6
<i>t4</i>	1,16
<i>t5</i>	2,22
<i>t6</i>	<b>7,45</b>
<i>t7</i>	<b>7,25</b>
<i>t8</i>	2,12

W tabeli 7.15 zaprezentowano statystykę modelu  $mod-2_x$  po usunięciu predyktorów.

**Tabela 7.15.** Dopasowanie współczynników trzyczynnikowego modelu  $mod-2_x$  regresji liniowej

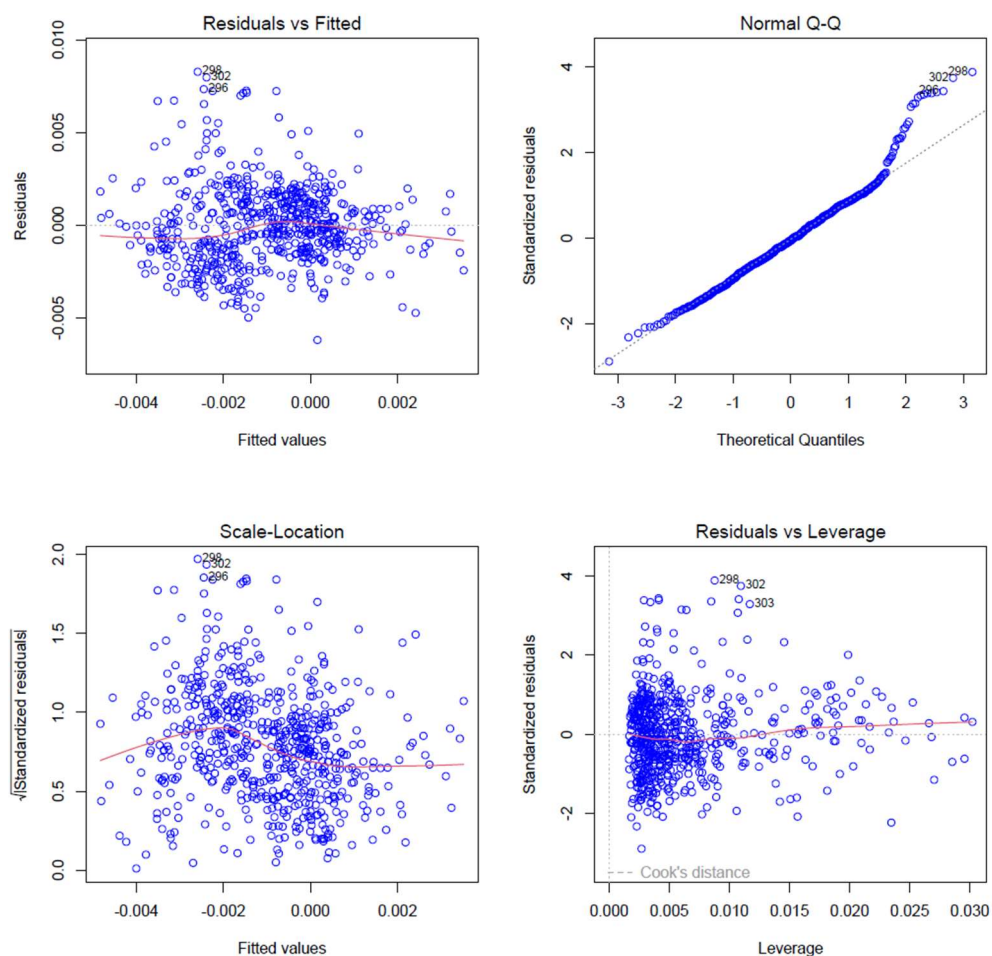
	$x$			
	$\beta$	$SE$	$t$	$Pr(> t )$
<i>Stała</i>	$-8.591 \cdot 10^{-6}$	$1.210 \cdot 10^{-4}$	-0.071	0.94
<i>t1</i>	$2.048 \cdot 10^{-3}$	$1.507 \cdot 10^{-4}$	13.590	<0,001
<i>t4</i>	$-4.343 \cdot 10^{-3}$	$7.084 \cdot 10^{-4}$	-6.131	<0,001
<i>t7</i>	$5.224 \cdot 10^{-4}$	$1.986 \cdot 10^{-4}$	2.630	0.0087

Adnotacja:  $N=623$ ,  $R^2 = 0.34$ ,  $R^2_{adj} = 0.33$ ,  $F(3, 619) = 97.53$ ,  $p < 0.001$ .  $RMSE = 0.0021$

Usuwanie predyktorów odbywało się metodą krokową uwzględniając uwarunkowania konstrukcyjne, istotności statystyczne poszczególnych czynników oraz wskaźniki  $vif$  w dopasowanym modelu  $mod-1_x$ . Ostatecznie tylko czynnik *t1*, *t4* oraz *t7* wykazuje istotność statystyczną ( $Pr(>|t|) < 0,05$ ). Współczynnik determinacji skorygowany wynosi  $R^2_{adj} = 0,33$  i nie zmienia się w znaczący sposób w porównaniu do  $mod-1_x$ .

- **Doprecyzowanie modelu bazowego**

Przeprowadzono analizę wskaźników diagnostycznych modelu  $mod-2_x$  zgodnie z rysunkiem 7.11. Linia dopasowania na wykresie reszty vs dopasowanie (Residuals vs Fitted), nie różni się znacząco od prostej poziomej, co nie wskazuje na zakłócenie liniowości. Z wykresu kwartył-kwartył (Normal Q-Q), wywnioskowano odmiennosc rozkładu reszt od normalnego. Linia odbiega od prostej w prawym krańcu. Z wykresu lokalizacji skali (Scale-Location), wynika, że reszty modelu  $mod-2_x$  nie cechowały się zaburzeniem homoskedastyczności. Na wykresie Reszty vs Wpływ (Residuals vs Leverage) istnieją obserwacje potencjalnie wpływowe, wykraczające poza przedział  $[-3;3]$ .



**Rys. 7.11.** Diagnostyki regresji modelu  $mod-2_x$  ( $N = 632$ )

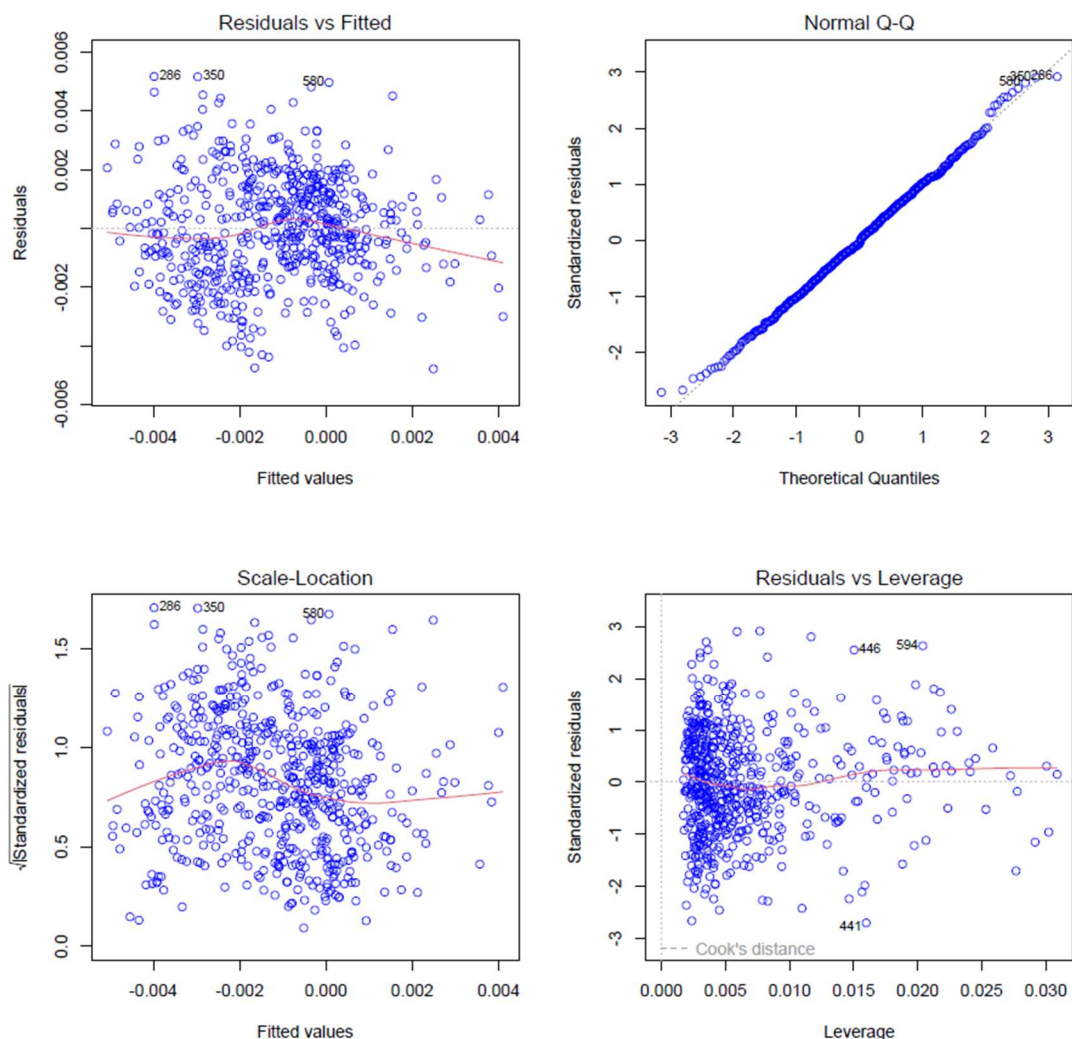
W związku z powyższym przeprowadzono krokowe usuwanie obserwacji potencjalnie zaburzających wskaźniki modelu regresji. Dla każdego kroku generowane były wykresy diagnostyki. Finalnie usunięto 21 obserwacji zgodnie z rekomendacjami wykresów diagnostyki. Listę usuniętych numerów obserwacji podano w tabeli 7.16.

**Tab. 7.16.** Postępy krokowego doprecyzowania modelu względem rozkładów reszt

Krok	Numery wyeliminowanych obserwacji	$N$ po eliminacji
Krok 1	302, 303, 298	620
Krok 2	302, 299, 572	617
Krok 3	299, 300, 296	614
Krok 4	342, 296, 489	611
Krok 5	309, 356, 434	608
Krok 6	288, 287, 309	605
Krok 7	294, 337, 480	602



Po dokonaniu procedury doprecyzowania, finalne wykresy diagnostyki dla modelu przedstawione zostały na rysunku 7.12.



**Rys. 7.12.** Diagnostyki regresji modelu  $mod-2_x$  ( $N = 602$ )

Zgodnie z danymi rysunku odnotowano niewielką poprawę rozkładów reszt dla wszystkich wykresów. Linie dopasowania wykresów Residuals vs. Fitted, Scale-Location, pozostają nadal poziome, położone symetrycznie względem rozkładów reszt. Znacznie zmniejszyła się odległość reszt od linii punktowanej na wykresie Normal Q-Q. Nie odnotowano reszt wykraczających poza przedział  $[-3;3]$  na wykresie Residuals vs. Leverage. Taki model może być uznany za finałowy, gdy spełni założenia regresji liniowej.

Zbiór danych dla finałowego modelu zawiera 602 obserwacji oraz składa się z 4 zmiennych. Miary rozkładu zmiennych na skali przedziałowej, ilorazowej zaprezentowano w tabeli 7.17.

**Tab.7.17.** Statystyki opisowe rozkładu zmiennych na skali przedziałowej ( $N=602$ )

Zmienna	$M$	$SD$	$Mdn$	$Min$	$Max$	Roz.
$t1$	-0.39	0.61	-0.34	-1.75	1.75	3.5
$t4$	0.06	0.12	0.05	-0.35	0.49	0.84
$t7$	0.16	0.47	0.06	-1.49	1.84	3.33
$x$	$-1.155 \cdot 10^{-3}$	$2.43 \cdot 10^{-3}$	$-7.00 \cdot 10^{-4}$	$-6.7 \cdot 10^{-3}$	$6.06 \cdot 10^{-3}$	$1.27 \cdot 10^{-2}$

- **Normalność rozkładu**

Wyniki testu normalności Shapiro-Wilka wraz z wartościami skośności i kurtozy zmiennych modelu ostatecznego przedstawiono w tabeli 7.18.

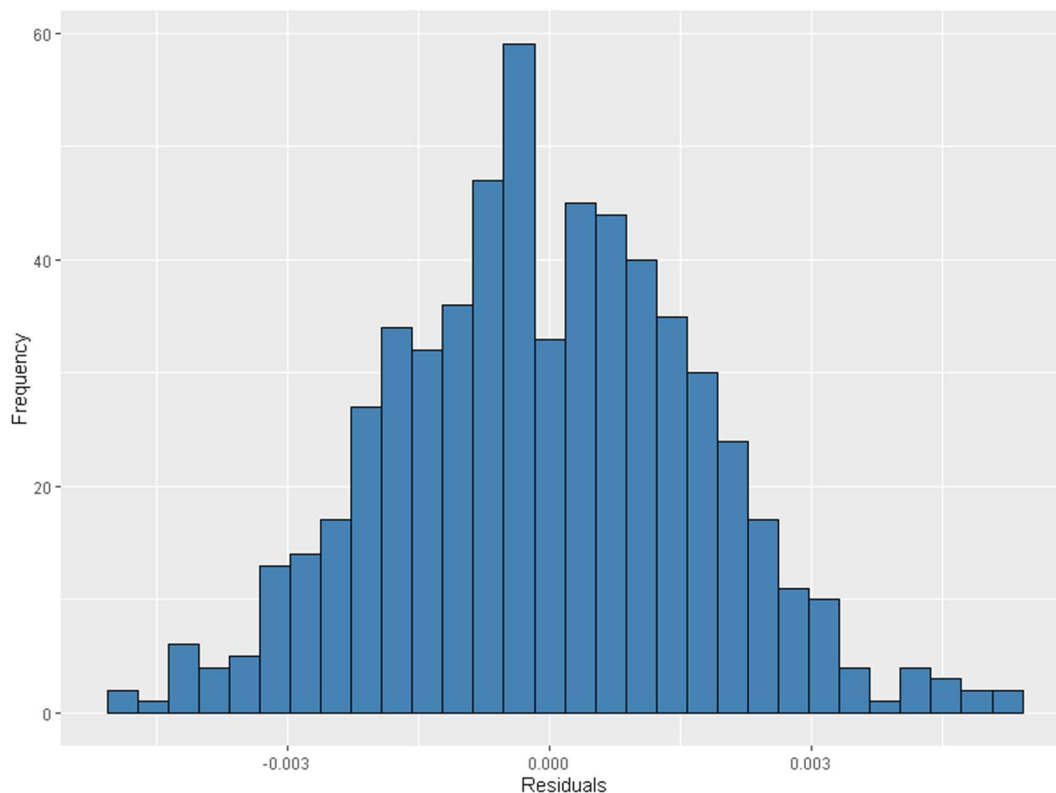
**Tab. 7.18.** Statystyki testu normalności wraz z miarami kształtu i symetrii rozkładów zmiennych modelu finałowego  $x$  ( $N=602$ )

Zmienna	$Sk$	$Kurt.$	$W$	$p$
$t1$	0.22	0.06	0.98	<0,001
$t4$	0.47	2.15	0.95	<0,001
$t7$	0.65	2.37	0.89	<0,001
$x$	0.22	0.06	0.97	<0,001

Dla wszystkich zmiennych test normalności wykazał odmiennność rozkładów od normalnych ( $p < 0.05$ ) w odniesieniu do testu Shapiro-Wilka. Dodatkowymi wskaźnikami, świadczącymi o rozkładzie zmiennych są wyniki skośności i kurtozy. W oparciu o przyjętą konwencję rozkładu zmiennych o bezwzględnej wartości skośności poniżej „2.0”, oraz kurtozie poniżej „7.0” są uważane za rozkłady normalne [24, 28]. Wartości skośności i kurtozy dla zmiennych modelu finałowego nie przekraczały wartości granicznych, w związku z czym uznano rozkłady zmiennych modelu finałowego za normalne.

- **Normalność rozkładu reszt**

Na rysunku 7.13 przedstawiono rozkład reszt opracowanego modelu. W celu uzyskania jednoznacznej odpowiedzi przeprowadzono testy normalności rozkładu których wyniki zostały przedstawione w tabeli 7.19.



**Rys. 7.13.** Rozkład reszt ostatecznego modelu regresji dla  $x$

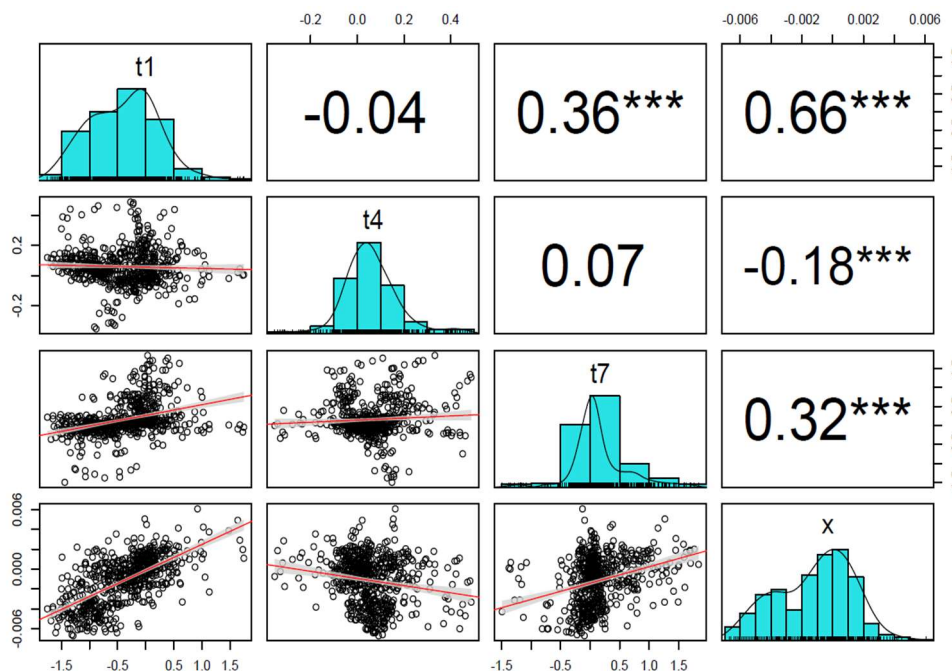
**Tab. 7.19.** Wyniki testów na zgodność rozkładu reszt modelu finalnego  $x$  z rozkładem normalnym

<i>Test</i>	<i>Statystyka</i>	<i>p</i>
Shapiro-Wilk	0.9979	0.6805
Kolmogorov-Smirnov	0.0228	0.9123
Anderson-Darling	0.1644	0.9422

Na ich podstawie stwierdzono, że nie ma podstawy do odrzucenia hipotezy zerowej tych testów o braku rozkładu normalnego dla analizowanych danych.

- **Założenie liniowości zależności**

Macierz korelacji zmiennych modelu finałowego przedstawiono na rysunku 7.14. W oparciu o dane założenie co do liniowości można uznać je za spełnione, ponieważ dane zorganizowane w widoczne liniowe skupiska, położone są wzdłuż linii dopasowania. Nie zaobserwowano równomiernych rozprożeń zmiennych wzdłuż całej powierzchni.



**Rys. 7.14.** Macierz korelacji pomiędzy zmiennymi badanymi dla modelu ostatecznego regresji liniowej zmiennej objaśnianej  $x$  ( $N=602$ )

- **Założenie braku współliniowości**

Wyniki testu wariancji inflacji przedstawiono w tabeli 7.20.

**Tab. 7.20.** Wyniki testu wariancji inflacji (*vif*) dla zmiennych modelu finałowego zmiennej objaśnianej  $x$

Predyktor	<i>vif</i>
<i>t1</i>	1.15
<i>t4</i>	1.01
<i>t7</i>	1.16

Z danych wynika, że dla wszystkich zmiennych wskaźniki *vif* nie przekraczają wartości 5.0. Świadczy to o braku współliniowości pomiędzy zmiennymi.

- **Założenie co do wystarczającej ilości obserwacji per czynnik**

Liczba obserwacji przypadająca na jedną składową modelu (*Obs*), wynosi 150.5. Przekraczało to minimalną wartość 10-20 dla zastosowania modelu regresji.

- **Założenie homoscedastyczności danych modelu**

Przeprowadzony test Goldfelda-Quandta z odrzuceniem około 20% wszystkich obserwacji (fraction =120). Pozwolił na osiągnięcie następujących wyników: GQ(237, 237)=0.54, p=0.999 z H1: „wariancja wzrastała od segmentu 1 do 2”. Ponieważ wartość  $p > 0.05$ , nie ma dowodów, aby stwierdzić, że heteroskedastyczność jest obecna.

- **Wyniki dopasowania modelu finałowego dla x**

Po przeprowadzeniu przekształcenia na etapie usuwania obserwacji zgodnie z rekomendacjami wykresów diagnostycznych zmianie uległy statystyki dopasowania modelu finałowego dla przemieszczeń TCP w osi X.

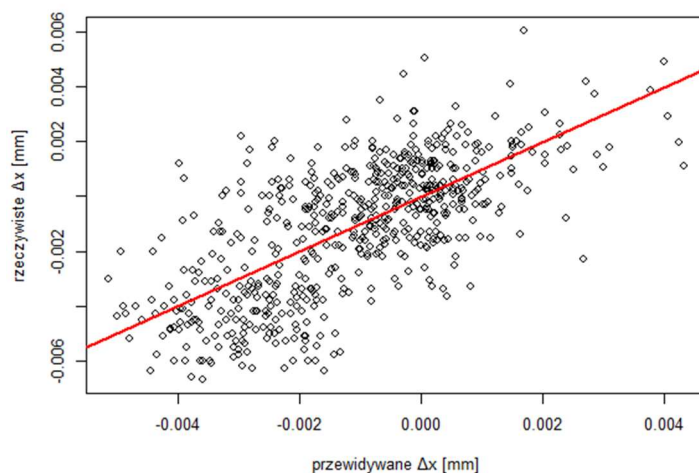
Statystyki dopasowania modelu finałowego zmiennej objaśnianej *x* przedstawiono w tabeli 7.21.

**Tab. 7.21.** *Dopasowanie współczynników trzyczynnikowego modelu finałowego dla x, regresji liniowej*

	<i>x</i>			
	$\beta$	<i>SE</i>	<i>t</i>	<i>Pr(&gt; t )</i>
<i>Stała</i>	$-1 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	-1.04	<b>0,07</b>
t1	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	18.93	<b>&lt;0,001</b>
t4	$-3,2 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-4}$	-5.35	<b>&lt;0,001</b>
t7	$6 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	3.38	<b>&lt;0,001</b>

Adnotacja:  $N=602$   $R^2 = 0.464$ .  $R^2_{adj} = \mathbf{0.46}$ .  $F(3, 598) = 172.6$ .  $p < 0.001$ .  $RMSE = 0,0018$

Z tabeli wynikał, że wszystkie czynniki modelu finałowego są istotne statystycznie ( $p < 0.05$ ) oprócz wyrazu wolnego. Współczynnik determinacji skorygowany wyniósł  $R^2_{adj} = 0,46$ . Oznaczało to że, model finałowy w 46% wyjaśnia zmienność przemieszczeń TCP w osi X. Wykres wartości rzeczywistych w odniesieniu do przewidywanych dla  $N=602$  obserwacji uwzględnionych w modelu ostatecznym przedstawiono na rysunku 7.15.



**Rys. 7.15.** Wartości rzeczywiste w odniesieniu do zaobserwowanych dla modelu finalnego  $x$  ( $N=602$ )

$RMSE$  dla tak opracowanego modelu nie zmniejszył się w stosunku do  $mod-1_x$  oraz  $mod-2_x$  i wynosi 0,0018mm.

W oparciu o dane tabeli 7.21 model przemieszczenia TCP w osi X względem bazy obróbkowej WKS w zależności od zmian temperatury podzespołów oraz płynów eksploatacyjnych można opisać wzorem:

$$\Delta x = -1 \cdot 10^{-4} + 2,4 \cdot 10^{-3} \cdot \delta T_{co} - 2,4 \cdot 10^{-3} \cdot \delta T_{x2} + 6 \cdot 10^{-4} \cdot \delta T_{y1} \quad (7.11)$$

Opracowany model  $\Delta x = f(\delta T_{co}, \delta T_{x2}, \delta T_{y1})$ , uznano za nieuzasadniony do zaimplementowania w systemie sterowania obrabiarki z następujących przyczyn:

- niska wartość współczynnika determinacji  $R^2_{adj} = 0,46$ , świadczy o tym, że model jest słabo dopasowany (tylko w 46% tłumaczy zmienność  $\Delta x$ ),
- na wykresie 7.15 który przedstawia wartości rzeczywiste do dopasowanych, widoczny jest stosunkowo duży rozrzut względem linii dopasowania jak również błędy dopasowania są proporcjonalnie duże w odniesieniu do rzeczywistych zmian  $\Delta x$  na badanej próbie.
- zarejestrowane wartości  $\Delta x$  na badanej próbie w wielu przypadkach zbliżone są do poziomu niepewności metody pomiaru  $\Delta x$  wariantu Wp2 która była wykorzystywana podczas akwizycji danych przemieszczeń w osi X.

W celu poprawy wskaźników jakościowych modelu  $\Delta x = f(\delta T_{co}, \delta T_{x2}, \delta T_{y1})$ , konieczne byłoby przeprowadzenie pomiarów z wykorzystaniem dokładniejszych metod pomiarowych. W związku z powyższymi dalsze analizy prowadzone są tylko i wyłącznie w oparciu o model 7.10.

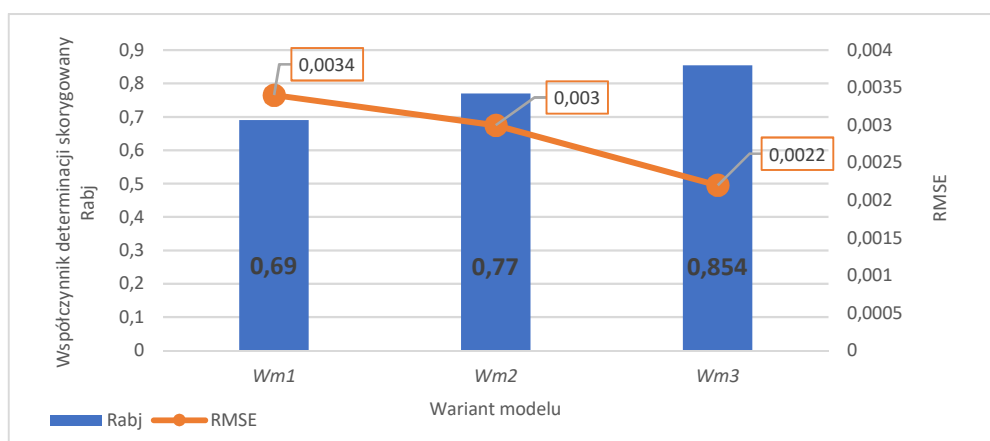
## 7.5. Porównanie modeli zmiennej objaśnianej $y$ w różnych scenariuszach danych objaśniających

W celu oceny wpływu zastosowania uśrednienia wykładniczego, którego zadaniem jest usunięcie zakłóceń oraz oceny wpływu ujęcia w modelach regresji zmian temperatury płynów eksploatacyjnych jako zmiennych objaśniających, przeprowadzono analizy regresji w dwóch dodatkowych wariantach. Analizy przeprowadzono dla zmiennej objaśnianej  $y$ .

W wariantcie pierwszym  $Wm1$ , jako zmienne objaśniające uwzględnione zostały predyktory od  $t3$  do  $t8$ , z wykluczeniem  $t1$  oraz  $t2$ , odpowiadających za zmiany temperatury płynów eksploatacyjnych. Współczynniki uśrednienia wykładniczego dla rejestrowanych temperatur zostały ustawione na poziomie  $\alpha=1$ . Oznacza to, że jako dane wejściowe analizy regresji zastosowane zostaną dane wejściowe bez usunięcia efektu zakłóceń podczas pomiarów temperatury.

W wariantcie drugim  $Wm2$ , jako zmienne objaśniające uwzględnione zostały wszystkie predyktory od  $t1$  do  $t8$ , natomiast współczynniki uśrednienia wykładniczego pozostały nadal na poziomie  $\alpha=1$ .

Analiza regresji dla obu dodatkowych wariantów została przeprowadzona analogicznie jak w przypadku budowy modelu finalnego opisanego wzorem 7.10. Ze względu na obszerność obliczeń, przedstawiono tylko wyniki w postaci wskaźników determinacji  $R_{adj}$  oraz  $RMSE$  dla modeli finalnych wariantu  $Wm1$  oraz  $Wm2$ . Otrzymane wskaźniki zestawiono na rysunku 7.16 z wskaźnikami analizy regresji modelu finalnego  $y$  który oznaczono jako  $Wm3$  (tab. 7.12). Współczynniki  $\alpha$  dla poszczególnych zmiennych temperaturowych wariantu  $Wm3$  dobrane są zgodnie z tabelą 6.6 (podrozdział 6.6).



Rys. 7.16. Porównanie wskaźników dopasowania modeli do danych eksperymentalnych

Porównując poszczególne wskaźniki świadczące o dopasowaniu modelu do danych eksperymentalnych (rys. 7.16), najgorzej wypada wariant *Wm1*, natomiast najlepiej wariant *Wm3*. W związku z czym można wyciągnąć wniosek, że zarówno filtracja danych jak również uwzględnienie zmian temperatury płynów eksploatacyjnych poprawia możliwości predycyjne opracowanego modelu.



## **8. PRAKTYCZNA KOMPENSACJA ZMIAN POŁOŻENIA TCP Z WYKORZYSTANIEM OPRACOWANEGO MODELU MATEMATYCZNEGO NA OBRABIARCE CNC**

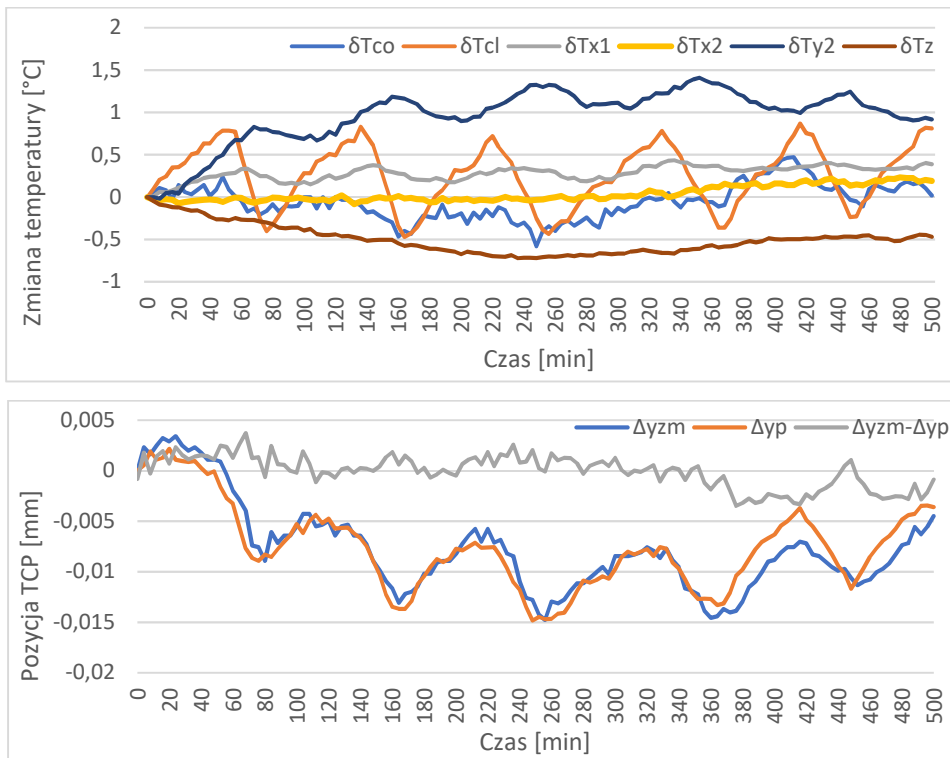
### **8.1. Weryfikacja możliwości predykcyjnych modelu**

Modele matematyczne w swoim założeniu mają jak najdokładniej odzwierciedlać rzeczywistość w oparciu o dane wejściowe. W celu zweryfikowania możliwości predykcyjnych opracowanego modelu 7.10 na nowym zestawie danych wejściowych, przeprowadzono dwa dodatkowe eksperymenty. Polegają one na prowadzeniu obróbki symulowanej na badanej obrabiarce CNC z wykorzystaniem tego samego uchwyty obróbkowego, który służył pozyskaniu danych do opracowania modelu (podrozdział 7.1). Obróbka symulowana polegała na wykonywaniu ruchów oscylacyjnych osiami liniowymi ze zmienną prędkością posuwu. W trakcie symulacji losowo zmieniane były także obroty elektrowrzeciona. Do przestrzeni roboczej tak jak podczas normalnego procesu podawane było chłodziwo obróbkowe. Podczas symulowanej obróbki, cyklicznie w odstępach co 4 minuty realizowany był pomiar aktualnej pozycji TCP względem punktu bazowego na uchwycie. Do pomiarów zmiany położenia wykorzystywano sondę przedmiotową RMP600. Należy zaznaczyć, że symulowane eksperymenty przeprowadzone zostały około trzy miesiące po tym jak zarejestrowane zostały dane które posłużyły do opracowania testowanego modelu. Miało to na celu ocenić, czy pomimo upływu czasu model nadal jest adekwatny.

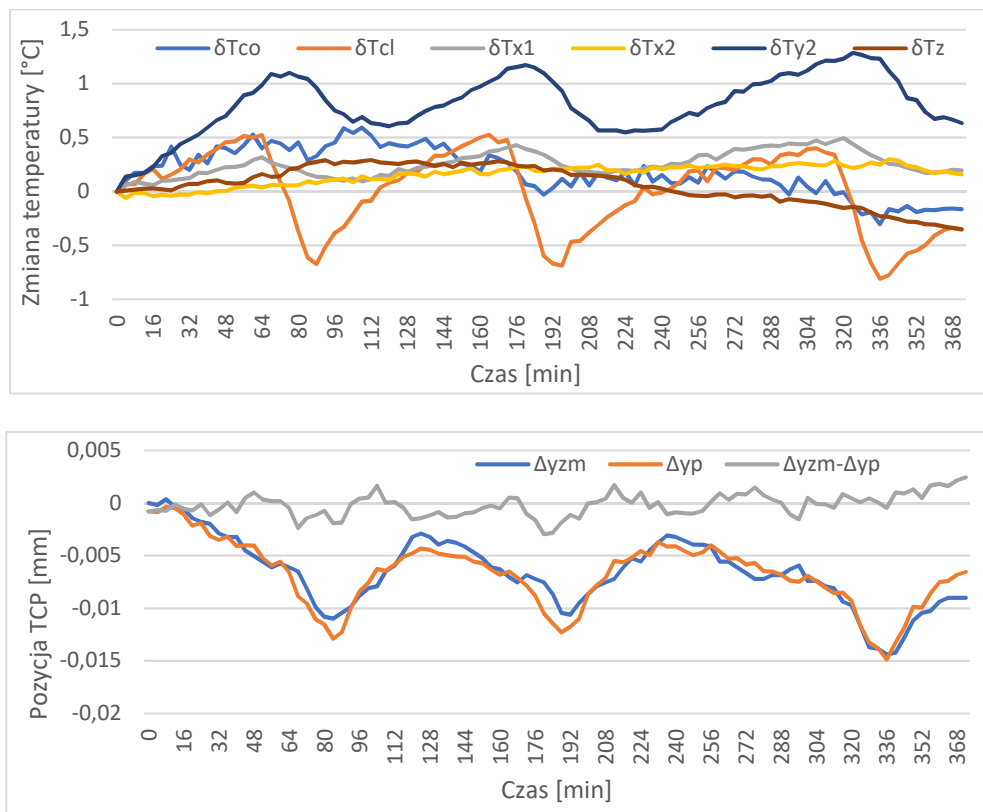
Na rysunku 8.1 oraz 8.2, przedstawiono przebiegi zmian temperatur, wyliczone oraz zmierzone przemieszczenia TCP w osi Y względem punktu bazowego.

Eksperyment pierwszy trwał 496 minut, natomiast eksperyment drugi 372 minuty. Wartości przemieszczeń zarejestrowanych oznaczono jako  $\Delta_{ym}$ . Wartość przemieszczeń wyliczonych na podstawie modelu 7.10, oznaczono jako  $\Delta_{yp}$ . Różnicę pomiędzy wartościami zmierzonymi a przewidzianymi oznaczono jako  $\Delta_{ym} - \Delta_{yp}$ . Jako wskaźnik użyteczności modelu przyjęto współczynnik determinacji  $R^2$  (wzór 7.4), pomiędzy danymi zmierzonymi a przewidzianymi modelem.

W przypadku eksperymentu pierwszego, obliczony współczynnik determinacji wyniósł  $R^2 = 0,87$ . Oznacza to, że zmienność zarejestrowanych błędów położenia TCP względem punktu bazowego obróbki wyjaśniona jest w 87% przez opracowany model.



**Rys. 8.1.** Zmierzone oraz przewidziane położenie TCP -: eksperyment 1



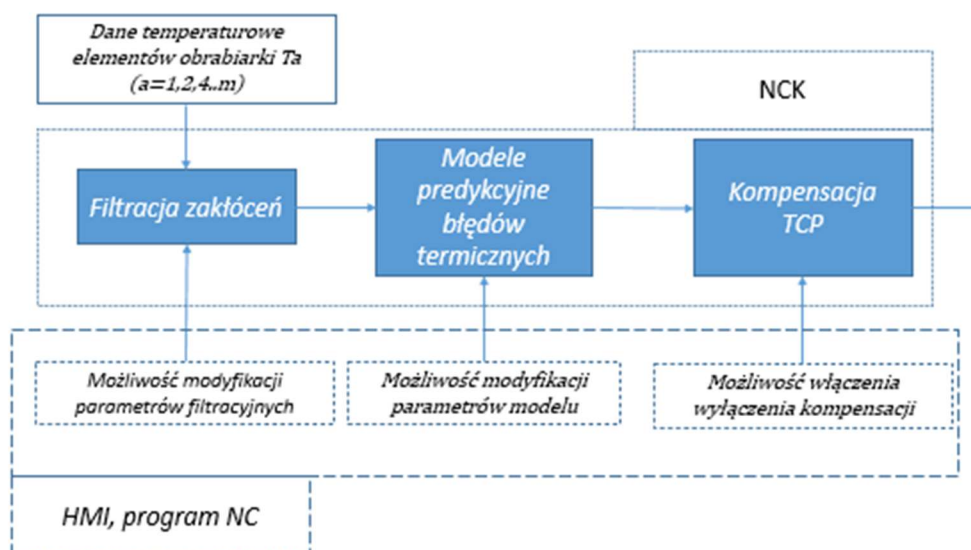
**Rys. 8.2.** Zmierzone oraz przewidziane położenie TCP - eksperyment 2

W przypadku eksperymentu drugiego, obliczony współczynnik determinacji wyniósł  $R^2 = 0,89$ . Oznacza to, że zmienność zarejestrowanych błędów położenia TCP względem punktu bazowego obróbki wyjaśniona jest przez opracowany model w 89%.

W obu przypadkach współczynnik determinacji przekroczył przyjętą minimalną wartość progową na poziomie  $R^2 > 0,85$ . To kolejne potwierdzenie, że zasadnym jest zaimplementowanie modelu 7.10 do systemu sterowania.

## 8.2. Implementacja kompensacji do systemu sterowania obrabiarki

Na rysunku 8.3 przedstawiono zakładaną ideę działania systemu kompensacji w obrębie NCK obrabiarki. Jednym z głównych założeń jest, aby wszystkie parametry algorytmów oraz same algorytmy można było zmodyfikować z poziomu interfejsu HMI sterownika CNC lub poziomu programu obróbczego a samą kompensację włączyć/wyłączyć w dowolnym momencie. Takie rozwiązanie pozwoli na przeniesienie koncepcji proponowanego rozwiązania na inne obrabiarki z systemem sterowania Sinumerik 840D bez konieczności ingerencji w PLC obrabiarki.



**Rys. 8.3.** Schemat ideowy implementacji kompensacji w obrębie NCK obrabiarki

Uzyskane wyniki badań wstępnych wykazały, że pomiary temperatur obarczone są zakłóceniami wynikającymi z czynników środowiskowych. Aby usunąć zakłócenia ze zmiennych temperaturowych, zdecydowano o zastosowaniu uśrednienia wykładniczego realizowanego wzorem 6.2. Sam zapis matematyczny jest nieskomplikowany natomiast

konieczne jest, aby każda ze zmiennych temperaturowych posiadała rejestr pamięci dla  $y(n-1)$ ; poprzedniej próbki wyjściowej systemu uśredniającego. Taki zabieg w oprogramowaniu Excel, R czy Matlab jest prosty do zrealizowania, ponieważ te programy posiadają gotowe algorytmy. Mając na uwadze ograniczenia w formie braku możliwości ingerencji w PLC obrabiarki oraz konieczności realizacji wygładzania w czasie rzeczywistym, opcją dostępną jest wysłanie wygładzonych w rejestratorze danych temperaturowych lub wygładzenia danych w obrębie modułu NCK sterowania CNC. Producent systemu monitorowania temperatury zainstalowanego na badanej obrabiarkie nie przewidział możliwości wygładzania przebiegów. Rozwiązaniem w takiej sytuacji jest zaadoptowanie algorytmu wygładzania w NCK sterownika CNC. Uznano, że realizację takiego algorytmu można wykonać z wykorzystaniem akcji synchronicznych układu sterowania Sinumerik. Do realizacji zadania wygładzania wykorzystano szereg akcji synchronicznych typu IDS, działających modalnie we wszystkich trybach pracy, nawet po zakończeniu programu. Ze względu na to, że w akcjach synchronicznych nie wolno używać tradycyjnych zmiennych GUD zdefiniowanych przez użytkownika, konieczne było wykorzystanie zmiennych GUD dla akcji synchronicznych o nazwie - SYG\_RU[*i*]. Liczbę specjalnych zmiennych GUD dla akcji synchronicznych określają dane maszynowe MD18660, ..., MD18665 [136]. Próbkowanie wartości temperatury z poszczególnych czujników odbywało się co 60 sekund. Implementacja numeryczna wygładzenia za pomocą akcji synchronicznych wraz z objaśnieniami wygląda następująco:

```

.....
; $A_DBR[28] - Tco, SYG_RU[3] - a Tco, SYG_RU[0] - Tco(n-1), SYG_RU[2] - Tcof
SYG_RU[3]=0.4
SYG_RU[2]=$A_DBR[28]
SYG_RU[0]=$A_DBR[28]
; $A_DBR[32] - Tcl, SYG_RU[7] - a Tcl, SYG_RU[4] - temp. Tcl(n-1), SYG_RU[6] - Tclf
SYG_RU[7]=0.35
SYG_RU[6]=$A_DBR[32]
SYG_RU[4]=$A_DBR[32]
; $A_DBR[36] - Tx1, SYG_RU[11] - aTx1, SYG_RU[8] - Tx1(n-1), SYG_RU[10] - Tx1f
SYG_RU[11]=0.15
SYG_RU[10]=$A_DBR[36]
SYG_RU[8]=$A_DBR[36]
; $A_DBR[40] - Tx2, SYG_RU[15] - aTx2, SYG_RU[12] - Tx2 (n-1), SYG_RU[14] - Tx2f
SYG_RU[15]=0.15
SYG_RU[14]=$A_DBR[40]
SYG_RU[12]=$A_DBR[40]
; $A_DBR[44] - Tenv, SYG_RU[19] - aTenv, SYG_RU[16] - Tenv(n-1), SYG_RU[18] - Tenvf
SYG_RU[19]=0.2

```

```

SYG_RU[18]=$A_DBR[44]
SYG_RU[16]=$A_DBR[44]
;$A_DBR[48] - Ty1, SYG_RU[23] -  $\alpha$ Ty1, SYG_RU[20] - Ty1 (n-1), SYG_RU[22] - Ty1 f
SYG_RU[23]=0.3
SYG_RU[22]=$A_DBR[48]
SYG_RU[20]=$A_DBR[48]
;$A_DBR[52] - Ty2, SYG_RU[27] -  $\alpha$ Ty2, SYG_RU[24] - Ty2(n-1), SYG_RU[26] - Ty2f
SYG_RU[27]=0.2
SYG_RU[26]=$A_DBR[52]
SYG_RU[24]=$A_DBR[52]
;$A_DBR[56] - Tz, SYG_RU[31] -  $\alpha$ Tz, SYG_RU[28] - Tz(n-1), SYG_RU[30] - Tzf
SYG_RU[31]=0.1
SYG_RU[30]=$A_DBR[56]
SYG_RU[28]=$A_DBR[56]
STOPRE
IDS=100 EVERY $$A_SECOND==57 DO SYG_RU[2]=SYG_RU[3]*$A_DBR[28]+(1-
SYG_RU[3])*SYG_RU[0] SYG_RU[0]=SYG_RU[2]
IDS=101 EVERY $$A_SECOND==57 DO SYG_RU[6]=SYG_RU[7]*$A_DBR[32]+(1-
SYG_RU[7])*SYG_RU[4] SYG_RU[4]=SYG_RU[6]
IDS=102 EVERY $$A_SECOND==57 DO SYG_RU[10]=SYG_RU[11]*$A_DBR[36]+(1-
SYG_RU[11])*SYG_RU[8] SYG_RU[8]=SYG_RU[10]
IDS=103 EVERY $$A_SECOND==57 DO SYG_RU[14]=SYG_RU[15]*$A_DBR[40]+(1-
SYG_RU[15])*SYG_RU[12] SYG_RU[12]=SYG_RU[14]
IDS=104 EVERY $$A_SECOND==57 DO SYG_RU[18]=SYG_RU[19]*$A_DBR[44]+(1-
SYG_RU[19])*SYG_RU[16] SYG_RU[16]=SYG_RU[18]
IDS=105 EVERY $$A_SECOND==57 DO SYG_RU[22]=SYG_RU[23]*$A_DBR[48]+(1-
SYG_RU[23])*SYG_RU[20] SYG_RU[20]=SYG_RU[22]
IDS=106 EVERY $$A_SECOND==57 DO SYG_RU[26]=SYG_RU[27]*$A_DBR[52]+(1-
SYG_RU[27])*SYG_RU[24] SYG_RU[24]=SYG_RU[26]
IDS=107 EVERY $$A_SECOND==57 DO SYG_RU[30]=SYG_RU[31]*$A_DBR[56]+(1-
SYG_RU[31])*SYG_RU[28] SYG_RU[28]=SYG_RU[30]
.....

```

Do realizacji obliczeń w czasie rzeczywistym z wykorzystaniem modeli predykcyjnych, podobnie jak w poprzednim przypadku, wykorzystano akcję synchroniczne typu IDS oraz zmienne typu SYG\_RU[<i>]. Danymi temperaturowymi przetwarzanymi w bloku kompensacji są dane wygładzone w bloku filtracji. Ze względu na to, że wyliczone przemieszczenie na podstawie zmian temperatur będzie miało na rzeczywistej obrabiarce realny wpływ na zmianę położenia TCP względem części obrabianej, zdecydowano się na wprowadzenie zabezpieczenia polegającego na ograniczeniu korekcji położenia TCP w zakresie +/- 0,03mm. Zabezpieczenia zrealizowano z wykorzystaniem funkcji FCTDEF oraz odpowiednimi parametrami limitu <LLIMIT>, <ULIMIT>[136]. Implementacja numeryczna modelu matematycznego predykcyjnego opisanego wzorem 7.8, wraz z opisami wygląda następująco:

.....

```
SYG_RU[41]=SYG_RU[2] ;Tco 10
```

```

SYG_RU[50]=-0.00292;  $\beta_{\delta T_{co}}$ 
SYG_RU[42]=SYG_RU[6] ;  $T_{cl_{i0}}$ 
SYG_RU[51]=0.003239;  $\beta_{\delta T_{cl}}$ 
SYG_RU[43]=SYG_RU[10] ;  $T_{x1_{i0}}$ 
SYG_RU[52]=0.009784;  $\beta_{\delta T_{x1}}$ 
SYG_RU[44]=SYG_RU[14] ;  $T_{x2_{i0}}$ 
SYG_RU[53]=0.002756;  $\beta_{\delta T_{x2}}$ 
SYG_RU[45]=SYG_RU[18] ;  $T_{env_{i0}}$ 
SYG_RU[54]=0;  $\beta_{\delta T_{env}}$ 
SYG_RU[46]=SYG_RU[22] ;  $T_{y1_{i0}}$ 
SYG_RU[55]=0;  $\beta_{\delta T_{y1}}$ 
SYG_RU[47]=SYG_RU[26] ;  $T_{y2_{i0}}$ 
SYG_RU[56]=-0.01256;  $\beta_{\delta T_{y2}}$ 
SYG_RU[48]=SYG_RU[30] ;  $T_{z_{i0}}$ 
SYG_RU[57]=-0.00179;  $\beta_{\delta T_{z}}$ 
SYG_RU[58]=-0.00083
FCTDEF(1,-0.03,0.03,0,1)
STOPRE
IDS=108 DO SYG_RU[40]=SYG_RU[58]+(SYG_RU[2]-SYG_RU[41])*SYG_RU[50]+(SYG_RU[6]-
SYG_RU[42])*SYG_RU[51]+(SYG_RU[10]-SYG_RU[43])*SYG_RU[52]+(SYG_RU[14]-
SYG_RU[44])*SYG_RU[53]+(SYG_RU[18]-SYG_RU[45])*SYG_RU[54]+(SYG_RU[22]-
SYG_RU[46])*SYG_RU[55]+(SYG_RU[26]-SYG_RU[47])*SYG_RU[56]+(SYG_RU[30]-
SYG_RU[48])*SYG_RU[57]
IDS=109 DO SYNFACT(1,SYG_RU[49],SYG_RU[40])

```

.....

Opracowany model opisany wzorem 7.10 odnosi się do przemieszczeń TCP względem punktu charakterystycznego uchwytu obróbkowego w którym z założenia zawieszony jest układ WKS. W przypadku analizowanej obrabiarki ustalona jest zasada programowania, że układ WKS (G54, G55, ...) powiązany jest z układem MKS translacją o wektor (TRANS), z wykluczeniem rotacji (ROT). Wyżej wymienione założenia pozwalają wprowadzić dane kompensacyjne w dwóch blokach funkcyjnych NCK, tj. w bloku interpretera oraz w bloku interpolatora zgrubnego. Analiza literatury w tym zakresie (podrozdział 3.3), wskazuje, że bardziej korzystne jest, aby wprowadzać kompensację w obrębie interpolatora zgrubnego. Nie wymaga to modyfikacji kodu sterującego obróbką a wyliczone kompensaty są natychmiastowo uwzględniane podczas przemieszczania osi roboczych. Implementacja numeryczna wprowadzenia kompensacji za pomocą akcji synchronicznej w obrębie interpolatora zgrubnego wygląda następująco:

.....

```
IDS=110 DO $$$A_TEMP_COMP_ABS_VALUE[Y] = - SYG_RU[49]
```

.....

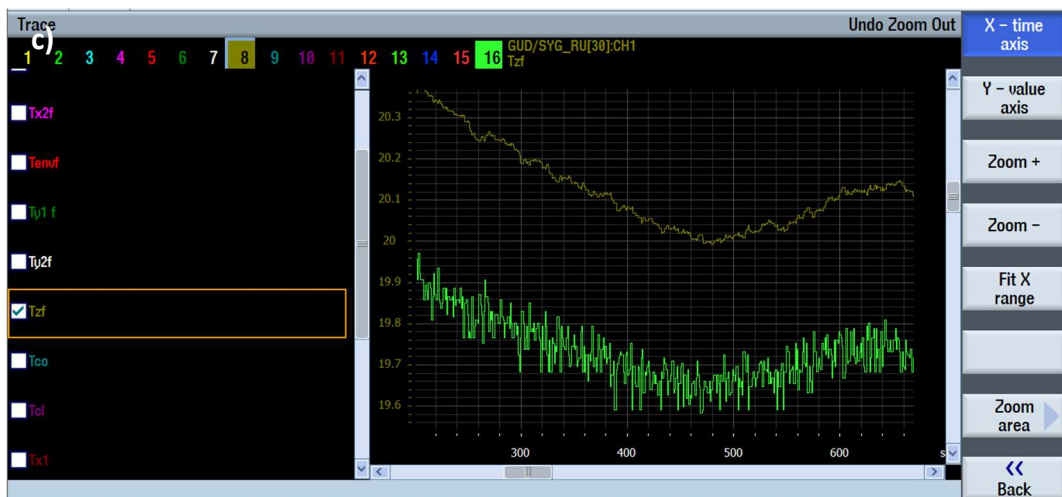
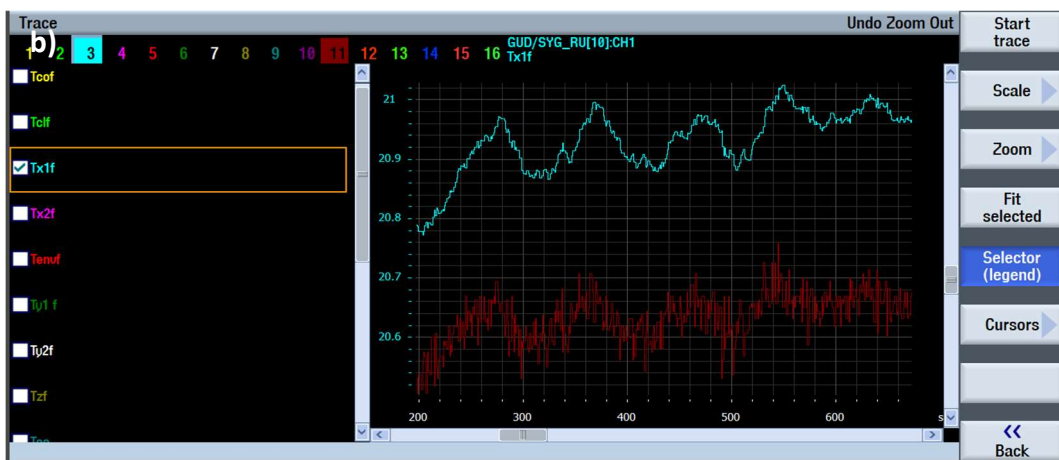
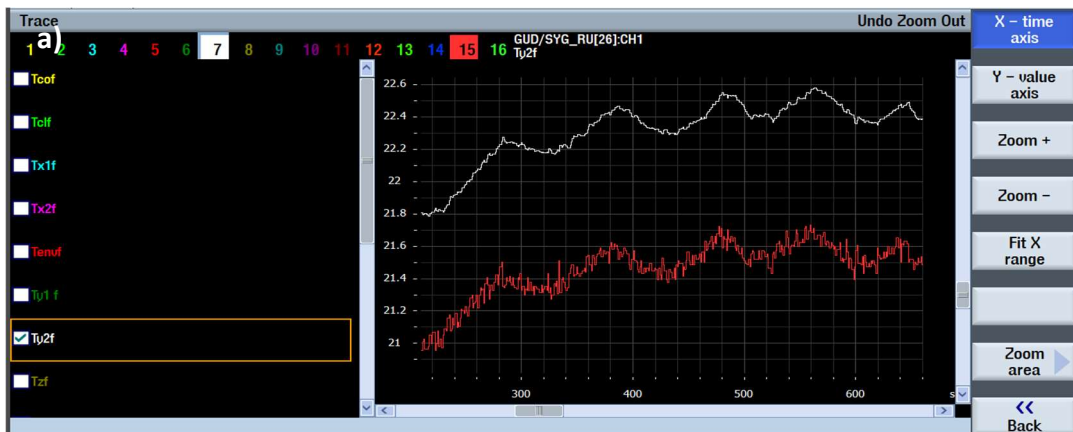
Podczas tworzenia kolejnych algorytmów z wykorzystaniem akcji synchronicznych typu IDS, zachowywano odpowiednią chronologię pomiędzy poszczególnymi blokami

funkcyjnymi jak również wewnątrz nich. Wynika to z faktu, że realizowane są one w jednym taktie zegara IPO z zachowaniem chronologii od IDS z mniejszym indeksem do IDS z indeksem większym oraz kolejnością działań wewnątrz pojedynczej akcji IDS.

### **8.3. Weryfikacja rozwiązania programowego z wykorzystaniem symulatora sterownika obrabiarki**

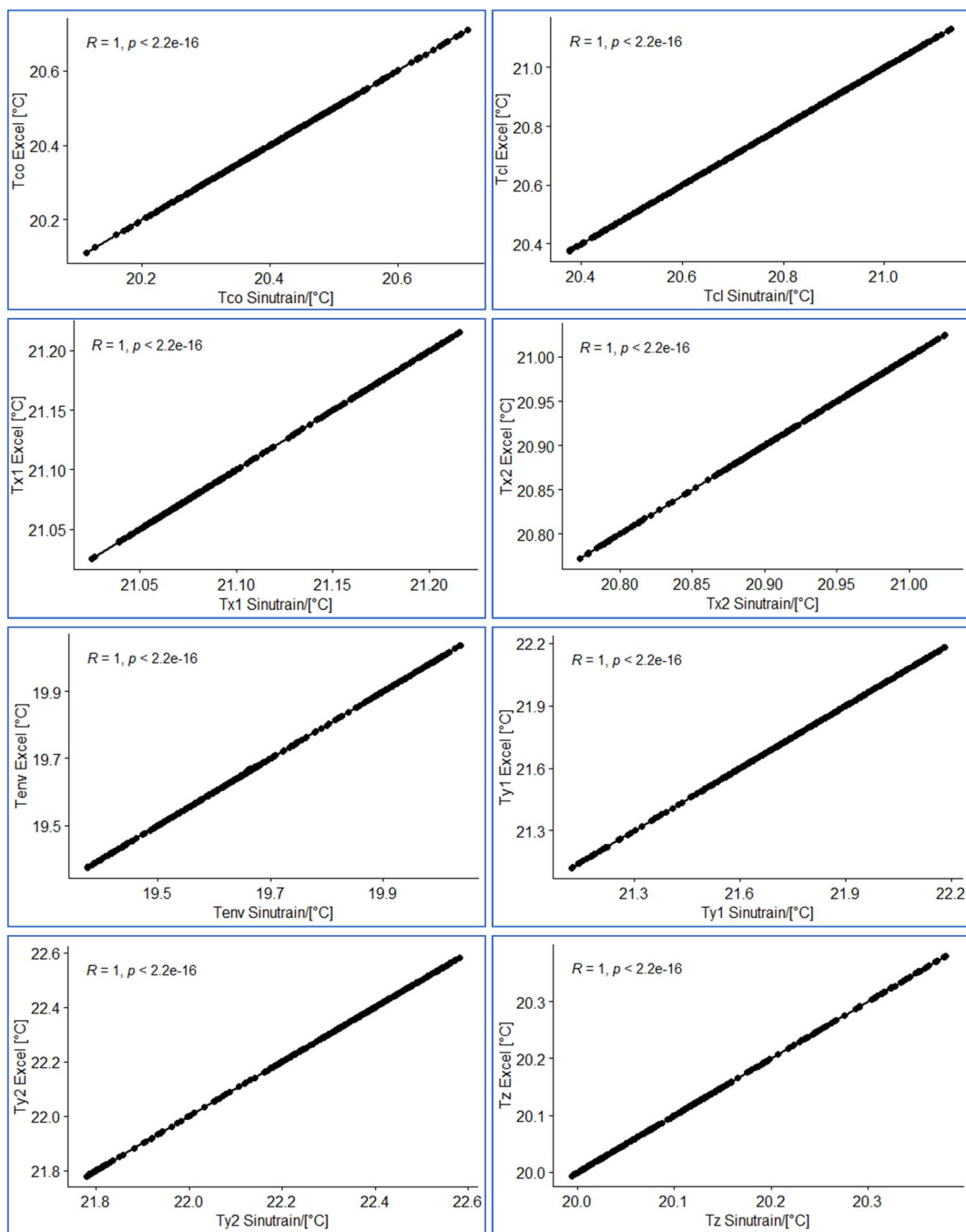
Przygotowanie oraz testowanie szeregu akcji synchronicznych spełniających zakładane wymagania na rzeczywistej obrabiarce powodowałoby zakłócenia w produkcji seryjnej a ewentualne błędy programu mogłyby doprowadzić do uszkodzeń obrabiarki. Aby wstępnie uniknąć tego typu ryzyka, do przygotowania oraz przetestowania programu wykorzystującego akcje synchroniczne użyto symulatora Sinutrain [132]. W celu odwzorowania rzeczywistego środowiska implementacji akcji synchronicznych wykonano kopię zapasową sterownika CNC obrabiarki będącej obiektem badań. Następnie, na podstawie kopii stworzono wirtualnego bliźniaka sterownika CNC. Do tak przygotowanego środowiska zaimplementowano szereg akcji synchronicznych przedstawionych w podrozdziale 8.1 odpowiedzialnych za realizację uśrednienia wykładniczego zmian temperatury oraz kalkulacji przemieszczeń TCP względem punktu bazowego w osi Y.

Na rysunku 8.4 przedstawiono wizualizację zmian temperatury z wykorzystaniem narzędzia Trace Sinumerik. Na rysunku widoczne są przebiegi zmian temperatury oryginalne oraz z usuniętymi zakłóceniami z wykorzystaniem algorytmu uśrednienia wykładniczego. W celu weryfikacji poprawności działania algorytmu w systemie sterowania CNC przeprowadzono analizę korelacji. Ten sam zestaw danych temperaturowych surowych (zazumionych, odczytywanych bezpośrednio z danych NC), poddano wygładzeniu wykładniczemu w arkuszu kalkulacyjnym Excel i skorelowano z danymi uzyskanymi za pomocą uśrednienia wykładniczego realizowanego z wykorzystaniem akcji synchronicznych. Wyniki w postaci diagramów korelacji wraz ze współczynnikiem korelacji  $R$  zaprezentowano na rysunku 8.5. Na podstawie uzyskanych wyników z 444 obserwacji próbkowanych co 60 sekund nie stwierdzono błędów w działaniu algorytmu akcji synchronicznych. Współczynnik korelacji dla każdej zmiennej temperaturowej korelowanej wyniósł  $R=1$ , co oznacza korelację całkowitą.



*Rys. 8.4. Widok okien graficznej wizualizacji danych (Trace Sinumerik), z przebiegami czasowymi zmian temperatury dla wybranych czujników temperatury: a) czujnik temperatury słupa osi Y, b) czujnik temperatury podstawy, po której porusza się słup osi Y, d) czujnik temperatury podstawy obrabiarki*





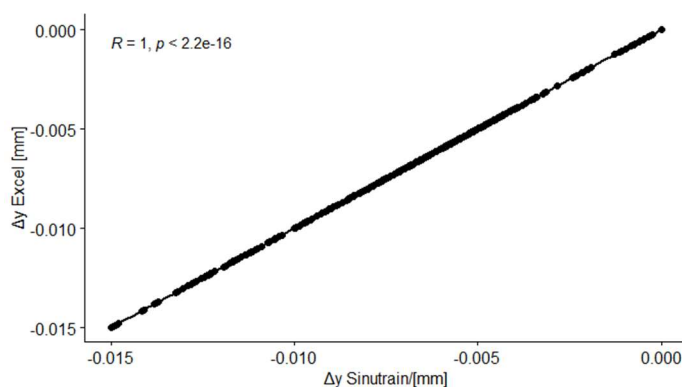
**Rys. 8.5.** Diagramy korelacji pomiędzy danymi uśrednionymi wykładniczo w akcjach synchronicznych a danymi uśrednionymi w arkuszu kalkulacyjnym

Podobnie jak w przypadku uśrednienia wykładniczego, test programu akcji synchronicznych realizującego równanie opracowanego modelu 7.10 przeprowadzony został na symulatorze Sinutrain. Na rysunku 8.6 przedstawiono wynik symulacji działania modelu 7.10.



**Rys. 8.6.** Widok okna graficznej wizualizacji danych (Trace Sinumerik), przewidzianych przemieszczeń TCP w osi Y

W celu oceny poprawności działania algorytmu przeprowadzono analizę korelacji pomiędzy przemieszczeniami wyliczonymi w akcjach synchronicznych a przemieszczeniami wyliczonymi za pomocą arkusza kalkulacyjnego Excel. Wyniki zaprezentowano na rysunku 8.7.



**Rys. 8.7.** Diagramy korelacji pomiędzy błędami położenia TCP w osi Y wyliczonymi w akcjach synchronicznych a danymi wyliczonymi za pomocą arkusza kalkulacyjnego

Na podstawie uzyskanych wyników z 373 obserwacji próbkowanych co 60 sekund nie stwierdzono błędów w działaniu algorytmu akcji synchronicznych. Współczynnik korelacji dla zmiennych korelowanych wyniósł  $R=1$ , co oznacza korelację całkowitą.

Tak więc, przygotowane rozwiązanie w kolejnym kroku zostanie przetestowane bezpośrednio na obrabiarce.

## 8.4. Praktyczna weryfikacja proponowanego rozwiązania

Praktyczna weryfikacja bazuje na implementacji modelu do systemu sterowania CNC przedstawionej w podrozdziale 8.2.

Aby ocenić efektywność opracowanego rozwiązania, zaplanowano dwa eksperymenty polegające na przeprowadzeniu obróbki płyty z regularnie rozmieszczonymi otworami na płaszczyźnie zgodnej z płaszczyzną XY układu obróbkowego WKS. Półfabrykatem do obróbki jest płyta o wymiarach 720mm x 390mm x 65mm, materiał AU2GN. Obrabiany przedmiot zamocowany został w uchwycie obróbkowym, który wykorzystywany był do akwizycji danych potrzebnych do opracowania modelu. Widok płyty wraz z uchwytem w przestrzeni obrabiarki zaprezentowano na rysunku 8.8a. Schemat rozmieszczenia otworów zawiera załącznik nr 1.



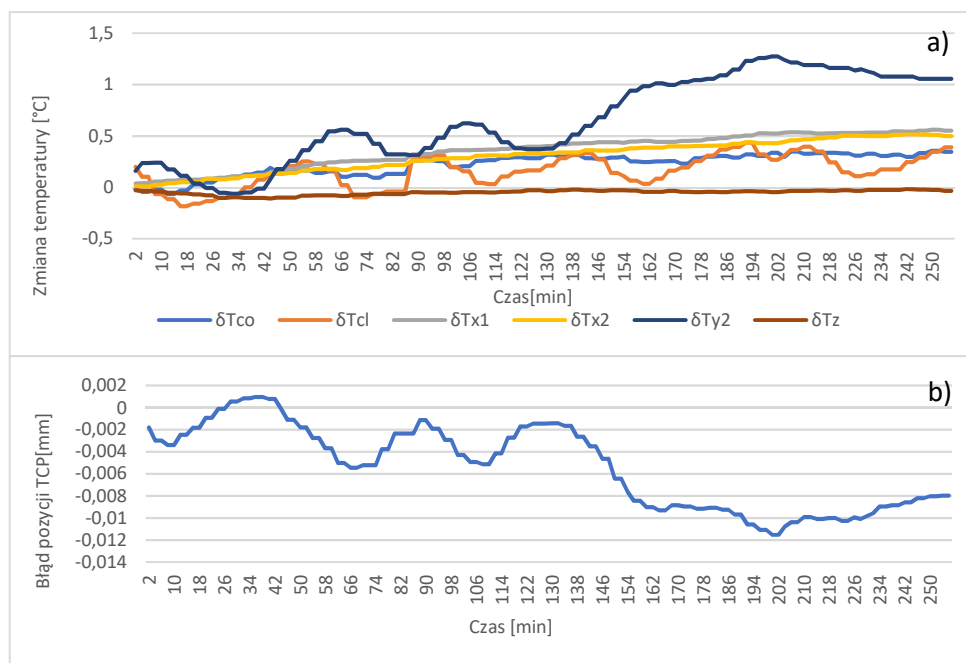
**Rys. 8.8.** Widok przedmiotu testowego: a) w przestrzeni roboczej obrabiarki b) podczas weryfikacji wymiarów na maszynie współrzędnościowej Altera-M20.12.10

W realizacji eksperymentów założono następujące warunki ich przebiegu:

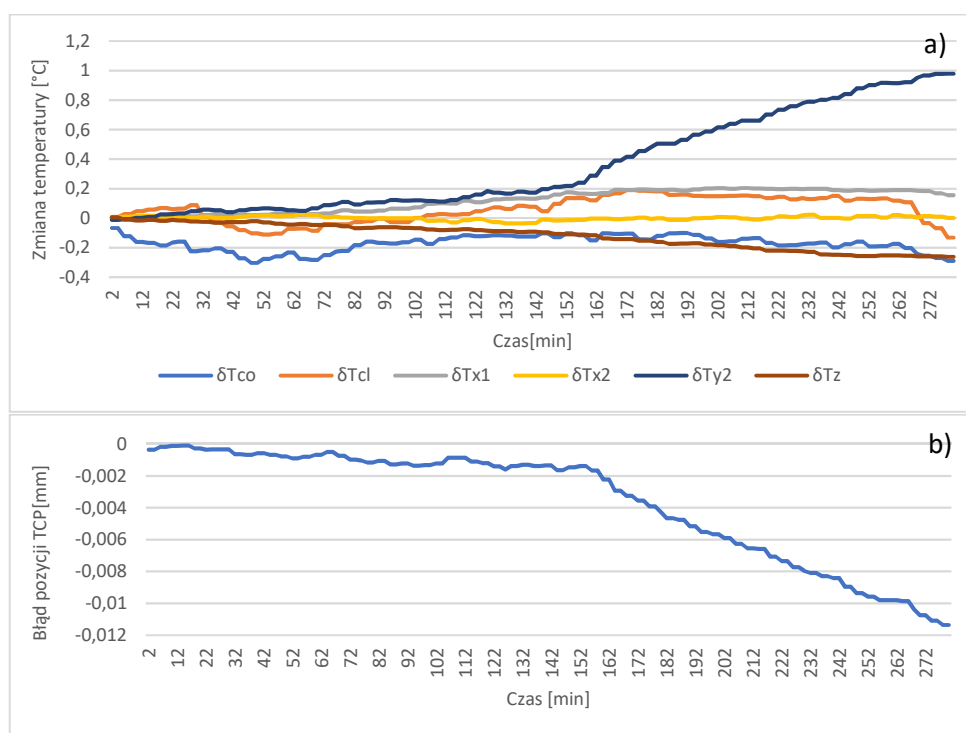
- Podczas procesu obróbki cały czas jest podawane chłodziwo obróbkowe zarówno na ściany obrabiarki jak również na przedmiot obrabiany, jak to ma miejsce w trakcie realizacji wszystkich procesów na badanej obrabiarce.
- Proces obróbki podzielono na dwa etapy: obróbki zgrubnej oraz wykończeniowej. Obróbka zgrubna polega na splanowaniu powierzchni czołowej płyty, wykonaniu otworów wstępnych i wykonaniu faz technologicznych na krawędziach otworów. Obróbka wykończeniowa obejmuje powtórne bazowanie w otworze bazującym, wytoczenie otworu bazowego w części, następnie obróbkę pozostałych otworów.
- Wytaczanie wykończeniowe otworów realizowane jest naprzemiennie z włączoną oraz wyzerowaną kompensacją tak, aby było możliwe porównanie wyników dla par otworów w tych samych warunkach.
- Wytaczanie wykończeniowe obejmuje dwa warianty kolejności wytaczania. Wariant pierwszy od pary nr 1 do pary nr 142. Wariant drugi od pary nr 142 do pary nr 1 (rys. zał. 1).
- W trakcie realizacji procesów testowych w momencie wykonywania otworów kompensowanych rejestrowane są wartości zmian temperatury oraz wyliczony błąd dla osi Y.
- Pomiar gotowej części realizowany jest na maszynie współrzędnościowej Altera-M20.12.10 (rys. 8.8 b).

Na rysunkach 8.9 oraz 8.10 przedstawiono przebiegi zmian temperatur oraz błąd położenia TCP w osi Y względem punktu bazowego obróbki. Jest on wyliczany w akcjach synchronicznych w trakcie realizacji eksperymentów. Rysunki odnoszą się do czasu realizacji obróbki wykończeniowej eksperymentów. Jak wynika z zarejestrowanych danych dla pierwszego eksperymentu (rys. 8.9a), największe zmiany temperatury widoczne są dla czujnika słupa osi Y ( $\delta T_{y2}$ ). Różnica pomiędzy najwyższą a najniższą zarejestrowaną wartością wynosi  $1.3^{\circ}\text{C}$ . Temperatura podstawy ( $\delta T_z$ ), właściwie nie uległa zmianie. Temperatura podstawy, po której porusza się oś Y ( $\delta T_{x1}$ ,  $\delta T_{x2}$ ), w trakcie eksperymentu wzrosła w przybliżeniu o  $0,5^{\circ}\text{C}$ . Na rysunku 8.9b, przedstawiono wyliczony błąd położenia TCP względem bazy obróbkowej. Jak wynika z rysunku, rozstęp dla wyliczonego błędu wynosi  $0,0125\text{mm}$ . Przebiegi zmian temperatury słupa osi Y ( $\delta T_{y2}$ ), oraz temperatury chłodziwa ( $\delta T_{cl}$ ), charakteryzują się

przebiegami zbliżonymi do sinusoidalnych. Zdeterminowane są działaniem układu stabilizacji temperaturowej a dokładnie cykliczną pracą chłodziarki.



**Rys. 8.9.** Eksperyment pierwszy, przebieg zmian: a) temperatury elementów wpływających na błąd położenia TCP, b) obliczony błąd TCP w osi Y

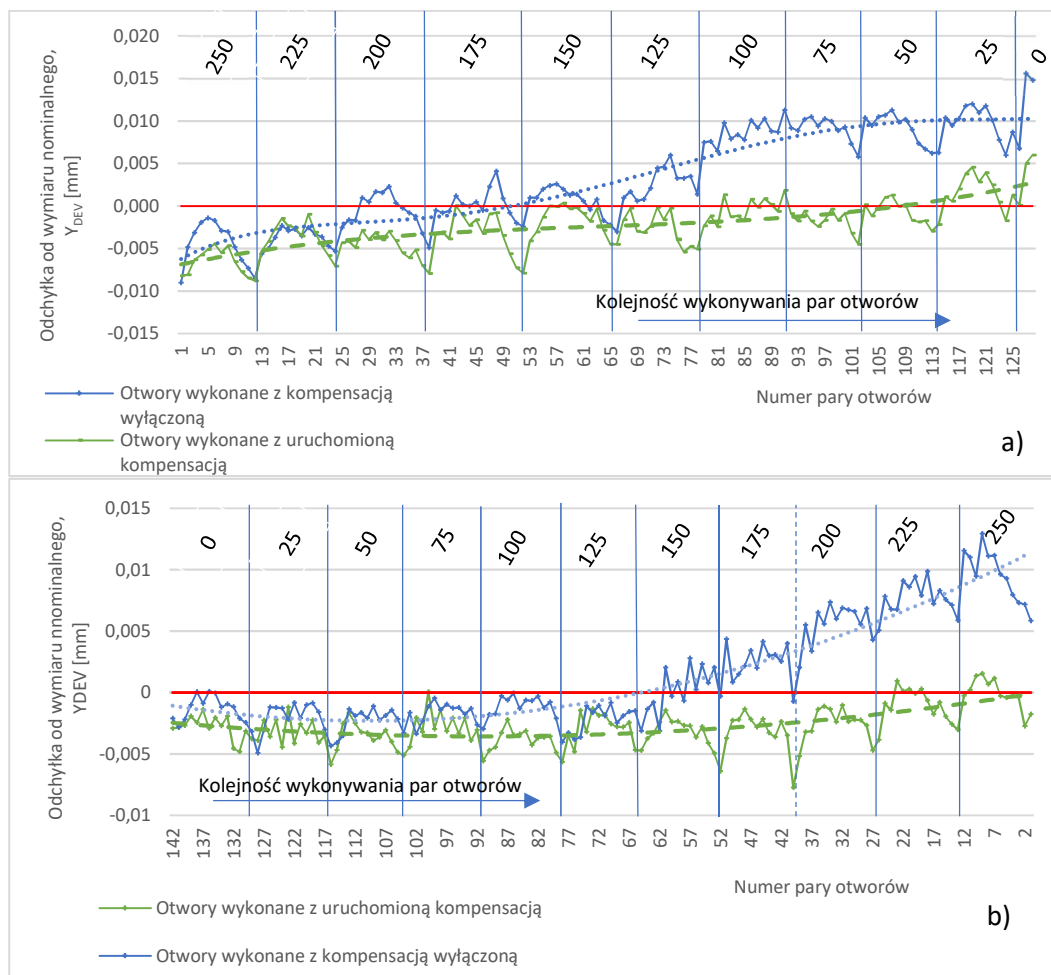


**Rys. 8.10.** Eksperyment drugi, przebieg zmian: a) temperatury elementów wpływających na błąd położenia TCP, b) obliczony błąd TCP w osi Y

Analizując drugi eksperyment (rys. 8.10a), największe zmiany temperatury, widoczne są dla czujnika słupa osi Y ( $\delta T_{y2}$ ). Różnica pomiędzy najwyższą a najniższą

zarejestrowaną wartością wynosi w przybliżeniu  $1^{\circ}\text{C}$ . Dla pozostałych czujników różnica temperatur w trakcie trwania eksperymentu nie przekracza  $0,6^{\circ}\text{C}$ . Jak wynika z rysunku rozstęp dla wyliczonego błędu wynosi  $0,0113\text{mm}$ . W eksperymencie drugim nie zaobserwowano charakterystycznych sinusoidalnych przebiegów zmian temperatury.

Potwierdzeniem funkcjonowania opracowanej kompensacji temperatury jest pomiar położenia wykonanych otworów. Jako charakterystykę kontrolną przyjęto odchyłkę położenia otworu od wymiaru nominalnego w kierunku Y (zał. 1). Oznaczono ją jako  $Y_{DEV}$ . Wyniki pomiarów charakterystyki  $Y_{DEV}$ , części testowych zmierzonych na maszynie współrzędnościowej, przedstawiono na rysunku 8.11.



**Rys. 8.11.** Wyniki pomiarów części testowej w postaci odchyłki od wymiaru nominalnego  $Y_{DEV}$ , w kierunku Y: a) wyniki uzyskane w eksperymencie pierwszy, b) wyniki uzyskane w eksperymencie drugim

Wyniki pomiarów przedstawione zostały chronologicznie w kolejności wykonywania poszczególnych par otworów. W górnej części z każdego wykresów wskazane są wymiary nominalne odległości par otworów od bazy (rys. zał. 1). Ze względu na

uszkodzenie płytki wytaczadła w trakcie eksperymentu pierwszego, w analizach ujęto 131 par otworów. W drugim eksperymencie nie odnotowano uszkodzeń i w analizach wzięto pod uwagę 142 pary otworów.

Na rysunku 8.11 widoczna jest poprawa dokładności położenia otworów, będącą wynikiem wdrożonego rozwiązania. Ilościowym potwierdzeniem uzyskanych korzyści mogą być wartości wskaźników jakościowych. Jako miarę rozrzutu wartości wskaźnika jakościowego, przyjęto odchylenie standardowe, które jest jedną z miar powtarzalności:

$$S(x) = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (8.1)$$

gdzie:  $n$  – liczba otworów,  $i$  – numer pomiaru,  $x_i$  – wartość wskaźnika,  $\bar{x}$  – średnia arytmetyczna wartości wskaźnika.

Im większa jest wartość odchylenia standardowego, tym większy jest rozrzut od średniej wartości wskaźnika jakości.

Jako drugą miarę oceny jakości rozwiązania przyjęto rozstęp odchyłki wskaźnika:

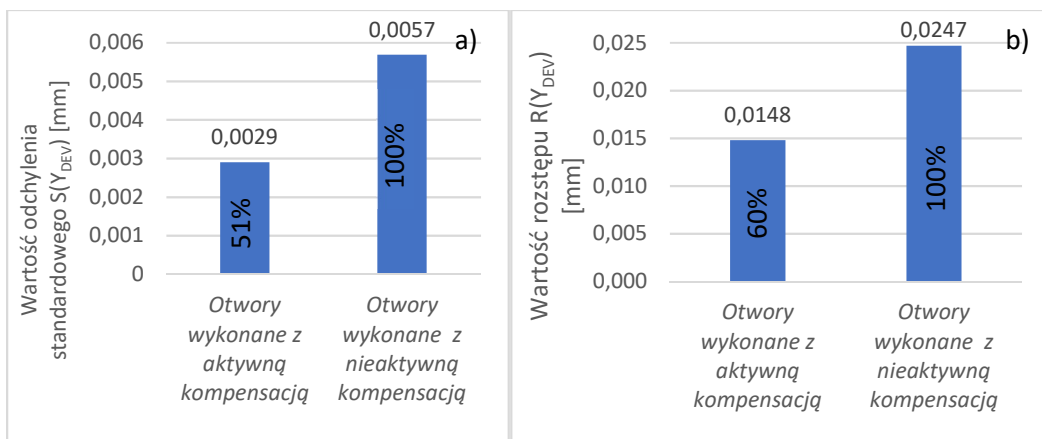
$$R(x) = x_{max} - x_{min} \quad (8.2)$$

gdzie:  $R(x)$  – rozstęp,  $x_{max}$  -najwyższa wartość wskaźnika jakości,  $x_{min}$  -najniższa wartość wskaźnika jakości.

Rozstęp jest stosowany głównie w tych przypadkach, gdy jest konieczne szybkie określenie obszaru zmienności badanego wskaźnika. Porównaniu poddano wskaźniki jakościowe pomiędzy otworami wykonanymi z włączoną oraz z wyłączoną kompensacją.

Wyniki obliczeń miar wskaźnika jakościowego (8.1) oraz (8.2) zaprezentowane zostały w formie wykresów słupkowych w dwóch ujęciach:

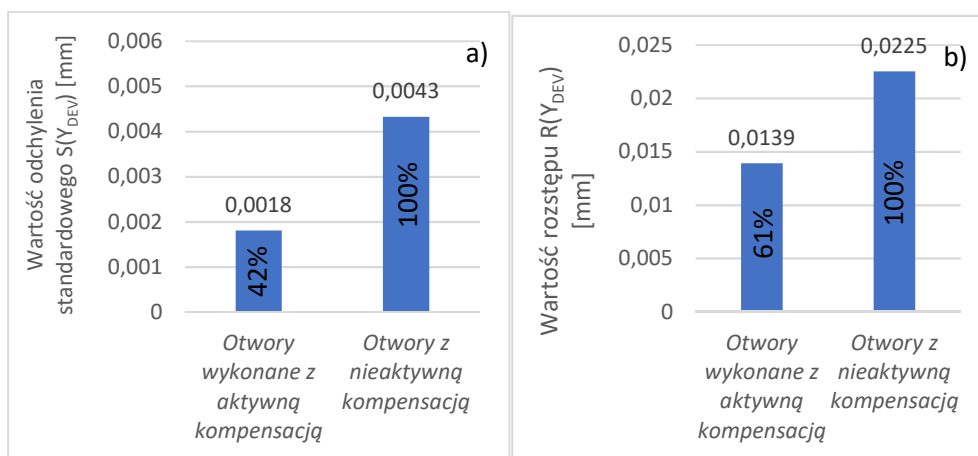
- Na rysunkach 8.11 oraz 8.12 przedstawiono porównanie przyjętych miar wskaźnika w odniesieniu do odchyłek położenia otworów niekompensowanych oraz kompensowanych z podziałem na poszczególne eksperymenty.
- Na rysunkach 8.12 do 8.17 przedstawiono porównanie przyjętych miar wskaźnika w odniesieniu do odchyłek położenia otworów niekompensowanych oraz kompensowanych dla poszczególnych wartości nominalnych w osi Y, bez podziału na eksperymenty.



**Rys. 8.12.** Porównanie wskaźników jakościowych uzyskanych w eksperymencie pierwszym: a) odchylenia standardowego  $S(Y_{DEV})$ , b) rozstępu  $R(Y_{DEV})$

Jak wynika z rysunku 8.12a, wartość odchylenia standardowego od wartości średniej  $S(Y_{DEV})$ , dla otworów wykonanych z uruchomioną kompensacją wynosi  $2,9\mu\text{m}$ . Dla otworów wykonanych z kompensacją wyłączoną wyniosła  $5,7\mu\text{m}$ . Świadczy to o tym, że wskaźnik poprawił się o około 49%. Rozstęp  $R(Y_{DEV})$  (rys. 8.12b), dla otworów wykonanych z kompensacją wyłączoną wynosi  $24,7\mu\text{m}$ . Dla otworów wykonanych z kompensacją aktywną,  $14,8\mu\text{m}$ . Taki wynik świadczy, że rozrzut zmniejszył się o około 40% na korzyść otworów z kompensacją uruchomioną. Poprawa wskaźników jakościowych widoczna jest szczególnie dla otworów wykonywanych mniej więcej po 142 minucie trwania eksperymentu, gdzie zaobserwować można wzrost temperatury podstawy słupa osi Y ( $\delta T_y2$ , rys.8.9).

Wartości wskaźników jakościowych odnoszące się do drugiego eksperymentu przedstawiono na rysunku 8.13.

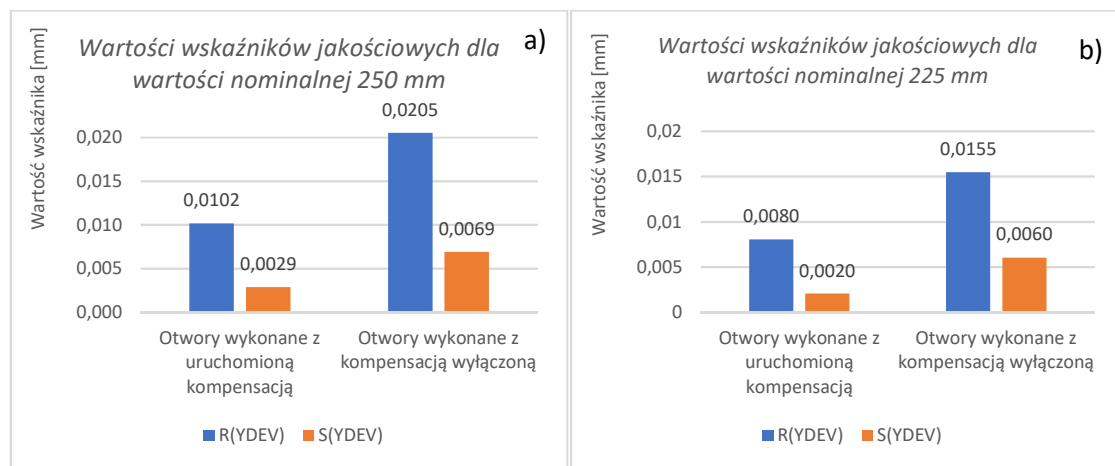


**Rys. 8.13.** Porównanie wskaźników jakościowych uzyskanych w eksperymencie drugim: a) odchylenia standardowego  $S(Y_{DEV})$ , b) rozstępu  $R(Y_{DEV})$

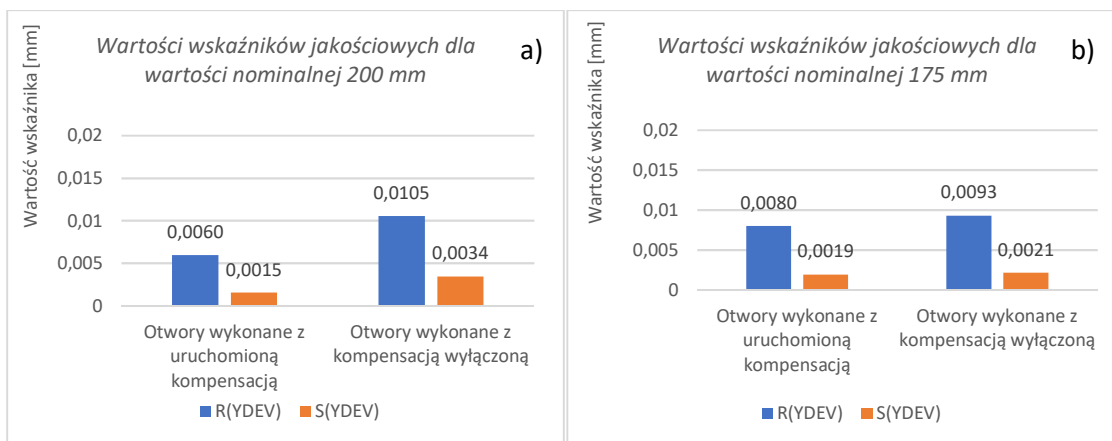


Wartość odchylenia standardowego od wartości średniej  $S(Y_{DEV})$ , w eksperymencie drugim (rys. 8.13a), wynosi  $1,8\mu\text{m}$  dla otworów kompensowanych. Odchylenie standardowe dla otworów niekompensowanych wynosi  $4,3\mu\text{m}$ . Świadczy to o tym, że wskaźnik  $S(Y_{DEV})$  zmniejszył się o około 58% na korzyść otworów kompensowanych. Rozstęp  $R(Y_{DEV})$  (rys. 8.13b), dla otworów kompensowanych wynosi  $13,9\mu\text{m}$  a dla otworów niekompensowanych  $22,5\mu\text{m}$ . Rozrzut zmniejszył się o około 39%, w stosunku do otworów wykonanych z kompensacją wyłączoną. Wpływ algorytmu kompensacji na uzyskane wyniki zaobserwować można wyraźnie od 152 minuty trwania eksperymentu, gdzie widoczny jest wyraźny wzrost temperatury podstawy słupa osi Y ( $\delta T_{y2}$ , rys.8.10). Podsumowując zarówno w eksperymencie pierwszym jak również drugim, widoczne jest poprawa miar wskaźnika jakościowego na korzyść otworów wykonanych z uruchomioną kompensacją. W obu przypadkach następuje właściwa reakcja systemu na wzrost temperatury.

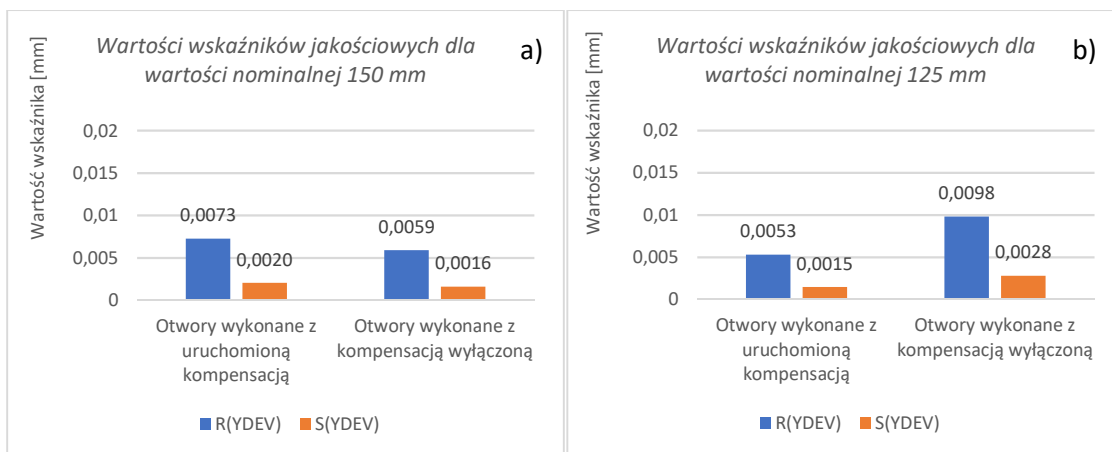
Rysunki 8.14 do 8.19 pokazują wartości wskaźników jakościowych na poszczególnych poziomach położenia otworów. Wskaźniki obliczono zbiorczo dla obu eksperymentów.



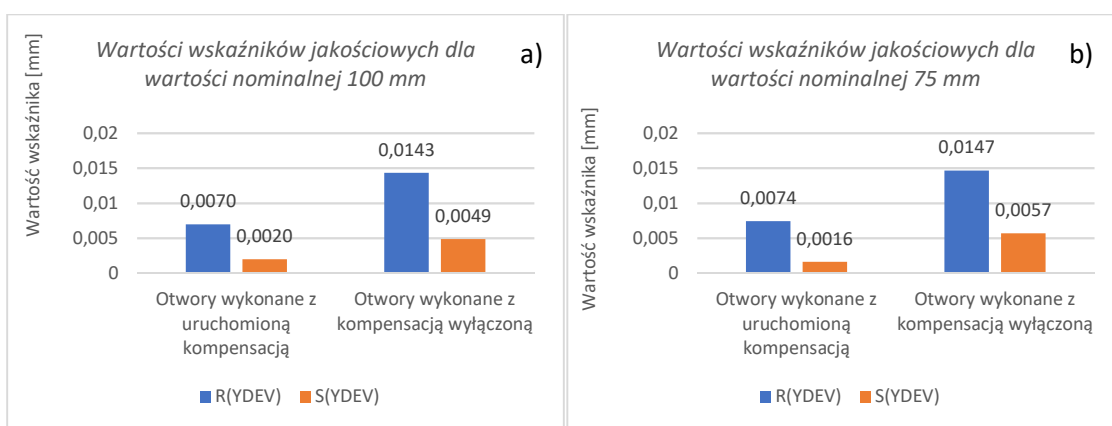
**Rys. 8.14.** Porównanie wskaźników jakościowych  $S(Y_{DEV})$  oraz  $R(Y_{DEV})$ , uzyskanych w eksperymencie pierwszym oraz drugim w odniesieniu do otworów wykonanych na pozycji nominalnej w osi Y: a) 250 mm, b) 225 mm



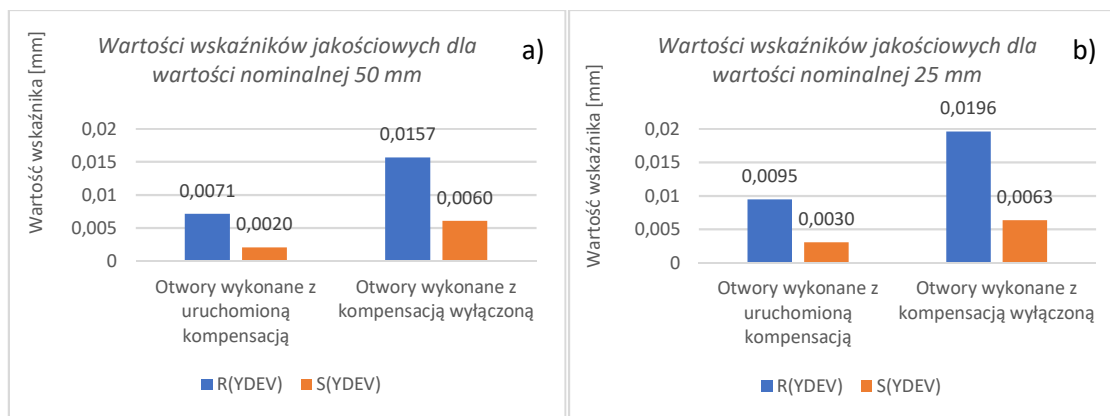
**Rys. 8.15.** Porównanie wskaźników jakościowych  $S(Y_{DEV})$  oraz  $R(Y_{DEV})$ , uzyskanych w eksperymencie pierwszym oraz drugim w odniesieniu do otworów wykonanych na pozycji nominalnej w osi Y: a) 200 mm, b) 175 mm



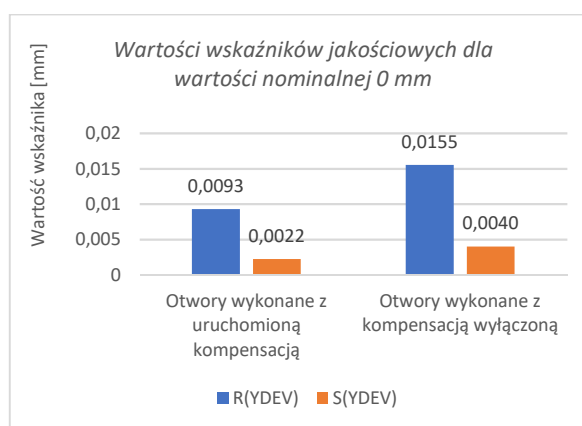
**Rys. 8.16.** Porównanie miar wskaźników jakościowych  $S(Y_{DEV})$  oraz  $R(Y_{DEV})$ , uzyskanych w eksperymencie pierwszym oraz drugim w odniesieniu do otworów wykonanych na pozycji nominalnej w osi Y: a) 150 mm, b) 125 mm



**Rys. 8.17.** Porównanie wskaźników jakościowych  $S(Y_{DEV})$  oraz  $R(Y_{DEV})$ , uzyskanych w eksperymencie pierwszym oraz drugim w odniesieniu do otworów wykonanych na pozycji nominalnej w osi Y: a) 100 mm, b) 75 mm



**Rys. 8.18.** Porównanie wskaźników jakościowych  $S(Y_{DEV})$  oraz  $R(Y_{DEV})$ , uzyskanych w eksperymencie pierwszym oraz drugim w odniesieniu do otworów wykonanych na pozycji nominalnej w osi Y: a) 50 mm, b) 25 mm



**Rys. 8.19.** Porównanie wskaźników jakościowych  $S(Y_{DEV})$  oraz  $R(Y_{DEV})$ , uzyskanych w eksperymencie pierwszym oraz drugim w odniesieniu do otworów wykonanych na pozycji nominalnej 0mm w osi Y

Analizując wartości wskaźników jakościowych (rys. 8.14 do 8.19), obliczonych w odniesieniu do pozycji nominalnych na jakich docelowo otwory z założenia są wykonane, praktycznie w każdym przypadku można stwierdzić, poprawę. Jedynie dla wartości nominalnej 150 mm (rys. 18.7a), widoczne jest nieznaczne pogorszenie  $S(Y_{DEV})$  oraz  $R(Y_{DEV})$ , na niekorzyść otworów wykonanych z kompensacją uruchomioną. Na uwagę należy mieć to, że otrzymane wyniki pomiarów charakterystyki  $Y_{DEV}$  a w konsekwencji wskaźniki jakościowe  $S(Y_{DEV})$  oraz  $R(Y_{DEV})$ , obarczone są błędami które wynikają z realizacji eksperymentów w warunkach produkcyjnych a nie laboratoryjnych. Wartości odchyłek dla tego przypadku są niewielkie i w obu eksperymentach były wykonywane praktycznie na granicy wzrostu temperatury. Należy zaznaczyć, że wartości wskaźników w tym przypadku nie odbiegają znacząco od poziomu wskaźnika otworów niekompensowanych

Analizując wyniki pomiarów  $Y_{DEV}$  na rysunku 8.11 a, b, zauważyć można, iż odchyłki od wartości nominalnej układają się w charakterystyczny kształt łukowy na poszczególnych poziomach wartości nominalnej. Spowodowane to jest błędem geometrycznym obrabiarki pochodzącym od błędu ruchu liniowego w osi X mierzonego w płaszczyźnie XY układu maszynowego. Został on wykazany podczas badania za pomocą kolumny wzorcowej (podrozdział 6.5, rys. 6.21).

Jako że proponowane rozwiązanie jest formą kompensacji błędu w odniesieniu do bazy obróbkowej, w związku z czym nie uwzględnia ono:

- błędów geometrycznych obrabiarki nie pochodzących od wpływów termicznych,
- błędów PDTE powstałych w wyniku np. zmian temperatury układu pomiarowego obrabiarki czy zmian temperatury obrabianej części w trakcie realizacji procesu.

Błędy te można zaobserwować w obu eksperymentach analizując linie trendu dla odchyłek pozycji otworów, których pozycja została skompensowana (rys. 8.11 a, b).

Podsumowując, można stwierdzić, że zastosowanie proponowanego rozwiązania w formie kompensacji błędów położenia TCP względem bazy obróbkowej pozytywnie wpływa na poprawę przyjętych wskaźników jakościowych na obu częściach testowych na badanej obrabiarce. Pozytywny wpływ zauważalny jest zarówno na wykresach zarejestrowanych odchyłek jak również wykresach ilustrujących poziom wskaźników jakościowych.

## PODSUMOWANIE

Mnogość czynników mających wpływ na wynik obróbki sprawia, że zapobieganie występującym błędom jest zagadnieniem złożonym i trudnym. Istotnym a zarazem bardzo uciążliwym czynnikiem wywierającym wpływ na dokładność obróbki są zmiany temperatury. W praktyce można spotkać się z szeregiem prac i rozwiązań mających na celu zmniejszenie wpływu zmian temperatury na efekt obróbki. Należy jednak zaznaczyć, że całkowite jego wyeliminowanie jest rzeczą niemożliwą.

Mówiąc o dokładności obróbki trzeba mieć na uwadze posiadane zaplecze technologiczne jak i zjawiska towarzyszące samej obróbce. Jak przedstawiono w niniejszej pracy, w produkcji lotniczej wykorzystywane są dokładne obrabiarki z zaawansowanymi systemami sterowania i nadzoru. Mimo to, nie zapewniają one bezproblemowej produkcji w określonych operacjach. Świadczą o tym liczne prace prezentowane w literaturze. Potwierdza to również przypadek będący przedmiotem rozprawy. Na skutek zmian temperatury elementów obrabiarki spowodowanych czynnikami zewnętrznymi oraz wewnętrznymi w trakcie realizacji procesów, powstają błędy obróbki spowodowane rozszerzalnością cieplną układu OUPN wpływając na jej geometrię. Analiza literatury pokazuje, że istnieje wiele koncepcji rozwiązań w zakresie minimalizacji błędów termicznych. W przytoczonych źródłach literaturowych uwagę zwraca jednak fakt, że większość z przytoczonych rozwiązań nie znalazła swojego zastosowania w przemyśle. Niewielu autorów potwierdza skuteczność proponowanych metod podczas realizacji rzeczywistej obróbki. Również cykliczna weryfikacja stanu technicznego obrabiarki w kontekście parametrów geometrycznych oraz ustawczych realizowana zgodnie z wytycznymi norm oraz producenta obrabiarek jest czasochłonna. Wymaga zaangażowania wyspecjalizowanego personelu, oprzyrządowania, odpowiedniego przygotowania obrabiarki w kontekście BHP przed realizacją pomiarów. Częściowym rozwiązaniem problemu w tym obszarze może być wykorzystanie autorskiej metody pomiarów z wykorzystaniem artefaktu wzorcowego. Dzięki prezentowanemu w pracy rozwiązaniu możliwe jest częściowe uproszczenie tych procedur oraz wizualizacja zależności zmian temperatury w funkcji mierzonych cech artefaktu. Uzyskane wyniki badań z wykorzystaniem kolumny wzorcowej w zakresie temperaturowym WT2 wykazały, że:

- poszczególne odchyłki prostoliniowości podawane względem punktów PR na podstawie odtwarzanego kształtu artefaktu mieszczą się w zakresie 0,001mm do 0,004mm,
- wyniki podawane w układzie maszynowym, wykazały przesunięcia zarysów kształtu artefaktu w poszczególnych osiach maszynowego układu współrzędnych, z wykazaniem największych odchyłek w osi Y,
- odkształcenia korpusu obrabiarki względem wzorca pomiarowego spowodowane zmianami temperatur nie mają istotnego wpływu na zmiany prostoliniowości ruchu poszczególnych osi liniowych oraz nie wpływają na ich zależności kątowe w sposób zauważalnie istotny,
- wyniki pomiarów równoległości osi wrzeciona w płaszczyznach głównych obrabiarki wykonane metodą bazującą na metodzie Renishaw AxiSet TM, nie wykazały odchyłeń kątowych wrzeciona,
- pomiary położenia punktu zerowego wykazały, że badana obrabiarka wykazuje największy dryft TCP w osi Y.

Zainstalowanie artefaktu wzorcowego na palecie wymiennej umożliwia wykonanie pomiaru w dowolnym momencie pomiędzy zadaniami produkcji seryjnej, jak również na innych obrabiarkach zainstalowanych w obrębieniu linii FMS. Pozwala to stosować opracowane rozwiązanie jako szybkie narzędzie diagnostyczne. Graficzna wizualizacja wyników pozwala na ocenę zmian określonych parametrów w szerokiej perspektywie czasu. Należy jednak zauważyć, że wykorzystanie artefaktu wzorcowego wymaga wprowadzenia procedury kontrolnej w trakcie realizacji procesu obróbki celem korekty położenia TCP. Nie wychwytuje jednak momentu zmian temperatury i tym samym pojawiają się odchyłki, które wymuszają korektę TCP. W związku z powyższym podjęto dalsze prace mające na celu automatyczną korektę odchyłek wywołanych zmianą temperatury. Działania ukierunkowane zostały na implementację do systemu sterowania CNC modelu matematycznego. Przygotowany model matematyczny bazuje na pomiarach temperatury wybranych elementów oraz przemieszczeń wybranych charakterystyk. Wartym podkreślenia jest założenie braku ingerencji w konstrukcję obrabiarki w kontekście rozmieszczenia czujników pomiarowych co odróżnia realizowaną pracę od prac prezentowanych w literaturze, gdzie występuje całkowita swoboda w tym zakresie. Aby spełnić ten warunek wykorzystano dane temperaturowe

pochodzące z systemu nadzorowania układu stabilizacji temperaturowej obrabiarki, którego zadaniem jest nadzorowanie:

- temperatury glikolu krążącego w układzie stabilizacji temperatury elektrowrzeciona ( $T_{co}$ ),
- temperatury chłodziwa ( $T_{cl}$ ),
- temperatury podstawy, po której porusza się oś Y ( $T_{x1}$ ,  $T_{x2}$ ),
- temperatury otoczenia obrabiarki ( $T_{env}$ ),
- temperatury słupa, po której porusza się oś Y ( $T_{y1}$ ,  $T_{y2}$ ),
- temperatury podstawy obrabiarki ( $T_z$ ).

Wartym podkreślenia jest wykorzystanie w budowie modelu matematycznego czynników chłodzących, nieuwzględnianych w modelach literaturowych. Badania zmian w/w temperatury elementów i środków obróbki wykazały stosunkowo niewielkie zmiany temperatur w porównaniu do prezentowanych w literaturze z zakresu kompensacji temperaturowej. Przyczynę takiego stanu rzeczy należy upatrywać w tym, że badana obrabiarka posiada system stabilizacji temperatury podzespołów. Rejestrowane przebiegi zmian temperatur uwidoczniły obecność zakłóceń, w postaci szumów naniesionych na przebieg główny. Wymusiły one opracowanie metody eliminacji niepożądanych efektów nie wykraczającej poza sterownik CNC, która finalnie została zaimplementowana w akcjach synchronicznych. Podejście do wykorzystania akcji synchronicznych jako kompleksowego modułu w obszarze kompensacji błędów wywołanych czynnikami temperaturowymi, zdaniem autora stanowi autorskie podejście w tej dziedzinie. Dodatkowo opracowana metodyka oraz algorytmy mogą znaleźć zastosowanie w innych obrabiarkach wyposażonych w sterowniki Sinumerik 840D. Prezentowane podejście wykorzystujące fabryczne rozmieszczenie czujników pomiarowych jak i brak ingerencji w system sterowania co nie narusza warunków gwarancji obrabiarki jak i zasad BHP w zakresie jej obsługi.

Odnosząc się do opracowanego modelu matematycznego, na podstawie przeprowadzonych pomiarów można stwierdzić, że wychwytuje on zmiany temperatury w trakcie obróbki i koryguje współrzędne położenia TCP w osi Y, zwiększa dokładność realizowanego procesu. Zostało to wykazane podczas praktycznej weryfikacji na częściach testowych dla których przyjęte wskaźniki jakościowe  $S(Y_{DEV})$  oraz  $R(Y_{DEV})$  uległy poprawie. W eksperymencie pierwszym współczynnik  $S(Y_{DEV})$ , dla otworów wykonanych z uruchomioną kompensacją w odniesieniu do otworów wykonanych bez

kompensacji zmniejszył się o 49%, w eksperymencie drugim zmniejszył się o 58%. Współczynnik  $R(Y_{DEV})$ , dla otworów kompensowanych w odniesieniu do otworów niekompensowanych w eksperymencie pierwszym zmniejszył się o 40%, natomiast w eksperymencie drugim zmniejszył się o 39%.

Wartym podkreślenia jest również fakt realizacji badań bezpośrednio w warunkach produkcyjnych a nie laboratoryjnych. Rozwiązanie nadaje się więc do zastosowań przemysłowych. Uzyskane wyniki stanowią potwierdzenie osiągniętego celu pracy oraz udowodnienie postawionej tezy.

Podsumowując całość zrealizowanych prac można wyciągnąć następujące wnioski:

- wykorzystanie kolumny wzorcowej zapewnia szybki pomiar jak i korektę ustawień obrabiarki. Nie pozwala jednak na określenia momentu powstania przemieszczeń TCP,
- wykorzystanie kolumny wzorcowej oraz opracowanej procedury kontrolnej możliwe jest na innych obrabiarkach CNC zainstalowanych na linii produkcyjnej,
- zrealizowany sposób pomiaru zmiennych składowych modelu matematycznego nie ingeruje w konstrukcję obrabiarki,
- model matematyczny  $\Delta y = f(\delta T_{co}, \delta T_{cl}, \delta T_{x1}, \delta T_{x2}, \delta T_{y2}, \delta T_z)$ , opracowany na podstawie danych statystycznych uzyskanych w produkcji seryjnej pomimo błędów predykcyjnych w 85% wyjaśnia zmienność przemieszczeń TCP w osi Y. Pozwala to na skuteczne przewidywanie przemieszczeń TCP względem punktu zerowego obróbki,
- weryfikacja modelu na nowych danych wejściowych uzyskanych w trakcie realizacji dwóch procesów symulowanych realizowanych po upływie trzech miesięcy w innych warunkach i uzyskanie kolejno 87% oraz 89% dopasowania modelu do danych rzeczywistych, pozwala wnioskować, że model będzie nadal adekwatny w perspektywie czasu,
- uwzględnienie takich czynników jak zmiany temperatury płynów eksploatacyjnych (glikol, chłodziwo), jako dane wejściowe modelu, pozwala na polepszenie zdolności predykcyjnych modelu,
- istotnym z punktu widzenia dopasowania modelu do danych statystycznych jest jakość danych predykcyjnych (brak zakłóceń). Filtracja zakłóceń znacznie poprawia jakość modelu,



- istnieje możliwość implementacji kompleksowych algorytmów służących do kompensacji temperaturowej za pomocą akcji synchronicznych w obrębie NCK sterownika Sinumerik 840D SL, bez konieczności angażowania dodatkowych środków czy ingerencji w programy PLC obrabiarki,
- w obrębie akcji synchronicznych można implementować modele zawierający jawny zapis matematyczny,
- sonda przedmiotowa może być odpowiednim narzędziem do identyfikacji błędów termicznych, pod warunkiem odpowiedniego stanu technicznego obrabiarki jak również samej sondy przedmiotowej.

Przedstawione badania nie wyczerpują zagadnień wpływu temperatury na dokładność obróbki na badanej obrabiarce. Pokazują jednocześnie dalsze obszary wymagające prac, których tematyka będzie dotyczyła:

- opracowania modeli uwzględniających błędy PDTE w funkcji zmian temperatury przedmiotu obrabianego oraz układu pomiarowego osi liniowych zarówno dla osi X jak również Y,
- implementacji opracowanych modeli w akcjach synchronicznych,
- próby zastosowania prezentowanego podejścia na innych obrabiarkach.



## BIBLIOGRAFIA

1. Abdulshahed A.M., Longstaff A.P., Fletcher S, Potdar A, (2016). *Thermal error modelling of a gantry-type 5-axis machine tool using a Grey Neural Network Model*. Journal of Manufacturing Systems 41, str. 130–142
2. Abukhshim N.A., Mativenga P.T., Sheikh M.A., (2006). *Heat generation and temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high speed machining*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 46, str. 782-800
3. Basara D., Skoczylas L., (2020). *Importance and control of geometric and kinematic accuracy in precision machining of parts in assembly operation aspect*. Technologia i Automatyzacja Montażu 2/2020, str. 21-26
4. Basara D., Skoczylas L.,(2022). *Correlation Studies of Dimensional Accuracy with Temperature Changes of Selected Elements of a Machine Tool in the Machining Process*. Advances in Science and Technology Research Journal-16(1), str. 253–259
5. Belsley, D. A., Kuh, E., and Welsch, R. E., (1980). *Regression Diagnostics: Identifying Influential Data and Sources of Collinearity*. New York: John Wiley & Sons
6. Biecek P. 2013. *Analiza danych z programem R*. Wydawnictwo naukowe PWN. Warszawa
7. Blasera P., Pavlicecka F., Morib K., Mayrc J., Weikertc S., Wegenera K., (2017). *Adaptive learning control for thermal error compensation of 5-axis machine tools*. Journal of Manufacturing Systems 44, str. 302–309
8. Bomba G., Ornat A., Gierlak, P.,(2021). *Geometric Measurements on a CNC Machining Device as an Element of Closed Door Technology*. Sensors 21
9. Brandt S., (1975). *Metody statystyczne i obliczeniowe analizy danych*. PWN Warszawa
10. Brecher, C., Hirsch, P.,(2004). *Compensation of Thermo-elastic Machine Tool Deformation Based on Control internal Data*. CIRP Annals 53/ 1, str. 299-304
11. Bryan J, (1978). *A Practical Solution to the Thermal Stability Problem in Machine Tools*, SME, MR-72-138.
12. Bryan, J., (1990). *International status of thermal error research*. Annals of the CIRP 39/2, str. 645-656.
13. Caban J., Iskra R., Józwick J., Kamińska-Krzowska B., (2007). *Ocena stanu maszyny technologicznej CNC z zastosowaniem interferometrii laserowej*. Monografia pod red. J. Józwick i inni „Techniki wytwarzania w budowie maszyn – aktualne zagadnienia badawcze”, LTN, Lublin.

14. Chen T., Chang C., Hung J., Lee R., Wang C., (2016). *Real-Time Compensation for Thermal Errors of the Milling Machine*. Applied Science 6
15. Christopher D. Mizea, John C. Ziegertb, (2000). *Neural network thermal error compensation of a machining center*. Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology 24 str. 338–346
16. Cui G., Lu Y., Gao D., Yao Y., (2012). *A novel error compensation implementing strategy and realizing on Siemens 840D CNC systems*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 61/5–8, str. 595–608
17. Delbressine F.L.M., Florussen G.H.J., Schijvenaars L.A.,(2006). *Schellekens Modelling thermomechanical behaviour of multi-axis machine tools*. Precision Engineering 30, str. 47–53
18. Deutsch J., Albrecht T., Riedel M., Penter L., Wiemer H., Jens M. (2020), *Thermo-Elastic Structural Analysis Of A Machine Tool Using A Multi-Channel Absolute Laser Interferometer*. Journal of Machine Engineering, Vol. 20, No. 3, str. 63–75
19. Donatas Gurauskisa, Arturas Kilikeviciusb, Sergejus Borodinasb, (2019). *Analysis of geometric and thermal errors of linear encoder for real-time compensation*. Sensors and Actuators A 296. str. 145–154
20. Miao E., Liu Y., Liu H., Gao Z., Li W., (2015). *Study on the effects of changes in temperature-sensitive points on thermal error compensation model for CNC machine tool*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 97, str. 50–59
21. Fan J., Tao H., Wu C.; Pan R, Tang Y., Li Z., (2018). *Kinematic errors prediction for multi-axis machine tools' guideways based on tolerance*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 98, str. 1131–1144
22. Farrar D., Glauber R., (1967). *Multicollinearity in regression analysis: the problem revisited*. Rev Econ Stat 49, str. 92–107
23. Feng Wenlong, Li Zihan, Gu Qunying, Yang Jianguo, (2015). *Thermally induced positioning error modelling and compensation based on thermal characteristic analysis*. International Journal of Machine Tools and Manufacture 93, str. 26-36
24. Field, A., (2000). *Discovering statistics using spss for windows*. London-Thousand Oaks- New Delhi. Sage publications.
25. Fox. J., Monette. G., (1992). *Generalized collinearity diagnostics*. JASA. 87, str. 178–183
26. Gareth J., Witten D., Hastie T., Tibshirani R., (2021). *An Introduction to Statistical Learning: With Applications in R*. Springer Publishing Company, Incorporated.
27. Gould L.,(1989) *Sensors for machine tool monitoring*. Sensors (Peterborough, NH)6
28. Gravetter, F., Wallnau, L., (2014). *Essentials of statistics for the behavioral sciences* (8th ed.). Belmont, CA: Wadsworth.

29. Grochalski K., Jabłoński P., Talar R., Twardowski P., Wieczorowski M., Jakubek B., Rukat W. (2020). *Temperature Measurement of Modern Cutting Tools During Turning*. Advances in Science and Technology Research Journal 14(4), str.37-48
30. Habibi M., Arezoo B., Vahebi M., (2011). *Tool deflection and geometrical error compensation by tool path modification*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 51, str. 439–449
31. Hao Wu, Hongtao Zhang, Qianjian Guo, Xiushan Wang, Jianguo Yang, (2008). *Thermal error optimization modeling and real-time compensation on a CNC turning center*. Journal of materials processing technology 207, str. 172–179
32. Horejš O., Mareš M., Hornych. A J., (2014). *General Approach To Thermal Error Modelling Of Machine Tools*. Assises MUGV 2014 Clermont Ferrand, 15-16 octobre 2014
33. Horejš O., Mareš M., Novotný L.,(2012). *Advanced Modelling of Thermally Induced Displacements and Its Implementation into Standard CNC Controller of Horizontal Milling Center*. Procedia CIRP 4, str. 67 – 72
34. Huang J., Zhou Z., Liu M., Zhang E., Chen M., Truong D., Ji I C., (2015). *Real-time measurement of temperature field in heavy-duty machine tools using fiber Bragg grating sensors and analysis of thermal shift errors*. Mechatronics, Vol. 31, str. 16-21
35. Hui Liu, Enming Miao, Xindong Zhuang, Xinyuan Wei, (2018) . *Thermal error robust modeling method for CNC machine tools based on a split unbiased estimation algorithm*. Precision Engineering 51 str. 169–175
36. Huicheng Zhou, Pengcheng Hu, Huiling Tan , Jihong Chen, Guoan Liu, (2018). *Modelling and compensation of thermal deformation for machine tool based on the real-time data of the CNC system*. Procedia Manufacturing 26, str. 1137–1146
37. Jacniacka E, Semotiuk L., (2013). *Experimental methods for determining uncertainty of measurement using inspection probes*. Maintenance and Reliability 15, str. 246–252
38. Jedrzejewski J., i inni, (2008). *Precise Model of HSC Machining Centre for Aerospace Parts Milling*. Journal of Mechanical Engineering 8, str. 29–41
39. Jedrzejewski J., Modrzycki W.,(1997). *Intelligent supervision of thermal deformations in high precision machine tools*, Proc. 32nd Int. MATADOR Conf, Manchester, UK, str. 457–462.
40. Jong-Jin K., Young J., Hun Dong-Woo I C., (2004). *Thermal behavior of a machine tool equipped with linear motors*. International Journal of Machine Tools and Manufacture 44, Issue 7-8, str. 749-758
41. Józwick J. (red.) i in.(2015). *Postęp w technikach wytwarzania i konstrukcji maszyn*. Lubelskie Towarzystwo Naukowe, str. 123–134
42. Józwick J. i.in, (2005). *Procedury termograficznych bada diagnostycznych tokarki uniwersalnej*. Monografia pod red. Józwick J. Postęp w technikach wytwarzania i konstrukcji maszyn. Lubelskie Towarzystwo Naukowe, Lublin

43. Józwik J., Lonkwic P., Sága M., Kuric I., (2014). *R-test static measurement of the 5-axis CNC machining centre rotary axis kinematic centre error*. *Manufacturing Technology: Journal for Science, Research and Production*, 14, str. 186–193
44. Józwik J., Ocena odchyłki prostopadłości osi obrabiarki sterowanej numerycznie z wykorzystaniem systemu diagnostycznego QC10 Ballbar. *Postępy Nauki i Techniki*, 2010, 4, s. 91–102 P
45. Józwik J., Pieśko P., Krajewski G., (2010). *Evaluation of QC10 Ballbar diagnostics method for CNC machine*. *Maintenance and Reliability* 3/47, str. 10–20
46. Józwik J., (2018). *Experimental methods of error identification in CNC machine tool operation*. Politechnika Lubelska
47. Keaveney S., Connolly P., O'Cearbhaill, Eoin D., (2018). *Kinematic error modeling and error compensation of desktop 3D printer*. *Nanotechnology and Precision Engineering* 1, str. 180–186
48. Kim H.S., Jeong K.S., Lee D.G., (1997). *Design and manufacture of a three-axis ultra-precision CNC grinding machine*. *Journal of Materials Processing Technology* 71, str. 258-266
49. Kim S.M., (2002) *Effect of Bearing Surroundings on the High-Speed Spindle-Bearing Compliance*. *Advanced Manufacturing Technologies* 19:551–557.
50. Kim S.M., et al, (2001) *Prediction of Thermo-elastic Behaviour in a Spindlebearing Surroundings*. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 41:809–831.
51. Kim S.M., pozostali, (2005). *Spindle Housing Design Parameter Optimization Considering Thermo-Elastic Behaviour*. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 25, str. 1061–1070
52. Kosmal J., (2017). *Zastosowanie polimerobetonów w budowie korpusów obrabiarek*. *Przetwórstwo Tworzyw* 1, str. 33-45
53. Krämer W., Sonnberger H., (1986). *The Linear Regression Model under Test*. Heidelberg: Physica
54. Kuang-Chao Fan, (2001). *An Intelligent Thermal Error Compensation System for CNC Machining Centers*. *J. of Chinese Society of Mechanical Engineers*, 28, No. 1, str. 81-90
55. Lee J., Yang S., (2002). *Statistical optimization and assessment of a thermal error model*. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*-42, str. 147–155
56. Li S., Zhang Y., Zhang I G., (1997). *A study of pre-compensation for thermal errors of NC machine tools*. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 37-12, str. 1715-1719
57. Liang Y.C., Li W.D., Lou P., Hu J.M., (2020). *Thermal error prediction for heavy-duty CNC machines enabled by long short-term memory networks and fog-cloud architecture*. *Journal of Manufacturing Systems* 62, str 950-963

58. Liu J., Ma C., Gui H., Wang S., (2021). *Thermally-induced error compensation of spindle system based on long short term memory neural networks*. Applied Soft Computing Journal 102
59. Liu J., Maa C., Wang S., (2020). *Data-driven thermally-induced error compensation method of high-speed and precision five-axis machine tools*. Mechanical Systems and Signal Processing 138
60. Lo C., Yuan J., Ni J., (1999). *Optimal temperature variable selection by grouping approach for thermal error modeling and compensation*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 39, str. 1383–1396
61. Lyons R. G., (2010). *Wprowadzenie do cyfrowego przetwarzania sygnałów*. ISBN: 978-83-206-1764-1
62. Majda P., (2011). *Pomiary i kompensacja błędów geometrycznych obrabiarek CNC*. Inżynieria Maszyn, 16, str. 126–134
63. Majda P., (2012). *The influence of geometric errors compensation of a CNC machine tool on the accuracy of movement with circular interpolation*. Advances in Manufacturing Science and Technology 36, str. 59–67
64. Mares M., Horejs O., Havlík L., (2020). *Thermal error compensation of a 5-axis machine tool using indigenous temperature sensors and CNC integrated Python code validated with a machined test piece*. Precision Engineering 66, str. 21–30
65. Mayr J., Ess M., Weikert S., Wegener I K., (2018). *Simulation and prediction of the thermally induced deformations on machine tools caused by moving linear axis using the fdem simulation approach*. Proceedings of the 23rd Annual Meeting of the American Society for Precision Engineering
66. Mayr J., Gebhardt M., Massow B., Weikert S., Wegener K., (2014). *Cutting fluid influence on thermal behavior of 5-axis machine tools*. Procedia CIRP 14, str. 395–400
67. Mayr J., Jedrzejewski J., Uhlmann E., Alkan Donmez M., Knapp W., Härtig F., Wendt K., Moriwaki T., Shore P., Schmitt R., (2012). *Thermal issues in machine tools*. CIRP Ann. – Manuf. Technol. 61, str. 771–791.
68. Medyk P., Jedrzejewski J., Kasprzak M., (2019). *Cnc machine tool error compensation system implementation strategies and their constraints*. Journal of Machine Engineering 19- 4, str. 70–81
69. Mekid S., (2019). *Introduction to Precision Machine Design and Error Assessment*. Taylor & Francis Ltd; Edycja 1. ISBN-13: 978-0367386061
70. Merghache S. M., Hamdi A., (2020) . *Numerical evaluation of geometrical errors of three-axes CNC machine tool due to cutting forces—case: milling*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 111, str. 1683–1705
71. Miao E., Gong Y., Dang L., Miao J., (2014). *Temperature-sensitive point selection of thermal error model of CNC machining center*. Int J Adv Manuf Technol 74, str. 681–691

72. Miao E., Liu Y., Liu H., Gao Z., Li W., (2015). *Study on the effects of changes in temperature sensitive points on thermal error compensation model for CNC machine tool*. Int J Mach Tools Manuf 97, str 50–59
73. Miyaguchi K., Arai S., (2013). *State of the Art Ball Screw Trends for Machine Tool Applications*. Journal of SME, str. 13-18
74. Mori M., Irino N., Shimoik M., (2019). *A new measurement method for machine tool thermal deformation on a two-dimensional trajectory using a tracking interferometer*. CIRP Annals - Manufacturing Technology 68, str. 551–554
75. Mutilba U., Gomez-Acedo E., Kortaberria G., Olarra A., Yagüe-Fabra J., (2017). *Traceability of On-Machine Tool Measurement: A Review*. Sensors (Basel, Switzerland) 7
76. Pater J., Basara D., Stadnicka D., (2021). *Temperature Based Process Parameter Compensation on Process Efficiency and Productivity*. Technologia i Automatykacja Montażu nr 2/2021 str. 44-51
77. Polyakov A. N., Parfenov I. V., (2019). *Thermal error compensation in CNC machine tools using measurement technologies*. Journal of Physics: Conference Series 1333
78. Postlethwaite S.R., Ford D.G., Morton D.,(1997), *Dynamic calibration of CNC machine tools*. International Journal of Machine Tools and Manufacture 37/3, str.287–294
79. Praca zbiorowa, (1999). *Wyrażanie niepewności pomiaru - przewodnik*. Główny Urząd Miar, Warszawa
80. Rahman M., Mayer J.R.R., (2016). *Measurement Accuracy Investigation Of Touch Trigger Probe With Five-Axis Machine Tools*. Archive of Mechanical Engineering 63, str. 495-510
81. Ramesh R., Mannan M., Poo A., (2003). *Thermal error measurement and modelling in machine tools: Part I. Influence of varying operating conditions*. Int. J. Mach. Tools Manuf. 43, str. 391–404
82. Ramesh R., Mannan M.A., Poo A.N., oraz pozostali, (2000). *Error compensation in machine tools – a review, Part 1 & 2*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 40, str. 1235-1284
83. Reddy N, V S., Vinod P., Krishna S G., Narendranath S, Shashi Kumar.P.V, (2014). *Real-time thermal error compensation module for intelligent Ultra Precision Turning Machine*. Procedia Materials Science 6, str. 1981 – 1988
84. Reddy T N., V S., Vinod P., Krishna S G., (2020). *Real-time Thermal Error Compensation Strategy for Precision Machine tools Materials Today*. Proceedings 22, str. 2386–2396
85. Róaski L., Poloszyk S.,(2014). *Zastosowanie termowizji w diagnostyce maszyn*. Agenda Wydawnicza PAK, str. 75–83



86. Rutkowski L., (2019). *Metody i techniki sztucznej inteligencji*. Wydanie II PWN Warszawa 2011
87. Schwenke H., Knapp W., Haitjema H., Weckenmann A., Schmitte R., Delbressine F., (2008). *Geometric error measurement and compensation of machines – An update*. CIRP Annals – Manufacturing Technology 57/2, str. 660–675
88. Shi H., Ma C., Yang J., Zhao L., Mei X., Gong I G., (2015). *Investigation into effect of thermal expansion on thermally induced error of ball screw feed drive system of precision machine tools*. International Journal of Machine Tools and Manufacture 97, str. 60-71
89. Shi H., Zhang D., Yang J., Ma C., Mei X., Gong I G., (2016). *Experiment-based thermal error modeling method for dual ball screw feed system of precision machine tool*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 82, str.1693-1705
90. Shor B., Bafumi J., Keele L., David P., (2017). *A bayesian multilevel modeling approach to time-series cross-sectional data*. Soc Sci Electron Publ 15-2, str. 165–181
91. Skoczyński W., Stembalski M., Roszkowski A., Jankowski T., Turek P., (2016). *Sensory we współczesnych obrabiarkach sterowanych numerycznie*. Mechanik 11
92. Smoothing B., (1963). *Forecasting and Prediction of Discrete Time Series*. Engelwood Cliffs
93. Srinivas N. Grama, Ashvarya Mathur, Ramesh Aralaguppi, Subramanian T, (2017). *Optimization of high speed machine tool spindle to minimize thermal*. Procedia CIRP 58, str. 457 – 462
94. Srinivasa N., Ziegert J. C., (1996). *Automated measurement and compensation of thermally induced error maps in machine tools*. Precision Engineering 19, str. 112-132
95. Staniek R., Róaski L.,(2002). *Thermography in the Studies of the Thermal Characteristics of Numerically Controlled Vertical Knee-type Milling Machines*. Quantitative InfrRed Thermography 6
96. Sugishita H., Nishiyama H., Nagayasu O., i inni, (1988). *Development of Concrete Machining Center and Identification of the Dynamic and the Thermal Structural Behaviour*. Annals of the CIRP 37, str. 377-380
97. Suk S.H., (2008). *Theory and design of CNC systems*. Springer Science & Business Media
98. Trzpiot G., (2013). *Wybrane elementy statystyki odpornej*. ISBN 978-83-7875-099-4
99. Turek P, Kwaśny W, Jędrzejewski J, (2010). *Zaawansowane Metody Identyfikacji Błędów Obrabiarek*. Inżynieria Maszyn, R. 15, z. 1-2, str. 7-37
100. Venkata Krishna D., Prabhu Raja V., J Kanchana, S Ramesh Babu, (2014). *A Modeling Approach of Robust Regression for Developing Thermal Error*

- Compensation Model for CNC Turning Centre. International Journal of Engineering Research & Technology 3*
101. Wang W., Deng J., (1993). *Fundamental study of relational analysis in grey system.* Int Symp Uncertain Model Anal 11, str. 187–192
  102. Wang Y., Zhang G., Moon K.S., Sutherland J.W.,(1998). *Compensation for the thermal error of a multi-axis machining center,* Journal of Materials Processing Technology 75, str. 45-53
  103. Weck M., McKeown P., Bonse R., Herbst U., (1995). *Reduction and Compensation of Thermal Errors in Machine Tools.* CIRP Annals 44/2, str. 589-598
  104. Wei X., Miao E., Liu H., Liu S., Suxin S.,(2019).*Two-dimensional thermal error compensation modeling for worktable of CNC machine tools.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 101, str. 501–509
  105. Yan J. Y., Yang J. G., (2009). *Application of synthetic grey correlation theory on thermal point optimization for machine tool thermal error compensation.* Int J Adv Manuf Technol 43, str. 1124–1132
  106. Yang J., Mei X., Zhao L., Ma C., Shi H., Feng B., (2015), *Thermal error compensation on a computer numerical control machine tool considering thermal tilt angles and cutting tool length.* J Engineering Manufacture 229, str. 78–97
  107. Yang J., Shi H., Feng B., Zhao L., Ma C., Mei X., (2014). *Applying neural network based on fuzzy cluster pre-processing to thermal error modeling for coordinate boring machine.* Procedia CIRP 17, str. 698 – 703
  108. Yang J.G., Ren Y.Q., Liu G.L., Zhao H.T., Dou X.L., Chen W.Z, He S.W., (2005). *Testing, variable selecting and modeling of thermal errors on an INDEX-G200 turning center.* Int J Adv Manuf Technol 26, str. 814–818
  109. Yang L , Jun Z., Dongxu S., Changxing Zhou, Wanhua Zhao, (2018). *Experiment-based thermal behavior research about the feed drive system with linear scale.* Advances in Mechanical Engineering, Vol. 10(11). str. 1–10
  110. Yang Li, Wanhua Zhao, Wenwu Wu, Bingheng Lu, Yubao Chen, (2014). *Thermal error modeling of the spindle based on multiple variables for the precision machine tool.* Int J Adv Manuf Technol 72 str. 1415–1427
  111. Yang M., Lee J., (1998). *Measurement and prediction of thermal errors of a CNC machining center using two spherical balls.* Journal of Materials Processing Technology 75, str. 180–189
  112. Z. Z. Xu, X. J. Liu, H. K. Kim, J. H. Shin I S. K. Lyu, (2011). *Thermal error forecast and performance evaluation for an air-cooling ball screw system.* International Journal of Machine Tools and Manufacture 51, str. 605-611
  113. Zapłata J., Pajor M., (2019). *Piecewise compensation of thermal errors of a ball screw driven CNC axis.* Precision Engineering 60, str. 160-166

114. Zu-De Zhou, Lin Gui, Yue-Gang Tan, Ming-Yao Liu, Yi Liu, Rui-Ya Li, (2017). *Actualities and Development of Heavy-Duty CNC Machine Tool Thermal Error Monitoring Technology*. Chin. J. Mech. Eng. 30, str. 1262–1281

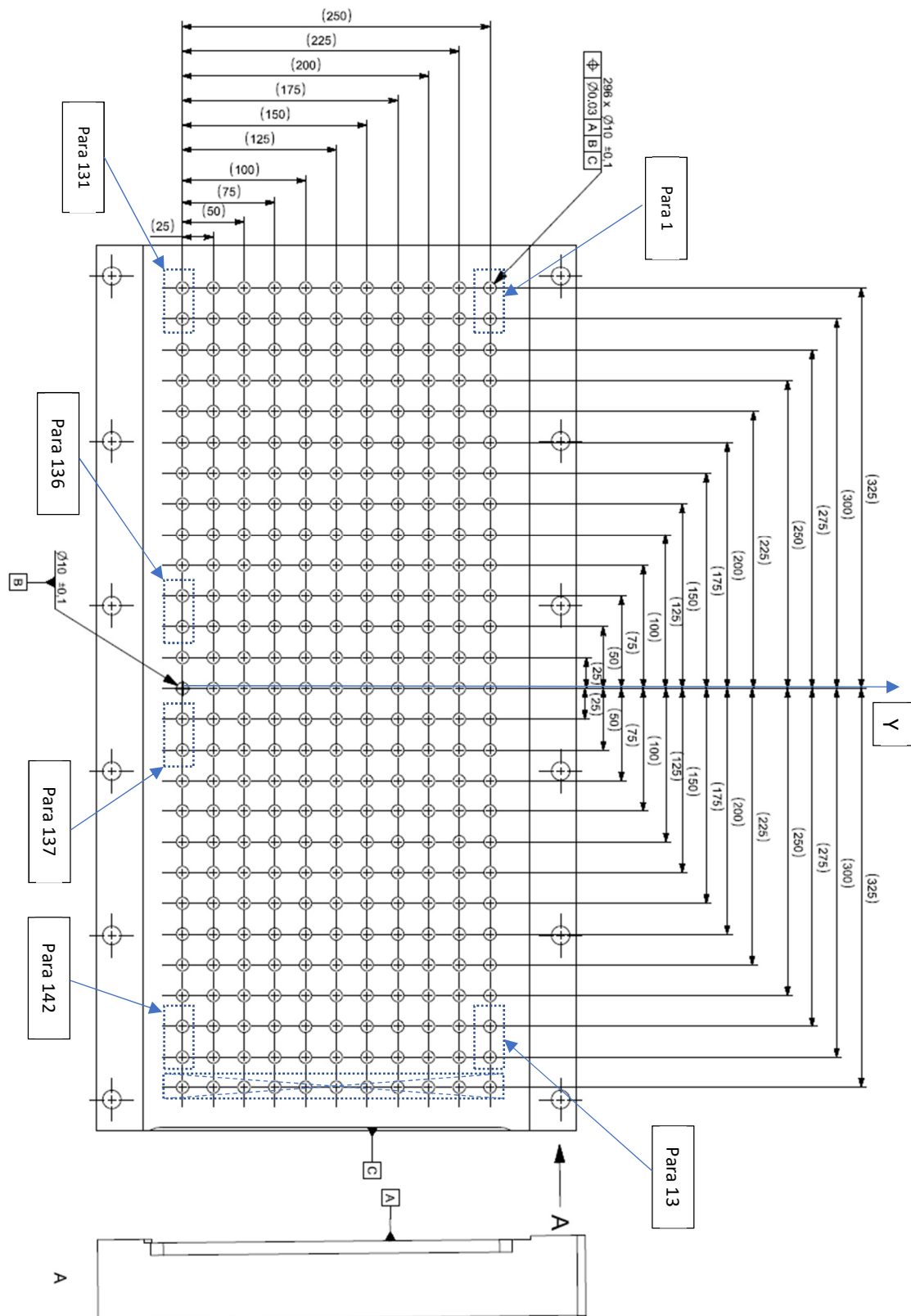
## **NORMY KATALOGI**

115. ISO 230-1:2012 - *Test code for machine tools — Part 1: Geometric accuracy of machines operating under no-load or quasi-static conditions*
116. ISO 230-2:2014 - *Test code for Machine tools - Part 2: Determination of accuracy and repeatability of positioning of numerically controlled machine tools axes*
117. ISO 230-3:2020 - *Test code for machine tools — Part 3: Determination of thermal effects*
118. ISO 230-4:1999 - *Test code for machine tools — Part 4: Circular tests for numerically controlled machine tools*
119. ISO 230-6:2002 - *Test code for machine tools — Part 6: Determination of positioning accuracy on body and face diagonals*
120. ISO 230-7:2006 - *Test code for machine tools - Part 7: Geometric accuracy of axes of rotation*
121. ISO 10791-1:2015 - *Test conditions for machining centres — Part 1: Geometric tests for machines with horizontal spindle (horizontal Z-axis)*
122. ISO 10791-2:2001 - *Test conditions for machining centres — Part 2: Geometric tests for machines with vertical spindle or universal heads with vertical primary rotary axis (vertical Z-axis)*
123. ISO 10791-3:1998 - *Test conditions for machining centres — Part 3: Geometric tests for machines with integral indexable or continuous universal heads (vertical Z-axis)*
124. ISO 10791-4:1998 - *Test conditions for machining centres — Part 4: Accuracy and repeatability of positioning of linear and rotary axes*
125. ISO 10791-5:1998 - *Test conditions for machining centres — Part 5: Accuracy and repeatability of positioning of work-holding pallets*
126. ISO 10791-10:2007 - *Test conditions for machining centres — Part 10: Evaluation of thermal distortions*
127. ISO 13041-8:2004 - *Test Conditions for Numerically Controlled Turning Machines and Turning Centres – Part 8: Evaluation of Thermal Distortions*
128. ISO 6983-1:2009 - *Numerical control of machines – program format and definition of address words – part 1: Data format for positioning, line motion and contouring control systems. Iso, International Organization for Standardization*
129. IEC 60751:2008 - *Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors*
130. EA-4/02:1999 - *Wyrażanie niepewności przy wzorcowaniu*

131. Automatyka. Numer 3/2017. ISSN 2392-1056 str. 64-68
132. Oficjalna strona SIEMENS. URL: [www.new.siemens.com/pl/pl/produkty/automatyka/systemy/cnc-sinumerik/sinutrain.html](http://www.new.siemens.com/pl/pl/produkty/automatyka/systemy/cnc-sinumerik/sinutrain.html), (dostęp 14.01.2022)
133. Oficjalna strona IBSPE. URL: [www.ibspe.com/machine-qualification](http://www.ibspe.com/machine-qualification), (dostęp 14.03.2022)
134. Heidenhain (1998). *Technial manual TNC 407/TNC 415/TNC 425*
135. Siemens (2012). *Function Manual Sinumerik 840D sl / 828D Extended Functions*
136. Siemens (2013). *Instrukcja producenta/serwisowa SINUMERIK 840D sl/828. Function Manual Synchronized Actions*
137. Renishaw (2022). *Laserowe systemy do ustawiania narzędzi o wysokiej dokładności*
138. Renishaw (2009). *RMP600 high accuracy radio machine probe*
139. Siemens (2018). *SINUMERIK 840D sl/828D - Cykle pomiarowe. Podręcznik programowania*
140. Siemens (2018). *SINUMERIK 840Dsl/828D - Access MyMachine-OPC UA*
141. Siemens (2006). *SINUMERIK 840Dsl/828D - Programming Manual*
142. Siemens (2009). *SINUMERIK 5-axis machining - Manual Edition*
143. Fanuc (2016). *Fanuc Focas Ethernet Driver*

# ZAŁĄCZNIKI

## Zał. 1. Szkic części testowej



Rys. Z.1. Szkic części testowej

## Zał. 2. Lista pakietów użytych podczas analiz statystycznych w oprogramowaniu IDE RStudio

Tab. Z.2. Lista pakietów użytych podczas analiz statystycznych w oprogramowaniu IDE RStudio

<i>Pakiet</i>	<i>Wersja</i>
<i>zoo</i>	1.8.9
<i>lmtest</i>	0.9.38
<i>PerformanceAnalytics</i>	2.0.4
<i>readxl</i>	1.3.1
<i>xts</i>	0.12.1
<i>car</i>	3.0.11
<i>carData</i>	3.0.4
<i>MVN</i>	5.9
<i>sjmisc</i>	2.8.7
<i>sjlabelled</i>	1.1.8
<i>sjPlot</i>	2.8.9
<i>report</i>	0.5.1
<i>energy</i>	1.7.9
<i>nlme</i>	3.1.152
<i>foreign</i>	0.8.81
<i>psych</i>	2.1.6
<i>orcutt</i>	2.3
<i>MASS</i>	7.3.54

## Zał. 3. Dane eksperymentalne wykorzystane do opracowania modeli

Tab. Z.3. Dane eksperymentalne wykorzystane do opracowania modeli zmiennej objaśnianej  $y$  oraz  $x$

nr obs.	nr eks.	$\delta T_{co}$ [°C]	$\delta T_{cl}$ [°C]	$\delta T_{x1}$ [°C]	$\delta T_{x2}$ [°C]	$\delta T_{env}$ [°C]	$\delta T_{y1}$ [°C]	$\delta T_{y2}$ [°C]	$\delta T_z$ [°C]	$\Delta y$ [mm]	$\Delta x$ [mm]
1	E1	0,19	-0,04	-0,05	0,03	-0,28	-0,08	0,02	-0,06	-0,0034	-0,0006
2	E1	-0,06	0,11	-0,02	0,03	-0,29	-0,10	0,03	-0,04	-0,0022	0,0010
3	E1	0,08	0,21	-0,02	0,01	-0,37	-0,14	0,03	-0,08	-0,0022	0,0002
4	E1	0,11	0,30	0,01	0,01	-0,36	-0,15	0,00	-0,08	0,0000	0,0010
5	E1	0,29	0,21	0,02	0,06	-0,12	-0,05	0,01	-0,05	-0,0016	0,0016
6	E1	0,16	-0,05	-0,05	0,06	-0,17	-0,03	-0,02	-0,02	0,0320	0,0010
7	E1	-0,21	-0,06	-0,08	0,05	-0,23	-0,03	-0,01	0,00	-0,0051	0,0009
8	E1	0,11	0,26	-0,03	-0,01	-0,42	-0,05	0,04	-0,02	-0,0054	0,0001
9	E1	-0,36	0,61	0,11	0,07	-0,43	-0,16	0,01	-0,06	0,0021	-0,0015
10	E1	-0,45	0,58	0,13	0,04	-0,53	-0,18	0,00	-0,06	0,0027	-0,0006
11	E1	-0,45	0,48	0,15	0,01	-0,55	-0,20	-0,04	-0,09	0,0034	0,0001
12	E1	-0,34	-0,86	0,01	0,02	-0,50	-0,21	-0,08	-0,11	-0,0078	-0,0001
13	E1	-0,41	-0,24	0,02	0,01	-0,67	-0,30	-0,16	-0,17	0,0058	0,0009
14	E1	-0,05	0,01	0,07	0,03	-0,25	-0,31	-0,20	-0,11	0,0094	0,0014
15	E1	0,30	0,27	0,09	0,03	-0,16	-0,24	-0,14	-0,05	0,0096	0,0022
16	E2	-0,19	-0,12	-0,15	-0,01	-0,59	0,00	0,07	-0,17	-0,0035	-0,0005
17	E2	-0,41	-0,14	-0,17	-0,04	-0,82	-0,20	0,11	-0,29	-0,0032	-0,0011
18	E2	-0,49	-0,02	-0,14	-0,10	-1,01	-0,23	0,09	-0,41	-0,0048	-0,0003

**Tab. Z.3. cd.** Dane eksperymentalne wykorzystane do opracowania modeli zmiennej objaśnianej  $y$  oraz  $x$

nr obs.	nr eks.	$\delta T_{co}$ [°C]	$\delta T_{cl}$ [°C]	$\delta T_{x1}$ [°C]	$\delta T_{x2}$ [°C]	$\delta T_{env}$ [°C]	$\delta T_{y1}$ [°C]	$\delta T_{y2}$ [°C]	$\delta T_z$ [°C]	$\Delta y$ [mm]	$\Delta x$ [mm]
19	E2	-0,63	-0,02	-0,09	-0,08	-0,96	-0,30	0,08	-0,51	-0,0027	-0,0002
20	E2	-0,30	-0,07	-0,12	-0,11	0,08	-0,24	-0,01	-0,42	-0,0048	0,0005
21	E2	-0,35	-0,28	-0,18	-0,09	0,11	-0,20	-0,01	-0,36	-0,0080	0,0000
22	E2	-0,59	-0,25	-0,19	-0,05	0,11	-0,15	0,02	-0,32	-0,0072	0,0007
23	E2	-0,35	0,09	-0,08	-0,03	0,28	-0,17	0,02	-0,27	-0,0078	0,0006
24	E2	-0,65	0,28	0,12	0,04	0,40	-0,14	0,11	-0,14	-0,0011	-0,0001
25	E2	-0,67	0,31	0,17	0,06	0,53	-0,13	0,08	-0,15	-0,0006	-0,0011
26	E2	-0,68	0,34	0,20	0,05	0,60	-0,11	0,08	-0,14	0,0000	-0,0004
27	E2	-0,12	-0,35	0,30	0,11	0,60	-0,04	0,17	-0,06	-0,0058	-0,0008
28	E2	-0,36	-0,11	0,26	0,21	0,89	0,26	0,24	-0,25	0,0011	-0,0008
29	E2	0,00	0,07	0,38	0,20	0,83	0,24	0,21	-0,19	0,0029	-0,0004
30	E2	0,18	0,21	0,40	0,20	0,83	0,23	0,31	-0,15	0,0021	0,0017
31	E3	0,00	-0,22	-0,06	0,00	-0,55	-0,05	0,03	0,04	-0,0030	-0,0005
32	E3	-0,18	-0,12	-0,08	-0,02	-0,62	-0,02	0,01	0,02	-0,0018	-0,0001
33	E3	-0,05	-0,03	-0,08	-0,02	-0,69	-0,10	0,08	-0,02	-0,0034	0,0003
34	E3	-0,02	-0,03	-0,07	0,01	-0,72	-0,11	0,08	-0,05	-0,0011	-0,0003
35	E3	-0,06	-0,19	-0,14	0,05	-0,51	-0,18	0,04	-0,16	-0,0034	-0,0002
36	E3	-0,28	-0,71	-0,23	0,01	-0,72	-0,24	-0,02	-0,15	-0,0054	-0,0009
37	E3	-0,67	-0,64	-0,22	0,02	-0,79	-0,27	0,00	-0,19	-0,0053	-0,0010
38	E3	-0,40	-0,31	-0,26	-0,02	-0,79	-0,31	-0,03	-0,32	-0,0048	-0,0015
39	E3	-0,82	-0,12	-0,16	0,01	-1,07	-0,57	-0,10	-0,41	0,0034	-0,0039
40	E3	-0,78	-0,13	-0,15	0,00	-1,12	-0,55	-0,16	-0,46	0,0038	-0,0037
41	E3	-0,66	-0,13	-0,13	-0,02	-1,12	-0,67	-0,23	-0,49	0,0056	-0,0038
42	E3	-0,51	-0,83	-0,13	-0,04	-1,19	-0,64	-0,22	-0,54	-0,0003	-0,0034
43	E3	-0,79	-0,43	-0,10	0,00	-0,83	-0,63	-0,28	-0,57	0,0085	-0,0043
44	E3	-0,53	-0,14	-0,05	-0,03	-0,98	-0,51	-0,34	-0,57	0,0107	-0,0050
45	E3	-0,48	-0,32	-0,04	-0,04	-0,63	-0,45	-0,27	-0,59	0,0085	-0,0035
46	E4	0,07	0,03	-0,03	0,02	0,07	-0,03	0,08	0,01	-0,0035	-0,0015
47	E4	-0,04	0,20	0,04	-0,02	0,08	0,01	0,08	0,00	-0,0024	-0,0018
48	E4	0,11	0,36	0,03	-0,03	0,10	0,02	0,14	-0,01	-0,0026	-0,0006
49	E4	0,06	0,52	0,06	-0,01	0,10	-0,05	0,14	0,01	-0,0008	-0,0016
50	E4	0,25	0,06	0,06	-0,01	-0,05	0,04	0,11	-0,01	-0,0056	-0,0005
51	E4	-0,03	-0,10	-0,05	0,05	-0,17	0,00	0,12	0,00	-0,0080	-0,0015
52	E4	-0,30	-0,08	-0,03	0,04	-0,16	0,03	0,17	-0,01	-0,0064	-0,0008
53	E4	0,14	-0,63	0,07	0,01	-0,17	-0,06	0,16	-0,05	-0,0080	-0,0016
54	E4	-0,49	0,29	0,20	0,07	-0,30	-0,14	0,15	-0,08	-0,0018	-0,0026
55	E4	-0,50	0,43	0,23	0,04	-0,37	-0,08	0,16	-0,12	-0,0005	-0,0030
56	E4	-0,33	0,39	0,29	0,02	-0,38	-0,13	0,15	-0,17	0,0016	-0,0034
57	E4	0,05	0,65	0,32	0,04	-0,38	-0,11	0,16	-0,17	0,0006	-0,0026
58	E4	-0,59	-0,28	0,10	0,11	-0,29	-0,09	0,08	-0,15	-0,0002	-0,0034
59	E4	-0,13	0,19	0,11	0,03	-0,38	-0,02	0,04	-0,18	0,0019	-0,0030
60	E4	0,06	0,41	0,14	0,03	-0,49	-0,09	0,10	-0,21	0,0010	-0,0005
61	E5	0,20	0,09	-0,07	-0,04	-0,16	-0,03	0,07	0,00	-0,0008	-0,0001
62	E5	0,00	0,24	-0,05	-0,06	-0,24	0,01	0,06	0,00	-0,0008	0,0013
63	E5	0,03	0,35	0,02	-0,01	-0,31	-0,04	0,07	-0,03	-0,0003	0,0004
64	E5	-0,09	0,41	0,03	-0,04	-0,32	-0,02	0,07	-0,03	0,0019	0,0013
65	E5	0,19	0,16	0,08	-0,03	-0,18	0,07	0,03	-0,06	0,0008	0,0033
66	E5	0,06	-0,15	-0,04	-0,01	-0,26	0,01	0,04	-0,06	-0,0024	0,0013
67	E5	-0,39	-0,09	-0,03	-0,03	-0,29	0,00	0,05	-0,03	-0,0014	0,0005
68	E5	0,03	0,20	-0,02	-0,07	-0,44	0,00	0,06	-0,07	-0,0018	0,0005
69	E5	-0,39	0,36	0,16	-0,05	-0,46	-0,16	0,03	-0,12	0,0046	-0,0005
70	E5	-0,47	0,38	0,19	-0,03	-0,46	-0,24	0,02	-0,10	0,0051	0,0008
71	E5	-0,36	0,38	0,19	-0,05	-0,44	-0,18	-0,07	-0,12	0,0070	0,0011
72	E5	0,08	0,49	0,23	-0,05	-0,38	-0,10	0,00	-0,16	0,0059	0,0021
73	E5	-0,29	0,46	0,38	-0,02	-0,37	-0,05	-0,03	-0,08	-0,0200	0,0005

**Tab. Z.3. cd.** Dane eksperymentalne wykorzystane do opracowania modeli zmiennej objaśnianej  $y$  oraz  $x$

nr obs.	nr eks.	$\delta T_{co}$ [°C]	$\delta T_{cl}$ [°C]	$\delta T_{x1}$ [°C]	$\delta T_{x2}$ [°C]	$\delta T_{env}$ [°C]	$\delta T_{y1}$ [°C]	$\delta T_{y2}$ [°C]	$\delta T_z$ [°C]	$\Delta y$ [mm]	$\Delta x$ [mm]
74	E5	0,12	0,12	0,42	0,00	-0,19	0,03	-0,08	-0,05	0,0096	0,0019
75	E5	0,35	0,40	0,47	0,04	0,01	0,19	0,02	0,01	0,0090	0,0010
76	E6	0,09	-0,09	0,05	0,05	1,36	0,02	0,11	0,09	-0,0005	0,0002
77	E6	0,11	-0,01	0,12	0,05	1,37	0,07	0,11	0,15	-0,0006	0,0012
78	E6	0,41	0,19	0,16	0,07	1,59	0,08	0,15	0,21	-0,0006	-0,0009
79	E6	0,43	0,34	0,17	0,10	1,53	0,06	0,12	0,29	0,0008	0,0006
80	E6	0,64	0,30	0,29	0,20	1,02	0,38	0,27	0,39	-0,0032	0,0006
81	E6	0,44	0,48	0,27	0,16	0,62	0,28	0,27	0,39	0,0002	0,0002
82	E6	-0,01	0,27	0,30	0,19	0,59	0,23	0,28	0,39	-0,0002	-0,0009
83	E6	0,29	0,27	0,25	0,17	0,12	0,17	0,21	0,28	-0,0019	-0,0013
84	E6	-0,62	-0,11	0,29	0,13	-0,08	-0,07	0,21	0,06	0,0022	-0,0030
85	E6	-0,63	-0,14	0,26	0,14	-0,21	-0,06	0,19	0,03	0,0008	-0,0011
86	E6	-0,51	-0,12	0,24	0,10	-0,26	-0,10	0,09	-0,05	0,0022	-0,0012
87	E6	-0,28	0,14	0,23	0,08	-0,24	-0,19	0,11	-0,12	0,0019	-0,0013
88	E6	-0,12	-0,03	0,29	0,21	1,14	0,06	0,09	0,08	0,0093	-0,0016
89	E6	0,39	0,50	0,48	0,26	1,29	0,17	0,04	0,21	0,0109	0,0003
90	E6	0,46	0,42	0,61	0,31	1,09	0,31	0,14	0,26	0,0112	-0,0013
91	E7	-0,14	-0,19	0,08	-0,01	-0,48	-0,03	0,14	0,02	0,0000	-0,0022
92	E7	-0,21	-0,05	0,09	-0,04	-0,77	-0,07	0,12	-0,01	-0,0002	0,0014
93	E7	-0,09	0,08	0,09	-0,01	-0,94	-0,03	0,12	-0,03	-0,0014	0,0022
94	E7	-0,16	-0,01	0,11	-0,04	-1,00	-0,15	0,13	-0,09	0,0002	0,0014
95	E7	-0,22	-0,42	-0,05	-0,04	-1,04	-0,15	0,06	-0,24	-0,0045	-0,0002
96	E7	-0,46	-0,47	-0,09	-0,02	-1,34	-0,27	0,10	-0,29	-0,0050	-0,0008
97	E7	-0,75	-0,43	-0,06	-0,05	-1,46	-0,35	0,04	-0,33	-0,0038	0,0018
98	E7	-0,66	-0,40	-0,02	-0,09	-1,08	-0,37	-0,03	-0,41	-0,0034	-0,0013
99	E7	-0,72	-0,16	0,03	0,02	0,11	-0,19	0,00	-0,20	-0,0005	-0,0005
100	E7	-0,65	-0,43	0,10	0,03	0,19	-0,21	0,02	-0,14	-0,0006	-0,0002
101	E7	-0,66	-0,38	0,13	0,05	0,08	-0,10	0,03	-0,06	-0,0014	0,0004
102	E7	-0,10	0,10	0,16	0,15	-0,37	-0,05	0,08	-0,01	-0,0002	0,0010
103	E7	-1,16	-0,90	0,07	0,02	-1,54	-0,26	-0,06	-0,55	-0,0003	-0,0014
104	E7	-0,62	-0,51	-0,01	0,02	-0,92	-0,23	-0,18	-0,58	0,0016	0,0001
105	E7	-0,28	-0,17	0,09	0,03	-0,21	-0,16	-0,12	-0,50	0,0019	0,0011
106	E8	-0,23	0,15	-0,05	0,00	0,17	-0,04	-0,07	0,02	0,0006	-0,0011
107	E8	0,49	0,41	0,06	0,09	1,57	0,29	0,00	0,25	-0,0014	-0,0003
108	E8	0,55	0,64	0,10	0,11	1,62	0,36	0,03	0,34	0,0006	-0,0003
109	E8	0,13	0,55	0,18	0,14	1,55	0,42	0,09	0,38	0,0013	0,0012
110	E8	0,33	0,58	0,22	0,14	0,96	0,39	0,14	0,40	-0,0016	0,0002
111	E8	-0,15	0,43	0,22	0,13	0,31	0,06	0,09	0,26	0,0040	-0,0004
112	E8	-0,28	0,23	0,19	0,17	0,32	0,08	0,06	0,22	0,0043	-0,0019
113	E8	-0,38	0,01	0,15	0,13	0,20	0,13	0,05	0,20	0,0030	-0,0018
114	E8	0,06	0,39	0,11	0,08	-0,02	-0,05	0,01	0,10	0,0027	-0,0017
115	E8	-0,61	-0,07	0,04	0,04	-0,29	-0,19	-0,09	-0,17	0,0072	-0,0023
116	E8	-0,27	0,16	0,10	-0,05	-0,19	-0,21	-0,24	-0,26	0,0085	-0,0022
117	E8	-0,31	-0,15	0,03	-0,03	-0,17	-0,16	-0,17	-0,27	0,0046	-0,0001
118	E9	0,23	0,04	0,01	0,02	-0,12	0,09	0,07	-0,03	-0,0011	-0,0025
119	E9	-0,13	-0,07	0,01	0,00	-0,20	0,07	0,04	-0,04	-0,0032	0,0009
120	E9	0,11	0,12	0,00	-0,01	-0,37	0,00	0,11	-0,05	-0,0042	-0,0034
121	E9	-0,03	0,16	0,04	-0,01	-0,30	0,01	0,13	-0,07	-0,0019	0,0008
122	E9	0,32	0,00	0,00	0,05	0,08	0,07	0,10	-0,09	-0,0050	0,0026
123	E9	0,26	0,09	0,00	0,09	0,00	0,05	0,14	-0,05	-0,0048	0,0019
124	E9	0,00	0,21	0,02	0,08	-0,01	0,04	0,17	-0,04	-0,0035	0,0001
125	E9	0,11	0,20	0,09	0,07	-0,24	0,14	0,17	-0,05	-0,0058	-0,0004
126	E9	-0,44	0,23	0,08	0,15	-0,36	0,02	0,18	0,00	-0,0022	-0,0018
127	E9	-0,58	-0,21	0,13	0,11	-0,45	-0,04	0,18	-0,03	-0,0021	-0,0004
128	E9	-0,45	-0,27	0,11	0,11	-0,50	-0,04	0,11	-0,06	-0,0034	-0,0007



**Tab. Z.3. cd.** Dane eksperymentalne wykorzystane do opracowania modeli zmiennej objaśnianej  $y$  oraz  $x$

nr obs.	nr eks.	$\delta T_{co}$ [°C]	$\delta T_{cl}$ [°C]	$\delta T_{x1}$ [°C]	$\delta T_{x2}$ [°C]	$\delta T_{env}$ [°C]	$\delta T_{y1}$ [°C]	$\delta T_{y2}$ [°C]	$\delta T_z$ [°C]	$\Delta y$ [mm]	$\Delta x$ [mm]
129	E9	-0,14	-0,47	0,14	0,07	-0,54	-0,03	0,12	-0,08	-0,0074	0,0004
130	E9	-0,38	-0,13	0,25	0,16	-0,31	0,01	0,09	-0,11	0,0034	0,0004
131	E9	-0,02	0,19	0,18	0,12	-0,33	0,15	0,04	-0,08	0,0029	0,0011
132	E9	-0,07	-0,03	0,16	0,18	-0,32	0,15	0,12	-0,05	-0,0005	-0,0007
133	E10	-0,92	-0,10	0,08	0,06	-0,36	-0,08	0,05	-0,12	0,0043	-0,0050
134	E10	-1,04	-0,37	0,09	0,07	-0,41	-0,14	0,06	-0,12	0,0029	-0,0033
135	E10	-0,85	-0,27	0,06	0,07	-0,62	-0,12	0,07	-0,14	0,0016	-0,0049
136	E10	-1,02	-0,10	0,09	0,06	-0,66	-0,19	0,07	-0,18	0,0046	-0,0035
137	E10	-0,89	-0,35	0,01	-0,01	-0,44	-0,11	0,01	-0,23	0,0000	-0,0011
138	E10	-0,74	-0,12	0,05	0,06	-0,57	-0,21	0,01	-0,22	0,0029	-0,0035
139	E10	-1,04	-0,19	0,05	0,06	-0,51	-0,24	-0,02	-0,25	0,0042	-0,0057
140	E10	-1,05	-0,09	0,10	0,08	-0,46	-0,27	0,01	-0,26	0,0018	-0,0054
141	E10	-1,57	-0,34	0,08	0,11	-0,45	-0,34	-0,06	-0,24	0,0066	-0,0058
142	E10	-1,63	-0,65	0,07	0,14	-0,39	-0,37	-0,02	-0,23	0,0056	-0,0045
143	E10	-1,44	-0,47	0,11	0,13	-0,46	-0,32	-0,05	-0,22	0,0050	-0,0038
144	E10	-1,11	-0,11	0,16	0,08	-0,28	-0,32	-0,02	-0,27	0,0058	-0,0038
145	E10	-1,31	-0,11	0,17	0,12	-0,41	-0,25	-0,04	-0,22	0,0130	-0,0045
146	E10	-0,99	-0,20	0,12	0,10	-0,44	-0,19	-0,09	-0,24	0,0115	-0,0036
147	E10	-0,89	-0,40	0,15	0,09	-0,26	-0,24	-0,01	-0,21	0,0099	-0,0044
148	E11	-0,25	-0,45	-0,01	0,01	-0,43	-0,02	0,09	-0,02	-0,0018	-0,0016
149	E11	-0,43	-0,25	-0,03	-0,06	-0,72	-0,04	0,08	-0,07	-0,0019	-0,0003
150	E11	-0,26	-0,35	0,00	-0,05	-0,64	-0,10	0,13	-0,13	-0,0030	-0,0004
151	E11	-0,49	-0,45	0,01	-0,05	-0,62	-0,13	0,06	-0,15	-0,0021	-0,0008
152	E11	-0,10	-0,53	-0,04	-0,01	-0,50	-0,24	0,07	-0,26	-0,0032	0,0007
153	E11	-0,06	-0,22	-0,02	-0,04	-0,76	-0,30	0,04	-0,33	-0,0021	0,0012
154	E11	-0,48	-0,27	-0,04	-0,04	-0,79	-0,31	-0,03	-0,35	-0,0013	-0,0013
155	E11	-0,39	-0,46	-0,05	-0,03	-0,85	-0,29	0,01	-0,38	-0,0042	-0,0021
156	E11	-0,70	-0,35	-0,03	-0,02	-1,00	-0,57	-0,07	-0,43	0,0016	-0,0036
157	E11	-0,72	-0,30	-0,06	-0,04	-1,19	-0,60	-0,11	-0,44	0,0029	-0,0013
158	E11	-0,80	-0,23	-0,05	-0,01	-1,33	-0,65	-0,12	-0,45	0,0043	-0,0017
159	E11	-0,45	-0,42	-0,07	-0,06	-0,82	-0,53	-0,13	-0,40	0,0014	-0,0007
160	E11	-0,51	-0,25	0,06	0,00	0,18	-0,17	-0,11	-0,17	0,0066	0,0006
161	E11	-0,22	-0,08	0,16	0,05	0,06	-0,06	-0,10	-0,05	0,0091	0,0020
162	E11	-0,16	-0,20	0,11	0,10	-0,36	-0,01	0,00	-0,03	0,0034	0,0010
163	E12	0,06	-0,05	0,06	0,06	0,03	-0,02	0,05	0,00	-0,0029	-0,0005
164	E12	-0,03	0,09	0,10	0,06	-0,12	-0,04	0,06	0,01	-0,0003	0,0004
165	E12	0,01	-0,07	0,09	0,05	-0,11	-0,10	0,05	-0,02	-0,0027	-0,0004
166	E12	-0,13	-0,24	0,08	0,05	-0,13	-0,11	0,09	0,00	-0,0022	0,0004
167	E12	0,10	-0,14	0,05	0,03	-0,19	-0,12	0,03	-0,06	-0,0030	0,0013
168	E12	-0,15	-0,19	0,01	0,02	-0,33	-0,09	0,03	-0,08	-0,0038	0,0015
169	E12	-0,41	-0,06	0,06	0,03	-0,34	-0,14	0,05	-0,11	-0,0019	0,0000
170	E12	-0,20	-0,14	0,05	0,04	-0,30	-0,12	0,02	-0,12	-0,0053	0,0003
171	E12	-0,61	-0,22	0,05	0,07	-0,22	-0,19	-0,01	-0,12	-0,0010	-0,0020
172	E12	-0,51	-0,16	0,05	0,08	-0,25	-0,18	0,01	-0,10	-0,0003	-0,0003
173	E12	-0,55	-0,06	0,09	0,07	-0,34	-0,26	-0,05	-0,12	0,0008	0,0000
174	E12	-0,29	-0,15	0,06	0,07	-0,40	-0,30	-0,09	-0,16	-0,0018	-0,0002
175	E12	-0,54	-0,07	0,05	0,04	-0,42	-0,30	-0,07	-0,18	0,0029	0,0005
176	E12	-0,20	-0,02	0,03	0,05	-0,45	-0,33	-0,19	-0,21	0,0018	0,0018
177	E12	-0,17	-0,33	-0,01	0,01	-0,42	-0,36	-0,13	-0,19	0,0005	0,0000
178	E13	-0,94	-0,11	0,02	0,03	0,02	0,08	0,00	0,00	0,0026	-0,0040
179	E13	-0,77	0,10	0,04	0,02	-0,08	0,08	0,06	-0,01	0,0040	-0,0042
180	E13	-1,07	-0,20	0,08	0,05	-0,15	0,14	0,13	-0,03	0,0024	-0,0034
181	E13	-0,89	0,10	0,10	0,07	-0,28	0,10	0,17	-0,03	0,0010	-0,0045
182	E13	-0,91	0,01	0,08	0,05	-0,32	0,00	0,19	-0,04	0,0042	-0,0032
183	E13	-0,72	-0,05	0,06	0,02	-0,29	0,05	0,18	-0,11	0,0005	-0,0021

**Tab. Z.3. cd.** Dane eksperymentalne wykorzystane do opracowania modeli zmiennej objaśnianej  $y$  oraz  $x$

nr obs.	nr eks.	$\delta T_{co}$ [°C]	$\delta T_{cl}$ [°C]	$\delta T_{x1}$ [°C]	$\delta T_{x2}$ [°C]	$\delta T_{env}$ [°C]	$\delta T_{y1}$ [°C]	$\delta T_{y2}$ [°C]	$\delta T_z$ [°C]	$\Delta y$ [mm]	$\Delta x$ [mm]
184	E13	-0,99	-0,09	0,07	0,08	-0,29	0,07	0,19	-0,11	-0,0002	-0,0032
185	E13	-1,21	-0,06	0,10	0,11	-0,27	0,11	0,21	-0,14	0,0010	-0,0055
186	E13	-0,90	-0,08	0,12	0,10	-0,31	0,05	0,19	-0,14	-0,0006	-0,0043
187	E13	-1,40	-0,28	0,15	0,15	-0,48	-0,09	0,18	-0,14	0,0022	-0,0041
188	E13	-1,53	-0,42	0,12	0,15	-0,50	-0,06	0,21	-0,18	0,0019	-0,0051
189	E13	-1,32	-0,38	0,13	0,13	-0,58	-0,06	0,25	-0,17	0,0003	-0,0049
190	E13	-0,95	0,15	0,17	0,16	-0,55	-0,05	0,11	-0,18	0,0019	0,0012
191	E13	-1,15	0,00	0,17	0,14	-0,58	-0,20	0,13	-0,30	0,0038	-0,0042
192	E13	-1,07	0,03	0,23	0,20	-0,10	-0,08	0,05	-0,25	0,0021	-0,0034
193	E13	-1,01	-0,15	0,15	0,17	-0,10	-0,02	0,18	-0,22	-0,0021	-0,0045
194	E14	-1,14	-0,33	0,05	0,02	-0,22	0,06	0,04	-0,01	0,0018	-0,0048
195	E14	-1,06	-0,17	0,13	0,06	-0,35	0,00	0,10	-0,01	0,0021	-0,0047
196	E14	-1,27	-0,29	0,14	0,05	-0,43	0,02	0,17	0,02	0,0002	-0,0023
197	E14	-1,00	-0,06	0,16	0,04	-0,50	-0,02	0,20	-0,07	-0,0003	-0,0042
198	E14	-1,20	-0,50	0,19	0,02	-0,50	-0,01	0,23	-0,08	0,0008	-0,0033
199	E14	-0,92	-0,28	0,17	0,04	-0,60	0,01	0,22	-0,18	-0,0014	-0,0025
200	E14	-1,05	-0,33	0,16	0,06	-0,65	0,08	0,27	-0,18	-0,0034	-0,0042
201	E14	-1,38	-0,24	0,17	0,04	-0,74	0,04	0,26	-0,21	-0,0026	-0,0060
202	E14	-1,17	-0,32	0,17	0,07	-0,71	-0,02	0,25	-0,22	-0,0032	-0,0055
203	E14	-1,51	-0,13	0,23	0,09	-0,79	-0,10	0,28	-0,29	0,0003	-0,0041
204	E14	-1,75	-0,39	0,23	0,12	-0,83	-0,14	0,22	-0,30	0,0002	-0,0040
205	E14	-1,65	-0,65	0,20	0,06	-0,96	-0,24	0,26	-0,29	-0,0010	-0,0040
206	E14	-1,42	-0,21	0,18	0,11	-1,04	-0,18	0,22	-0,36	-0,0014	-0,0036
207	E14	-1,65	-0,35	0,19	0,11	-1,11	-0,25	0,17	-0,45	-0,0006	-0,0038
208	E14	-1,42	-0,32	0,26	0,11	-1,07	-0,21	0,11	-0,44	0,0011	-0,0027
209	E14	-1,47	-0,49	0,21	0,06	-0,96	-0,18	0,15	-0,42	-0,0032	-0,0043
210	E15	-0,86	-0,20	-0,02	0,02	-0,01	-0,08	-0,11	-0,04	0,0037	-0,0002
211	E15	-1,29	-0,45	-0,07	0,01	-0,70	-0,26	-0,13	-0,25	0,0042	-0,0047
212	E15	-1,06	-0,17	-0,05	0,01	-0,69	-0,32	-0,09	-0,34	0,0032	-0,0016
213	E15	-1,17	-0,40	-0,05	-0,02	-0,60	-0,30	-0,11	-0,37	0,0032	-0,0045
214	E15	-0,95	-0,37	-0,13	-0,03	-0,08	-0,24	-0,17	-0,39	0,0014	-0,0033
215	E15	-1,09	-0,37	-0,16	-0,03	-0,08	-0,10	-0,11	-0,36	-0,0002	-0,0042
216	E15	-1,33	-0,26	-0,13	-0,03	-0,10	-0,18	-0,11	-0,36	0,0011	-0,0013
217	E15	-0,99	-0,27	-0,11	0,00	0,08	-0,13	-0,08	-0,28	-0,0019	-0,0006
218	E15	-1,53	-0,28	-0,05	0,08	-0,01	-0,14	-0,11	-0,19	0,0011	-0,0033
219	E15	-1,45	-0,07	-0,04	0,08	-0,12	-0,17	-0,10	-0,17	0,0027	-0,0046
220	E15	-1,49	-0,11	0,01	0,08	-0,08	-0,23	-0,12	-0,15	0,0038	-0,0048
221	E15	-1,13	-0,17	0,01	0,06	-0,09	-0,16	-0,11	-0,19	0,0002	-0,0050
222	E15	-1,37	-0,05	0,00	0,18	-0,20	-0,18	-0,11	-0,12	0,0070	-0,0049
223	E15	-1,06	-0,03	-0,01	0,13	-0,26	-0,19	-0,17	-0,12	0,0064	-0,0045
224	E15	-1,15	-0,45	0,02	0,14	-0,36	-0,23	-0,14	-0,10	0,0032	-0,0021
225	E16	-0,91	-0,31	0,04	0,01	0,02	0,02	0,04	0,02	0,0027	0,0003
226	E16	-0,84	-0,11	0,05	0,01	-0,21	0,03	0,07	0,01	0,0008	-0,0001
227	E16	-0,98	-0,34	0,07	-0,01	-0,20	-0,02	0,10	-0,09	0,0026	-0,0021
228	E16	-1,01	-0,58	0,07	0,04	-0,11	-0,05	0,10	-0,09	-0,0014	0,0000
229	E16	-0,97	-0,77	0,09	0,05	-0,09	-0,09	0,13	-0,14	0,0002	-0,0036
230	E16	-0,73	-0,18	0,09	0,03	-0,08	-0,05	0,12	-0,19	0,0006	-0,0024
231	E16	-0,92	-0,20	0,11	0,07	-0,16	0,04	0,13	-0,17	0,0008	-0,0031
232	E16	-1,25	-0,33	0,13	0,03	-0,18	-0,03	0,12	-0,20	0,0010	0,0002
233	E16	-0,92	-0,24	0,13	0,04	-0,34	-0,03	0,15	-0,25	-0,0011	-0,0008
234	E16	-1,49	-0,58	0,14	0,07	-0,43	-0,23	0,12	-0,31	0,0037	-0,0009
235	E16	-1,44	-0,69	0,13	0,06	-0,48	-0,25	0,05	-0,31	0,0034	-0,0039
236	E16	-1,42	-0,47	0,12	0,03	-0,51	-0,28	0,04	-0,34	0,0022	-0,0028
237	E16	-1,06	-0,23	0,14	0,04	-0,32	-0,33	0,01	-0,38	0,0048	-0,0031
238	E16	-1,32	-0,17	0,16	0,12	-0,45	-0,30	-0,01	-0,37	0,0072	-0,0031

**Tab. Z.3. cd.** Dane eksperymentalne wykorzystane do opracowania modeli zmiennej objaśnianej  $y$  oraz  $x$

nr obs.	nr eks.	$\delta T_{co}$ [°C]	$\delta T_{cl}$ [°C]	$\delta T_{x1}$ [°C]	$\delta T_{x2}$ [°C]	$\delta T_{env}$ [°C]	$\delta T_{y1}$ [°C]	$\delta T_{y2}$ [°C]	$\delta T_z$ [°C]	$\Delta y$ [mm]	$\Delta x$ [mm]
239	E16	-1,09	-0,59	0,11	0,06	-0,55	-0,34	-0,10	-0,35	0,0038	-0,0038
240	E16	-0,95	-0,30	0,08	0,02	-0,61	-0,34	-0,05	-0,39	0,0037	-0,0005
241	E17	-0,98	-0,35	0,02	-0,03	-0,04	-0,01	-0,03	0,02	0,0019	-0,0039
242	E17	-0,78	-0,29	0,05	0,00	-0,16	0,01	0,06	0,00	0,0013	-0,0051
243	E17	-1,12	-0,47	0,05	0,03	-0,22	-0,05	0,05	-0,03	0,0002	-0,0026
244	E17	-0,87	-0,29	0,05	-0,03	-0,32	-0,01	0,04	-0,04	-0,0005	-0,0047
245	E17	-1,11	-1,03	0,05	-0,02	-0,23	-0,07	0,08	-0,06	0,0022	-0,0033
246	E17	-0,70	-0,34	0,06	-0,03	-0,11	-0,09	0,11	-0,09	0,0018	-0,0038
247	E17	-0,81	-0,32	0,04	0,00	-0,27	-0,02	0,06	-0,08	0,0003	-0,0049
248	E17	-1,23	-0,45	0,06	0,01	-0,30	-0,02	0,03	-0,07	0,0014	-0,0043
249	E17	-0,71	-0,33	0,06	0,04	-0,43	-0,11	0,06	-0,11	0,0005	-0,0051
250	E17	-1,33	-0,55	0,05	0,02	-0,40	-0,22	0,02	-0,17	0,0051	-0,0051
251	E17	-1,55	-0,92	0,07	0,03	-0,45	-0,25	0,03	-0,18	0,0050	-0,0049
252	E17	-1,27	-0,79	0,02	-0,01	-0,55	-0,23	-0,03	-0,19	0,0035	-0,0051
253	E17	-1,03	-0,26	0,07	0,03	-0,35	-0,30	-0,03	-0,22	0,0050	-0,0037
254	E17	-1,06	-0,35	0,09	0,06	-0,69	-0,33	-0,13	-0,20	0,0080	-0,0045
255	E17	-1,11	-0,72	0,07	0,05	-0,58	-0,26	-0,11	-0,28	0,0067	-0,0041
256	E17	-0,86	-0,57	0,02	0,08	-0,65	-0,24	-0,06	-0,25	0,0048	-0,0048
257	E18	-0,91	0,29	0,01	0,04	-0,23	-0,07	0,02	-0,07	-0,0300	-0,0050
258	E18	-0,92	0,22	0,05	0,08	-0,40	-0,15	-0,05	-0,14	0,0062	-0,0048
259	E18	-1,09	0,23	0,03	0,07	-0,56	-0,23	-0,02	-0,25	0,0085	-0,0056
260	E18	-0,91	-0,01	0,05	0,13	-0,50	-0,29	-0,05	-0,28	0,0059	-0,0042
261	E18	-1,17	0,16	0,05	0,14	-0,59	-0,32	-0,04	-0,29	0,0085	-0,0038
262	E18	-1,12	-0,08	0,00	0,23	-0,38	-0,32	-0,07	-0,33	0,0072	-0,0046
263	E18	-1,10	0,23	0,02	0,25	-0,57	-0,31	-0,13	-0,34	0,0077	-0,0045
264	E18	-1,38	0,09	0,05	0,26	-0,48	-0,39	-0,12	-0,32	0,0088	-0,0020
265	E18	-0,98	0,28	0,01	0,24	-0,76	-0,48	-0,14	-0,37	0,0062	-0,0030
266	E18	-1,50	-0,03	0,04	0,31	-0,50	-0,49	-0,22	-0,35	0,0101	-0,0020
267	E18	-1,48	0,06	0,04	0,39	-0,52	-0,51	-0,19	-0,32	0,0098	-0,0030
268	E18	-1,39	0,26	0,08	0,38	-0,55	-0,64	-0,20	-0,30	0,0112	-0,0040
269	E18	-1,14	0,07	0,13	0,40	-0,44	-0,39	-0,27	-0,28	0,0101	-0,0043
270	E18	-1,34	0,03	0,23	0,44	-0,30	-0,41	-0,26	-0,20	0,0075	-0,0044
271	E18	-0,85	0,32	0,20	0,46	-0,40	-0,38	-0,27	-0,16	0,0077	-0,0047
272	E18	-0,91	-0,03	0,19	0,44	-0,29	-0,41	-0,18	-0,13	0,0046	-0,0060
273	E19	-0,90	-0,41	-0,01	0,01	-0,04	-0,16	-0,01	0,02	0,0022	0,0003
274	E19	-0,69	-0,18	0,06	0,05	-0,35	-0,13	-0,01	0,02	0,0029	0,0005
275	E19	-1,04	-0,39	0,12	0,04	-0,45	-0,17	-0,02	0,02	0,0038	-0,0020
276	E19	-0,85	-0,17	0,11	0,01	-0,63	-0,18	-0,02	-0,03	0,0024	0,0004
277	E19	-0,90	-0,10	0,15	0,05	-0,67	-0,22	-0,05	-0,04	0,0059	-0,0018
278	E19	-0,75	-0,60	0,09	0,08	-0,50	-0,35	-0,06	-0,21	0,0035	-0,0010
279	E19	-0,88	-0,19	0,10	0,07	-0,71	-0,37	-0,12	-0,17	0,0066	-0,0030
280	E19	-1,08	-0,22	0,11	0,04	-0,86	-0,35	-0,17	-0,19	0,0083	0,0005
281	E19	-0,91	-0,34	0,08	0,03	-1,11	-0,40	-0,24	-0,28	0,0056	0,0000
282	E19	-1,39	-0,51	0,08	0,03	-1,04	-0,31	-0,28	-0,37	0,0096	-0,0007
283	E19	-1,34	-0,45	0,09	0,07	-0,94	-0,43	-0,28	-0,38	0,0112	-0,0027
284	E19	-1,20	-0,55	0,10	0,05	-0,92	-0,45	-0,29	-0,38	0,0104	-0,0010
285	E19	-1,16	-0,35	0,07	0,05	-0,92	-0,27	-0,40	-0,39	0,0107	0,0000
286	E19	-1,49	-0,49	0,12	0,02	-1,18	0,07	-0,36	-0,46	0,0165	0,0012
287	E19	-0,95	-0,33	0,09	0,00	-0,87	-0,11	-0,32	-0,46	0,0154	0,0034
288	E19	-1,05	-0,43	0,04	0,02	-0,74	-0,31	-0,27	-0,40	0,0141	0,0033
289	E20	-0,94	-0,41	-0,05	-0,02	-0,18	-0,01	-0,09	-0,02	0,0021	-0,0029
290	E20	-0,66	-0,39	-0,02	-0,03	-0,41	-0,02	-0,10	-0,13	0,0040	-0,0006
291	E20	-0,76	-0,47	-0,05	-0,01	-0,37	-0,09	-0,08	-0,17	0,0042	-0,0023
292	E20	-0,55	-0,23	-0,02	0,01	-0,46	-0,01	-0,15	-0,19	0,0043	-0,0008
293	E20	-0,80	-0,18	0,01	0,02	-0,45	0,23	-0,17	-0,23	0,0066	0,0006

**Tab. Z.3. cd.** Dane eksperymentalne wykorzystane do opracowania modeli zmiennej objaśnianej  $y$  oraz  $x$

nr obs.	nr eks.	$\delta T_{co}$ [°C]	$\delta T_{cl}$ [°C]	$\delta T_{x1}$ [°C]	$\delta T_{x2}$ [°C]	$\delta T_{env}$ [°C]	$\delta T_{y1}$ [°C]	$\delta T_{y2}$ [°C]	$\delta T_z$ [°C]	$\Delta y$ [mm]	$\Delta x$ [mm]
294	E20	-0,72	-0,49	-0,03	-0,02	-0,57	0,17	-0,10	-0,37	0,0056	0,0012
295	E20	-0,88	-0,47	-0,08	0,04	-0,78	0,24	-0,13	-0,41	0,0038	0,0020
296	E20	-1,13	-0,31	-0,08	0,01	-0,84	0,39	-0,14	-0,42	0,0048	0,0049
297	E20	-0,83	-0,49	-0,05	-0,04	-0,87	0,39	-0,05	-0,51	0,0022	0,0056
298	E20	-1,44	-0,60	-0,06	-0,09	-1,06	0,73	-0,07	-0,62	0,0043	0,0057
299	E20	-1,40	-0,80	-0,06	-0,12	-1,13	0,49	-0,03	-0,67	0,0050	0,0026
300	E20	-1,46	-0,67	-0,09	-0,14	-1,24	0,43	-0,12	-0,67	0,0037	0,0041
301	E20	-1,04	-0,36	-0,12	-0,16	-1,19	0,86	-0,06	-0,68	-0,0010	0,0057
302	E20	-1,44	-0,56	-0,12	-0,15	-1,05	0,60	-0,14	-0,73	-0,0027	0,0056
303	E20	-1,20	-0,78	-0,09	-0,20	-0,90	0,68	-0,01	-0,73	-0,0054	0,0054
304	E20	-1,12	-0,58	-0,18	-0,20	-1,08	0,42	-0,06	-0,73	-0,0061	0,0058
305	E21	-1,09	-0,41	-0,01	0,07	-0,17	-0,03	-0,04	0,02	0,0000	-0,0060
306	E21	-0,83	-0,06	0,04	0,04	-0,33	0,00	-0,04	-0,04	0,0016	-0,0053
307	E21	-1,24	-0,50	0,02	0,11	-0,18	-0,28	-0,06	-0,03	0,0038	-0,0053
308	E21	-1,01	-0,38	0,00	0,10	-0,26	-0,23	-0,12	-0,07	0,0010	-0,0053
309	E21	-1,01	-0,10	0,06	0,09	-0,38	-0,10	-0,12	-0,09	0,0045	-0,0035
310	E21	-1,04	-0,53	0,04	0,07	-0,38	-0,35	-0,18	-0,17	0,0035	-0,0062
311	E21	-1,05	-0,17	0,02	0,08	-0,44	-0,23	-0,20	-0,16	0,0042	-0,0058
312	E21	-1,31	-0,37	0,01	0,11	-0,43	-0,29	-0,22	-0,17	0,0058	-0,0066
313	E21	-0,99	-0,12	0,01	0,12	-0,58	-0,35	-0,32	-0,23	0,0046	-0,0053
314	E21	-1,60	-0,43	0,03	0,08	-0,67	-0,54	-0,32	-0,28	0,0093	-0,0064
315	E21	-1,68	-0,57	0,05	0,11	-0,66	-0,59	-0,36	-0,27	0,0101	-0,0052
316	E21	-1,39	-0,46	0,02	0,09	-0,75	-0,58	-0,43	-0,26	0,0098	-0,0042
317	E21	-1,14	-0,37	0,03	0,08	-0,55	-0,16	-0,33	-0,28	0,0067	-0,0013
318	E21	-1,44	-0,22	0,06	0,09	-0,86	0,06	-0,27	-0,34	0,0134	0,0032
319	E21	-1,34	-0,51	0,07	0,04	-0,60	-0,08	-0,08	-0,32	0,0126	0,0025
320	E21	-1,18	-0,24	0,02	0,03	-0,53	-0,19	-0,08	-0,29	0,0125	-0,0017
321	E22	-0,80	0,00	0,00	-0,04	-0,14	0,16	-0,02	-0,01	0,0010	-0,0046
322	E22	-0,63	0,03	0,06	0,03	-0,20	0,10	0,08	-0,05	0,0005	-0,0051
323	E22	-0,83	-0,25	0,08	0,07	-0,16	-0,07	0,07	-0,05	0,0018	-0,0043
324	E22	-0,61	0,00	0,11	0,06	-0,21	-0,14	0,01	-0,07	0,0016	-0,0060
325	E22	-0,80	0,11	0,09	0,01	-0,26	-0,08	0,00	-0,10	0,0040	-0,0040
326	E22	-0,73	-0,31	0,06	0,04	-0,36	-0,34	-0,30	-1,05	0,0064	-0,0060
327	E22	-0,84	0,10	0,04	0,05	-0,47	-0,43	-0,51	-0,33	0,0086	-0,0052
328	E22	-1,21	-0,14	0,06	0,04	-0,41	-0,45	-0,55	-0,26	0,0106	-0,0061
329	E22	-0,54	0,08	0,06	0,05	-0,45	-0,46	-0,73	-0,21	0,0056	-0,0060
330	E22	-1,14	-0,10	0,05	0,12	-0,48	-0,48	-0,71	-0,23	0,0069	-0,0060
331	E22	-1,34	-0,45	0,08	0,10	-0,46	-0,56	-0,72	-0,23	0,0090	-0,0060
332	E22	-1,17	-0,30	0,06	0,09	-0,58	-0,56	-0,81	-0,24	0,0072	-0,0060
333	E22	-0,86	-0,08	0,08	0,11	-0,36	-0,49	-0,78	-0,25	0,0062	-0,0050
334	E22	-1,13	0,27	0,18	0,09	-0,52	-0,06	-0,51	-0,28	0,0083	-0,0013
335	E22	-0,93	-0,03	0,14	0,08	-0,44	-0,24	-0,36	-0,29	0,0114	-0,0063
336	E22	-0,71	0,21	0,10	0,07	-0,41	-0,15	-0,40	-0,29	0,0107	-0,0063
337	E23	-0,66	-0,04	0,00	0,05	0,04	-0,10	-0,17	0,03	0,0019	-0,0056
338	E23	-0,51	-0,21	0,04	0,07	0,07	-0,11	-0,15	0,08	0,0037	-0,0064
339	E23	-0,72	-0,30	0,06	0,05	-0,09	-0,16	-0,22	0,07	0,0016	-0,0052
340	E23	-0,57	-0,03	0,10	0,12	-0,28	-0,15	-0,13	0,03	-0,0002	-0,0053
341	E23	-0,77	0,17	0,11	0,10	-0,26	0,00	-0,12	0,02	-0,0005	0,0006
342	E23	-0,63	-0,35	0,02	0,10	-0,34	-0,17	-0,07	0,02	0,0000	-0,0034
343	E23	-0,59	-0,01	0,07	0,12	-0,50	-0,15	-0,21	-0,03	0,0003	-0,0029
344	E23	-1,03	-0,18	0,07	0,12	-0,55	-0,19	-0,19	-0,06	0,0024	-0,0059
345	E23	-0,59	-0,02	0,02	0,05	-0,69	-0,23	-0,22	-0,11	-0,0019	-0,0040
346	E23	-1,30	-0,35	0,06	0,05	-0,85	-0,20	-0,12	-0,20	0,0021	-0,0040
347	E23	-1,29	-0,61	0,01	0,09	-0,89	-0,29	-0,16	-0,21	0,0021	-0,0024
348	E23	-1,17	-0,44	0,04	0,04	-0,98	-0,29	-0,23	-0,21	0,0008	-0,0027

**Tab. Z.3. cd.** Dane eksperymentalne wykorzystane do opracowania modeli zmiennej objaśnianej  $y$  oraz  $x$

nr obs.	nr eks.	$\delta T_{co}$ [°C]	$\delta T_{cl}$ [°C]	$\delta T_{x1}$ [°C]	$\delta T_{x2}$ [°C]	$\delta T_{env}$ [°C]	$\delta T_{y1}$ [°C]	$\delta T_{y2}$ [°C]	$\delta T_z$ [°C]	$\Delta y$ [mm]	$\Delta x$ [mm]
349	E23	-0,86	-0,08	0,06	0,05	-0,92	-0,04	-0,18	-0,28	-0,0021	0,0018
350	E23	-0,96	-0,11	0,03	0,06	-0,66	-0,09	-0,03	-0,27	0,0013	0,0050
351	E23	-0,94	-0,45	0,03	0,06	-0,58	0,03	0,07	-0,24	0,0029	0,0028
352	E23	-0,78	-0,18	-0,01	0,05	-0,70	-0,05	-0,03	-0,22	0,0005	0,0014
353	E24	-0,80	0,24	0,04	0,01	0,08	0,03	-0,04	-0,02	0,0029	-0,0033
354	E24	-0,65	0,21	0,05	0,03	0,09	0,02	-0,03	0,02	-0,0050	-0,0007
355	E24	-0,89	0,30	0,12	0,02	0,07	0,09	0,04	0,04	0,0040	0,0003
356	E24	-0,91	-0,04	0,11	0,05	0,01	0,10	0,02	0,00	0,0019	-0,0036
357	E24	-1,06	0,08	0,12	0,06	-0,17	0,09	0,05	-0,03	0,0034	-0,0005
358	E24	-0,67	-0,10	0,12	0,04	-0,17	-0,08	-0,13	-0,01	0,0035	-0,0038
359	E24	-0,90	0,23	0,11	0,11	-0,32	-0,14	-0,12	-0,02	0,0042	-0,0049
360	E24	-1,29	0,12	0,13	0,09	-0,31	-0,16	-0,10	-0,04	0,0046	-0,0067
361	E24	-0,81	0,28	0,14	0,07	-0,41	-0,17	-0,20	-0,10	0,0016	-0,0054
362	E24	-1,39	0,05	0,10	0,09	-0,51	-0,23	-0,11	-0,19	0,0058	-0,0055
363	E24	-1,39	-0,39	0,12	0,11	-0,53	-0,22	-0,12	-0,20	0,0059	-0,0041
364	E24	-1,32	-0,25	0,08	0,11	-0,52	-0,22	-0,19	-0,23	0,0050	-0,0046
365	E24	-1,03	0,20	0,08	0,05	-0,60	-0,10	-0,14	-0,28	0,0019	0,0017
366	E24	-1,41	0,08	0,08	0,05	-0,62	-0,02	-0,02	-0,35	0,0018	0,0036
367	E24	-1,22	-0,16	0,04	-0,02	-0,57	0,11	0,09	-0,35	0,0010	0,0022
368	E24	-1,07	0,08	0,04	-0,05	-0,58	0,02	0,09	-0,34	0,0003	0,0005
369	E25	0,08	0,25	0,05	-0,03	-0,01	0,16	0,09	0,01	0,0005	0,0004
370	E25	0,16	0,36	0,15	0,00	-0,04	0,29	0,23	0,09	0,0003	0,0006
371	E25	0,11	0,50	0,17	-0,05	-0,01	0,46	0,20	0,08	-0,0008	0,0010
372	E25	0,13	0,64	0,20	-0,02	0,12	0,58	0,37	0,16	-0,0019	0,0010
373	E25	0,26	0,64	0,13	-0,04	0,16	0,74	0,46	0,19	-0,0027	0,0009
374	E25	0,20	0,73	0,22	-0,05	0,20	0,99	0,50	0,21	-0,0035	0,0013
375	E25	0,22	0,88	0,31	-0,03	0,38	1,01	0,71	0,28	-0,0035	0,0016
376	E25	0,12	0,98	0,38	-0,01	0,40	1,13	0,83	0,40	-0,0054	0,0019
377	E25	0,43	1,10	0,46	0,00	0,52	1,33	0,85	0,45	-0,0063	0,0010
378	E25	0,42	1,12	0,45	-0,09	0,59	1,42	0,94	0,49	-0,0071	0,0016
379	E25	0,34	0,53	0,51	-0,06	0,82	1,55	1,02	0,52	-0,0106	0,0020
380	E25	0,24	0,50	0,48	0,01	0,95	1,71	1,15	0,59	-0,0158	0,0018
381	E25	0,30	0,84	0,57	-0,06	1,18	1,90	1,45	0,68	-0,0155	0,0019
382	E25	0,42	1,12	0,65	0,02	1,27	2,04	1,58	0,73	-0,0171	0,0025
383	E25	0,60	1,22	0,70	0,00	1,17	2,12	1,63	0,78	-0,0180	0,0017
384	E25	0,36	1,30	0,70	0,07	1,23	2,15	1,69	0,81	-0,0185	0,0018
385	E25	0,39	1,45	0,80	0,11	1,17	2,19	1,77	0,86	-0,0209	0,0020
386	E26	0,01	0,10	0,05	0,10	-0,05	0,03	0,05	0,02	0,0011	0,0004
387	E26	0,05	0,28	0,08	0,14	-0,06	0,28	0,08	-0,01	-0,0003	0,0008
388	E26	0,16	0,50	0,15	0,12	-0,08	0,29	0,09	-0,08	0,0003	0,0013
389	E26	0,15	0,57	0,23	0,11	-0,05	0,47	0,23	-0,10	-0,0005	0,0010
390	E26	0,00	0,65	0,27	0,05	-0,07	0,55	0,34	-0,11	-0,0005	0,0012
391	E26	-0,07	0,82	0,28	0,08	-0,08	0,80	0,40	-0,11	-0,0019	0,0015
392	E26	0,07	0,79	0,25	0,02	-0,09	1,02	0,59	-0,16	-0,0027	0,0017
393	E26	0,12	0,91	0,35	0,10	-0,08	1,31	0,57	-0,19	-0,0016	0,0022
394	E26	-0,03	0,81	0,39	0,13	-0,06	1,37	0,70	-0,20	-0,0022	0,0019
395	E26	-0,23	0,45	0,38	0,16	-0,02	1,54	0,78	-0,24	-0,0038	0,0014
396	E26	-0,14	0,18	0,39	0,19	0,04	1,57	0,82	-0,25	-0,0063	0,0005
397	E26	-0,36	-0,17	0,37	0,15	0,02	1,65	0,78	-0,25	-0,0084	-0,0001
398	E26	-0,44	-0,49	0,33	0,11	0,11	1,51	0,81	-0,27	-0,0095	-0,0008
399	E26	-0,28	-0,79	0,30	0,12	0,09	1,21	0,74	-0,30	-0,0101	-0,0012
400	E27	-0,24	-0,72	0,25	0,17	0,07	0,94	0,63	-0,28	-0,0084	-0,0022
401	E27	-0,45	-0,66	0,27	0,15	-0,03	0,63	0,49	-0,31	-0,0082	-0,0018
402	E27	-0,28	-0,54	0,26	0,13	-0,08	0,58	0,48	-0,31	-0,0076	-0,0016
403	E27	-0,10	-0,25	0,26	0,20	-0,16	0,46	0,45	-0,33	-0,0068	-0,0014

**Tab. Z.3. cd.** Dane eksperymentalne wykorzystane do opracowania modeli zmiennej objaśnianej y oraz x

nr obs.	nr eks.	$\delta T_{co}$ [°C]	$\delta T_{cl}$ [°C]	$\delta T_{x1}$ [°C]	$\delta T_{x2}$ [°C]	$\delta T_{env}$ [°C]	$\delta T_{y1}$ [°C]	$\delta T_{y2}$ [°C]	$\delta T_z$ [°C]	$\Delta y$ [mm]	$\Delta x$ [mm]
404	E27	-0,01	-0,03	0,28	0,26	-0,09	0,44	0,46	-0,33	-0,0057	-0,0010
405	E27	-0,14	0,03	0,24	0,26	-0,02	0,28	0,51	-0,34	-0,0044	-0,0005
406	E27	-0,13	0,12	0,24	0,24	0,01	0,39	0,43	-0,39	-0,0024	-0,0004
407	E27	0,09	0,24	0,27	0,28	-0,01	0,55	0,46	-0,41	-0,0016	0,0003
408	E27	-0,16	0,54	0,34	0,29	-0,09	0,63	0,56	-0,43	-0,0019	0,0009
409	E27	-0,13	0,37	0,35	0,21	-0,15	0,84	0,61	-0,40	-0,0033	0,0008
410	E27	0,11	0,65	0,41	0,18	-0,12	1,07	0,62	-0,41	-0,0022	0,0015
411	E27	0,01	0,78	0,41	0,19	-0,11	1,09	0,71	-0,42	-0,0014	0,0016
412	E27	-0,06	0,84	0,44	0,16	-0,13	1,30	0,77	-0,41	-0,0030	0,0010
413	E27	0,02	0,81	0,46	0,21	-0,15	1,62	0,79	-0,40	-0,0033	0,0015
414	E27	0,03	0,57	0,54	0,21	-0,12	1,70	0,91	-0,37	-0,0038	0,0015
415	E27	-0,03	0,30	0,54	0,23	-0,18	1,81	0,98	-0,41	-0,0057	0,0010
416	E28	-0,21	0,08	0,00	-0,09	0,04	0,08	0,08	-0,04	-0,0005	-0,0002
417	E28	-0,13	0,15	0,00	-0,11	0,06	0,31	0,15	-0,08	0,0000	-0,0005
418	E28	-0,16	0,30	0,05	-0,16	0,06	0,34	0,27	-0,09	-0,0011	-0,0001
419	E28	-0,11	0,31	0,05	-0,15	0,07	0,50	0,37	-0,08	-0,0024	-0,0004
420	E28	0,07	0,38	0,13	-0,07	0,17	0,66	0,53	-0,12	-0,0035	0,0002
421	E28	0,11	0,46	0,18	-0,05	0,31	0,88	0,63	-0,12	-0,0035	0,0005
422	E28	-0,17	0,62	0,19	-0,03	0,40	0,96	0,70	-0,13	-0,0044	-0,0001
423	E28	-0,19	0,23	0,19	-0,08	0,42	1,08	0,82	-0,12	-0,0065	-0,0001
424	E28	-0,33	-0,08	0,15	-0,03	0,54	1,07	0,89	-0,09	-0,0101	-0,0010
425	E28	-0,39	-0,62	0,12	-0,07	0,70	0,96	0,81	-0,12	-0,0128	-0,0021
426	E28	-0,63	-0,99	0,03	-0,06	0,78	0,52	0,75	-0,13	-0,0122	-0,0021
427	E28	-0,51	-1,13	0,01	-0,08	0,82	0,23	0,70	-0,13	-0,0128	-0,0019
428	E28	-0,36	-0,94	-0,04	-0,05	0,68	0,27	0,66	-0,04	-0,0141	-0,0013
429	E28	-0,43	-0,69	-0,07	-0,10	0,71	0,24	0,59	-0,03	-0,0128	-0,0014
430	E28	-0,21	-0,51	-0,13	-0,06	0,72	0,26	0,62	-0,04	-0,0117	-0,0013
431	E29	-0,27	-0,47	-0,04	-0,03	0,83	0,15	0,64	-0,03	-0,0120	-0,0013
432	E29	-0,26	-0,37	-0,01	-0,04	0,79	0,25	0,62	-0,05	-0,0114	-0,0012
433	E29	-0,17	-0,19	0,03	-0,11	0,88	0,17	0,59	-0,05	-0,0106	-0,0006
434	E29	-0,06	-0,04	0,07	-0,03	0,89	0,32	0,65	-0,08	-0,0101	-0,0010
435	E29	-0,01	0,13	0,11	-0,02	0,91	0,37	0,75	-0,05	-0,0098	-0,0007
436	E29	-0,13	0,15	0,19	-0,05	0,88	0,55	0,72	-0,03	-0,0109	-0,0006
437	E29	-0,12	0,19	0,19	-0,01	0,85	0,80	0,82	0,00	-0,0120	-0,0002
438	E29	0,06	0,34	0,24	-0,02	0,88	0,97	0,88	-0,06	-0,0120	-0,0002
439	E29	-0,01	0,34	0,30	-0,04	1,02	0,91	1,04	0,01	-0,0112	-0,0005
440	E29	-0,11	0,53	0,36	-0,02	1,01	1,09	1,10	0,00	-0,0122	0,0000
441	E29	-0,02	0,60	0,40	-0,03	1,01	1,23	1,15	-0,01	-0,0128	0,0002
442	E29	0,05	0,67	0,47	-0,03	0,96	1,35	1,21	-0,04	-0,0136	0,0000
443	E29	-0,17	0,60	0,50	-0,02	0,91	1,41	1,29	-0,06	-0,0151	0,0004
444	E30	0,01	-0,06	0,01	0,00	-0,06	0,38	0,28	-0,07	-0,0086	-0,0060
445	E30	-0,02	-0,02	0,03	-0,04	-0,03	0,52	0,37	-0,06	-0,0037	0,0004
446	E30	-0,09	-0,08	0,09	-0,06	-0,28	0,65	0,46	-0,10	-0,0057	-0,0017
447	E30	-0,11	-0,12	0,08	-0,06	-0,23	0,75	0,56	-0,10	-0,0044	0,0017
448	E30	0,74	0,82	0,04	-0,02	0,18	1,20	0,99	-0,09	-0,0112	0,0018
449	E30	0,98	1,06	-0,03	-0,06	0,30	0,92	0,90	-0,03	-0,0114	0,0018
450	E30	1,00	1,04	-0,10	-0,04	0,33	0,57	0,74	0,02	-0,0110	0,0011
451	E30	1,02	1,00	-0,17	0,01	0,47	-0,05	0,34	0,18	-0,0047	0,0042
452	E30	1,13	0,29	-0,24	-0,01	0,71	-0,25	0,03	0,38	-0,0055	0,0037
453	E30	1,48	0,24	-0,24	-0,02	0,68	-0,18	0,01	0,41	-0,0077	0,0039
454	E30	1,75	0,28	-0,23	0,01	0,55	-0,29	-0,05	0,46	-0,0105	0,0011
455	E30	1,64	0,20	-0,21	0,02	0,44	-0,33	-0,09	0,49	-0,0063	0,0049
456	E30	0,99	0,54	-0,18	0,04	0,27	-0,37	-0,12	0,40	-0,0021	0,0027
457	E30	1,68	0,80	-0,12	0,04	0,24	-0,07	0,01	0,40	-0,0060	0,0029
458	E30	1,73	0,66	-0,17	0,00	0,27	-0,44	-0,17	0,41	-0,0060	0,0020

**Tab. Z.3. cd.** Dane eksperymentalne wykorzystane do opracowania modeli zmiennej objaśnianej  $y$  oraz  $x$

nr obs.	nr eks.	$\delta T_{co}$ [°C]	$\delta T_{cl}$ [°C]	$\delta T_{x1}$ [°C]	$\delta T_{x2}$ [°C]	$\delta T_{env}$ [°C]	$\delta T_{y1}$ [°C]	$\delta T_{y2}$ [°C]	$\delta T_z$ [°C]	$\Delta y$ [mm]	$\Delta x$ [mm]
459	E31	1,13	0,79	0,10	0,03	0,06	0,02	-0,09	0,07	-0,0033	-0,0023
460	E31	1,06	0,88	0,14	0,07	0,18	0,13	-0,03	0,10	-0,0016	-0,0008
461	E31	0,54	0,26	0,18	0,11	0,11	0,00	-0,11	0,14	0,0014	0,0002
462	E31	0,30	0,49	0,16	0,07	0,01	-0,13	-0,15	0,11	0,0025	-0,0016
463	E31	0,35	0,38	0,37	0,17	0,13	0,24	0,04	0,24	0,0020	-0,0014
464	E31	0,92	0,34	0,28	0,16	0,14	-0,03	-0,13	0,24	0,0054	0,0061
465	E31	1,03	0,30	0,29	0,13	0,19	-0,06	-0,19	0,27	0,0017	0,0015
466	E31	0,62	0,90	0,30	0,22	0,21	0,01	-0,12	0,31	0,0037	-0,0015
467	E31	-0,12	0,10	0,41	0,30	0,22	-0,06	-0,18	0,37	0,0035	-0,0058
468	E31	-0,14	0,25	0,42	0,37	0,22	-0,20	-0,22	0,38	0,0052	-0,0055
469	E31	-0,18	0,41	0,38	0,41	0,21	-0,20	-0,19	0,40	0,0085	-0,0016
470	E31	0,26	0,60	0,50	0,39	0,19	0,19	-0,12	0,40	0,0084	0,0001
471	E31	-0,26	0,94	0,75	0,42	0,04	0,93	0,51	0,42	0,0076	-0,0005
472	E31	0,32	1,14	0,85	0,42	0,06	1,38	0,86	0,42	0,0028	0,0008
473	E31	0,51	0,96	0,82	0,44	0,18	1,57	1,04	0,49	-0,0014	0,0011
474	E32	0,18	0,24	-0,10	-0,08	-0,24	-0,07	-0,16	-0,17	-0,0007	-0,0015
475	E32	0,51	0,11	-0,10	-0,09	-0,22	0,08	-0,14	-0,24	-0,0007	0,0019
476	E32	0,70	0,67	-0,02	-0,08	-0,24	0,33	0,01	-0,32	-0,0010	0,0012
477	E32	0,78	0,71	-0,01	-0,16	-0,18	0,52	0,04	-0,34	-0,0020	0,0010
478	E32	-0,50	-0,01	-0,20	-0,18	-0,17	-0,15	-0,34	-0,33	0,0016	-0,0038
479	E32	-0,74	0,27	-0,22	-0,18	-0,25	-0,01	-0,27	-0,37	0,0058	-0,0006
480	E32	-0,67	0,30	-0,21	-0,21	-0,29	0,04	-0,22	-0,36	0,0060	0,0007
481	E32	-0,56	0,50	-0,07	-0,24	-0,08	0,56	0,06	-0,34	0,0044	0,0012
482	E32	-0,83	-0,36	-0,08	-0,25	0,08	0,68	0,29	-0,33	-0,0020	-0,0009
483	E32	-0,68	-0,35	-0,12	-0,23	0,15	0,39	0,15	-0,34	-0,0023	-0,0018
484	E32	-0,60	-0,22	-0,17	-0,24	0,03	0,25	0,04	-0,36	0,0013	0,0016
485	E32	-0,42	0,22	-0,12	-0,28	-0,18	0,37	0,03	-0,33	0,0021	0,0010
486	E32	-0,66	-0,11	-0,08	-0,31	-0,10	0,83	0,40	-0,38	-0,0003	0,0028
487	E32	-0,91	-0,27	-0,18	-0,34	-0,11	0,14	0,04	-0,33	0,0029	0,0019
488	E32	-0,88	-0,19	-0,17	-0,35	-0,15	0,23	-0,01	-0,34	0,0016	-0,0007
489	E33	0,35	0,24	0,10	0,01	-0,03	0,24	0,29	-0,03	-0,0047	-0,0015
490	E33	0,57	0,47	0,12	0,03	-0,02	0,44	0,38	0,02	-0,0042	0,0008
491	E33	0,46	0,62	0,09	0,03	0,07	0,50	0,50	0,05	-0,0057	-0,0006
492	E33	0,16	0,27	0,13	0,06	0,11	0,59	0,54	0,06	-0,0029	0,0024
493	E33	-0,13	-0,08	0,03	0,10	0,24	-0,51	-0,05	0,08	-0,0002	-0,0021
494	E33	-0,06	-0,16	0,08	0,11	0,33	-0,32	-0,07	0,13	0,0026	0,0012
495	E33	-0,04	-0,16	0,12	0,14	0,32	-0,21	0,02	0,14	0,0023	0,0017
496	E33	-0,09	-0,10	0,16	0,14	0,41	0,05	0,16	0,08	0,0043	0,0051
497	E33	-0,08	-0,34	0,23	0,19	0,28	0,30	0,40	0,05	0,0022	0,0065
498	E33	-0,04	-0,35	0,23	0,17	0,36	0,43	0,41	0,04	-0,0032	0,0003
499	E33	-0,16	-0,43	0,19	0,17	0,40	0,53	0,48	0,02	-0,0051	-0,0011
500	E33	0,56	0,60	0,17	0,12	0,37	0,65	0,67	-0,04	-0,0072	-0,0004
501	E33	0,88	0,86	0,02	0,15	0,62	-0,31	0,16	0,16	-0,0031	0,0002
502	E33	0,74	0,38	-0,06	0,16	0,71	-0,70	-0,17	0,22	0,0012	0,0029
503	E33	0,65	-0,03	-0,12	0,20	0,70	-0,80	-0,31	0,27	-0,0039	-0,0033
504	E34	-0,38	0,25	0,11	0,09	-0,06	0,51	0,33	-0,02	-0,0004	-0,0014
505	E34	-0,50	0,27	0,22	0,08	-0,09	0,73	0,45	0,03	-0,0017	-0,0036
506	E34	-0,14	0,25	0,29	0,10	-0,06	0,92	0,62	0,01	-0,0017	0,0007
507	E34	0,06	0,39	0,32	0,12	-0,04	1,14	0,79	-0,01	-0,0071	-0,0031
508	E34	-0,44	-0,43	0,25	0,15	-0,07	0,61	0,63	-0,02	-0,0083	-0,0057
509	E34	-0,25	-0,66	0,22	0,21	-0,07	0,61	0,54	-0,01	-0,0033	0,0020
510	E34	-0,10	-0,52	0,24	0,18	-0,06	0,70	0,55	-0,02	-0,0066	-0,0016
511	E34	-0,32	-0,11	0,30	0,17	-0,10	1,08	0,80	-0,03	-0,0062	-0,0020
512	E34	-0,59	0,06	0,47	0,18	0,00	1,64	1,23	-0,05	-0,0061	-0,0007
513	E34	-0,76	0,10	0,51	0,18	-0,06	1,71	1,29	-0,02	-0,0051	-0,0004

**Tab. Z.3. cd.** Dane eksperymentalne wykorzystane do opracowania modeli zmiennej objaśnianej  $y$  oraz  $x$

nr obs.	nr eks.	$\delta T_{co}$ [°C]	$\delta T_{cl}$ [°C]	$\delta T_{x1}$ [°C]	$\delta T_{x2}$ [°C]	$\delta T_{env}$ [°C]	$\delta T_{y1}$ [°C]	$\delta T_{y2}$ [°C]	$\delta T_z$ [°C]	$\Delta y$ [mm]	$\Delta x$ [mm]
514	E34	-0,72	-0,01	0,54	0,18	-0,03	1,79	1,35	-0,07	-0,0053	0,0007
515	E34	0,02	0,54	0,54	0,20	0,05	2,03	1,59	-0,08	-0,0100	0,0012
516	E34	0,25	0,58	0,29	0,18	0,35	0,90	1,07	-0,01	-0,0084	0,0002
517	E34	0,23	0,20	0,23	0,22	0,42	0,67	0,78	0,08	-0,0084	-0,0016
518	E34	-0,07	-0,31	0,24	0,24	0,38	0,60	0,66	0,11	-0,0051	0,0008
519	E35	0,08	-0,04	-0,04	0,04	0,00	0,01	0,04	0,00	-0,0016	-0,0001
520	E35	0,10	0,24	-0,04	0,00	0,05	0,00	0,06	-0,04	-0,0008	0,0000
521	E35	-0,08	0,00	-0,06	-0,02	0,04	0,04	0,07	-0,08	0,0015	0,0031
522	E35	0,36	-0,02	-0,08	0,00	0,01	0,10	0,07	-0,07	-0,0023	0,0019
523	E35	0,61	0,87	-0,02	0,00	0,22	0,23	0,21	0,01	-0,0040	-0,0014
524	E35	0,53	0,94	0,00	-0,01	0,26	0,31	0,23	0,08	-0,0010	0,0015
525	E35	0,50	1,10	-0,03	-0,07	0,21	0,34	0,28	0,11	-0,0020	0,0004
526	E35	0,55	1,10	0,04	-0,03	0,25	0,39	0,37	0,17	-0,0010	0,0023
527	E35	0,10	0,22	-0,22	0,07	0,32	-0,89	-0,27	0,28	0,0017	0,0004
528	E35	0,21	0,36	-0,25	0,07	0,24	-0,98	-0,47	0,26	0,0037	0,0004
529	E35	0,13	0,50	-0,21	0,04	0,25	-1,00	-0,54	0,25	0,0050	-0,0007
530	E35	0,31	0,57	-0,17	0,12	0,25	-0,79	-0,52	0,24	0,0036	-0,0019
531	E35	0,11	1,06	-0,05	0,06	0,27	-0,29	-0,31	0,31	0,0059	-0,0015
532	E35	0,31	1,10	0,04	0,06	0,42	-0,14	-0,10	0,32	0,0044	0,0001
533	E36	0,39	1,16	0,05	0,06	0,47	0,04	-0,02	0,34	0,0050	0,0023
534	E36	0,17	-0,11	0,14	0,14	0,07	0,33	0,31	0,02	-0,0033	0,0002
535	E36	0,02	-0,18	0,18	0,15	0,14	0,49	0,38	0,06	0,0004	0,0045
536	E36	0,13	-0,31	0,18	0,22	0,10	0,64	0,52	0,05	-0,0050	0,0012
537	E36	-0,02	-0,33	0,19	0,24	-0,37	0,70	0,62	0,05	-0,0072	-0,0012
538	E36	-0,92	-0,61	0,17	0,15	-2,38	0,51	0,69	-0,36	-0,0062	-0,0038
539	E36	-1,13	-0,40	0,03	0,14	-1,81	0,53	0,74	-0,52	-0,0042	-0,0015
540	E36	-0,94	-0,49	0,02	0,10	-1,52	0,55	0,74	-0,53	-0,0063	-0,0019
541	E36	-0,63	-0,31	0,04	0,12	-0,99	0,72	0,80	-0,60	-0,0098	-0,0044
542	E36	0,16	0,28	0,08	0,11	-0,88	0,94	0,93	-0,60	-0,0091	0,0012
543	E36	0,39	0,64	0,09	0,14	-0,79	1,02	0,95	-0,59	-0,0095	0,0005
544	E36	0,38	0,80	0,14	0,09	-0,83	1,01	1,01	-0,54	-0,0107	-0,0015
545	E36	0,58	1,44	0,20	0,16	-0,69	1,18	1,15	-0,41	-0,0058	0,0041
546	E36	-0,42	0,71	0,01	0,26	-0,72	-0,27	0,34	-0,22	-0,0009	-0,0035
547	E36	-0,10	0,97	0,10	0,33	-0,75	0,02	0,29	-0,11	0,0042	0,0018
548	E37	0,04	1,25	0,17	0,31	-0,70	0,28	0,44	-0,08	0,0024	0,0005
549	E37	0,41	-0,01	0,08	0,04	0,15	0,42	0,29	0,02	-0,0054	-0,0003
550	E37	-0,19	-0,61	0,06	0,07	0,35	0,32	0,36	0,07	-0,0056	-0,0008
551	E37	-0,06	-0,63	-0,05	0,09	0,32	-0,08	0,21	0,13	-0,0078	-0,0033
552	E37	-0,33	-0,57	-0,01	0,13	0,31	-0,27	0,07	0,12	0,0011	0,0028
553	E37	-0,39	0,43	0,10	0,19	0,50	0,32	0,23	0,07	0,0027	-0,0001
554	E37	-0,20	-0,60	0,09	0,20	0,63	0,45	0,36	0,01	-0,0064	-0,0028
555	E37	-0,08	-0,78	0,07	0,22	0,64	0,25	0,30	0,00	-0,0037	0,0018
556	E37	-0,11	-0,62	0,04	0,29	0,82	-0,17	0,12	-0,01	-0,0016	0,0010
557	E37	-0,13	-0,55	0,19	0,33	0,95	0,42	0,34	0,10	-0,0034	-0,0004
558	E37	-0,15	-0,59	0,25	0,38	1,00	0,52	0,43	0,15	-0,0056	-0,0027
559	E37	-0,19	-0,54	0,26	0,38	1,01	0,62	0,52	0,17	-0,0062	-0,0028
560	E37	-0,13	-0,59	0,28	0,43	1,02	0,91	0,73	0,16	-0,0060	0,0008
561	E37	-0,23	-0,43	0,35	0,47	1,11	1,28	1,17	0,19	-0,0109	-0,0013
562	E37	-0,27	-0,58	0,37	0,49	1,14	1,44	1,26	0,18	-0,0138	-0,0033
563	E38	-0,22	-0,47	0,34	0,48	0,96	1,46	1,34	0,19	-0,0131	-0,0012
564	E38	-0,28	0,11	0,07	-0,03	-0,06	0,29	0,16	-0,06	0,0016	0,0008
565	E38	-0,46	0,15	0,14	-0,06	-0,15	0,47	0,25	-0,09	0,0009	-0,0011
566	E38	-0,56	0,02	0,14	-0,06	-0,18	0,64	0,36	-0,11	-0,0010	-0,0019
567	E38	-0,18	0,00	0,16	-0,11	-0,20	0,69	0,40	-0,12	-0,0019	0,0004
568	E38	-0,23	-0,03	0,24	-0,06	0,26	1,30	0,82	-0,23	-0,0055	0,0008



**Tab. Z.3. cd.** Dane eksperymentalne wykorzystane do opracowania modeli zmiennej objaśnianej  $y$  oraz  $x$

nr obs.	nr eks.	$\delta T_{co}$ [°C]	$\delta T_{cl}$ [°C]	$\delta T_{x1}$ [°C]	$\delta T_{x2}$ [°C]	$\delta T_{env}$ [°C]	$\delta T_{y1}$ [°C]	$\delta T_{y2}$ [°C]	$\delta T_z$ [°C]	$\Delta y$ [mm]	$\Delta x$ [mm]
569	E38	0,06	-0,14	0,26	-0,08	0,02	1,42	0,97	-0,21	-0,0085	0,0019
570	E38	0,06	-0,06	0,26	-0,08	-0,01	1,49	1,04	-0,22	-0,0091	0,0017
571	E38	-0,02	0,16	0,25	-0,10	-0,15	1,66	1,30	-0,18	-0,0122	0,0002
572	E38	-0,19	-0,04	0,29	-0,11	-0,14	1,78	1,42	-0,22	-0,0149	-0,0022
573	E38	0,06	-0,61	0,30	-0,07	-0,15	1,82	1,43	-0,27	-0,0171	-0,0002
574	E38	0,36	0,12	0,28	-0,13	-0,15	1,86	1,45	-0,27	-0,0140	0,0031
575	E38	0,44	0,71	0,24	-0,16	-0,12	1,91	1,60	-0,27	-0,0186	-0,0023
576	E38	0,23	-0,14	-0,05	-0,13	0,00	0,51	0,60	-0,20	-0,0093	0,0008
577	E38	0,59	-0,01	-0,08	-0,19	-0,10	0,27	0,35	-0,14	-0,0072	0,0023
578	E39	0,87	0,53	-0,05	-0,15	-0,18	0,32	0,36	-0,15	-0,0071	0,0015
579	E39	-0,26	-0,56	-0,01	-0,10	-0,10	0,26	0,19	0,06	-0,0054	-0,0028
580	E39	-0,21	-1,29	-0,05	-0,10	-0,11	-0,04	0,11	0,04	-0,0035	0,0031
581	E39	-0,20	-1,09	-0,06	-0,10	-0,13	-0,22	0,06	0,06	-0,0027	0,0026
582	E39	-0,01	-0,77	-0,05	-0,06	-0,08	-0,14	0,02	0,05	-0,0037	0,0003
583	E39	-0,01	-1,16	0,01	-0,02	0,22	0,20	0,21	0,08	-0,0078	-0,0007
584	E39	0,21	-1,02	0,01	-0,03	0,27	0,08	0,11	0,11	-0,0065	0,0003
585	E39	0,19	-0,72	-0,01	0,00	0,26	0,12	0,11	0,11	-0,0058	-0,0003
586	E39	0,07	0,37	0,10	-0,02	-0,31	0,51	0,28	0,10	0,0006	0,0023
587	E39	-0,21	-0,96	-0,07	-0,08	-1,39	-0,13	0,08	-0,13	-0,0054	-0,0012
588	E39	-0,22	-0,56	-0,09	-0,10	-1,45	-0,08	0,04	-0,20	-0,0030	-0,0005
589	E39	-0,34	-0,07	-0,09	-0,13	-1,53	0,01	0,02	-0,29	-0,0009	-0,0016
590	E39	-0,52	-0,74	-0,21	-0,18	-1,68	0,04	0,07	-0,53	-0,0004	0,0035
591	E39	-0,61	-0,49	-0,37	-0,31	-1,92	-0,31	-0,25	-0,82	-0,0012	-0,0017
592	E39	-0,58	-1,15	-0,44	-0,32	-1,23	-0,24	-0,17	-0,79	-0,0039	0,0006
593	E40	-0,55	-2,05	-0,43	-0,33	-0,99	-0,44	-0,34	-0,77	-0,0064	-0,0002
594	E41	-0,51	0,31	0,11	0,45	-0,91	-0,94	-0,74	0,77	0,0125	-0,0035
595	E41	-0,02	0,15	0,06	0,04	-0,07	0,19	0,13	-0,01	0,0009	0,0013
596	E41	0,03	0,12	0,06	0,02	0,06	0,41	0,28	-0,03	-0,0007	0,0020
597	E41	0,18	0,07	0,13	-0,02	0,15	0,57	0,34	-0,02	-0,0036	-0,0001
598	E41	0,16	-0,02	0,27	0,09	0,23	1,06	0,91	-0,05	-0,0087	0,0003
599	E41	0,14	0,16	0,29	0,12	0,38	1,24	1,08	-0,05	-0,0077	0,0027
600	E41	0,13	0,21	0,30	0,13	0,44	1,29	1,07	-0,06	-0,0123	-0,0037
601	E41	-0,02	0,08	0,43	0,15	0,58	1,50	1,27	-0,07	-0,0060	0,0050
602	E41	-0,06	-0,08	0,44	0,15	0,45	1,66	1,49	-0,12	-0,0129	0,0003
603	E41	-0,02	-0,14	0,46	0,15	0,46	1,70	1,49	-0,15	-0,0159	-0,0033
604	E41	0,14	-0,16	0,45	0,16	0,46	1,70	1,51	-0,18	-0,0142	0,0004
605	E41	0,06	0,01	0,45	0,25	0,51	1,75	1,61	-0,18	-0,0159	-0,0018
606	E41	0,08	-0,11	0,44	0,26	0,47	1,83	1,69	-0,25	-0,0146	0,0019
607	E41	0,12	0,16	0,47	0,28	0,60	1,85	1,70	-0,23	-0,0147	0,0006
608	E41	0,03	0,16	0,45	0,33	0,61	1,96	1,84	-0,20	-0,0159	0,0005
609	E42	-0,15	-0,25	-0,02	0,06	0,27	-0,56	-0,29	0,14	0,0016	-0,0021
610	E42	-0,50	-0,55	-0,07	0,09	0,33	-0,86	-0,49	0,23	0,0068	0,0009
611	E42	-0,37	-1,23	-0,08	0,15	0,46	-1,05	-0,67	0,29	0,0020	-0,0034
612	E42	-0,44	-1,16	-0,12	0,14	0,25	-1,09	-0,72	0,40	0,0026	-0,0036
613	E42	-0,16	-0,68	-0,13	0,12	-0,70	-1,48	-1,08	0,38	0,0105	0,0007
614	E42	-0,91	-1,48	-0,24	0,16	-1,06	-1,71	-1,28	0,30	0,0101	-0,0031
615	E42	-1,07	-1,54	-0,24	0,16	-1,23	-1,80	-1,34	0,27	0,0146	0,0007
616	E42	-1,44	-1,23	-0,31	0,15	-1,63	-1,87	-1,49	0,08	0,0152	-0,0043
617	E42	-1,08	-0,70	-0,21	0,07	-0,59	-1,12	-1,19	0,00	0,0134	-0,0031
618	E42	-1,26	-0,89	-0,22	0,12	-0,46	-1,07	-1,13	0,03	0,0117	-0,0049
619	E42	-1,25	-1,21	-0,22	0,16	-0,37	-1,26	-1,16	0,03	0,0133	-0,0015
620	E42	-0,73	-1,47	-0,32	0,13	-0,32	-1,65	-1,38	0,05	0,0118	0,0001
621	E42	-0,26	-0,63	-0,13	0,13	-0,11	-1,10	-1,17	0,18	0,0120	0,0002
622	E42	-0,47	-1,30	-0,18	0,22	-0,52	-1,41	-1,21	0,28	0,0098	-0,0010
623	E42	-0,46	-1,02	-0,24	0,15	-1,07	-1,69	-1,35	0,24	0,0126	0,0000



## **STRESZCZENIE ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

Tytuł: Minimalizacja wpływu temperatury na powtarzalność charakterystyk końcowych części obrabianych na centrach numerycznych z wykorzystaniem kompensacji w czasie rzeczywistym

Autor: mgr inż. Damian Basara

Promotor: dr hab. inż. Leszek Skoczyła, prof. PRz

Praca doktorska dotyczy opracowania oraz implementacji metody kompensacji błędów obróbki na obrabiarce sterowanej numerycznie, wynikających ze zmian temperatury elementów OUPN oraz płynów eksploatacyjnych. Opracowana metoda nie wykracza poza środki techniczne stanowiące fabryczne wyposażenie obrabiarki. Takie podejście zgodne jest z wymaganiami stawianymi przez spółkę, w której realizowany są prace badawcze. W dysertacji zawarto opis zagadnień dotyczących różnorodności źródeł błędów obróbki, metod ich kompensacji. Scharakteryzowano zasadę działania systemu sterowania CNC z uwzględnieniem poszczególnych modułów sterownika CNC. Przeprowadzono analizę możliwości adaptacji systemu kompensacji temperaturowej w systemie sterowania Sinumerik 840D SL.

W ramach prac opracowano autorską metodę służącą szybkiej kontroli podstawowych parametrów geometrycznych oraz ustawczych obrabiarki w celu okresowej szybkiej kontroli stanu technicznego. Metoda oparta została na pomiarach artefaktu wzorcowego z wykorzystaniem sondy pomiarowej tensometrycznej oraz cykli pomiarowych. Opracowana metoda została wdrożona do użytku w ramach elastycznej linii produkcyjnej w obrębie której zainstalowana jest obrabiarka będąca obiektem badań. Przeprowadzono badania mające na celu określić niepewność pomiaru sondą przedmiotową w układzie badanej obrabiarki. W celu opracowania modeli matematycznych przemieszczeń termicznych TCP, zebrano dane statystyczne w trakcie realizacji rzeczywistych procesów obróbki pokrywy przekładni AGB. Przeprowadzono analizę istotności wpływu czynników termicznych na dryft TCP w drodze analizy metodą solidnej regresji. Finalny model matematyczny zweryfikowany został pod kątem możliwości predykcyjnych na niezależnych danych pochodzących z eksperymentów symulujących obróbkę. Opracowany sposób kompensacji błędów termicznych z wykorzystaniem szeregu akcji synchronicznych typu IDS przetestowany został w środowisku Sinutrain. Rozwiązania zaimplementowane zostały na obrabiarce będącej obiektem badań. Finalnie skuteczność opracowanego rozwiązania zweryfikowana została w warunkach produkcyjnych podczas obróbki części testowych.

W pracy wykazano, że możliwa jest skuteczna kompensacja błędów obróbki wynikających ze zmian temperatury elementów obrabiarki oraz płynów eksploatacyjnych, bazując na fabrycznym wyposażeniu obrabiarki.



## **ABSTRACT OF DOCTORAL THESIS**

Title: Minimization of the influence of temperature on the repeatability of the final characteristics of machined parts in numerical centers using real-time compensation

Author: mgr inż. Damian Basara

Supervisor: dr hab. inż. Leszek Skoczylas, prof. PRz

The doctoral thesis concerns the development and implementation of a method for compensating machining errors on a numerically controlled machine tool, resulting from changes in the temperature of machine elements and operating fluids. The developed method does not go beyond the technical means constituting the factory equipment of the machine tool. This approach is in line with the requirements set by the company where the research work is carried out. The dissertation contains a description of issues concerning the variety of sources of machining errors and methods of their compensation. The principle of operation of the CNC control system was characterized, taking into account the individual modules of the CNC controller. An analysis of the possibility of adapting the temperature compensation system in the Sinumerik 840D SL control system was carried out.

As part of the work, an original method was developed for quick control of the basic geometrical and setting parameters of the machine tool for periodic quick control of the technical condition. The method was based on measurements of the reference artifact using a measuring touch probe and measurement cycles. The developed method has been implemented for use within a flexible production line within which the machine tool being the object of research is installed. Tests were conducted to determine the measurement uncertainty with the touch probe in the system of the tested machine tool. In order to develop mathematical models of thermal displacements of the TCP, statistical data was collected during the actual machining processes of the AGB gearbox cover. An analysis of the significance of the influence of thermal factors on TCP drift was carried out by robust regression analysis. The final mathematical model was verified in terms of predictive capabilities on independent data from experiments simulating machining. The developed method of thermal error compensation using a series of IDS synchronous actions was tested in the Sinutrain environment. The solutions were implemented on the machine tool being the object of the research. Finally, the effectiveness of the developed solution was verified in production conditions during the processing of test parts.

The doctoral thesis showed that it is possible to effectively compensate for machining errors resulting from changes in the temperature of machine tool components and technical fluids, based on the factory equipment of the machine tool.