



POLITECHNIKA KRAKOWSKA im. T. Kościuszki
Wydział Mechaniczny
Instytut Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych

mgr inż. **Krzysztof Wach**

ROZPRAWA DOKTORSKA

Metoda pomiaru przemieszczeń koła względem nadwozia pojazdu

Promotor:
Dr hab. inż. **Józef Struski**, prof. PK

Kraków, 2016





Składam serdeczne podziękowania mojemu Promotorowi dr hab. inż. Józefowi Struskiemu, prof. PK za zainteresowanie mnie niniejszą tematyką, okazaną pomoc, wszelkie wskazówki oraz cierpliwość.

Dziękuję dr inż. Piotrowi Kupiec za pomoc w pomiarach metrologicznych.

Szczególne wyrazy wdzięczności, za wsparcie, składam Rodzicom, jak również wszystkim Osobom, które motywowały mnie podczas pisania niniejszej pracy.



Spis treści

Spis treści	5
CZEŚĆ TEORETYCZNA	7
Spis ważniejszych oznaczeń.....	9
1. Wstęp.....	11
1.1. Współczesne zawieszenia kół kierowanych samochodów osobowych.....	11
1.2. Przyrządy do pomiaru przemieszczeń liniowych oraz kątowych koła kierowanego względem nadwozia pojazdu.....	11
1.2.1. Pomiar kąta skrętu koła	12
1.2.2. Pomiar przemieszczenia i orientacji koła.....	13
2. Cel i zakres pracy	17
3. Teza pracy	17
4. Mechanizm wielowahaczowego zawieszenia kół kierowanych	18
4.1. Struktura mechanizmu	18
4.2. Sposób zapisu układu równań więzów geometrycznych mechanizmu	18
4.3. Sposób rozwiązania układu równań więzów geometrycznych	20
4.4. Charakterystyki zawieszenia	21
4.5. Współrzędne charakterystycznych punktów mechanizmu zawieszenia.....	23
5. Dobór struktury mechanizmu przyrządu pomiarowego do pomiaru przemieszczeń liniowych oraz kątowych koła względem nadwozia.....	23
5.1. Możliwe struktury mechanizmu przyrządu	23
5.1.1. Mechanizm o strukturze zbliżonej do mechanizmu platformy Stewarta	23
5.1.2. Mechanizm zbudowany z sześciu łączników z zabudowanymi czujnikami przemieszczeń liniowych	28
5.1.3. Mechanizm zbudowany z dziewięciu łączników z zabudowanymi czujnikami przemieszczeń liniowych	31
5.2. Analiza stopnia uwarunkowania układu równań więzów geometrycznych	34
5.3. Zmiany konfiguracji mechanizmu pomiarowego	35
5.4. Charakterystyki zawieszenia	36
CZEŚĆ BADAWCZA	39
6. Opis przyrządu pomiarowego	41
7. Pomiary metrologiczne współrzędnych punktów mocowania łączników przyrządu	44
8. Wyznaczanie konfiguracji konstrukcyjnej przyrządu	51
9. Opis wykonanych badań, metodyka pomiarów	53
9.1. Badania wstępne	58
9.2. Pomiary kątów skrętu i pochylenia koła kierowanego na samochodzie Skoda Octavia pierwszej generacji	62
9.2.1. Zmiany wydłużeń łączników przyrządu- konstrukcyjne obciążenie pojazdu....	62
9.2.2. Zmiany wydłużeń łączników przyrządu- pojazd odciążony	65
9.2.3. Zmiany wydłużeń łączników przyrządu- pojazd obciążony siłą 3 kN.....	67
9.2.4. Zmiany wydłużeń łączników przyrządu w przestrzeni ruchów resorowania....	69
9.2.5. Charakterystyki zawieszenia- konstrukcyjne obciążenie pojazdu	76
9.2.6. Charakterystyki zawieszenia- pojazd odciążony.....	79
9.2.7. Charakterystyki zawieszenia- pojazd obciążony siłą 3 kN	80
9.2.8. Charakterystyki zawieszenia w przestrzeni ruchów resorowania	83
9.3. Pomiary kątów skrętu i pochylenia koła kierowanego na samochodzie Volkswagen Passat B5	88
9.3.1. Zmiany wydłużeń łączników przyrządu- konstrukcyjne obciążenie pojazdu....	90
9.3.2. Zmiany wydłużeń łączników przyrządu- pojazd odciążony	95
9.3.3. Zmiany wydłużeń łączników przyrządu- pojazd obciążony siłą 3 kN.....	99

9.3.4.	Zmiany wydłużeń łączników przyrzędu w przestrzeni ruchów resorowania...	102
9.3.5.	Charakterystyki zawieszenia- konstrukcyjne obciążenie pojazdu	111
9.3.6.	Charakterystyki zawieszenia- pojazd odciążony.....	114
9.3.7.	Charakterystyki zawieszenia- pojazd obciążony siłą 3 kN	117
9.3.8.	Charakterystyki zawieszenia w przestrzeni ruchów resorowania	119
9.3.9.	Porównanie wyników pomiaru z wynikami symulacji numerycznych.....	123
10.	Analiza niepewności pomiaru	125
ZAKOŃCZENIE.....		127
11.	Wnioski	129
12.	Plan dalszych prac	130
13.	Literatura	131
Spis ilustracji.....		135
Spis tabel		145
Streszczenie.....		146
Summary		146
Zusammenfassung.....		146

CZĘŚĆ TEORETYCZNA



Spis ważniejszych oznaczeń

α	-	Kąt obrotu koła kierowanego względem osi x układu {N},
β	-	Kąt obrotu koła kierowanego względem osi y układu {N},
γ	-	Kąt obrotu koła kierowanego względem osi z układu {N},
γ_d	-	Kąt pochylania koła wyznaczony na podstawie symulacyjnego pomiaru z wykorzystaniem prototypowego przyrządu,
γ_k	-	Kąt pochylania koła wyznaczony na podstawie rozwiązania kinematyki zawieszenia,
ΔK_y	-	Przemieszczenie poprzeczne punkty związane z kołem,
δ_d	-	Kąt skrętu koła wyznaczony na podstawie symulacyjnego pomiaru z wykorzystaniem prototypowego przyrządu,
δ_k	-	Kąt skrętu koła wyznaczony na podstawie rozwiązania kinematyki zawieszenia,
σ	-	Odchylenie standardowe,
A_{NK}	-	Macierz orientacji pomiędzy układem {K} i {N},
{K}	-	Układ współrzędnych związany ze środkiem koła pojazdu,
{N}	-	Układ współrzędnych związany z nadwoziem pojazdu,
\vec{e}_k	-	Wektor jednostkowy leżący na osi obrotu koła,
$\vec{r}_{A_j B_j}$	-	Wektor o początku i końcu odpowiednio w punktach A_j oraz B_j ,
$\vec{r}_{D_i H_i}$	-	Wektor o początku i końcu odpowiednio w punktach D_i oraz H_i ,
{xyz}	-	Układ współrzędnych związany z płytą zewnętrzną prototypowego przyrządu pomiarowego,
{x _w y _w z _w }	-	Układ współrzędnych związany z wewnętrzną płytą prototypowego przyrządu pomiarowego,
$A_j, j=1(5)$	-	Środek przegubu j łączącego wahacz z nadwoziem pojazdu; dla j=3 - środek przegubu łączącego skrajny drążek mechanizmu zwrotniczego z drążkiem środkowym (listwą zębatą przekładni kierowniczej),
$B_j, j=1(5)$	-	Środek przegubu j łączącego wahacz ze zwrotnicą koła; dla j=3 - środek przegubu łączącego skrajny drążek mechanizmu zwrotniczego ze zwrotnicą koła,
D_i	-	Środek przegubu i, za pomocą którego łącznik d_i przyrządu pomiarowego zamocowany jest do płyty połączonej w sposób kinematyczny z osią piasty koła kierowanego pojazdu; w zależności od struktury mechanizmu $i=1(3)$ lub $i=1(6)$,
d_i	-	Długość łącznika i mechanizmu przyrządu pomiarowego; w zależności od struktury mechanizmu $i=1(6)$ lub $i=1(9)$,
H_i	-	Środek przegubu i, za pomocą którego łącznik d_i przyrządu pomiarowego zamocowany jest do płyty połączonej w sposób nieruchomy z nadwoziem pojazdu; w zależności od struktury mechanizmu $i=1(6)$ lub $i=1(9)$,
l_j	-	Długość łącznika j mechanizmu wielołącznikowego zawieszenia kół kierowanych; j= 1, 2, 4, 5 są to wahacze; j= 3 jest to skrajny drążek mechanizmu zwrotniczego,

- q - Ugięcie zawieszenia,
- R - Rzeczywista ruchliwość mechanizmu przyrządu pomiarowego,
- R_p - Pozorna ruchliwość mechanizmu przyrządu pomiarowego,,
- R_t - Teoretyczna ruchliwość mechanizmu przyrządu pomiarowego,,
- s_i - Wydłużenie i- tego łącznika przyrządu pomiarowego,
- u_p - Przesunięcie listwy zębatej układu kierowniczego,

1. Wstęp

1.1. Współczesne zawieszenia kół kierowanych samochodów osobowych

Zawieszenie jest to zespół elementów łączących koła jezdne (mosty napędowe lub osie w przypadku zawiesznień zależnych) z nadwoziem pojazdu. Jednym z jego głównych zadań jest prawidłowe prowadzenie kół względem nadwozia oraz przekazywanie na nadwozie, w odpowiedni- przewidziany przez konstruktora- sposób, sił generowanych na styku koła ogumionego z jezdnią. Koło ogumione powinno przenieść wymagane wartości sił bocznych, aby zapewnić odpowiednią stateczność kierunkową i kierowalność pojazdu [39]. W tym celu, podczas jazdy, musi ono zachować odpowiednie ustawienie względem jezdni. Wartości sił bocznych oraz sposób, w jaki narastają wynikają bezpośrednio z zależności zmian kątów zbieżności i pochylenia kół od ruchów pionowych, przemieszczeń nadwozia oraz od działających na nie sił. Zależności te zdefiniowane są przez kinematykę i elastokinematykę zawieszenia [39]. Kinematyka zawieszenia, zwana również geometrią, jest to zależność opisująca wartości przemieszczeń kół wynikające z pionowych ruchów zawieszenia oraz z pracy układu kierowniczego. Elastokinematyka opisuje natomiast wpływ sił i momentów generowanych na styku koła ogumionego z jezdnią na zmiany ustawień kół. Geometria zawieszenia wpływa na zmiany przechyłów nadwozia, zarówno poprzeczne, jak i podłużne, a także na charakterystyki sterowności pojazdu.

Analiza parametrów krzywoliniowego ruchu samochodu należy do podstawowych zagadnień z zakresu stateczności i kierowalności, mających decydujący wpływ na bezpieczeństwo czynne pojazdu. Zawsze zmiany tych parametrów są wywołane zmianami sił zewnętrznych działających na pojazd. Sterowność jest to zdolność pojazdu do samoczynnego utrzymania się na zadanym torze jazdy oraz do powrotu do poprzedniego toru ruchu po wytrąceniu z niego krótkotrwałym impulsem zewnętrznym. Kierowalność, natomiast, jest to zespół cech konstrukcyjnych decydujących o łatwości i pewności wprowadzania pojazdu w zadany tor ruchu oraz o pewności utrzymania go na tym torze [33].

W celu zmniejszenia oddziaływań na nadwozie drgań wynikających z toczenia się koła ogumionego oraz z oddziaływania nierówności drogi o małej długości fali, koła kierowane prowadzone są względem nadwozia za pomocą mechanizmów przestrzennych z więzami podatnymi. Podatność jest przyczyną tego, że podczas jazdy samochodu po tym samym torze, z różnymi prędkościami, ulega zmianie rzeczywiste przełożenie kinematyczne układu kierowniczego; występuje znaczna różnica pomiędzy kątami skrętu koła- rzeczywistym i teoretycznym. Pomiar rzeczywistych kątów skrętu i pochylenia kół w eksperymentalnych badaniach pojazdów ma zasadnicze znaczenie. Wyniki tych pomiarów wykorzystywane są przy opracowywaniu zależności pomiędzy parametrami ruchu oraz do oceny stateczności i kierowalności pojazdu samochodowego [13], [47], [57].

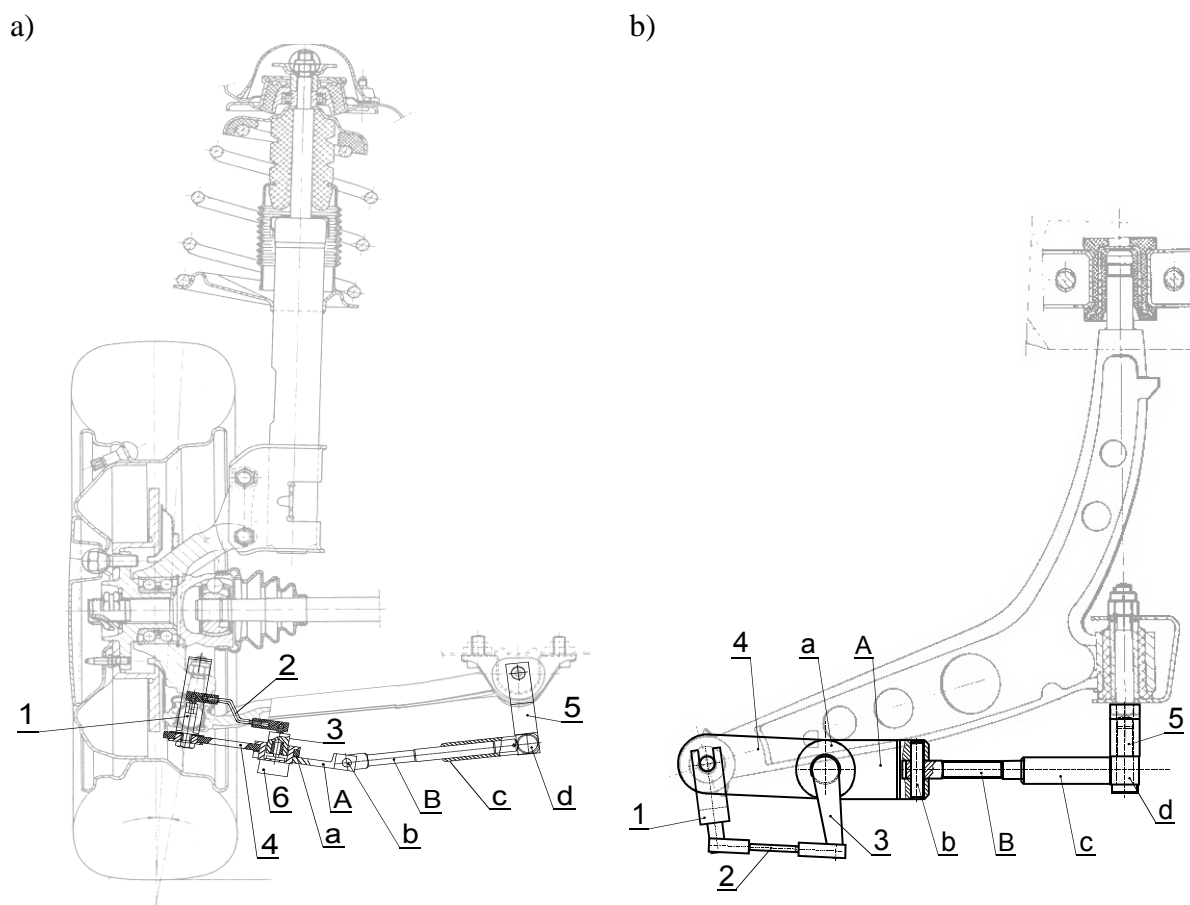
Przednie zawieszenia kół kierowanych współczesnych samochodów osobowych są najczęściej zawieszzeniami niezależnymi, w ich przypadku ruchy pionowe wywołane nierównościami drogi powodują zmianę rozstawu kół. Może to prowadzić do ich znoszenia i wpływać niekorzystnie na prowadzenie samochodu podczas jazdy na wprost [39], [40], [64], [57].

1.2. Przyrządy do pomiaru przemieszczeń liniowych oraz kątowych koła kierowanego względem nadwozia pojazdu

W podrozdziałach 1.2.1 i 1.2.2 omówione zostały niektóre z istniejących przyrządów służących do pomiarów przemieszczeń liniowych oraz kątowych koła kierowanego względem nadwozia pojazdu.

1.2.1. Pomiar kąta skrętu koła

W pracy [13] zaprezentowany został przyrząd służący do dynamicznego pomiaru skrętu koła nazwany TRS-1. Przyrząd ten jest unowocześnioną wersją prototypowego urządzenia omówionego w [16] i [46], jego schemat pokazany został na Rys. 1.



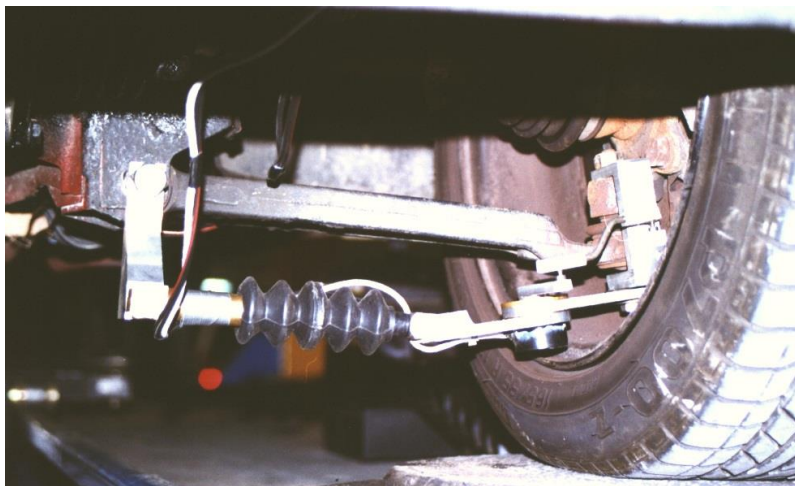
Rys. 1. Schemat przyrządu TRS-1 do dynamicznego pomiaru kąta skrętu koła. Schemat został przedstawiony na tle elementów zawieszenia McPherson prawego przedniego koła samochodu [13]. a)- widok z przodu, b)- widok z góry

Przyrząd składa się z zespołu A ramienia napędzającego 1 czworoboku przegubowego z łącznikiem 2 i zespołu B ramienia napędzającego 3. Oś obrotu pary kinematycznej ramienia napędzającego 1 zespołu A usytuowana jest równoległa do osi sworznia przegubu kulowego łączącego zwrotnicę koła z wahaczem zawieszenia. Element 4 zespołu A połączony jest obrotowo przegubem a z płytą podstawy potencjometru 6. Podstawa ta połączona jest z tłoczkiem cylinderka zespołu B za pomocą płaskiego przegubu b. Cylinderk i tłoczek stanowią parę kinematyczną obrotowo- przesuwną c. Wspornik 5 i cylinderk pary kinematycznej c połączone są przegubem płaskim d.

Podczas skrętu koła następuje obrót sworznia przegubu kulowego wahacza dolnego, a wraz z nim uchwytu i ramienia napędzającego 1 czworoboku przegubowego, wokół osi zataczania zwrotnicy. Za pomocą łącznika 2 obrót przekazywany jest na ramię 3 układu napędzanego oraz oś potencjometru 6. Odpowiednie mocowanie przyrządu do nadwozia oraz do zawieszenia powoduje, że oś przegubu b podczas ruchów resorowania koła ogumionego pozostaje zawsze równoległa do płaszczyzny czworoboku przegubowego, zmieniającego orientację w przestrzeni ruchów resorowania w zależności od kąta obrotu zwrotnicy wokół jej osi zataczania. Przemieszczenie środka przegubu kulowego wahacza w płaszczyznach równoległych do płaszczyzny x-y układu {N} powoduje względny obrót przegubu a i nie

wywołuje obrótu ramienia 1 oraz osi potencjometru 6. Względny obrót przegubu a jest utrudniony przez tarcie konstrukcyjne łożyska ślizgowego. Środek przegubu kulowego podczas ruchu pionowego oddala się od osi obrotu płaskiego przegubu d przy względnym ruchu tłoczka i cylinderka pary kinematycznej c [13].

Na Rys. 2. pokazany został przyrząd TRS-1 zamocowany po wewnętrznej stronie koła samochodu osobowego.

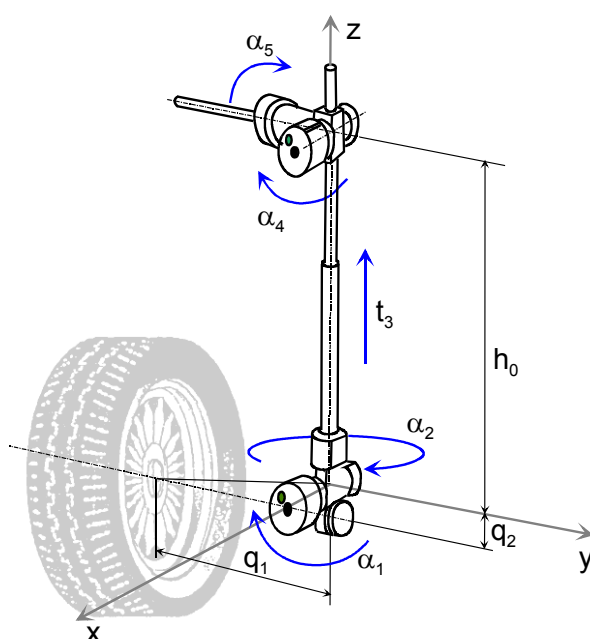


Rys. 2. Przyrządu TRS-1 zamocowany po wewnętrznej stronie koła kierowanego samochodu osobowego [13].

1.2.2. Pomiar przemieszczenia i orientacji koła

Najbardziej rozpowszechnionym przyrządem pozwalającym na pomiar położenia i orientacji koła względem nadwozia pojazdu jest uniwersalny przyrząd RV-3 firmy Corrsys-Datron (aktualnie Kistler Automotive GmbH) [2], [13], [68]. Pozycja i orientacja koła względem nadwozia pojazdu określana jest na podstawie mierzonych kątów wzajemnego obrotu elementów przyrządu oraz zmiany długości jago łącznika. Do tego celu zastosowane zostały wysokiej klasy czujniki, które zabezpieczone są przed szkodliwym oddziaływaniem czynników atmosferycznych. Mechaniczny zakres obrotu czujników kąta obrotu wynosi 360° , co ogranicza ryzyko uszkodzeń przyrządu w przypadku niewłaściwego użytkowania.

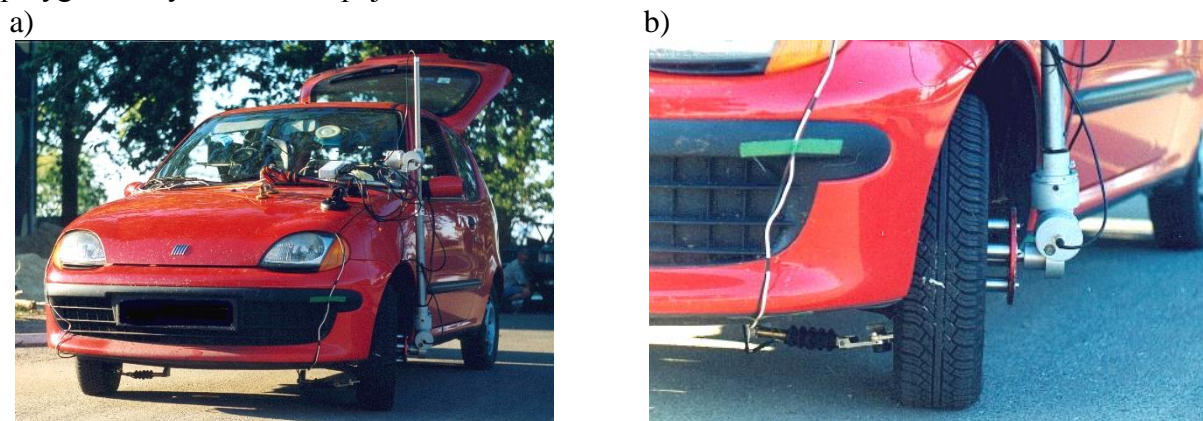
Schemat przyrządu RV-3 pokazany został na Rys. 3.



Rys. 3. Schemat przyrządu pomiarowego RV-3 firmy Corrsys-Datron [13].

Przyrząd mocowany jest do nadwozia za pomocą specjalnych przyssawek, do koła pojazdu, natomiast, za pomocą tulejek zaciskanych na jego śrubach. Tarcza mocowana do koła pojazdu powinna być ustawiona tak, aby jej oś obrotu pokrywała się z osią obrotu koła, natomiast jej płaszczyzna była możliwie równoległa do płaszczyzny koła. Błędne umocowanie tarczy na kole samochodu powoduje oscylacje sygnałów z poszczególnych czujników przyrządu, oscylacje te są proporcjonalne do prędkości obrotowej koła.

Na Rys. 4. przedstawiony został widok przyrządu RV-3 zamocowanego na przygotowanym do badań pojeździe.



Rys. 4. Widok przyrządu pomiarowego RV-3 zamocowanego na pojeździe [13]. a) Widok ogólny. b) Zbliżenie na koło badanego pojazdu. Widoczny jest również przyrząd pomiarowy TRS-1 zamontowany po wewnętrznej stronie koła.

Wartości kątów pochylenia i skrętu koła oraz jego przemieszczeń nie uzyskuje się w sposób bezpośredni, lecz na podstawie złożonych obliczeń. Wynikiem tych obliczeń są współrzędne punktu $P(P_x, P_y, P_z)$ leżącego na osi koła oraz współrzędne wektorów osi koła w układzie związanym z nadwoziem pojazdu, na podstawie których w łatwy sposób wyznaczyć można kąty skrętu i pochylenia koła. Wymienione wielkości określone są poprzez wyznaczenie macierzy transformacji pomiędzy odpowiednimi układami współrzędnych [13]:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} u_x & v_x & w_x \\ u_y & v_y & w_y \\ u_z & v_z & w_z \end{bmatrix} = \mathbf{R}_5 \mathbf{R}_4 \mathbf{R}_2 \mathbf{R}_1 \quad (1)$$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_x & P_y & P_z \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 0 & -q_1 & -q_2 \end{bmatrix}^T + \mathbf{R}_5 \mathbf{R}_4 \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & (t_3 - h_0) \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

gdzie:

$$\mathbf{R}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_1 & -s_1 \\ 0 & s_1 & c_1 \end{bmatrix}, \mathbf{R}_2 = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 \\ s_2 & c_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{R}_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_4 & -s_4 \\ 0 & s_4 & c_4 \end{bmatrix}, \mathbf{R}_5 = \begin{bmatrix} c_5 & 0 & s_5 \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_5 & 0 & c_5 \end{bmatrix};$$

przy czym przez s_i, c_i , oznaczono odpowiednio $\sin \alpha_i, \cos \alpha_i$, dla $i=1,2,4,5$.

Podstawiając poszczególne macierze transformacji do wzorów (1) i (2), otrzymujemy :

$$u_x = c_2 c_5 + s_2 s_4 s_5$$

$$u_y = s_2 c_4$$

$$u_z = -c_2 s_5 + s_2 s_4 s_5$$

$$v_x = -c_1 s_2 c_5 + (c_1 c_2 s_4 + s_1 c_4) s_5$$

$$v_y = c_1 c_2 c_4 - s_1 s_4$$

$$v_z = v_1 s_2 s_5 + (c_1 c_2 s_4 + s_1 c_4) c_5$$

(3)

$$w_x = s_1 s_2 c_5 - (s_1 c_2 s_4 - c_1 c_4) s_5$$

$$w_y = -s_1 c_2 c_4 - c_1 s_4$$

$$w_z = -s_1 s_2 s_5 - (s_1 c_2 s_4 - c_1 c_4) c_5$$

$$P_x = q_1 (c_1 s_2 c_5 - (s_1 c_4 + c_1 c_2 s_4) s_5) - q_2 (s_1 s_2 c_5 - (s_1 c_2 s_4 + c_1 c_2) s_5) - (h_0 - t_3) c_4 c_5$$

$$P_y = -q_1 (c_1 c_2 c_4 - s_1 s_4) + q_2 (s_1 c_2 c_4 + c_1 s_4) + (h_0 - t_3) s_4$$

$$P_z = -q_1 (c_1 s_2 c_5 + (s_1 c_4 + c_1 c_2 s_4) s_5) + q_2 (s_1 s_2 c_5 + (s_1 c_2 s_4 + c_1 c_2) s_5) + (h_0 - t_3) c_4 c_5$$

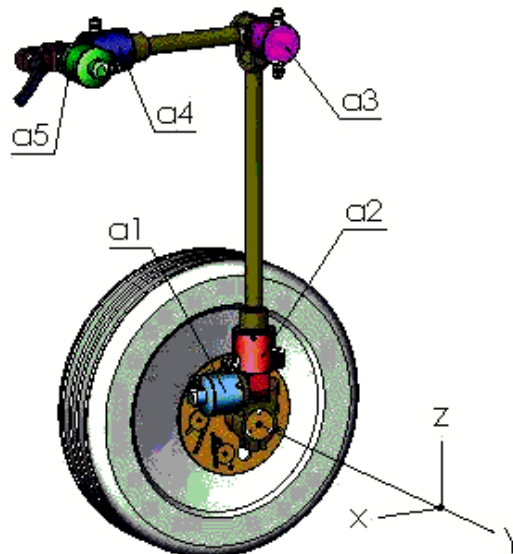
Wartości kątów skrętu δ_k i pochylenia koła γ_k obliczane są odpowiednio z zależności:

$$\delta_k = \arctg\left(\frac{v_x}{v_y}\right) \quad (4)$$

$$\gamma_k = \arctg\left(\frac{v_z}{v_y}\right) \quad (5)$$

Od niedawna w ofercie firmy Kistler Automotive GmbH znajduje się nowsza wersja omówionego wyżej przyrządu, oznaczona jako RV-4 [3].

Przyrząd RV-4, w przeciwieństwie do urządzenia poprzedniej generacji, nie posiada czujnika przemieszczeń liniowych, w zamian zastosowany został dodatkowy czujnik kąta obrotu. Schemat przyrządu pomiarowego RV-4 z zaznaczonymi czujnikami kątów obrotu, przedstawiony został na Rys. 5.



Rys. 5. Schemat przyrządu pomiarowego RV-4 z zaznaczonymi pięcioma czujnikami kątów obrotu [3].

Przyrząd RV-4, w porównaniu ze swoim poprzednikiem, charakteryzuje się między innymi lepszą dokładnością, większym zakresem pomiarowym oraz mniejszą masą. Widok przyrządu RV-4 zamocowanego na pojeździe pokazany został na Rys. 6., w Tab. 1. natomiast, zestawiono podstawowe różnice pomiędzy przyrządami RV-4 i RV-3.



Rys. 6. Widok przyrządu pomiarowego RV-4 zamocowanego na pojeździe [3].

Tab. 1. Porównanie podstawowych cech przyrządów RV-3 i RV-4.

Przyrząd	RV-4	RV-3
Masa elementów ruchomych [kg]	2,5	2,9
Masa całego urządzenia [kg]	3,35	5
Zakres pomiarowy [°]	60	45
Dokładność pomiaru kątów [°]	0,1	0,33
Maksymalne przemieszczenie pionowe [mm]	200	155
Czas potrzebny na przygotowanie przyrządu do badań [min]	15-20	30-40

Między innymi w pracach [5], [8] zaproponowany został innego typu przyrząd do pomiaru translacji i rotacji koła kierowanego samochodu osobowego. Mechanizm tego przyrządu posiada równoległą strukturę zbliżoną do struktury mechanizmu platformy Stewarta. Urządzenie składa się z dwóch płyt- ruchomej i nieruchomej, połączonych sześcioma linkowymi czujnikami przemieszczeń liniowych. Przyrząd zamocowany na stanowisku pomiarowym przedstawiony został na Rys. 7.



Rys. 7. Przyrząd do pomiaru translacji i rotacji koła kierowanego samochodu osobowego zamocowany na stanowisku pomiarowym [5], [8].

2. Cel i zakres pracy

Zasadniczym celem pracy jest opracowanie metody pomiaru przemieszczeń liniowych i kątowych koła kierowanego względem nadwozia samochodu oraz jej weryfikacja doświadczalna.

W części teoretycznej pracy omówione zostaną dotychczas stosowane przyrządy do pomiaru położenia i orientacji koła względem nadwozia. Do rozwiązywania nieliniowych równań więzów geometrycznych mechanizmów czterowahaczowego zawieszenia kół kierowanych i zaproponowanego przyrządu pomiarowego wykorzystana będzie metoda perturbacji. Na podstawie uzyskanych rozwiązań przeprowadzone będą symulacje numeryczne, które pozwolą na wyznaczenie charakterystyk kątów rotacji koła względem nadwozia pojazdu, jak również jego poprzecznych przemieszczeń. Przeprowadzona zostanie analiza możliwej do uzyskania dokładności pomiaru.

W zakresie części badawczej przewiduje się przeprowadzenie badań stanowiskowych samochodu z wykorzystaniem jednego z zaproponowanych przyrządów pomiarowych o strukturach mechanizmów nie wykazujących osobliwości. Uzyskane wyniki zostaną poddane weryfikacji w zakresie dokładności pomiaru.

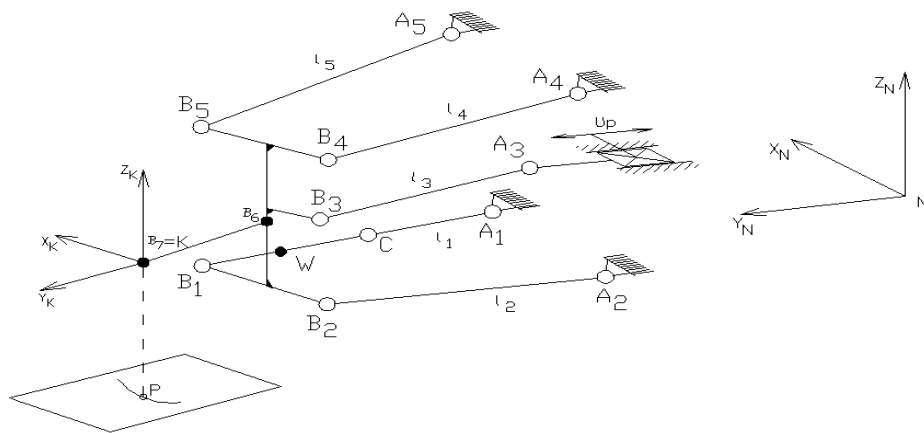
3. Teza pracy

Istnieje możliwość zbudowania przyrządu do pomiaru przemieszczeń liniowych oraz kątowych koła kierowanego w przestrzeni ruchów resorowania, którego uwarunkowanie układu równań więzów geometrycznych nie będzie zależne od konfiguracji konstrukcyjnej jego mechanizmu.

4. Mechanizm wielowahaczowego zawieszenia kół kierowanych

4.1. Struktura mechanizmu

Na Rys. 8. pokazany jest schemat mechanizmu czterowahaczowego zawieszenia kół kierowanych. Punkty: B_1, B_2, B_4 i B_5 są środkami przegubów kulowych łączących wahacze ze zwrotnicą koła. Punkt B_3 jest środkiem przegubu kulowego łączącego skrajny drążek mechanizmu zwrotniczego z ramieniem zwrotnicy. Punkty: A_1, A_2, A_4 i A_5 są środkami przegubów kulowych, którymi zastąpiono przeguby metalowo-gumowe, łączące wahacze z nadwoziem. Punkt A_3 jest środkiem przegubu kulowego łączącego drążek skrajny mechanizmu zwrotniczego z listwą zębatą przekładni kierowniczej. Dolny wahacz przedni, reprezentowany na rys. przez łącznik A_1B_1 , połączony jest ze stabilizatorem w punkcie W . Z wahaczem tym w punkcie C połączona jest, niezaznaczona na rysunku, kolumna teleskopowa. Punktami B_6 i B_7 zaznaczono oś obrotu koła. Układy $\{N\}$ i $\{K\}$ są związane, odpowiednio, z nadwoziem pojazdu i ze zwrotnicą koła.



Rys. 8. Schemat mechanizmu czterowahaczowego zawieszenia kół kierowanych.

4.2. Sposób zapisu układu równań więzów geometrycznych mechanizmu

Równania więzów geometrycznych mechanizmu pokazanego na rys. 8, można zapisać w postaci 14 lub 5 nieliniowych równań algebraicznych. W pierwszym sposobie równania wyrażają kwadraty odległości charakterystycznych punktów mechanizmu:

$$\begin{cases} \vec{r}_{A_j B_j}^T \cdot \vec{r}_{A_j B_j} = l_j^2, & \text{dla } j = (1)5, \\ \vec{r}_{B_j B_k}^T \cdot \vec{r}_{B_j B_k} = l_{jk}^2, & \text{dla } \begin{cases} j = 1 \text{ i } k = (2)5, \\ j = 2 \text{ i } k = (3)5, \\ j = 3 \text{ i } k = (4)5. \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

W powyższym układzie równań parametrami zadawanymi są współrzędna z_{B_1} punktu $B_1(x_{B_1}, y_{B_1}, z_{B_1})$ i przesunięcie listwy zębatej u_p , dodawane do współrzędnej y_{A_3} punktu $A_3(x_{A_3}, y_{A_3} + u_p, z_{A_3})$. Przy danych parametrach z_{B_1} i u_p z układu (6) wyznaczane są współrzędne punktów $B_j(x_{B_j}, y_{B_j}, z_{B_k})$, dla $j=(1)5$ i $k=(2)5$. Położenie konstrukcyjne punktów B_6 i B_7 jest dane, zatem wyznaczenie współrzędnych tych punktów w przestrzeni ruchów resorowania $\{N\}$ jest możliwe z układów równań:

dla punktu B₆

$$\vec{r}_{B_k B_j}^T \cdot \vec{r}_{B_k B_j} = l_{kj}^2, \quad \text{dla } \begin{cases} k=6 & i=j=1, \\ k=6 & i=j=3, \\ k=6 & i=j=5. \end{cases} \quad (7)$$

dla punktu B₇

$$\vec{r}_{B_k B_j}^T \cdot \vec{r}_{B_k B_j} = l_{kj}^2, \quad \text{dla } \begin{cases} k=7 & i=j=1, \\ k=7 & i=j=2, \\ k=7 & i=j=4. \end{cases} \quad (8)$$

W drugim sposobie równania więzów geometrycznych wyrażone są przez kwadraty długości wektorów o początkach i końcach, odpowiednio, w punktach A_j i B_j, dla j=(1)5 zapisane w formie:

$$(\vec{r}_{NK.N} + A_{NK} \cdot \vec{r}_{KB_j.K} - \vec{r}_{NA_j.N})^T (\vec{r}_{NK.N} + A_{NK} \cdot \vec{r}_{KB_j.K} - \vec{r}_{NA_j.N}) = l_j^2, \quad \text{dla } j=(1)5, \quad (9)$$

gdzie:

$$\mathbf{A}_{NK} = \mathbf{A}_\gamma \mathbf{A}_\beta \mathbf{A}_\alpha = \begin{bmatrix} c\gamma & -s\gamma & 0 \\ s\gamma & c\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c\beta & 0 & s\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\beta & 0 & c\beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha & -s\alpha \\ 0 & s\alpha & c\alpha \end{bmatrix} \quad (10)$$

jest macierzą obrotu {K} względem {N}.

Z układu równań (9) przy zadawanych parametrach q₃ i u_p obliczane są współrzędne q₁ i q₂ środka koła B₇(q₁, q₂, q₃) oraz kąty rotacji {K} względem {N}: α, β, γ.

W celu zapewnienia równoważności zakresu obliczeń algorytmów na podstawie układów (6) i (9) konieczne jest wyznaczenie kątów rotacji {K}: α, β, γ względem {N}. Zatem układ równań (6) musi być uzupełniony o obliczenia wymienionych kątów. Po obliczeniu współrzędnych punktów B₇ i B_j (j=(1)5) można utworzyć trzy wektory \vec{r}_{KB_j} dla j ∈ {1,2,3,4,5}. Dla każdego z tych wektorów spełnione jest równanie macierzowe:

$$\vec{r}_{KB_j.K} = \mathbf{A}_{KN} \cdot \vec{r}_{KB_j.N}, \quad (11)$$

gdzie: $\vec{r}_{KB_j.K}$ - wektor w {K}, $\vec{r}_{KB_j.N}$ - wektor w {N},

$$\mathbf{A}_{KN} = \mathbf{A}_{NK}^T = \begin{bmatrix} c\beta \cdot c\gamma & c\beta \cdot s\gamma & -s\beta \\ s\alpha \cdot s\beta \cdot c\gamma - c\alpha \cdot s\gamma & s\alpha \cdot s\beta \cdot s\gamma + s\alpha \cdot c\gamma & s\alpha \cdot c\beta \\ c\alpha \cdot s\beta \cdot c\gamma + s\alpha \cdot s\gamma & c\alpha \cdot s\beta \cdot s\gamma - s\alpha \cdot c\gamma & c\alpha \cdot c\beta \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Oznaczając współrzędne wektorów: $\vec{r}_{KB_j.K} = [x_{bj}, y_{bj}, z_{bj}]^T$, $\vec{r}_{KB_j.N} = [x_{jb}, y_{jb}, z_{jb}]^T$ i przyjmując j = n, m, v na podstawie (11) otrzymuje się:

$$\left. \begin{aligned} x_{bn} &= (x_{nb} \cdot c\gamma + y_{nb} \cdot s\gamma)c\beta - z_{nb} \cdot s\beta \\ x_{bm} &= (x_{mb} \cdot c\gamma + y_{mb} \cdot s\gamma)c\beta - z_{mb} \cdot s\beta \\ x_{bv} &= (x_{vb} \cdot c\gamma + y_{vb} \cdot s\gamma)c\beta - z_{vb} \cdot s\beta \end{aligned} \right\}. \quad (13)$$

Z układu równań (13) obliczane są kąty rotacji β i γ . W celu obliczenia kąta α wykorzystano równanie:

$$y_{bv} = (x_{vb} \cdot s\beta \cdot c\gamma)s\alpha - (x_{vb} \cdot s\gamma)c\alpha + (y_{vb} \cdot s\beta \cdot s\gamma)s\alpha + (y_{vb} \cdot c\gamma)c\alpha + (z_{vb} \cdot c\beta)s\alpha. \quad (14)$$

Następnie mając kąty rotacji układu $\{K\}$ względem układu $\{N\}$, obliczono współrzędne wektora $\vec{r}_{B_6B_7.N}$:

$$\vec{r}_{B_6B_7.N} = A_{NK} \cdot \vec{r}_{B_6B_7.K}, \quad (15)$$

wektor jednostkowy $\vec{e}_k = [e_{kx}, e_{ky}, e_{kz}]^T$, leżący na osi obrotu koła oraz kąty skrętu i pochylenia koła:

$$\delta_k = -\arctg\left(\frac{e_{kx}}{e_{ky}}\right), \quad (16)$$

$$\gamma_k = -\arcsin(e_{kz}). \quad (17)$$

Obliczanie kątów δ_k i γ_k w obu algorytmach jest analogiczne.

Należy zwrócić uwagę, że rozwiązanie algorytmu opartego na układzie czternastu równań (6) zajmuje znacznie mniej czasu, niż rozwiązanie oparte na układzie (9) składającym się z pięciu równań przestępnych [51].

4.3. Sposób rozwiązania układu równań więzów geometrycznych

Rozwiązania układów równań (6) i (9) uzyskano za pomocą metody perturbacji [9],[49], [53].

Metoda ta jest jedną z najbardziej efektywnych metod rozwiązywania układów nieliniowych równań algebraicznych. W porównaniu do innych metod, takich jak na przykład metoda Newtona- Raphsona, charakteryzuje się ona małą wrażliwością na krok obliczeń. Ponadto metoda perturbacji cechuje się bardzo krótkim efektywnym czasem obliczeń [51], dodatkowo otrzymane za jej pomocą rozwiązania nie posiadają wyrażen pierwiastkowych.

W odniesieniu do układu pięciu równań przestępnych (9) funkcje trygonometryczne rozwinięto w szeregi:

$$\sin(x_0 + x) = \sin x_0 + x \cos x_0 - \frac{x^2 \sin x_0}{2}, \quad (18)$$

$$\cos(x_0 + x) = \cos x_0 - x \sin x_0 - \frac{x^2 \cos x_0}{2} \quad (19)$$

i otrzymano układ równań, który można zapisać w ogólnej formie:

$$f_j(q_1, q_2, \alpha, \beta, \gamma) = 0, \quad j=(1)5. \quad (20)$$

Równania układu (20) rozdzielono na części nieliniowe i liniowe:

$$f_{jN}(q_1, q_2, \alpha, \beta, \gamma) + f_{jL}(q_1, q_2, \alpha, \beta, \gamma) = 0, \quad j=(1)5. \quad (21)$$

Części nieliniowe tych równań pomnożono przez parametr perturbacyjny ε i otrzymano układ równań pomocniczych:

$$g_j(\varepsilon, q_1, q_2, \alpha, \beta, \gamma) = \varepsilon \cdot f_{jN} + f_{jL}, \quad j=(1)5. \quad (22)$$

Dla $\varepsilon=1$ układy równań (21) i (22) są identyczne, natomiast dla $\varepsilon=0$ układ (22) utworzony jest tylko z równań liniowych. Założono, że rozwiązaniami układu (22) są szeregi liczbowe:

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= \sum_{i=0}^m \varepsilon^i q_{1i}, & q_2 &= \sum_{i=0}^m \varepsilon^i q_{2i}, \\ \alpha &= \sum_{i=0}^m \varepsilon^i \alpha_i, & \beta &= \sum_{i=0}^m \varepsilon^i \beta_i, & \gamma &= \sum_{i=0}^m \varepsilon^i \gamma_i \end{aligned} \right\}. \quad (23)$$

Po podstawieniu (23) do (22) otrzymuje się:

$$g_j(\varepsilon, q_1(\varepsilon), q_2(\varepsilon), \alpha(\varepsilon), \beta(\varepsilon), \gamma(\varepsilon)) = 0, \quad j=(1)5. \quad (24)$$

Układ równań (24) rozwinięto w szeregi względem potęg ε :

$$\sum_{i=0}^3 \varepsilon^i g_{ji} = 0, \quad j=(1)5. \quad (25)$$

Następnie rozwiązano liniowe układy równań $g_{ji}=0$, najpierw dla $i=0$ potem dla $i=1, 2, 3$. Otrzymano rozwiązania, które można zapisać w ogólnej postaci:

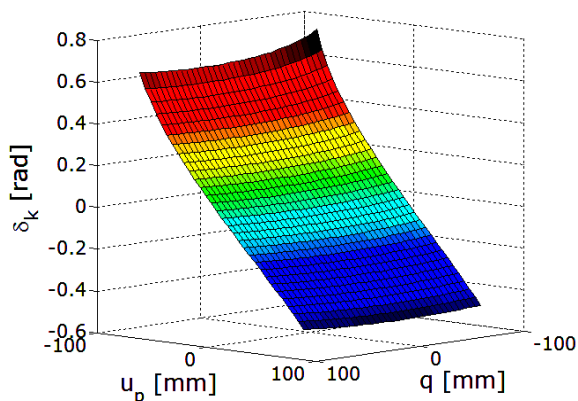
$$\left. \begin{aligned} q_1 &= \sum_{i=0}^3 q_{1i}, & q_2 &= \sum_{i=0}^3 q_{2i}, \\ \alpha &= \sum_{i=0}^3 \alpha_i, & \beta &= \sum_{i=0}^3 \beta_i, & \gamma &= \sum_{i=0}^3 \gamma_i \end{aligned} \right\}. \quad (26)$$

Układ równań (6) rozwiązano w analogiczny sposób.

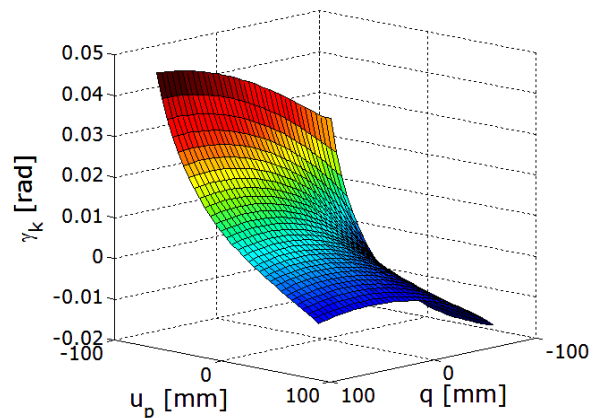
4.4. Charakterystyki zawieszenia

Na Rys. 9. pokazano charakterystyki mechanizmu czterowahaczowego zawieszenia kół kierowanych, uzyskane na podstawie rozwiązania jego kinematyki:

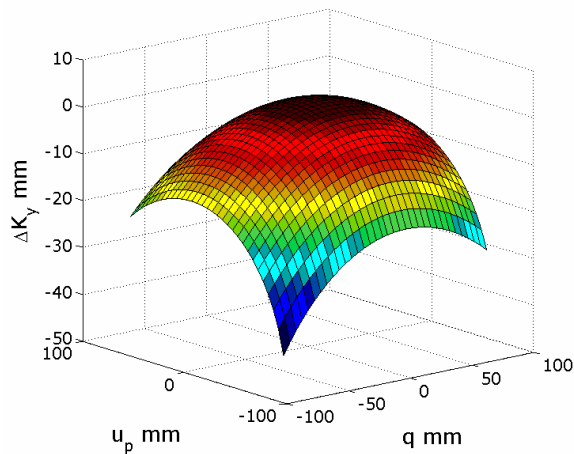
a)



b)



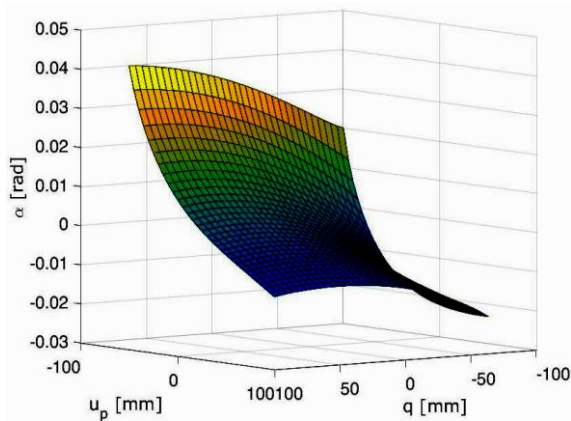
c)



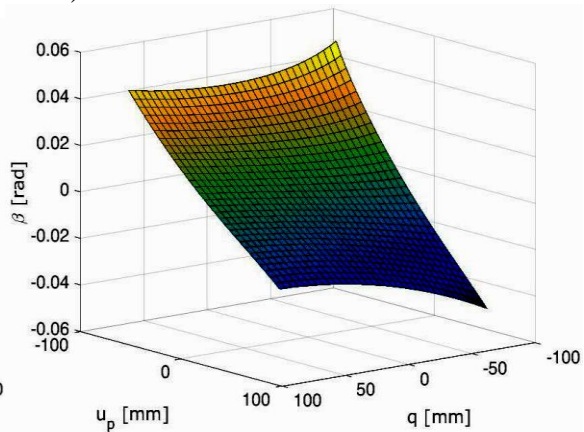
Rys. 9. Zależności kąta skrętu- δ_k i pochylenia- γ_k koła oraz względnych zmian poprzecznego położenia punktu związanego kołem ΔK_{yd} od ugięcia zawieszenia- q i przesunięcia listwy zębatej- u_p , wyznaczone na podstawie rozwiązania kinematyki zawieszenia.

Rys. 10. przedstawia charakterystyki kątów rotacji zwrotnicy koła. Kąty: α , β i γ są kątami obrotu układu $\{K\}$ względem osi: x , y , z układu $\{N\}$.

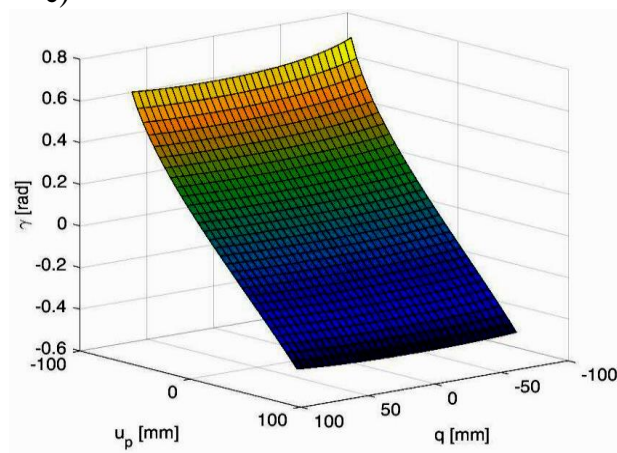
a)



b)



c)



Rys. 10. Zależności kątów rotacji zwrotnicy koła od ugięcia zawieszenia- q i przesunięcia listwy zębatej przekładni kierowniczej- u_p .

4.5. Współrzędne charakterystycznych punktów mechanizmu zawieszenia

Położenie konstrukcyjne mechanizmu w przestrzeni ruchów resorowania $\{N\}$ określonej poprzez współrzędne środków przegubów kulowych łączących wahacze z nadwoziem i zwrotnicą koła. Dane zostały zaczerpnięte z pracy [5]:

A_1 (144.1, 345.2, -92.2); A_2 (-229.2, 362.2, -101.7); A_3 (-99.7, 400.0, 306.2);
 A_4 (-69.0, 396.3, 413.5); A_5 (134.6, 428.5, 408.9); B_1 (28.7, 690.9, -98.0);
 B_2 (-24.4, 687.0, -131.6); B_3 (-135.7, 617.1, 286.9); B_4 (-18.1, 639.8, 388.4);
 B_5 (15.4, 673.3, 389.5).

Współrzędne punktów B_6 i $B_7 \equiv K$ leżących na osi obrotu koła:

B_6 (0.5, 647.0, 1.1); B_7 (1.0, 747.0, 0.6).

Wartości współrzędnych podano w milimetrach.

5. Dobór struktury mechanizmu przyrządu pomiarowego do pomiaru przemieszczeń liniowych oraz kątowych koła względem nadwozia

5.1. Możliwe struktury mechanizmu przyrządu

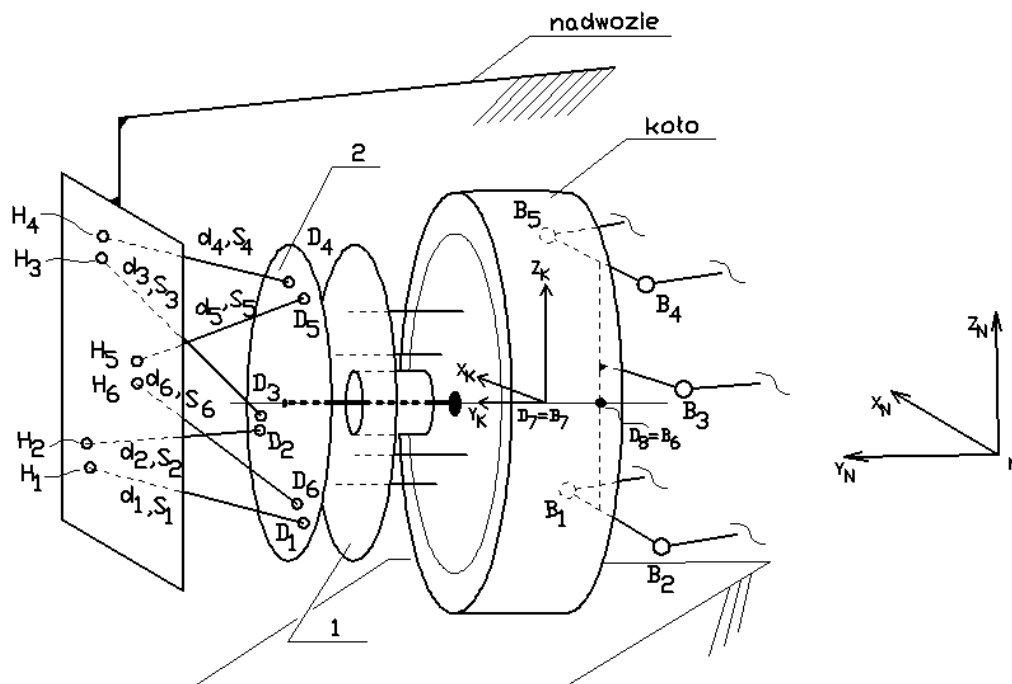
Mechanizm przyrządu do pomiaru przemieszczeń liniowych i kątowych koła kierowanego może posiadać różnego typu struktury. Wybór struktury mechanizmu przyrządu pomiarowego uzależniony jest od stopnia uwarunkowania jego układu równań więzów geometrycznych oraz błędu i efektywnego czasu pomiaru.

Aby funkcjonalność przyrządu pomiarowego nie była ograniczona przez mechanizm zawieszenia koła samochodu, jego konstrukcja powinna umożliwiać mocowanie go po zewnętrznej stronie koła.

5.1.1. Mechanizm o strukturze zbliżonej do mechanizmu platformy Stewarta

Jedną z możliwych struktur mechanizmu przyrządu pomiarowego jest struktura mechanizmu platformy Stewarta. Mechanizm o tego typu strukturze został zaprezentowany w pracy [54]. Przyrząd, którego struktura również wzorowana jest na strukturze mechanizmu platformy Stewarta, jednak dokonujący pomiaru na innej zasadzie, przedstawiono w pracy [5].

Schemat przyrządu o strukturze platformy Stewarta, opisanego w pracy [54], pokazany został na Rys. 11. Jego mechanizm zbudowany jest z 6 łączników d_i , $i=(1)6$ połączonych parami kinematycznymi obrotowo- przesuwными s_i , $i=(1)6$. W punktach: D_i , $i=(1)6$, będących środkami przegubów kulowych, łączniki połączone są z przymocowaną do koła tarczą parami kinematycznymi. Punktami H_i , $i=(1)6$, zaznaczono na rysunku środki przegubów kulowych łączących łączniki z nadwoziem.



Rys. 11. Schemat mechanizmu przyrządu służącego do wyznaczania przemieszczeń liniowych oraz kątowych koła kierowanego, którego struktura wzorowana jest na strukturze mechanizmu platformy Stewarta. 1- tarcza mocowana do obręczy koła, 2- płyta nieruchoma względem zwrotnicy koła.

Liczbę stopni ruchliwości mechanizmu można obliczyć za pomocą, znanego z teorii maszyn i mechanizmów [32] wzoru (27):

$$R = R_t - R_p, \quad (27)$$

gdzie:

$$R_t = 6(n-1) - \sum_{i=1}^5 i \cdot p_i, \quad (28)$$

- R - ruchliwość rzeczywista mechanizmu,
- R_t - ruchliwość teoretyczna mechanizmu,
- R_p - ruchliwość pozorną mechanizmu,
- p_i - liczba par kinematycznych i -tej klasy,
- n - liczba ogniów tworzących mechanizm,
- i - klasa pary kinematycznej.

W odniesieniu do rozpatrywanego mechanizmu: $n=14$, $p_4=6$, $p_3=12$, $p_5=p_2=p_1=0$, zatem $R_t=18$. Po odjęciu pozornych stopni ruchliwości $R_p=12$, odpowiadających obrotom łączników przyrządu względem ich osi podłużnych, od ruchliwości teoretycznej utrzymuje się ruchliwość rzeczywistą $R=6$, która jest równa liczbie stopni swobody zwrotnicy koła w $\{N\}$.

5.1.1.1. Kinematyka mechanizmu przyrządu pomiarowego

Środki przegubów kulowych: D_i , $i=(1)6$ są połączone w sposób kinematyczny ze zwrotnicą koła. Zatem można obliczyć odległości tych punktów od punktów B_j , $j=(1)6$. Natomiast współrzędne punktów D_i w $\{N\}$ daje się wyznaczyć z układów równań:

dla punktu D₁:

$$\vec{r}_{B_j D_1, N}^{-T} \vec{r}_{B_j D_1, N} = l_{D_1 B_j}^2, \quad \text{dla } \begin{cases} j = 1, \\ j = 2, \\ j = 3. \end{cases} \quad (29)$$

dla punktu D₂:

$$\vec{r}_{B_j D_2, N}^{-T} \vec{r}_{B_j D_2, N} = l_{D_2 B_j}^2, \quad \text{dla } \begin{cases} j = 1, \\ j = 2, \\ j = 4. \end{cases} \quad (30)$$

dla punktu D₃:

$$\vec{r}_{B_j D_3, N}^{-T} \vec{r}_{B_j D_3, N} = l_{D_3 B_j}^2, \quad \text{dla } \begin{cases} j = 2, \\ j = 3, \\ j = 4. \end{cases} \quad (31)$$

dla punktu D₄:

$$\vec{r}_{B_j D_4, N}^{-T} \vec{r}_{B_j D_4, N} = l_{D_4 B_j}^2, \quad \text{dla } \begin{cases} j = 2, \\ j = 3, \\ j = 5. \end{cases} \quad (32)$$

dla punktu D₅:

$$\vec{r}_{B_j D_5, N}^{-T} \vec{r}_{B_j D_5, N} = l_{D_5 B_j}^2, \quad \text{dla } \begin{cases} j = 3, \\ j = 4, \\ j = 5. \end{cases} \quad (33)$$

dla punktu D₆:

$$\vec{r}_{B_j D_6, N}^{-T} \vec{r}_{B_j D_6, N} = l_{D_6 B_j}^2, \quad \text{dla } \begin{cases} j = 1, \\ j = 4, \\ j = 5. \end{cases} \quad (34)$$

Zatem możliwe jest obliczenie względnych wydłużeń s_i łączników d_i , $i=(1)6$, względem ich odległości konstrukcyjnych. Wydłużenia s_i są funkcjami q i u_p .

W praktycznym zastosowaniu przyrządu pomiarowego do określenia translacji i rotacji zwrotnicy koła kierowanego trzeba dokonać pomiaru współrzędnych punktów: D_i , $i=(1)6$ oraz H_i , $i=(1)6$, przy konstrukcyjnej konfiguracji zawieszenia; potrzebne są również wydłużenia $s_i(q, u_p)$ łączników d_i , $i=(1)6$, mierzone za pomocą czujników.

Wyznaczanie rotacji i translacji zwrotnicy koła za pomocą przyrządu pomiarowego, sprowadza się do rozwiązania zadania, w którym przy danych wydłużeniach $s_i(q, u_p)$ łączników d_i , $i=(1)6$ i położeniach konstrukcyjnych punktów D_i oraz punktów dodatkowych, np. $D_7 \equiv B_7$ i $D_8 \equiv B_6$ leżących na osi obrotu koła, należy określić współrzędne tych punktów jako funkcje parametrów q i u_p z układu 18 równań:

$$\begin{cases} \vec{r}_{D_j H_j, N}^{-T} \vec{r}_{D_j H_j, N} = (l_{D_j H_j} + s_j)^2; & j=1(6), \\ \vec{r}_{D_k D_l, N}^{-T} \vec{r}_{D_k D_l, N} = l_{D_k D_l}^2; & k=1(2), l=3(6), \\ \vec{r}_{D_m D_n, N}^{-T} \vec{r}_{D_m D_n, N} = l_{D_m D_n}^2; & m=3(4), n=5(6). \end{cases} \quad (35)$$

Układ (35) został rozwiązany za pomocą omówionej wyżej metody perturbacji. Współrzędne punktu D_7 są rozwiązaniami układu równań:

$$\begin{cases} \vec{r}_{D_7 D_1, N}^{-T} \vec{r}_{D_7 D_1, N} = l_{D_7 D_1}^2, \\ \vec{r}_{D_7 D_2, N}^{-T} \vec{r}_{D_7 D_2, N} = l_{D_7 D_2}^2, \\ \vec{r}_{D_7 D_3, N}^{-T} \vec{r}_{D_7 D_3, N} = l_{D_7 D_3}^2. \end{cases} \quad (36)$$

Współrzędne punktu $D_8 \equiv B_6$ oblicza się analogicznie jak punktu D_7 .

Sposób wyznaczania kątów rotacji: α, β, γ {K} względem {N}, kątów skrętu i pochylenia koła δ_k, γ_k na podstawie współrzędnych punktów $D_i, i=(1)8$ oraz punktów $B_j, j=(1)6$ jest taki sam.

5.1.1.2. Współrzędne punktów mocowania przyrządu pomiarowego

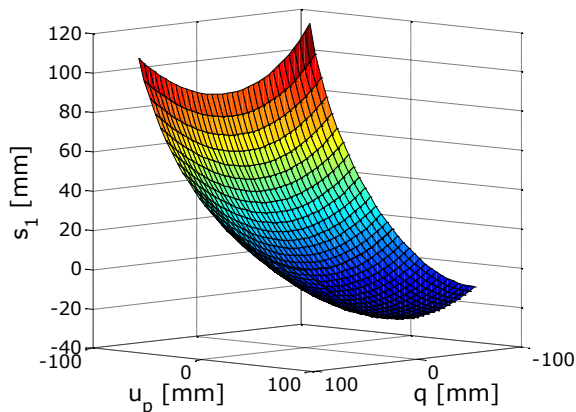
Poniżej, w milimetrach, podane zostały współrzędne punktów mocowania przyrządu pomiarowego $D_i, i=(1)6$ oraz $H_i, i=(1)6$ dla konstrukcyjnej konfiguracji mechanizmu zawieszenia:

$D_1(-70.7, 825.0, -50.0);$	$D_3(112.7, 815.0, -35.9);$	$D_5(-26.4, 811.0, 71.5);$
$D_2(74.4, 841.0, -50.6);$	$D_4(25.1, 812.0, 75.4);$	$D_6(-91.8, 821.0, -50.0);$
$H_1(-25.1, 1155.2, -101.2);$	$H_3(132.7, 1122.0, 50.2);$	$H_5(-83.6, 1116.4, 95.9);$
$H_2(29.2, 1180.4, -76.7);$	$H_4(102.0, 1110.3, 100.5);$	$H_6(-108.5, 1111.0, 56.0).$

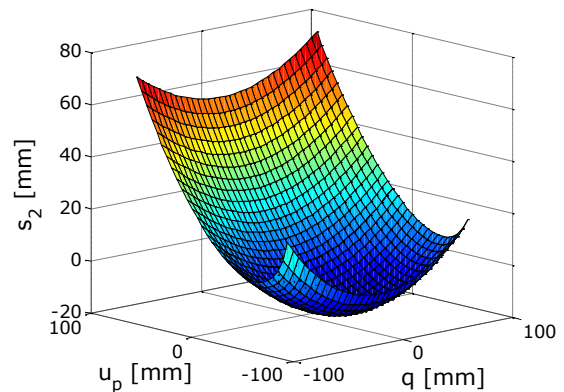
5.1.1.3. Wydłużenia łączników przyrządu pomiarowego

Pokazane poniżej wykresy przedstawiają zmiany wydłużeń łączników przyrządu pomiarowego w zależności od ugięcia zawieszenia q i przemieszczenia listwy zębatej u_p .

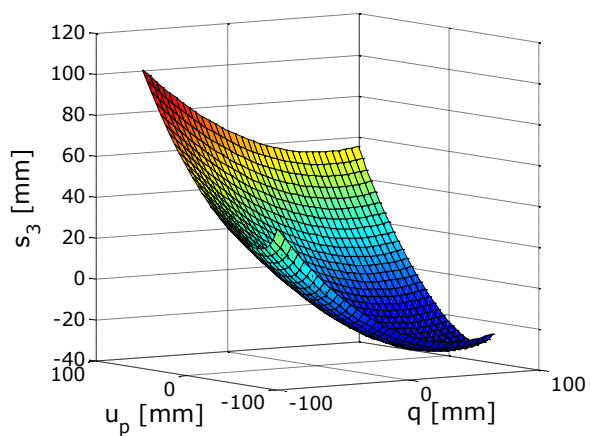
a)



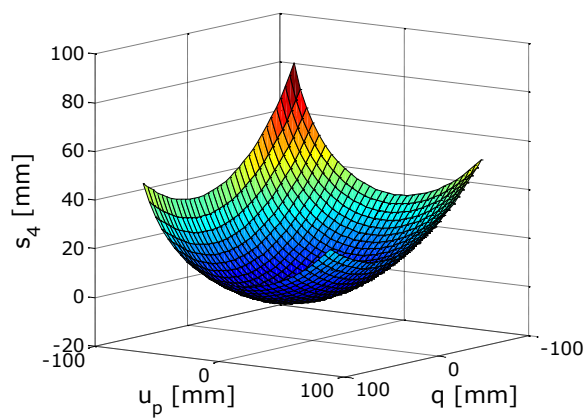
b)



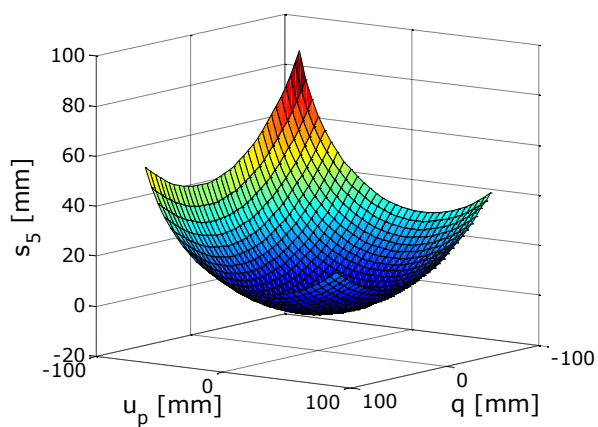
c)



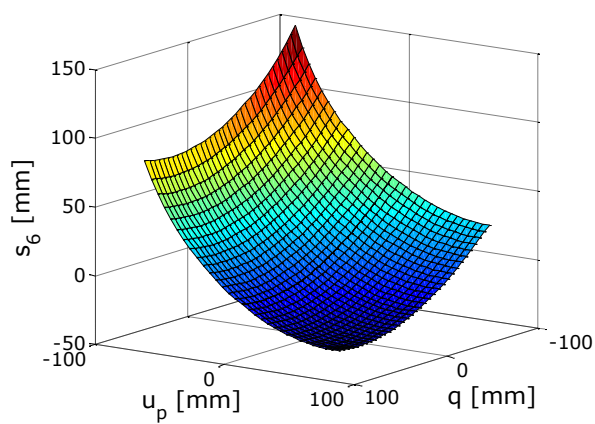
d)



e)



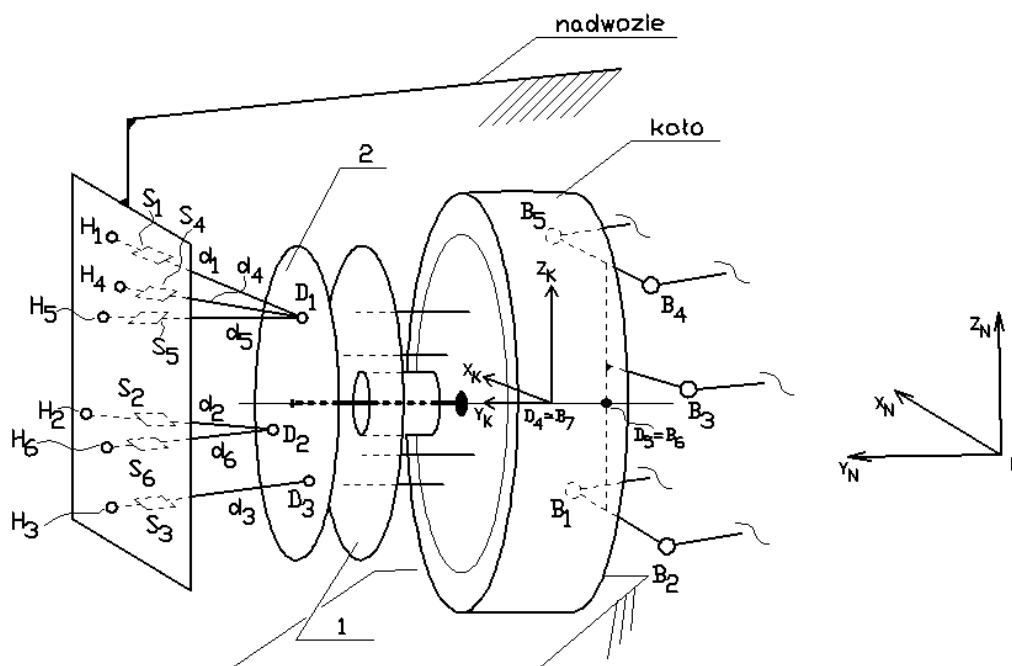
f)



Rys. 12. Zmiany wydłużeń łączników przyrządu pomiarowego o strukturze opartej o strukturę platformy Stewarta w zależności od ugięcia zawieszenia- q i przesunięcia listwy zębatej przekładni kierowniczej- u_p .

5.1.2. Mechanizm zbudowany z sześciu łączników z zabudowanymi czujnikami przemieszczeń liniowych

W pracy [55] przedstawiony został przyrząd, którego mechanizm posiada innego rodzaju strukturę. Schemat tego mechanizmu pokazano na Rys. 13.



Rys. 13. Schemat mechanizmu przyrządu służącego do wyznaczania przemieszczeń liniowych oraz kątowych koła kierowanego. Punkt D_1 jest wspólnym środkiem trzech przegubów kulowych, natomiast punkt D_2 jest środkiem dwóch takich przegubów. 1- tarcza mocowana do obręczy koła, 2- płyta nieruchoma względem zwrotnicy koła.

Podobnie, jak w przypadku wyżej przedstawionego przyrządu, mechanizm zbudowany jest z 6 łączników d_i , $i=(1)6$ połączonych parami kinematycznymi obrotowo- przesuwными s_i , $i=(1)6$. Różnica polega na tym, że przyrząd połączony jest z mocowaną do koła tarczą w trzech punktach D_i , $i=(1)3$, będących środkami przegubów kulowych. Charakterystyczne jest to, że punkt D_1 jest środkiem przegubu realizującego zadanie kinematyczne trzech przegubów kulowych o wspólnym środku, analogicznie, punkt D_2 jest środkiem przegubu realizującego zadanie kinematyczne dwóch przegubów kulowych o wspólnym środku. Punkt D_3 natomiast, jest środkiem przegubu kulowego. Podobnie, jak w przypadku mechanizmu o strukturze mechanizmu platformy Stewarta, punktami H_i , $i=(1)6$ zaznaczono środki przegubów łączących łączniki z nadwoziem.

Na podstawie wzorów (27) i (28), w sposób analogiczny jak w rozdziale 5.1.1, można wykazać, że mechanizm ten posiada ruchliwość R równą 6.

5.1.2.1. Kinematyka mechanizmu przyrządu pomiarowego

Sposób wyznaczania przemieszczeń liniowych oraz kątowych zwrotnicy wraz z kołem kierowanym, jest analogiczny, jak w przypadku mechanizmu o strukturze mechanizmu platformy Stewarta. W inny sposób, natomiast, zapisany został układ równań więzów geometrycznych mechanizmu przyrządu. Współrzędne punktów D_i , $i=(1)3$, mocowania łączników przyrządu do płyty połączonej w sposób kinematyczny ze zwrotnicą koła, zapisano w następujący sposób:

dla punktu D₁:

$$\vec{r}_{D_1H_i.N}^T \cdot \vec{r}_{D_1H_i.N} = (l_{D_1H_i} + s_i)^2, \quad \text{dla } \begin{cases} i = 1, \\ i = 4, \\ i = 5. \end{cases} \quad (37)$$

dla punktu D₂:

$$\begin{cases} \vec{r}_{D_2D_1.N}^T \cdot \vec{r}_{D_2D_1.N} = l_{D_2D_1}^2, \\ \vec{r}_{D_2H_i.N}^T \cdot \vec{r}_{D_2H_i.N} = (l_{D_2H_i} + s_i)^2, \end{cases} \quad \text{dla } \begin{cases} i = 2, \\ i = 6. \end{cases} \quad (38)$$

dla punktu D₃:

$$\begin{cases} \vec{r}_{D_3D_1.N}^T \cdot \vec{r}_{D_3D_1.N} = l_{D_3D_1}^2, \\ \vec{r}_{D_3D_2.N}^T \cdot \vec{r}_{D_3D_2.N} = l_{D_3D_2}^2, \\ \vec{r}_{D_3H_3.N}^T \cdot \vec{r}_{D_3H_3.N} = (l_{D_3H_3} + s_3)^2. \end{cases} \quad (39)$$

Powyższe układy rozwiązane zostały za pomocą omówionej wyżej metody perturbacji [55], możliwe jest również zastosowanie metody triangulacyjnej.

5.1.2.2. Współrzędne punktów mocowania przyrządu pomiarowego

Poniżej podane zostały współrzędne punktów mocowania przyrządu pomiarowego D_i, i=(1)3 oraz H_i, i=(1)6 dla konstrukcyjnej konfiguracji mechanizmu zawieszenia:

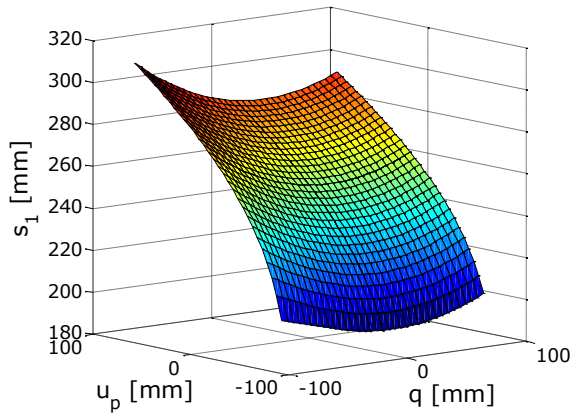
D ₁ (50.0, 818.0, -30.0);	D ₂ (25.0, 835.0, -90.0);	D ₃ (-50.0, 855.0, 200.0);
H ₁ (90.0, 1168.0, -40.0);	H ₃ (-40.0, 1174.0, 270.0);	H ₅ (110.0, 1168.0, 10.0);
H ₂ (10.0, 1170.0, -70.0);	H ₄ (45.0, 1162.0, -90.0);	H ₆ (-10.0, 1161.0, 270.0).

Wartości współrzędnych podano w milimetrach.

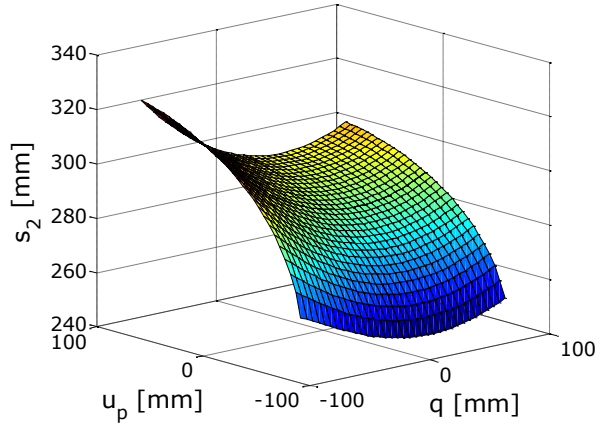
5.1.2.3. Wydłużenia łączników przyrządu pomiarowego

Na Rys. 14. pokazane zostały zmiany wydłużeń łączników przyrządu pomiarowego w zależności od zadawanych parametrów q i u_p .

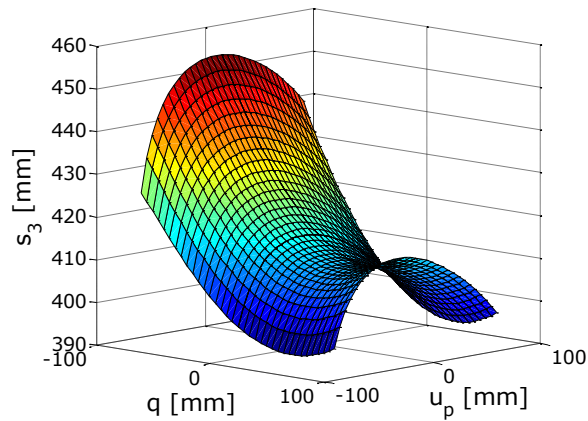
a)



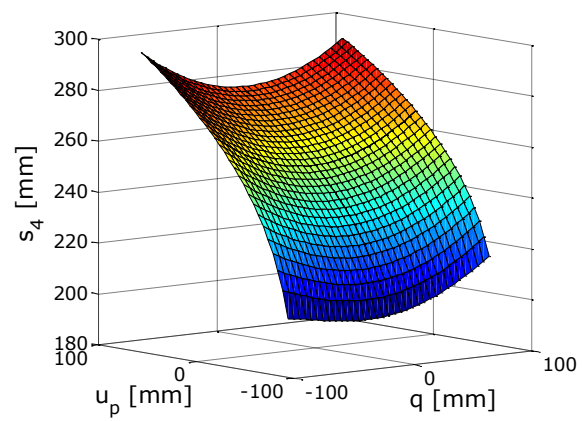
b)



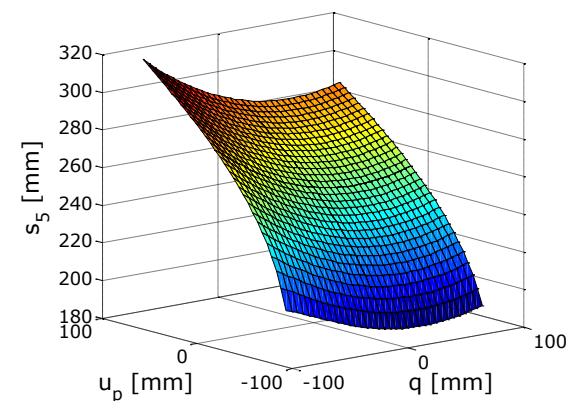
c)



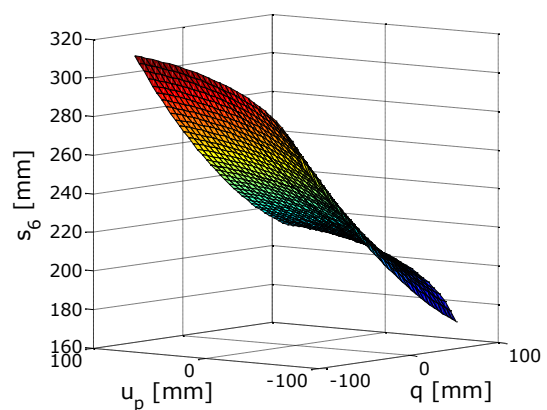
d)



e)



f)

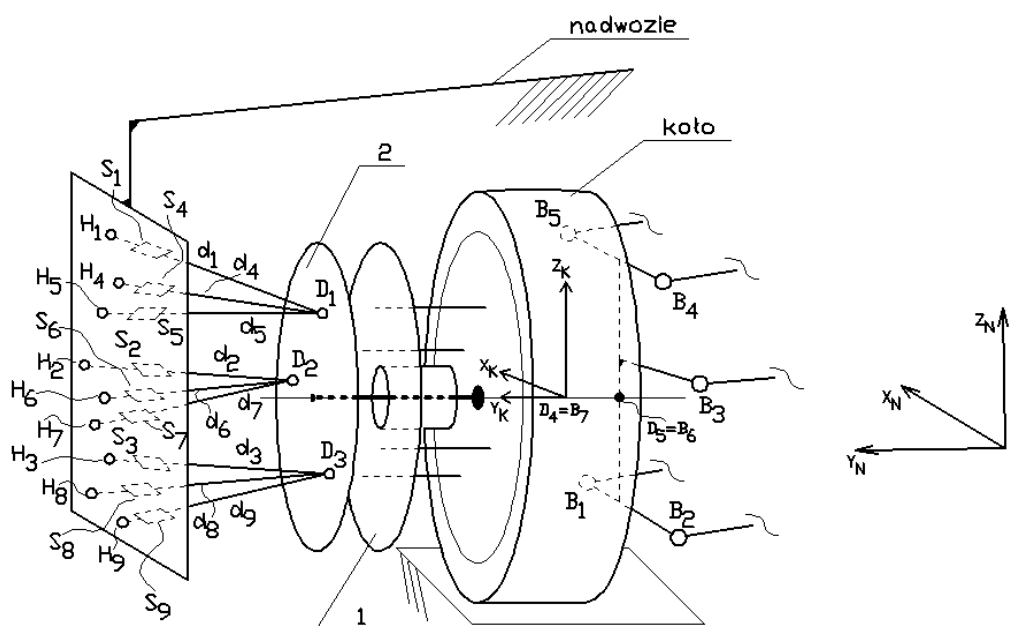


Rys. 14. Zmiany wydłużeń łączników przyrządu pomiarowego zbudowanego z sześciu łączników z zabudowanymi czujnikami przemieszczeń w zależności od ugięcia zawieszenia- q i przesunięcia listwy zębatej przekładni kierowniczej- u_p .

5.1.3. Mechanizm zbudowany z dziewięciu łączników z zabudowanymi czujnikami przemieszczeń liniowych

Mechanizm ten posiada strukturę podobną do struktury mechanizmu zbudowanego z sześciu łączników z zabudowanymi czujnikami przemieszczeń liniowych. Charakterystycznym dla niego jest to, że każdy z punktów D_i , $i=1(3)$, mocowania jego łączników do płyty połączonej w sposób kinematyczny ze zwrotnicą koła, jest środkiem przegubu spełniającego zadanie kinematyczne trzech przegubów kulowych o wspólnym środku. Ruchliwość mechanizmu R jest równa 6, co można wykazać stosując wzory (27) i (28). W tym przypadku $n=20$, $p_4=9$, $p_3=18$, $p_5=p_2=p_1=0$, $R_p=18$.

Schemat mechanizmu zbudowanego z dziewięciu łączników pomiarowych z zabudowanymi czujnikami przemieszczeń liniowych, pokazany został na Rys. 15.



Rys. 15. Schemat mechanizmu przyrządu służącego do wyznaczania przemieszczeń liniowych oraz kątowych koła kierowanego. Punkty D_i , $i=1(3)$ są środkami trzech współosiowych przegubów kulowych. 1- tarcza mocowana do obręczy koła, 2- tarcza nieruchoma względem zwrotnicy koła.

5.1.3.1. Kinematyka mechanizmu przyrządu pomiarowego

Układ więzów geometrycznych mechanizmu został zapisany za pomocą następujących układów równań, w których uwzględnione zostały wydłużenia łączników pomiarowych:

dla punktu D_1 :

$$\vec{r}_{D_1 H_1, N}^{-T} \vec{r}_{D_1 H_1, N} = (l_{D_1 H_1} + s_1)^2, \quad \text{dla } \begin{cases} i=1, \\ i=4, \\ i=5, \end{cases} \quad (40)$$

dla punktu D₂:

$$\vec{r}_{D_2H_i.N}^{-T} \vec{r}_{D_2H_i.N} = (l_{D_2H_i} + s_i)^2, \quad \text{dla } \begin{cases} i = 2, \\ i = 6, \\ i = 7, \end{cases} \quad (41)$$

dla punktu D₃:

$$\vec{r}_{D_3H_i.N}^{-T} \vec{r}_{D_3H_i.N} = (l_{D_3H_i} + s_i)^2, \quad \text{dla } \begin{cases} i = 3, \\ i = 8, \\ i = 9, \end{cases} \quad (42)$$

Powyższe układy równań zostały rozwiązane za pomocą metody triangulacyjnej. Sposób postępowania przy określaniu przemieszczeń liniowych oraz kątowych koła względem nadwozia jest taki sam jak w przypadku przedstawionych wyżej struktur mechanizmu przyrządu pomiarowego.

5.1.3.2. Współrzędne punktów mocowania przyrządu pomiarowego

Poniżej, w milimetrach, zestawione zostały współrzędne punktów D_i, i=(1)3 mocowania przyrządu pomiarowego, zbudowanego z dziewięciu łączników, do tarczy sztywno związanej ze zwrotnicą koła:

D₁(50.0, 815.0, 30.0);

D₂(25.0, 835.0, -90.0);

D₃(-50.0, 855.0, 200.0);

oraz H_i, gdzie i =1(9) stanowiących punkty mocowania łączników przyrządu do płyty połączonej w sposób nieruchomy z nadwoziem pojazdu:

H₁(90.0, 1165.0, -40.0);

H₄(45.0, 1171.0, -90.0);

H₇(30.0, 1166.0, -20.0);

H₂(10.0, 1164.0, -70.0);

H₅(110.0, 1162.0, 10.0);

H₈(-85.0, 1163.0, 220.0);

H₃(-40.0, 1169.0, 270.0);

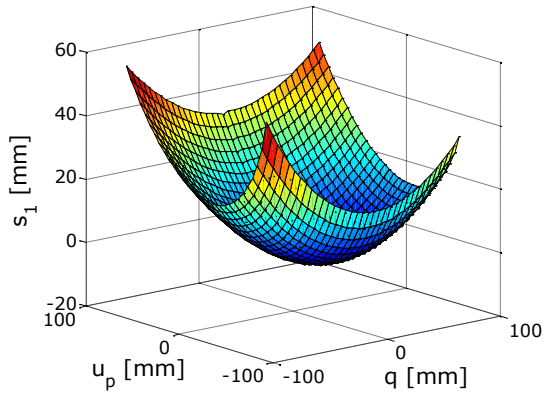
H₆(30.0, 1167.0, -95.0);

H₉(-20.0, 1164.0, 320.0).

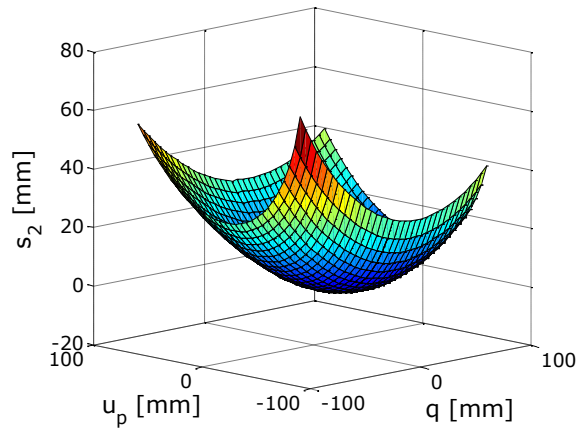
5.1.3.3. Wydłużenia łączników przyrządu pomiarowego

Na Rys. 16. pokazane zostały zmiany wydłużeń łączników przyrządu pomiarowego w zależności od zadawanych parametrów q i u_p .

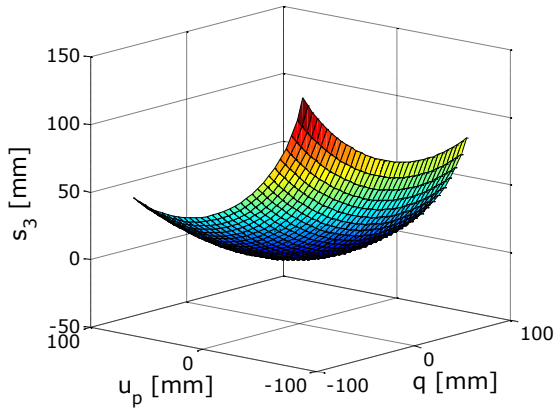
a)



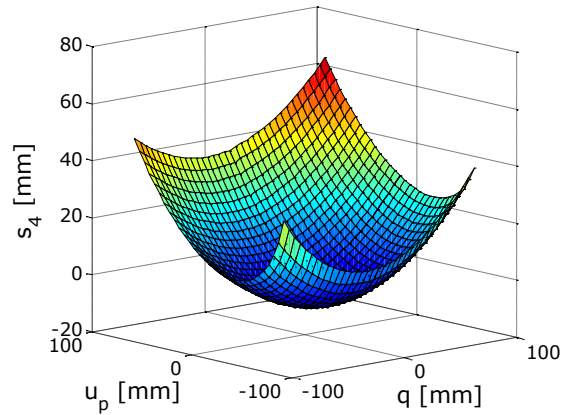
b)



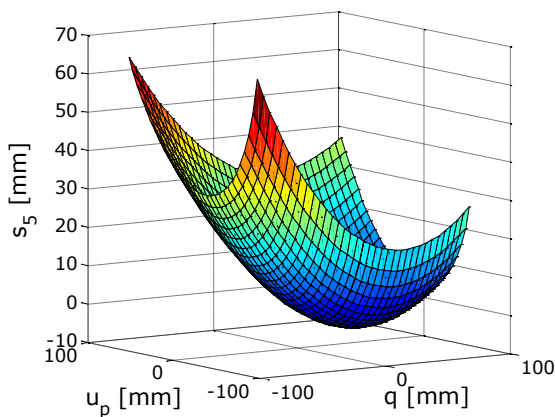
c)



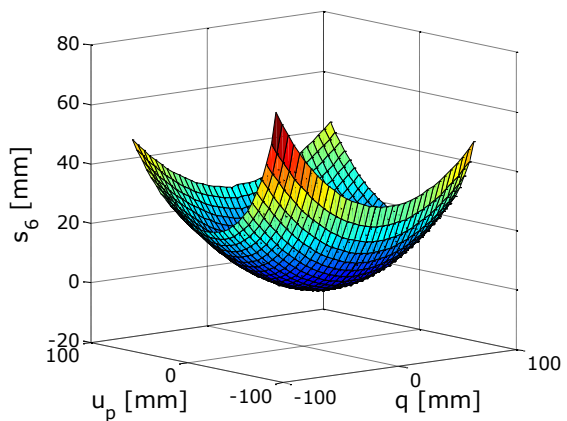
d)



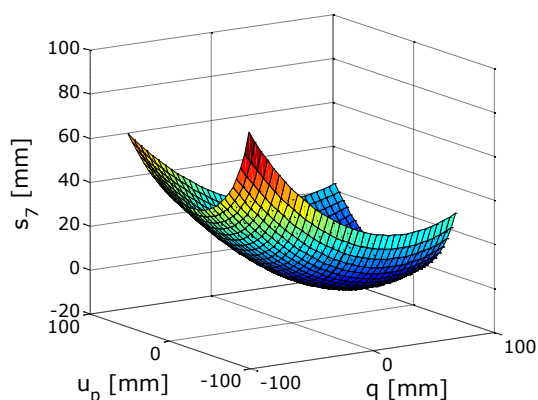
e)



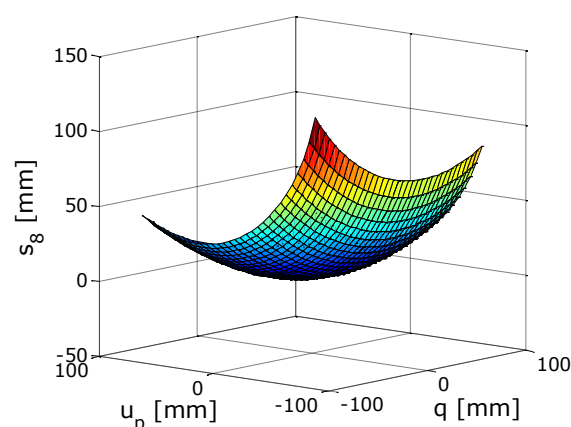
f)



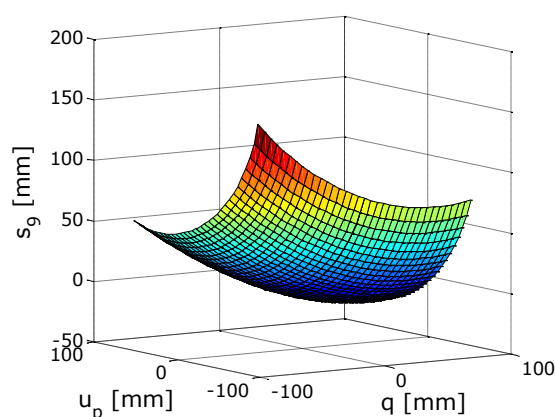
g)



h)



i)



Rys. 16. Zmiany wydłużeń łączników przyrządu pomiarowego zbudowanego z dziewięciu łączników z zabudowanymi czujnikami przemieszczeń w zależności od ugięcia zawieszenia- q i przesunięcia listwy zębatej przekładni kierowniczej- u_p .

5.2. Analiza stopnia uwarunkowania układu równań więzów geometrycznych

Wadą wymienionych w punktach 5.1.1 i 5.1.2. struktur mechanizmu przyrządu pomiarowego złożonych z sześciu łączników jest zależność istnienia rozwiązania układów równań ich więzów geometrycznych od początkowej konfiguracji konstrukcyjnej. W przypadku niewłaściwego doboru konstrukcyjnego położenia charakterystycznych punktów D_i oraz H_i mechanizmów pomiarowych w $\{N\}$ może okazać się, że wyznaczenie charakterystyk kinematycznych układu prowadzenia koła, opisujących jego ruch względem nadwozia, jest niemożliwe. Układy nieliniowych równań więzów geometrycznych mechanizmów, w pewnych obszarach założonej przestrzeni ruchu zwrotnicy z kołem, charakteryzują się osobliwością. Rys. 17. przedstawia niepełne charakterystyki zawieszenia wyznaczone za pomocą przyrządu pomiarowego o strukturze wzorowanej na strukturze mechanizmu platformy Stewarta w przypadku niżej podanych współrzędnych punktów D_i oraz H_i ; $i=1(6)$:

$$D_1 (100.1, 675.9, 350.0);$$

$$H_1 (200.1, 380.2, 210.2);$$

$$D_2 (80.4, 680.0, 390.6);$$

$$H_2 (-127.2, 370.2, 258.7);$$

$$D_3 (-260.7, 670.1, 75.0);$$

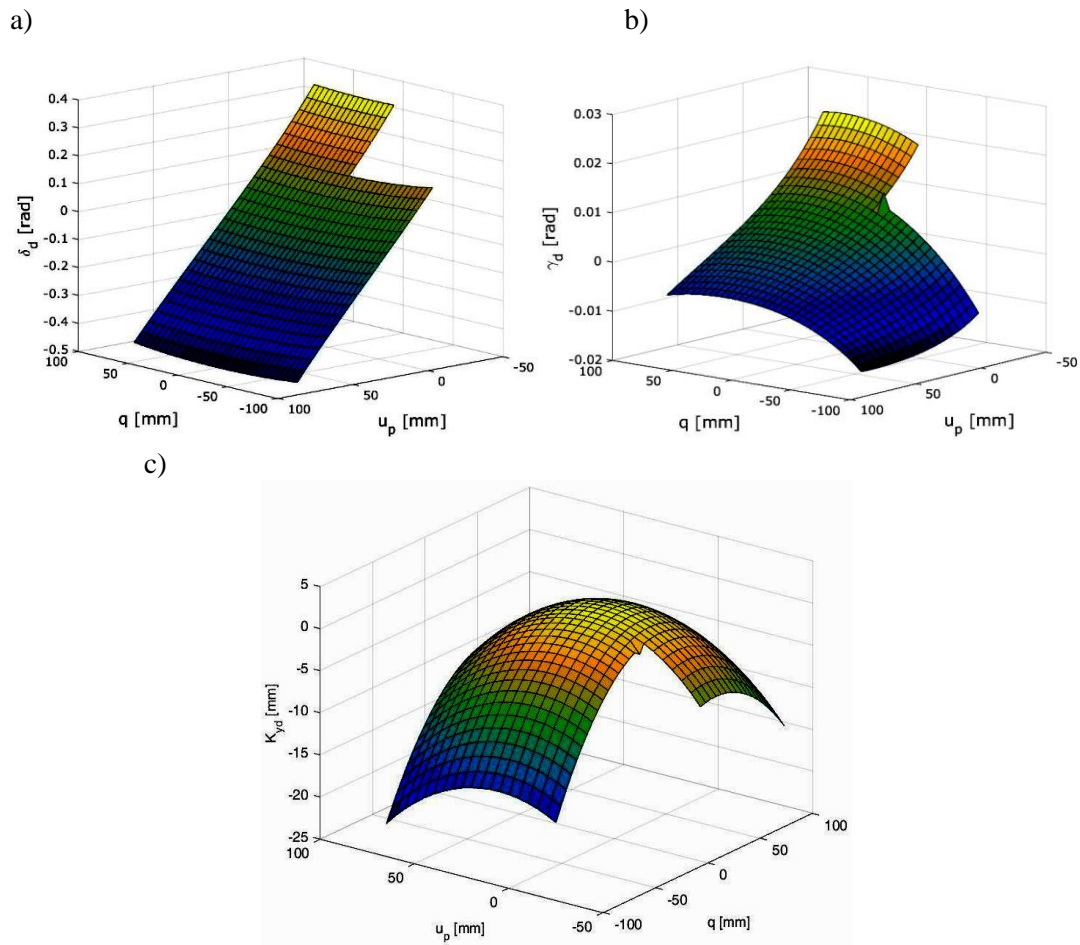
$$H_3 (-150.7, 375.0, 247.2);$$

$$D_4 (-245.4, 675.8, 45.4);$$

$$H_4 (-60.0, 390.3, -50.5);$$

D_5 (250.4, 685.3, -15.5);
 D_6 (239.0, 690.0, -30.0);

H_5 (215.6, 385.5, 180.9);
 H_6 (-45.0, 385.0, -58.0).



Rys. 17. Zależności kątów skrętu δ_d i pochylenia γ_d koła oraz względnych zmian poprzecznego położenia punktu związanego z kołem ΔK_{y_d} od ugięcia zawieszenia- q i przesunięcia listwy zębatej- u_p , wyznaczone za pomocą przyrządu pomiarowego o strukturze mechanizmu platformy Stewarta. Dla danych punktów mocowania przyrządu do koła i do nadwozia uzyskanie charakterystyk odpowiadających pełnemu zakresowi ruchów resorowania zawieszenia nie jest możliwe.

5.3. Zmiany konfiguracji mechanizmu pomiarowego

Przy pewnej konfiguracji konstrukcyjnej mechanizmu pomiarowego macierz główna układu więzów geometrycznych przyrządu (35) może być słabo uwarunkowana lub osobliwa. W celu zbadania wpływu przyjętej lub wyznaczonej konfiguracji wymienionego mechanizmu na uwarunkowanie macierzy głównej można wykorzystać równoważny układ więzów geometrycznych:

$$\bar{\mathbf{r}}_{H_i D_i N}^T \bar{\mathbf{r}}_{H_i D_i N} = r_{H_i D_i N}, \quad i=1(6); \quad (43)$$

gdzie:

$$\vec{r}_{H_i D_i . N} = \vec{r}_{ND_8 . N} + A_{NK} \cdot \vec{r}_{D_8 D_i . K} - \vec{r}_{NH_i . N}, \quad (44)$$

przy czym:

- $\vec{r}_{H_i D_i . N}$ - wektor i- tego łącznika mechanizmu,
- $\vec{r}_{ND_8 . N}$ - wektor położenia środka koła w układzie związanym z nadwoziem pojazdu,
- A_{NK} - macierz transformacji pomiędzy układem związanym ze środkiem koła i układem związanym z nadwoziem pojazdu,
- $\vec{r}_{D_8 D_i . K}$ - wektor położenia punktu D_i w układzie związanym ze środkiem koła,
- $\vec{r}_{NH_i . N}$ - wektor położenia punktu H_i w układzie związanym z nadwoziem pojazdu;

Jednokrotnie różniczkując równania więzów (43) uzyskuje się:

$$\dot{\vec{r}} = \mathbf{J} \cdot \hat{\mathbf{v}}^c \quad (45)$$

gdzie:

$$\dot{\vec{r}} = [\dot{\vec{r}}_{H_i D_i}, \dot{\vec{r}}_{H_2 D_2}, \dots, \dot{\vec{r}}_{H_i D_i}], \quad (46)$$

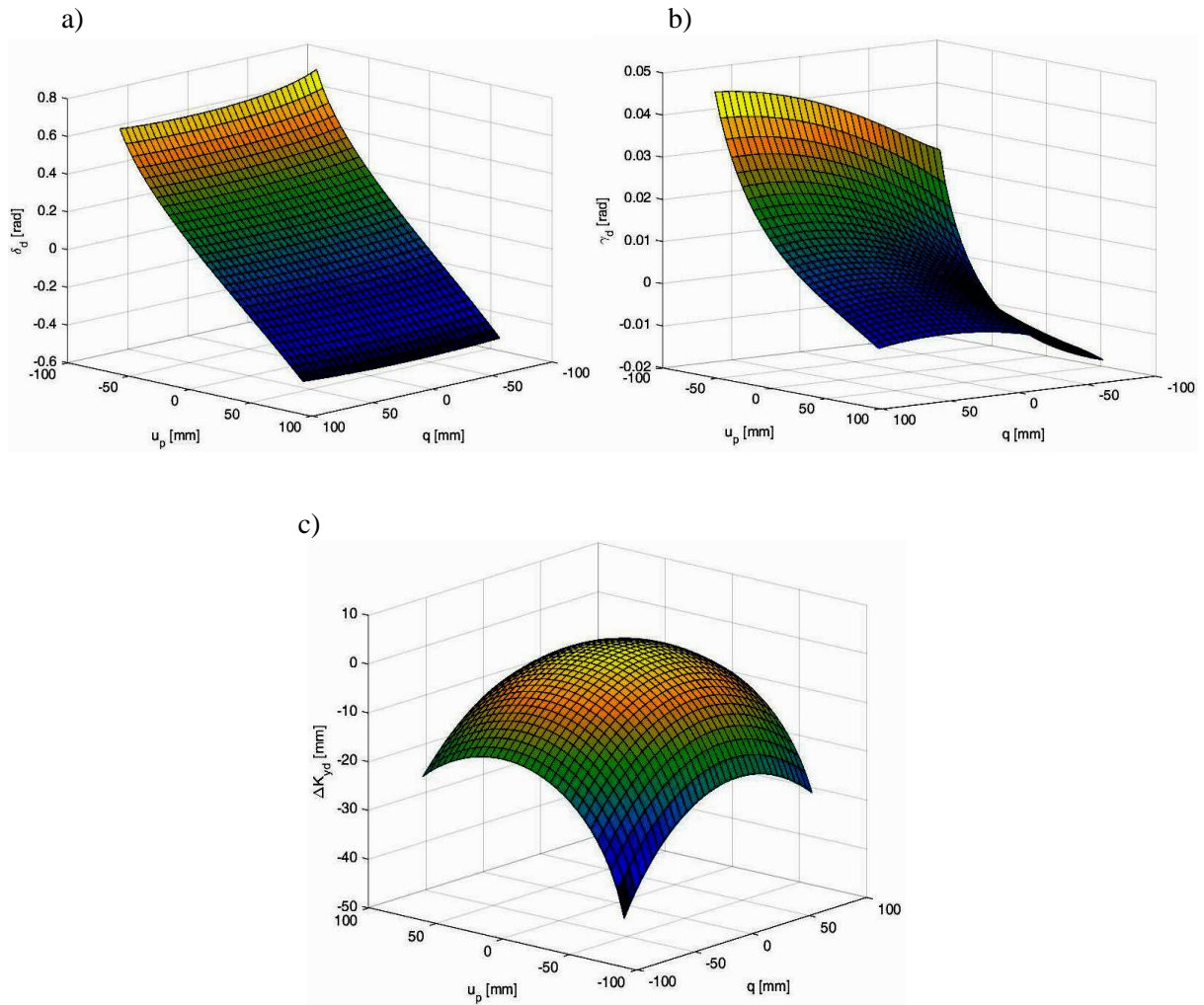
$$\hat{\mathbf{v}}^c = [[\mathbf{v}_k]^T [\boldsymbol{\omega}_k]^T], \quad (47)$$

- \mathbf{J} - macierz jacobianowa mechanizmu,
- $\hat{\mathbf{v}}^c$ - wektor, którego współrzędnymi są składowe prędkości liniowej środka koła \mathbf{v}_k i jego prędkości kątowej $\boldsymbol{\omega}_k$.

Słabe uwarunkowanie macierzy głównej układu równań (43) występuje w obszarach przestrzeni ruchu koła, w których wyznacznik macierzy jacobianowej mechanizmu $\det(\mathbf{J})$ jest bliski zeru, natomiast wskaźnik uwarunkowania macierzy jacobianowej $\chi(\mathbf{J})$ zmierza do nieskończoności [5].

5.4. Charakterystyki zawieszenia

Na Rys. 18. pokazane zostały charakterystyki wielowahaczowego zawieszenia lewego kierowanego koła samochodu osobowego. Charakterystyki te uzyskano w drodze symulacji komputerowych wykonanych w środowisku programu Matlab. Symulacje zostały przeprowadzone dla przyrządu zbudowanego z dziewięciu łączników, którego kinematykę omówiono w rozdziale 5.1.3. W obliczeniach przyjęto, podane w podpunkcie 5.1.1.2, współrzędne punktów mocowania łączników przyrządu do płyty zewnętrznej, zamocowanej w sposób nieruchomy do nadwozia pojazdu oraz płyty wewnętrznej, połączonej z kołem badanego samochodu.



Rys. 18. Zależności kątów skrętu δ_d i pochylenia γ_d koła oraz względnych zmian poprzecznego położenia punktu związanego z kołem ΔK_{y_d} od ugięcia zawieszenia- q i przesunięcia listwy zębatej- u_p , wyznaczone za pomocą przyrządu pomiarowego zbudowanego z dziewięciu łączników z zabudowanymi czujnikami przemieszczeń liniowych.



CZĘŚĆ BADAWCZA



6. Opis przyrządu pomiarowego

Ze względu na wykazaną w symulacjach numerycznych zależność istnienia rozwiązania układu równań więzów geometrycznych mechanizmu przyrządu od jego konfiguracji konstrukcyjnej, w przypadku mechanizmów z sześcioma łącznikami (Patrz rozdział 5), zdecydowano się na wykonanie prototypu przyrządu składającego się z dziewięciu łączników z zabudowanymi czujnikami przemieszczeń liniowych. Struktura tego typu przyrządu oraz sposób rozwiązania układu równań jego więzów geometrycznych omówione zostały w podrozdziale 5.1.3. Łączniki przyrządu zamocowane są do dwóch płyt (Rys. 22): po stronie zewnętrznej do płyty połączonej w sposób nieruchomy z nadwoziem pojazdu, po stronie wewnętrznej do płyty połączonej nieruchomo z piastą koła. Połączenie to zrealizowane jest za pomocą ułożyskowanej piasty (Rys. 19.).

a)

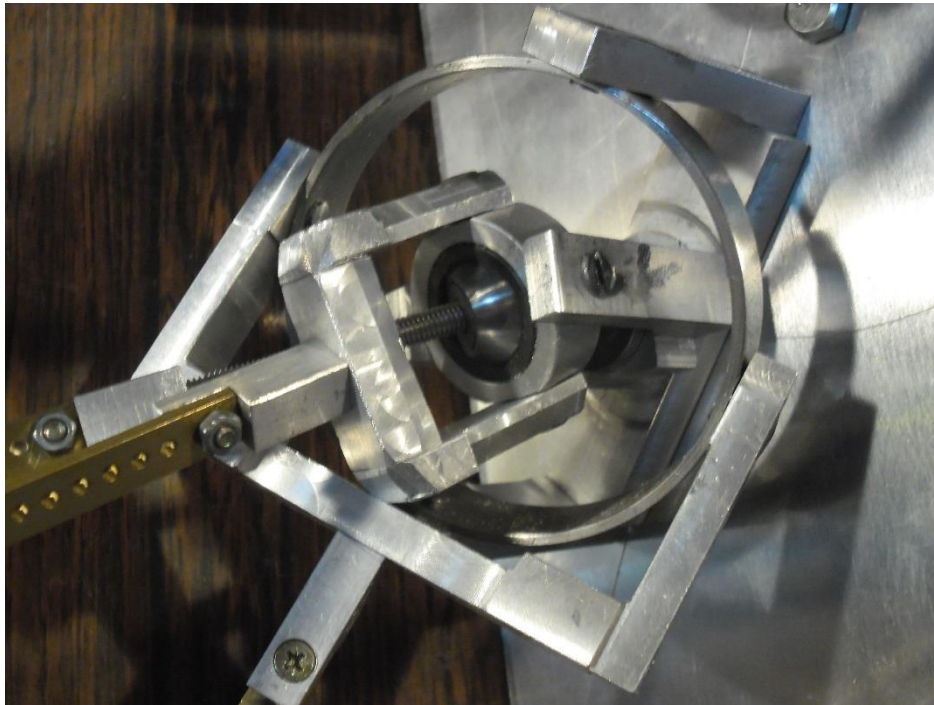


b)



Rys. 19. Ułożyskowana piasta, za pomocą której mocowana jest wewnętrzna płyta przyrządu. Widoczna jest również nakrętka łącząca piastę z osią piasty koła badanego pojazdu.

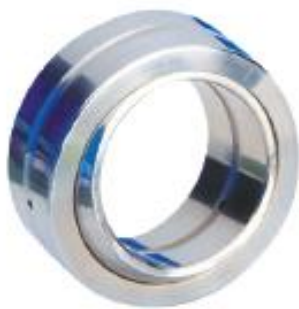
Ruch obrotowy płyty wewnętrznej (związanej z kołem badanego pojazdu) został zablokowany. Łączniki przyrządu zamocowane są do płyt za pomocą przegubów kulowych, których środki, w przypadku płyty zewnętrznej oznaczono literami H_i , gdzie $i=1(9)$; natomiast w przypadku płyty wewnętrznej literami D_j , gdzie $j=1(3)$. Punkty D_j są środkami przegubów spełniających zadania kinematyczne trzech przegubów kulowych o wspólnym środku (Rys. 20.).



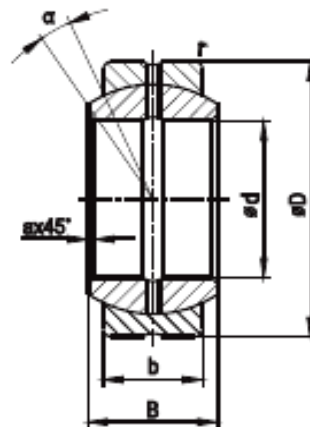
Rys. 20. Widok jednego z trzech przegubów $D_j, j=1(3)$. Ich charakterystyczną cechą jest to, że realizują zadanie kinematyczne trzech przegubów kulowych o wspólnym środku.

Do budowy przegubów $D_j, j=1(3)$ oraz $H_i, i=1(9)$ wykorzystano przegubowe łożyska ślizgowe przedstawione na Rys. 21.

a)



b)



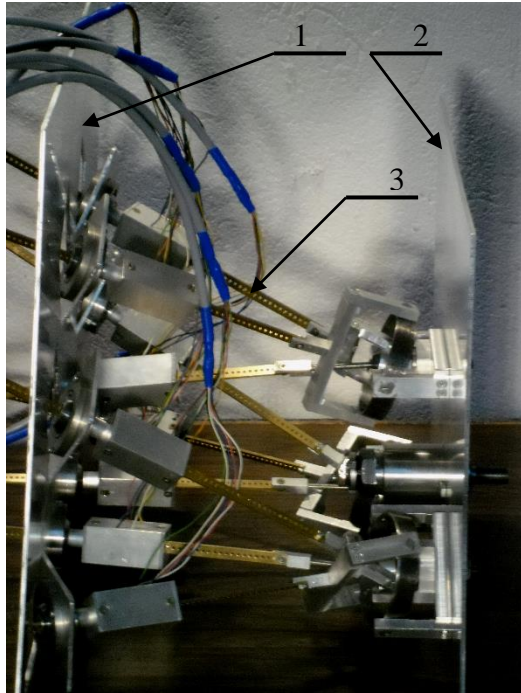
d [mm]	D [mm]	B [mm]	b [mm]	r [mm]	a [mm]	α [°]
16	32	21	15	0,8	0,3	15

Rys. 21. Przegubowe łożyska ślizgowe PGE 16X firmy ISKRA [67] wykorzystane do mocowania łączników przyrządu z płytą zewnętrzną i wewnętrzną. a) Widok ogólny. b) Wymiary.

Każdy z dziewięciu łączników posiada zabudowany optyczny czujnik przemieszczeń liniowych (Rys. 23.). Czujniki te służą do określania względnych wydłużeń łączników przyrządu pomiarowego. Sygnały z czujników trafiają do przetwornika analogowo-cyfrowego (Rys. 22., Rys. 24.), a stamtąd do specjalnie oprogramowanego komputera przenośnego. Napięcie zasilające urządzenie wynosi 12 V. Założona dokładność czujników wynosi $\pm 0,02$ mm.

Na Rys. 22., w widoku ogólnym, przedstawiony został prototypowy przyrząd służący do pomiaru przemieszczeń liniowych oraz kątowych koła względem nadwozia. Numerem 1 oznaczono płytę zewnętrzną mocowaną w sposób nieruchomy do nadwozia pojazdu, numerem 2 płytę wewnętrzną połączoną z kołem pojazdu za pomocą ułożyskowanej piasty, natomiast numerem 3 listwę pomiarową czujnika optycznego.

a)



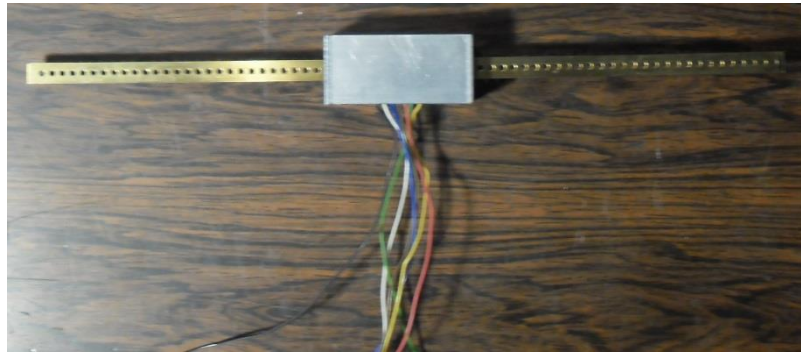
b)



Rys. 22. a) Widok ogólny prototypu przyrządu pomiarowego. 1- płyta zewnętrzna przyrządu mocowana do nadwozia pojazdu, 2- płyta wewnętrzna przyrządu mocowana do koła pojazdu, 3- listwa pomiarowa czujnika optycznego. b) Zestaw przetworników analogowo- cyfrowych.

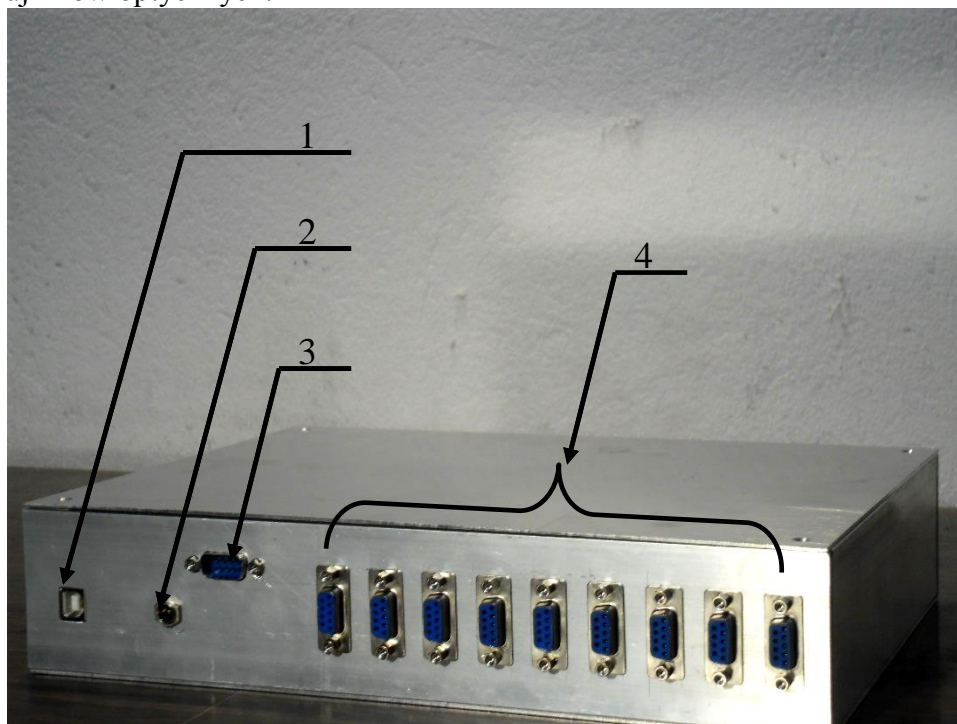
Rys. 23. przedstawia jeden z dziewięciu optycznych czujników przemieszczeń liniowych zabudowanych w łącznikach przyrządu pomiarowego.





Rys. 23. Jeden z dziewięciu optycznych czujników przemieszczeń liniowych wchodzących w skład przyrządu. Widoczna obudowa czujnika oraz listwa pomiarowa.

Na Rys. 24 pokazano zestaw przetworników analogowo- cyfrowych, do których trafiają sygnały z czujników optycznych.



Rys. 24. Zestaw przetworników analogowo- cyfrowych. 1- gniazdo typu USB B do komunikacji z komputerem, 2- gniazdo zasilania, 3- złącze DB9 – wejście sygnału z czujnika przemieszczenia liniowego środkowego drążka mechanizmu zwrotniczego (listwy zębatej), 4- złącza DB9- wejścia sygnałów z optycznych czujników zmian długości łączników przyrządu pomiarowego.

7. Pomiary metrologiczne współrzędnych punktów mocowania łączników przyrządu

Przed rozpoczęciem pomiarów przemieszczeń koła względem nadwozia pojazdu, konieczna jest znajomość początkowej konfiguracji mechanizmu opisywanego przyrządu. W tym celu należało wyznaczyć współrzędne początkowe punktów mocowania łączników przyrządu do płyty zewnętrznej oraz wewnętrznej (odpowiednio: D_j , $j=1(3)$; H_i , $i=1(9)$). Współrzędne punktów mocowania łączników przyrządu do płyty połączonej w sposób nieruchomy z nadwoziem badanego pojazdu (płyty zewnętrznej) zostały wyznaczone w Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej M-10 Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej [69], za pomocą, pokazanego na Rys. 25, ramienia pomiarowego firmy ROMER Multi Gage [70], [71].

a)



b)

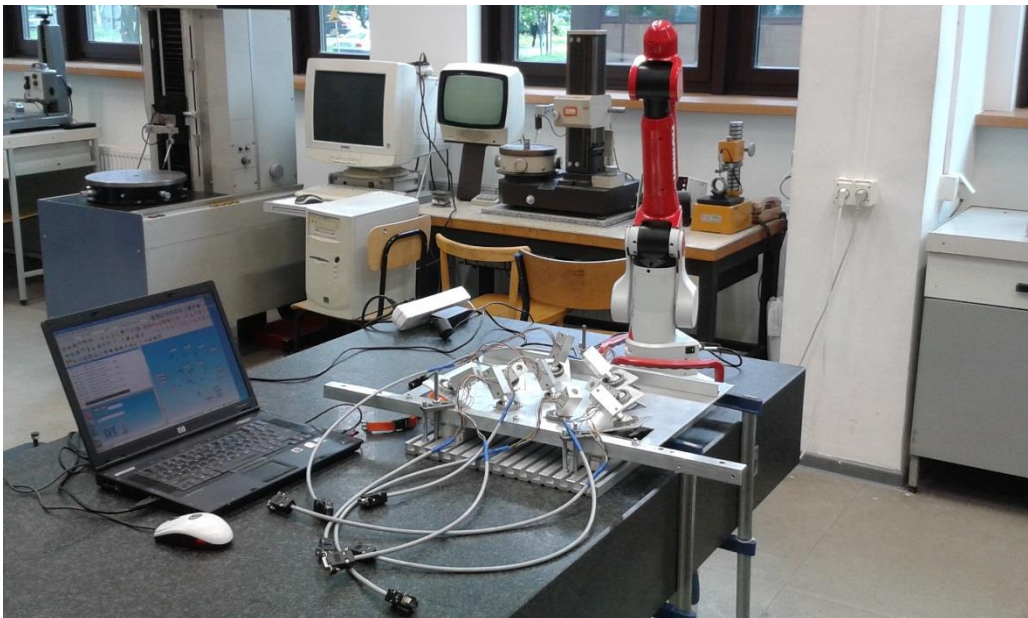


Rys. 25. Ramię pomiarowe firmy ROMER Multi Gage, za pomocą którego wyznaczone zostały współrzędne punktów H_i dla $i=1(9)$. a) Widok ogólny. b) Zbliżenie na końcówkę pomiarową.

Poniżej zestawiono podstawowe parametry ramienia Romer Multi Gage [71]:

- przestrzeń pomiarowa: 1.2 m,
- kalibracja i certyfikacja: zgodnie z normą ISO 10360-2,
- dokładność: $MPE_E=5+L/40 \leq 18 \mu\text{m}$; $MPE_P=8 \mu\text{m}$; gdzie L- długość,
- temperatura robocza: $0 \div 50^\circ\text{C}$,
- maksymalna wilgotność względna: 80% dla temp. do 31°C .

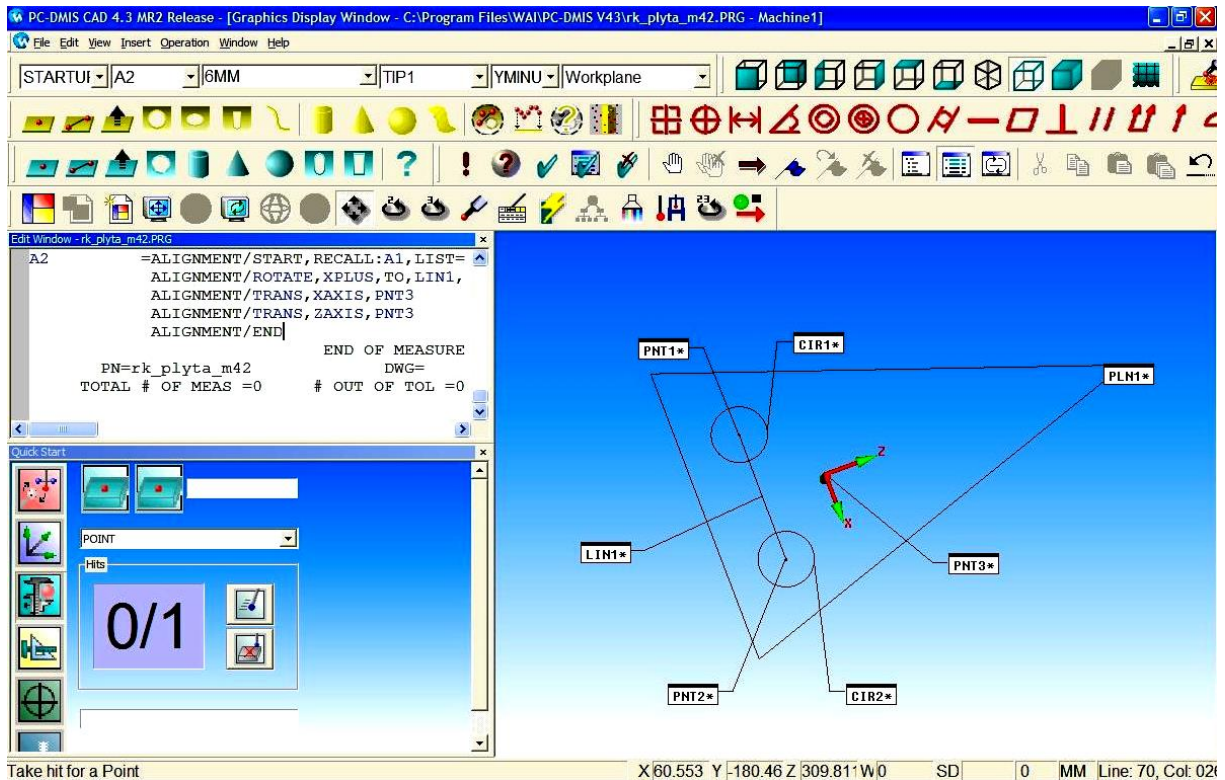
W celu dokonania pomiarów, płyta wraz z zamocowanymi za pomocą przegubów kulowych czujnikami przemieszczeń, została unieruchomiona na granitowej płycie pomiarowej w taki sposób, aby nie spowodować jej odkształceń (Rys. 26.).



Rys. 26. Płyta zewnętrzna przyrządu wraz z przymocowanymi, za pomocą przegubów kulowych, optycznymi czujnikami przemieszczeń liniowych unieruchomiona na stole pomiarowym. Widoczne jest również ramię firmy ROMER, za pomocą którego realizowano pomiary oraz komputer przenośny wraz z odpowiednim oprogramowaniem, na dysku którego rejestrowane były wyniki pomiarów.

Celem pomiaru było określenie współrzędnych środków przegubów oznaczonych jako H_i , $i = 1(9)$. Przed rozpoczęciem właściwych pomiarów należało jednoznacznie określić położenie układu współrzędnych, w którym wyznaczone zostaną współrzędne punktów H_i , $i = 1(9)$. W tym celu, w pierwszej kolejności, na powierzchni mierzonej płyty wyznaczono płaszczyznę (Na Rys. 27. oznaczoną jako PLN1.). Następnie na płaszczyźnie tej określono położenie dwóch okręgów (Oznaczenia CIR1 i CIR2), pomiędzy środkami których poprowadzono odcinek LIN1. Początek układu współrzędnych umiejscowiono we wcześniej zaznaczonym na powierzchni płyty punkcie (Oznaczenie PNT3). Oś x układu jest równoległa do odcinka LIN1, a jej zwrot skierowany jest w ten sposób, aby po zamocowaniu przyrządu pomiarowego na pojeździe samochodowym, oś x zorientowana była zgodnie z kierunkiem jazdy do przodu. Oś z jest prostopadła do osi x i skierowana do góry, natomiast kierunek i zwrot osi y dobrano tak, aby układ współrzędnych był układem prawoskrętnym

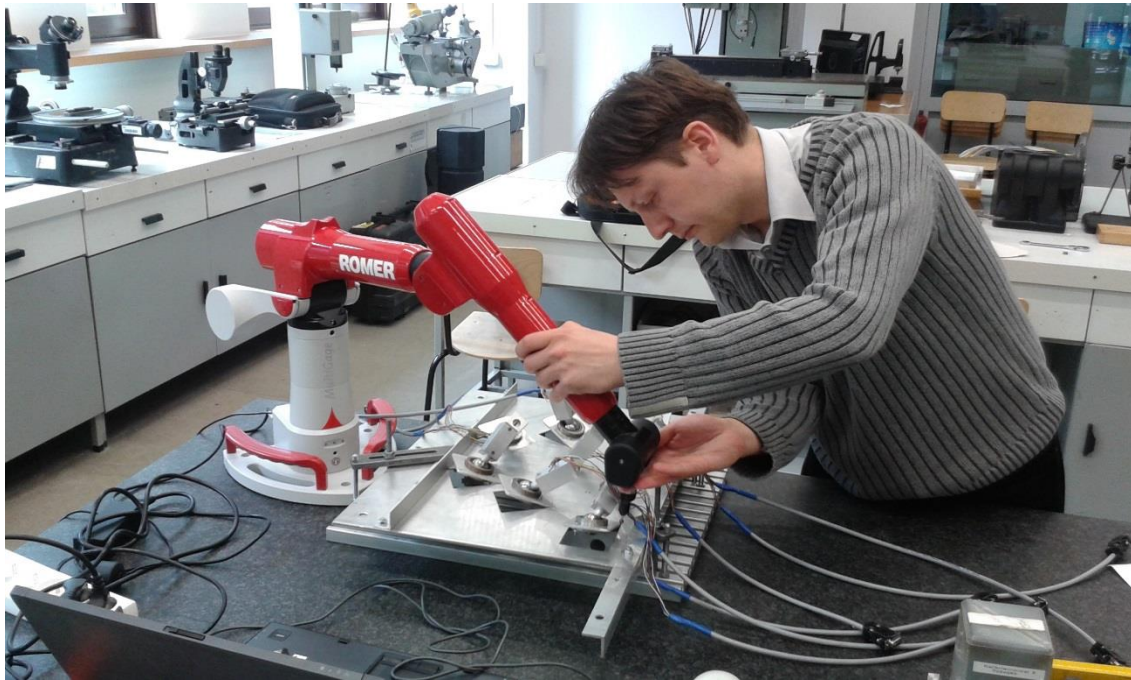
i ortogonalnym. Na Rys. 27. pokazano zrzut ekranu programu, za pomocą którego rejestrowano wyniki pomiarów, widoczne są cechy, które posłużyły do skonstruowania układu współrzędnych.



Rys. 27. Zrzut ekranu programu, za pomocą którego rejestrowano wyniki pomiarów wykonywanych ramieniem firmy ROMER. Widoczna płaszczyzna PLN1, okręgi CIR1 i CIR2, odcinek LIN1, początek układu współrzędnych PNT3 oraz kierunki i zwroty osi x i z, kierunek i zwrot osi y został przyjęty w ten sposób, aby układ był prawoskrętny i ortogonalny. Szczegółowy opis w tekście.

Współrzędne środków przegubów H_i , $i = 1(9)$ wyznaczono na podstawie pomiaru zewnętrznych powierzchni wewnętrznych pierścieni łożysk ślizgowych (Rys. 21.). Powierzchnie te stanowią fragment zarysu kuli, ich pomiar polegał na wskazaniu, za pomocą końcówki pomiarowej manipulatora firmy ROMER, ośmiu punktów, na podstawie których program określał średnicę oraz współrzędne x, y i z środków kul, a co za tym idzie współrzędne środków przegubów H_i , $i = 1(9)$ w wyznaczonym wcześniej układzie współrzędnych kartezjańskich. Dla zwiększenia dokładności, pomiar każdej z powierzchni został wykonany trzykrotnie, następnie wyznaczono średnie z uzyskanych wyników, które przyjęto jako poszukiwane współrzędne środków przegubów H_i dla $i = 1(9)$.

Na Rys. 28. widoczny jest operator ramienia Romer podczas przeprowadzania pomiarów.



Rys. 28. Pomiar współrzędnych środków przęubów kulowych H_i dla $i=1(9)$ za pomocą ramienia współrzędnościowego firmy ROMER.

Wyniki pomiarów zostały zestawione w Tab. 2.:

Tab. 2. Wyniki pomiarów współrzędnych środków przęubów H_i , $i=1(9)$ uzyskane za pomocą manipulatora firmy ROMER. Wyniki pomiarów z WRP były zmierzone z dokładnością 3 miejsc po przecinku. Z punktu widzenia realizacji celu zostały zaokrąglone do jednego miejsca po przecinku.

Przęub	Współrzędna	Pomiar 1 mm	Pomiar 2 mm	Pomiar 3 mm	Średnia mm	Odchylenie standardowe mm
H_1	x_{H1}	113,4	113,6	113,6	113,5	0,08
	y_{H1}	-11,3	-11,2	-11,2	-11,2	0,05
	z_{H2}	61,5	61,0	61,0	61,2	0,25
H_2	x_{H2}	177,9	177,9	178,0	177,9	0,03
	y_{H2}	-11,9	-11,9	-11,7	-11,8	0,10
	z_{H1}	-49,5	-50,0	-50,0	-49,8	0,28
H_3	x_{H3}	50,1	50,1	50,1	50,1	0,02
	y_{H3}	1,1	1,2	1,1	1,1	0,09
	z_{H3}	-49,8	-50,2	-50,2	-50,1	0,22
H_4	x_{H4}	-0,2	0,0	0,0	-0,1	0,09
	y_{H4}	1,3	1,3	1,3	1,3	0,02
	z_{H4}	36,9	36,5	36,6	36,7	0,22
H_5	x_{H5}	-65,2	-65,0	-64,9	-65,0	0,17
	y_{H5}	-10,9	-11,1	-11,1	-11,0	0,09
	z_{H5}	146,9	146,8	146,8	146,8	0,09
H_6	x_{H6}	63,2	63,6	63,7	63,5	0,24
	y_{H6}	-10,3	-10,3	-10,3	-10,3	0,04
	z_{H6}	147,7	147,3	147,3	147,4	0,22
H_7	x_{H7}	-114,0	-113,9	-113,9	-114,0	0,08
	y_{H7}	-12,9	-12,9	-12,9	-12,9	0,04

	Z _{H7}	59,3	59,3	59,3	59,3	0,04
H₈	X _{H8}	-177,6	-177,6	-177,6	-177,6	0,05
	Y _{H8}	-12,6	-12,4	-12,5	-12,5	0,09
	Z _{H8}	-50,5	-50,6	-50,6	-50,6	0,04
H₉	X _{H9}	-49,8	-49,8	-49,8	-49,8	0,03
	Y _{H9}	1,1	1,0	1,1	1,1	0,06
	Z _{H9}	-49,9	-50,1	-50,0	-50,1	0,10

Dla każdego z pomiarów wyznaczone zostało odchylenie standardowe zgodnie z ogólnym wzorem¹:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2}{n-1}} \quad (48)$$

gdzie:

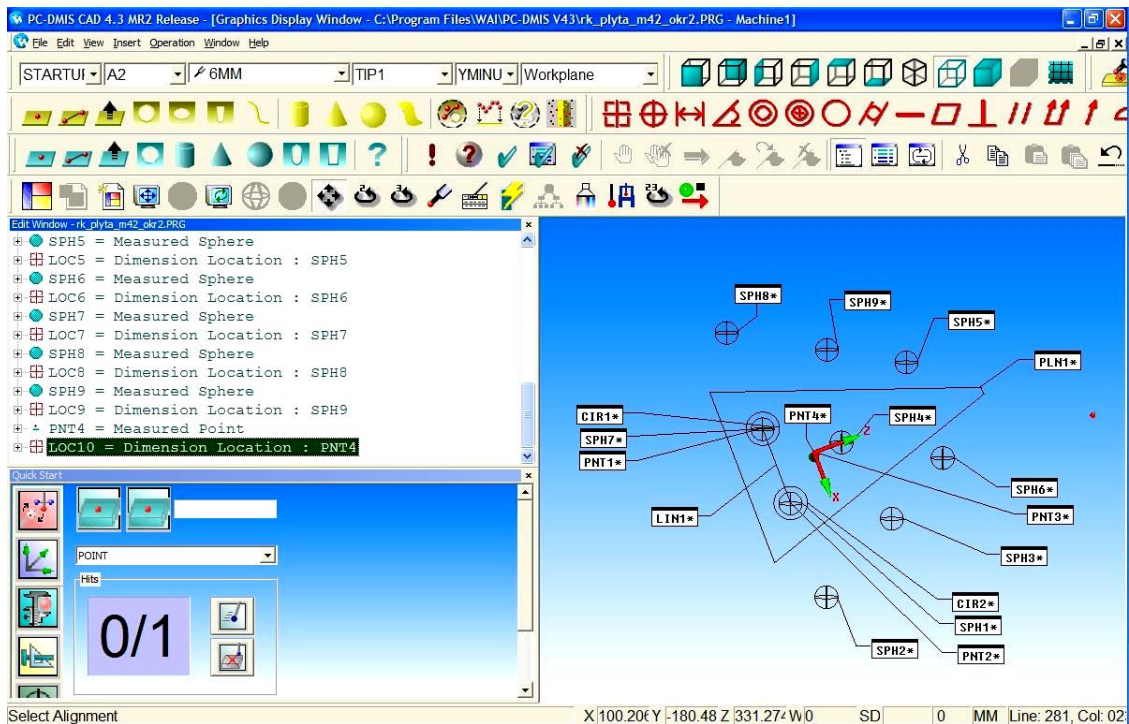
- σ - eksperymentalne odchylenie standardowe;
- x - zmierzona wartość danej współrzędnej;
- \bar{x} - średnia arytmetyczna z wszystkich pomiarów danej współrzędnej;
- i - numer pomiaru, $i=1 \div 3$,
- n - liczba pomiarów, $n=3$.

Poniżej, w milimetrach, przedstawione zostały, przyjęte w dalszych rozważaniach, wartości współrzędnych punktów mocowania łączników przyrządu do zewnętrznej płyty unieruchomionej względem nadwozia pojazdu:

H₁(113.6, -11.2, 61.0); H₄(0.0, 1.3, 36.5); H₇(-113.9, -12.9, 59.3);
H₂(177.9, -11.8, -50.0); H₅(-64.9, -11.1, 146.8); H₈(-177.6, -12.4, -50.6);
H₃(50.1, 1.1, -50.2); H₆(63.7, -10.3, 147.3); H₉(-49.8, 1.1, -50.0);

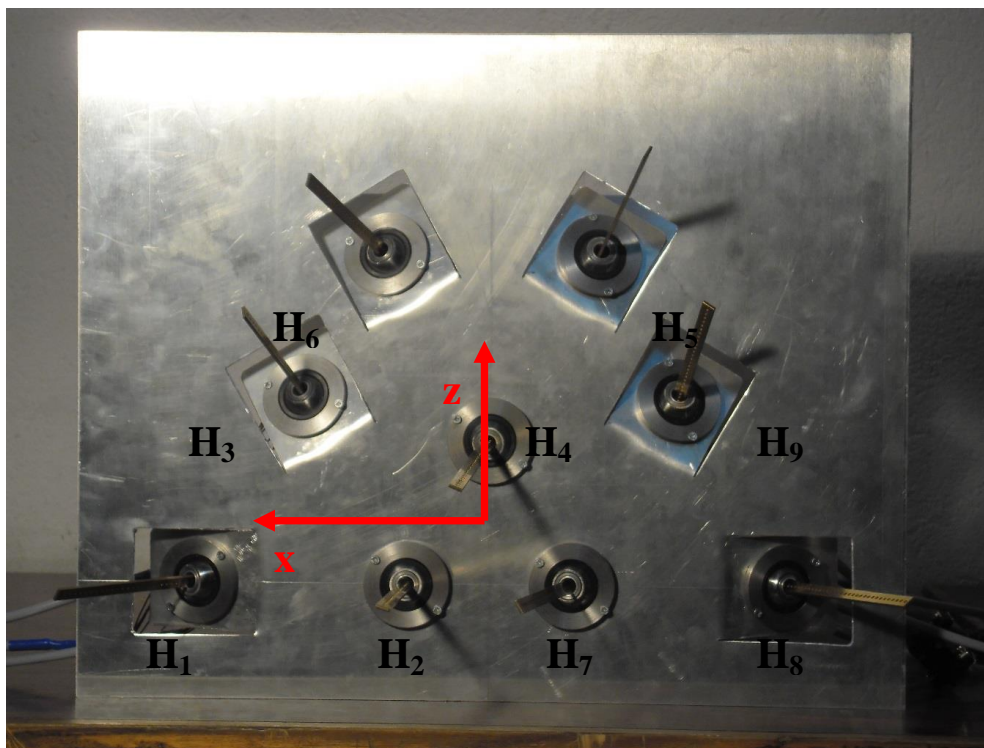
Na Rys. 29. pokazano okno programu rejestrującego pomiary realizowane za pomocą manipulatora firmy ROMER, poza obiektami omówionymi na Rys. 27. widoczne są położenia poszczególnych przegubów kulowych, łączących zewnętrzną, unieruchomioną względem nadwozia, płytę przyrządu pomiarowego z łącznikami tego przyrządu. Przeguby zostały oznaczone jako SPH1 ÷ SPH9.

¹ Wyznaczone zostało odchylenie standardowe z próby stanowiące estymator odchylenia standardowego w populacji, odchylenie to w statystyce przyjęło się oznaczać symbolem s, jednak w celu uniknięcia konfliktu oznaczeń zastosowano symbol σ (symbolem s_i oznaczono wydłużenia łączników przyrządu pomiarowego).



Rys. 29. Okno programu, za pomocą którego rejestrowano wyniki pomiarów wykonywanych ramieniem firmy ROMER. Widoczny jest układ współrzędnych, obiekty, które zostały wykorzystane do jego zbudowania (Patrz Rys. 27.) oraz położenie przegubów kulowych, których współrzędnych poszukiwano (oznaczenia SPH1÷SPH9).

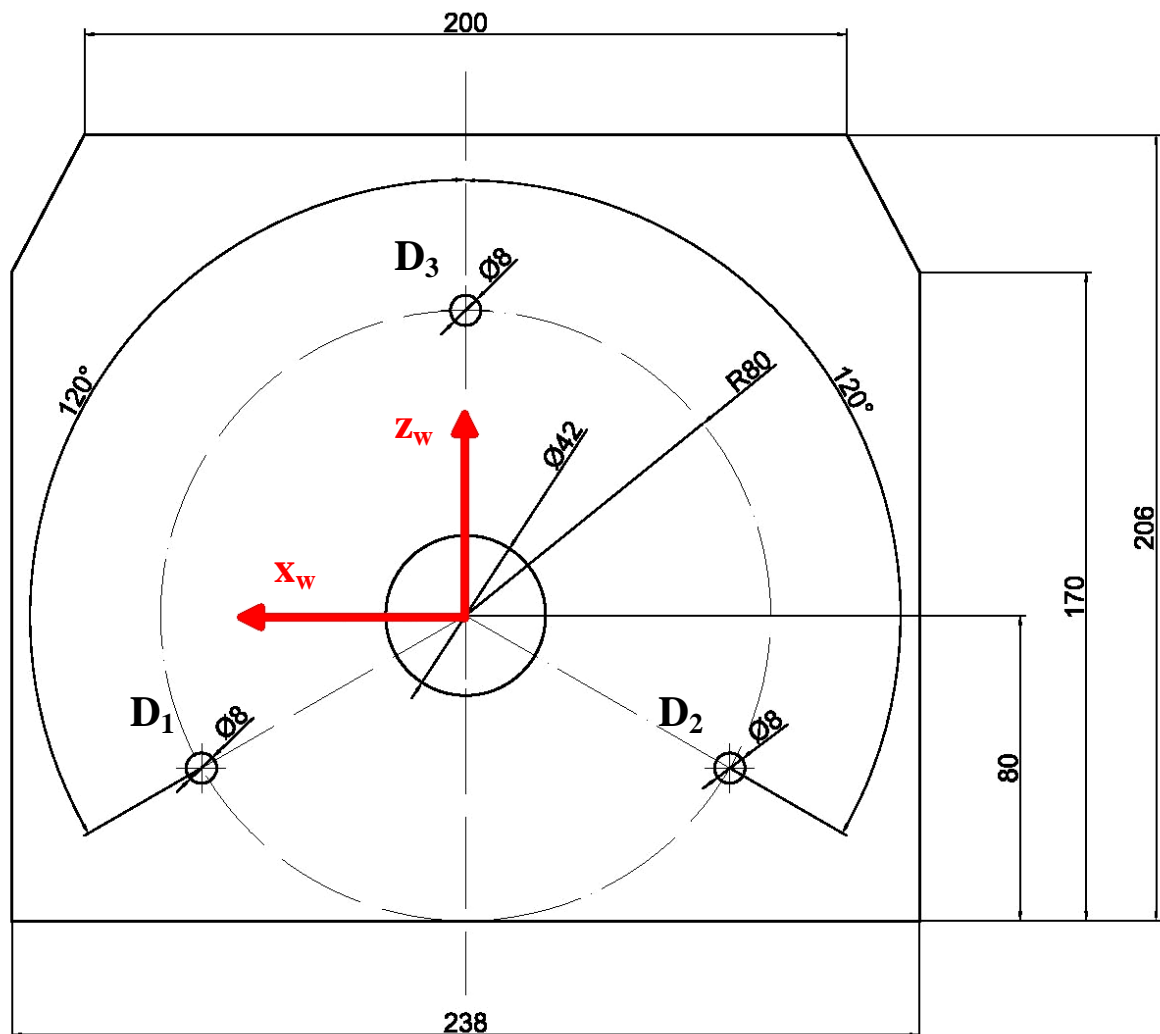
Na Rys. 30 pokazana została płyta zewnętrzna przyrządu pomiarowego w widoku ogólnym z naniesionym układem współrzędnych kartezyjskich oraz położeniami punktów H_i , $i = 1(9)$.



Rys. 30. Płyta zewnętrzna przyrządu pomiarowego w widoku ogólnym. Na zdjęcie naniesiony został układ współrzędnych kartezyjskich (Nieprzedstawiona na rysunku oś Y układu skierowana jest w stronę obserwatora.) oraz położenia przegubów kulowych łączących płytę z łącznikami przyrządu.

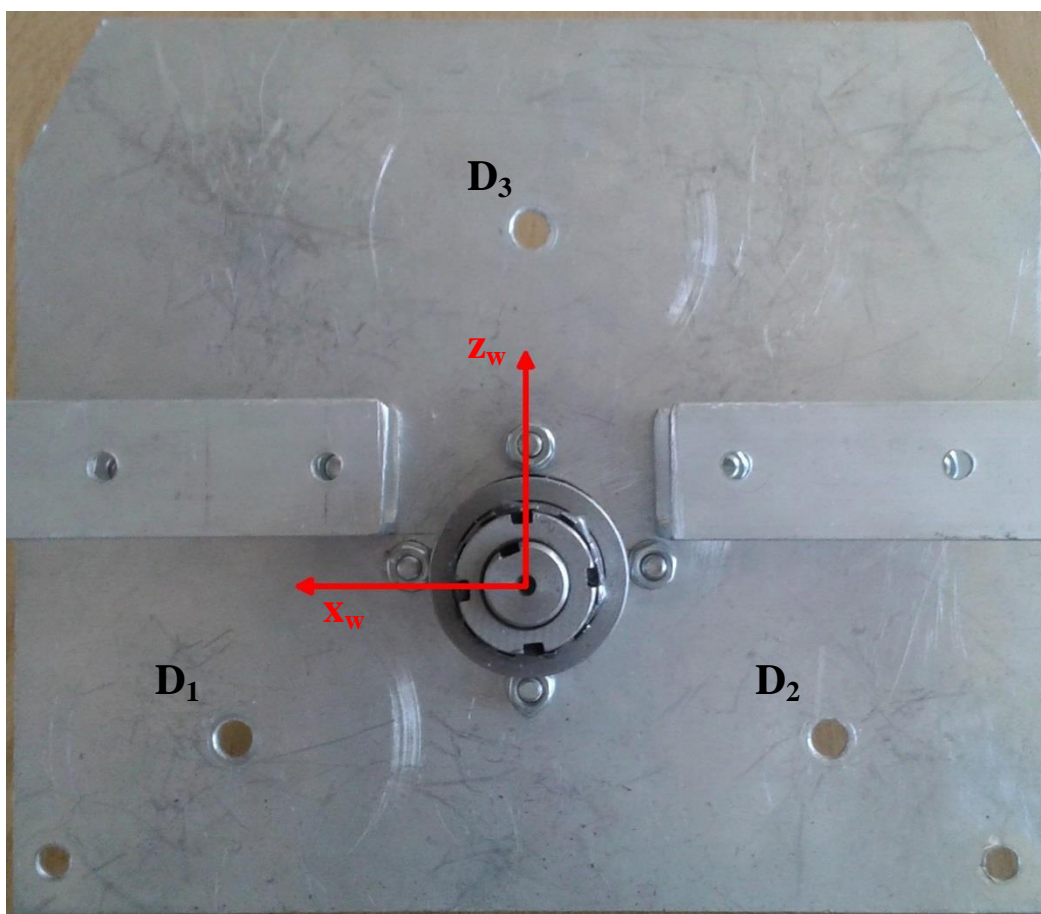
8. Wyznaczanie konfiguracji konstrukcyjnej przyrządu

Na podstawie znanych współrzędnych środków przegubów H_i , $i=1(9)$ w kartezjańskim układzie współrzędnych związanym z nieruchomą względem nadwozia pojazdu płytą zewnętrzną (Rys. 27., Rys. 30.), wyznaczone zostały współrzędne punktów D_j ; $j=1(3)$ w tym samym układzie odniesienia. Punkty D_j ; $j=1(3)$ stanowią środki przegubów kulowych, za pomocą których łączniki przyrządu pomiarowego przymocowane są do płyty wewnętrznej połączonej poprzez ułożyskowaną piastę z kołem samochodu. Na Rys. 31. przedstawiono poglądowy rysunek płyty wewnętrznej przyrządu pomiarowego z zaznaczonymi położeniami punktów D_j ; $j=1(3)$. Współrzędne punktów D_j w układzie odniesienia związanym z płytą zewnętrzną wyznaczono na podstawie znanych wymiarów płyty wewnętrznej oraz odległości pomiędzy płytami, przy założeniu równoległości obu płyt względem siebie oraz ich jednakowemu ustawieniu kątowemu.



Rys. 31. Poglądowy rysunek płyty wewnętrznej przyrządu pomiarowego mocowanej na kole badanego pojazdu. Zaznaczono osie x_w oraz z_w układu współrzędnych płyty, początek układu znajduje się w osi piasty koła, oś y_w pokrywa się z osią y układu związanego z płytą zewnętrzną i usytuowana jest w taki sposób, aby układ był układem prawoskrętnym i ortogonalnym. Na rysunku zaznaczone zostały również położenia punktów D_j ; $j=1(3)$.

Rys. 32. przedstawia widok ogólny wewnętrznej płyty przyrządu pomiarowego, która mocowana jest poprzez ułożyskowaną piastę do osi przedniego koła samochodu. Na zdjęcie naniesiono układ współrzędnych $\{x_w, y_w, z_w\}$ oraz miejsca mocowania przegubów oznaczonych jako: D_j ; $j=1(3)$.



Rys. 32. Widok ogólny płyty wewnętrznej przyrządu pomiarowego mocowanej na kole badanego pojazdu. Zaznaczono osie x_w oraz z_w układu współrzędnych płyty, początek układu znajduje się w osi piasty koła (pokrywającej się z osią, widoczną na zdjęciu, łożyskowej piasty mocującej płytę), oś y_w pokrywa się z osią y układu związanego z płytą zewnętrzną i usytuowana jest w taki sposób, aby układ był układem prawoskrętnym i ortogonalnym. Na rysunku zaznaczone zostały również położenia punktów D_j ; $j=1(3)$.

Do wyznaczenia współrzędnych x_w oraz z_w punktów wykorzystane zostały podstawowe zależności geometryczne:

$$x_{D1} = -x_{D2} = R \cdot \sin(30) = 80 \cdot 0,5 = 40 \text{ [mm]} \quad (49)$$

$$z_{D1} = -z_{D2} = R \cdot \cos(30) = 80 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 69,3 \text{ [mm]} \quad (50)$$

Wartości współrzędnych y_{D1} , y_{D2} , y_{D3} określono na podstawie znanej odległości pomiędzy płytą zewnętrzną i wewnętrzną przyrządu pomiarowego oraz wymiarów przegubów D_j .

Wyznaczone w powyższy sposób współrzędne środków przegubów kulowych D_j ; $j=1(3)$ stanowiących punkty mocowania łączników przyrządu pomiarowego do płyty związanej ze zwrotnicą koła zostały zestawione poniżej:

$D_1(69.3, -232.2, -40.0)$;

$D_2(-69.3, -232.2, -40.0)$;

$D_3(0.0, -232.2, 80.0)$;

Znając zarówno współrzędne punktów mocowania łączników przyrządu do płyty zewnętrznej H_i , dla $i = 1(9)$; jak i wewnętrznej D_j , dla $j=1(3)$; wyznaczono początkowe długości łączników. Skorzystano w tym celu z poniższych zależności:

W przypadku przegubu D_1 :

$$\vec{r}_{D_1H_i}^{-T} \vec{r}_{D_1H_i} = l_{D_1H_i}^2, \quad \text{dla } \begin{cases} i = 1, \\ i = 2, \\ i = 3. \end{cases} \quad (51)$$

W przypadku przegubu D_2 :

$$\vec{r}_{D_2H_i}^{-T} \vec{r}_{D_2H_i} = l_{D_2H_i}^2, \quad \text{dla } \begin{cases} i = 7, \\ i = 8, \\ i = 9. \end{cases} \quad (52)$$

W przypadku przegubu D_3 :

$$\vec{r}_{D_3H_i}^{-T} \vec{r}_{D_3H_i} = l_{D_3H_i}^2, \quad \text{dla } \begin{cases} i = 4, \\ i = 5, \\ i = 6. \end{cases} \quad (53)$$

9. Opis wykonanych badań, metodyka pomiarów

Przeprowadzone zostały badania stanowiskowe z wykorzystaniem prototypowego przyrządu pomiarowego, którego budowę omówiono w rozdziale 0. Przed przystąpieniem do pomiarów przyrząd został w odpowiedni sposób zamocowany na badanym pojeździe. Przed zamocowaniem przyrządu, pojazd ustawiono kołami przedniej osi na obrotnicach, natomiast kołami osi tylnej, na odpowiedniej wysokości płytach tak, aby w trakcie badań znajdował się on w pozycji wypoziomowanej. Płyta wewnętrzna została zamocowana w osi piasty przedniego koła samochodu za pomocą ułożyskowanej piasty (Rys. 19.). W celu odebrania płycie możliwości obrotu wokół osi poprzecznej y_w , zastosowano specjalne ramiona prowadzące względem bocznych (pionowych) krawędzi płyty zewnętrznej. Dzięki takiemu zamocowaniu uzyskano niezmienność położenia płyty, a co za tym idzie współrzędnych środków przegubów D_j , $j=1(3)$; względem koła pojazdu. Płyta zewnętrzna została unieruchomiona względem nadwozia pojazdu, w związku z czym układ współrzędnych $\{xyz\}$ (Rys. 30.) związany z płytą, jest jednocześnie układem związanym z nadwoziem pojazdu. Na Rys. 33. pokazany został, w widoku ogólnym, pojazd samochodowy z zamocowanym na przednim lewym kole prototypowym przyrządem pomiarowym.



Rys. 33. Widok ogólny pojazdu z zamocowanym prototypowym przyrządem pomiarowym. Widoczne obrotnice pod kołami osi przedniej oraz odpowiedniej wysokości płyty pod kołami osi tylnej.

Na Rys. 34. pokazano zbliżenie na zamocowany na kole przyrząd pomiarowy.



Rys. 34. Prototypowy przyrząd pomiarowy zamocowany na lewym kole samochodu osobowego.

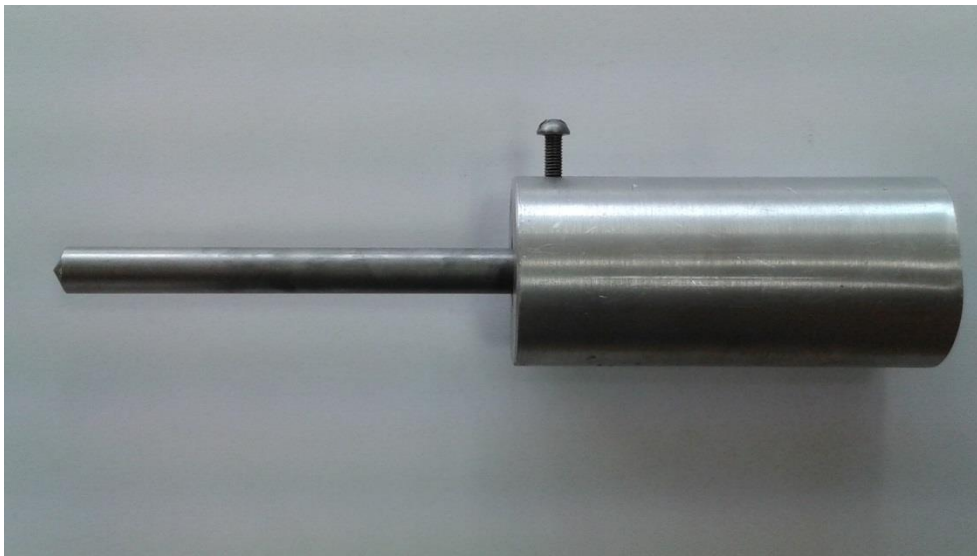
Zanim rozpoczęto pomiary zamocowany przyrząd został w odpowiedni sposób ustawiony. Przygotowanie przyrządu do badań, polegające na:

- równoległym ustawieniu płyty zewnętrznej i wewnętrznej,
- jednoznacznym określeniu położenia początku układu współrzędnych,

- odpowiednim ustawieniu kątowym, zamocowanej na kole pojazdu, płyty wewnętrznej w stosunku do płyty zewnętrznej.

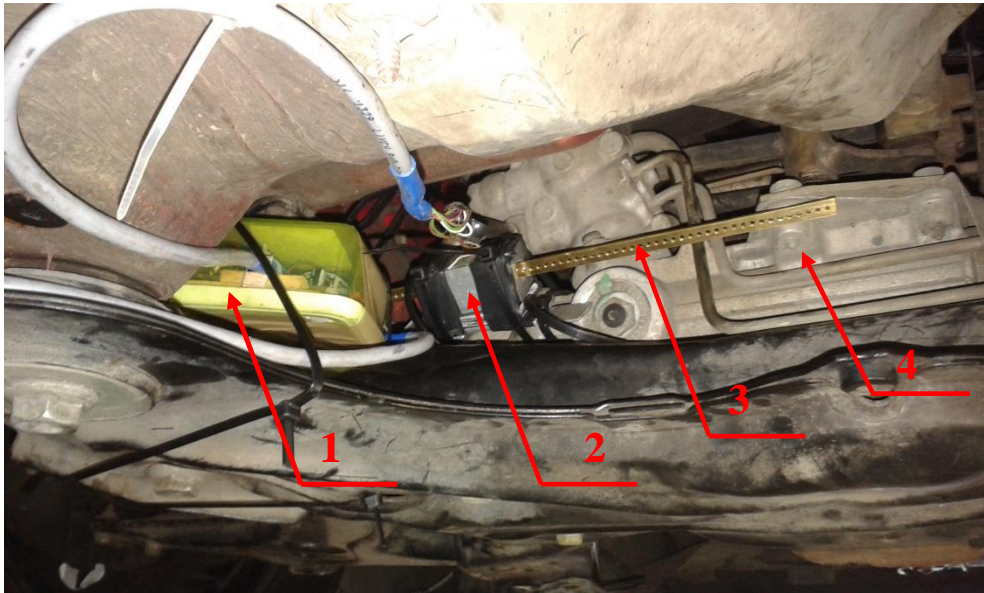
przeprowadzono dla kół ustawionych do jazdy na wprost.

Równoległość płyty zamocowanej do koła badanego pojazdu i płyty zewnętrznej, uchwyconej do nadwozia zapewniono za pomocą trzech trzpieni o jednakowej, znanej długości. Ustalenie położenia początku układu współrzędnych $\{xyz\}$ związanego z nieruchomą płytą zewnętrzną w punkcie, którego położenie wyznaczono podczas pomiarów metrologicznych (Patrz Rozdział 7 oraz Rys. 27. i Rys. 30.) w taki sposób, aby oś y tego układu pokrywała się z przechodzącą przez oś obrotu koła osią y_w układu związanego z płytą wewnętrzną, zostało zrealizowane za pomocą zdejmowanego trzpienia o znanej długości. Trzpień ten zbudowany jest z stożkowo zakończonym prętem wsuwanym do otworu w tulei nasuwanej na zewnętrzną powierzchnię ułożyskowanej piasty (Rys. 19.) mocującej wewnętrzną płytę przyrządu do koła badanego pojazdu. Powierzchnia wewnętrzna tulei oraz zewnętrzna piasty, a także powierzchnie współpracy pomiędzy tuleją a prętem, zostały w odpowiedni sposób spasowane w celu zapewnienia braku luzów, a co za tym idzie dokładnym ustaleniu początku układu odniesienia $\{xyz\}$. Po ustawieniu wymaganej długości trzpienia pręt zostaje unieruchomiony względem tulei za pomocą śruby. Taka budowa trzpienia ustalającego umożliwi jego wysunięcie po odpowiednim ustawieniu płyt względem siebie. Trzpień ustalający pokazany został na Rys. 35.

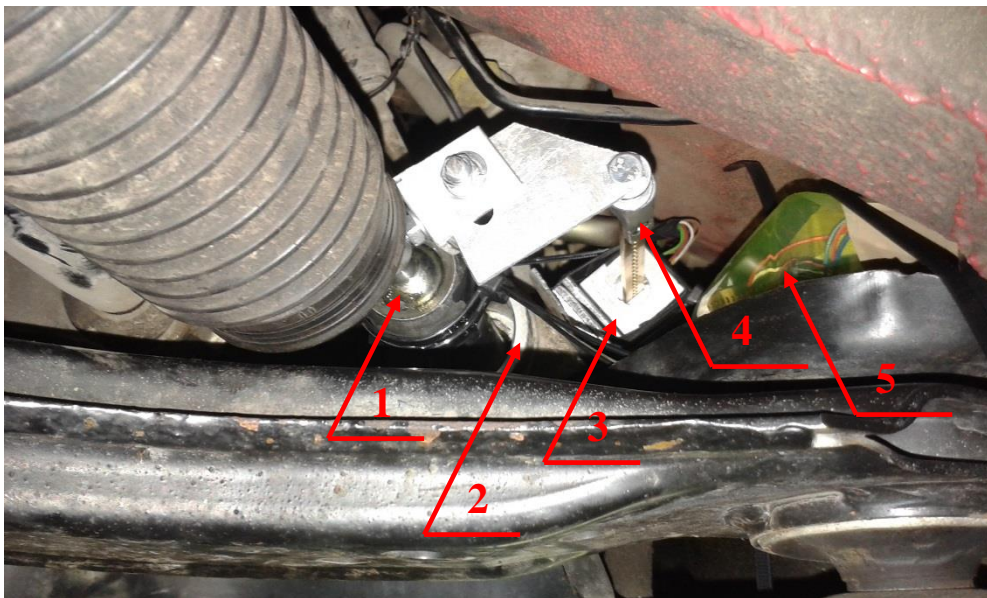


Rys. 35. Trzpień ustalający położenie początku układu współrzędnych $\{xyz\}$ związanego z, unieruchomioną względem nadwozia, płytą zewnętrzną przyrządu pomiarowego.

W trakcie przeprowadzonych badań stanowiskowych, wykorzystany został dodatkowy optyczny czujnik przemieszczeń liniowych, którego zadaniem był pomiar przemieszczenia listwy zębatej przekładni kierowniczej samochodu. Dokładność czujnika wynosiła $\pm 0,02$ mm. Sposób zamocowania przetwornika w badanym pojeździe przedstawiono na Rys. 36. i Rys. 37.



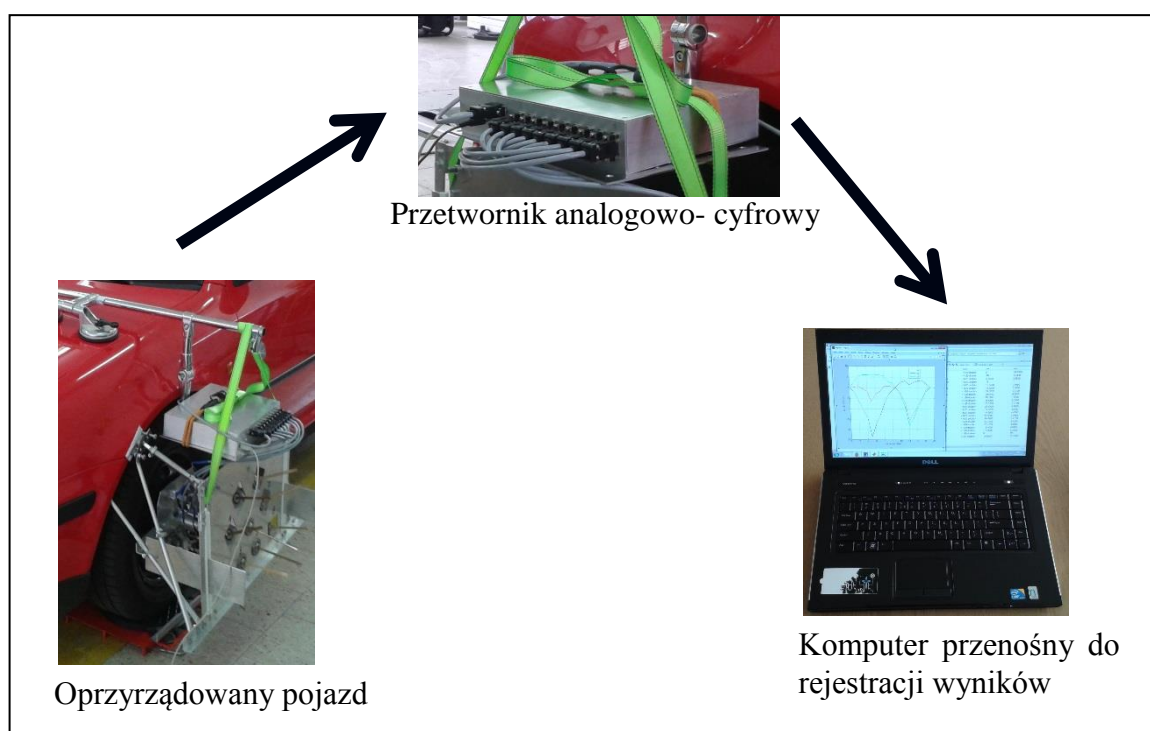
Rys. 36. Zamocowany w badanym pojeździe optyczny przetwornik przemieszczeń liniowych do pomiaru przemieszczeń środkowego drążka mechanizmu zwrotniczego układu kierowniczego. Widok z tyłu. 1- przetwornik analogowo- cyfrowy, 2- obudowa przetwornika przemieszczeń liniowych, 3- przesuwna listwa czujnika optycznego, 4- obudowa zębatkowej przekładni kierowniczey.



Rys. 37. Zamocowany w badanym pojeździe optyczny przetwornik przemieszczeń liniowych do pomiaru przemieszczeń środkowego drążka mechanizmu zwrotniczego układu kierowniczego. Widok z boku. 1- przegub kulowy łączący środkowy i skrajny (lewy) drążek mechanizmu zwrotniczego układu kierowniczego, 2- obudowa przekładni kierowniczey, 3- obudowa przetwornika przemieszczeń liniowych, 4- przesuwna listwa czujnika optycznego, 5- przetwornik analogowo- cyfrowy.

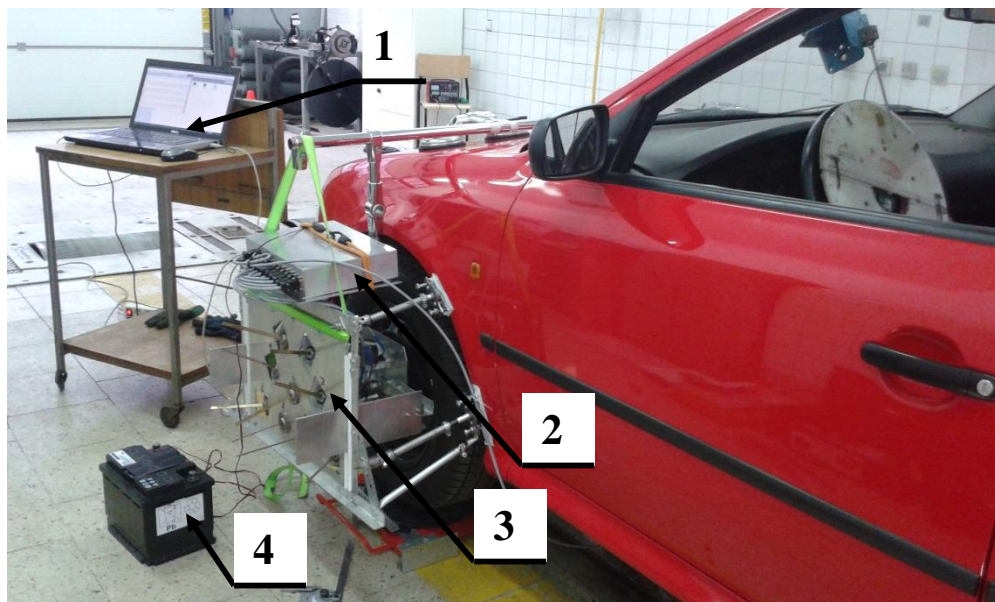
Dane z czujnika trafiały do przetwornika analogowo cyfrowego, a stamtąd do komputera przenośnego rejestrującego wyniki pomiarów.

Na Rys. 38. przedstawiony został schemat toru pomiarowego.



Rys. 38. Schemat toru pomiarowego.

Rys. 39. przedstawia widok ogólny toru pomiarowego w czasie badań stanowiskowych.

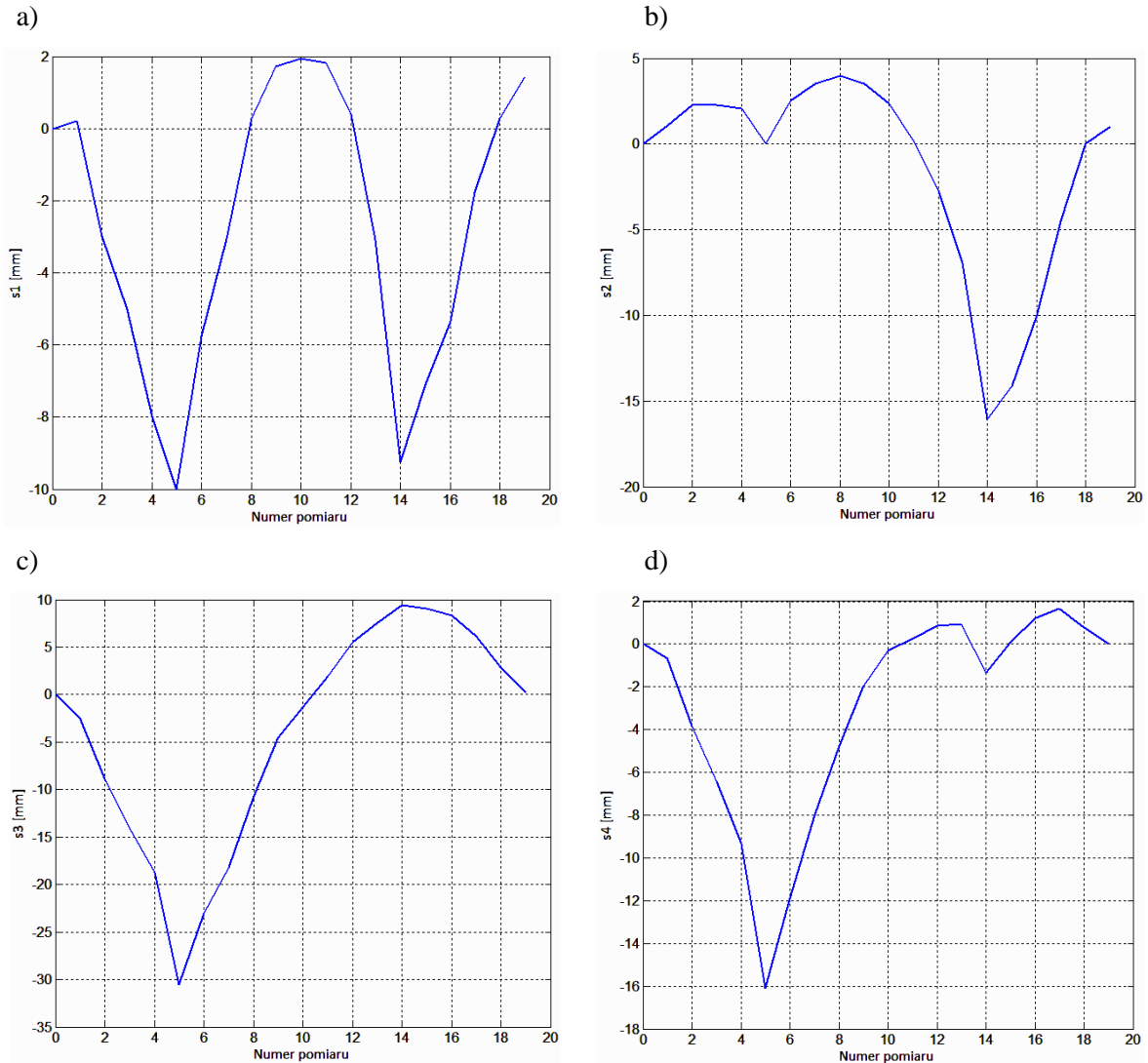


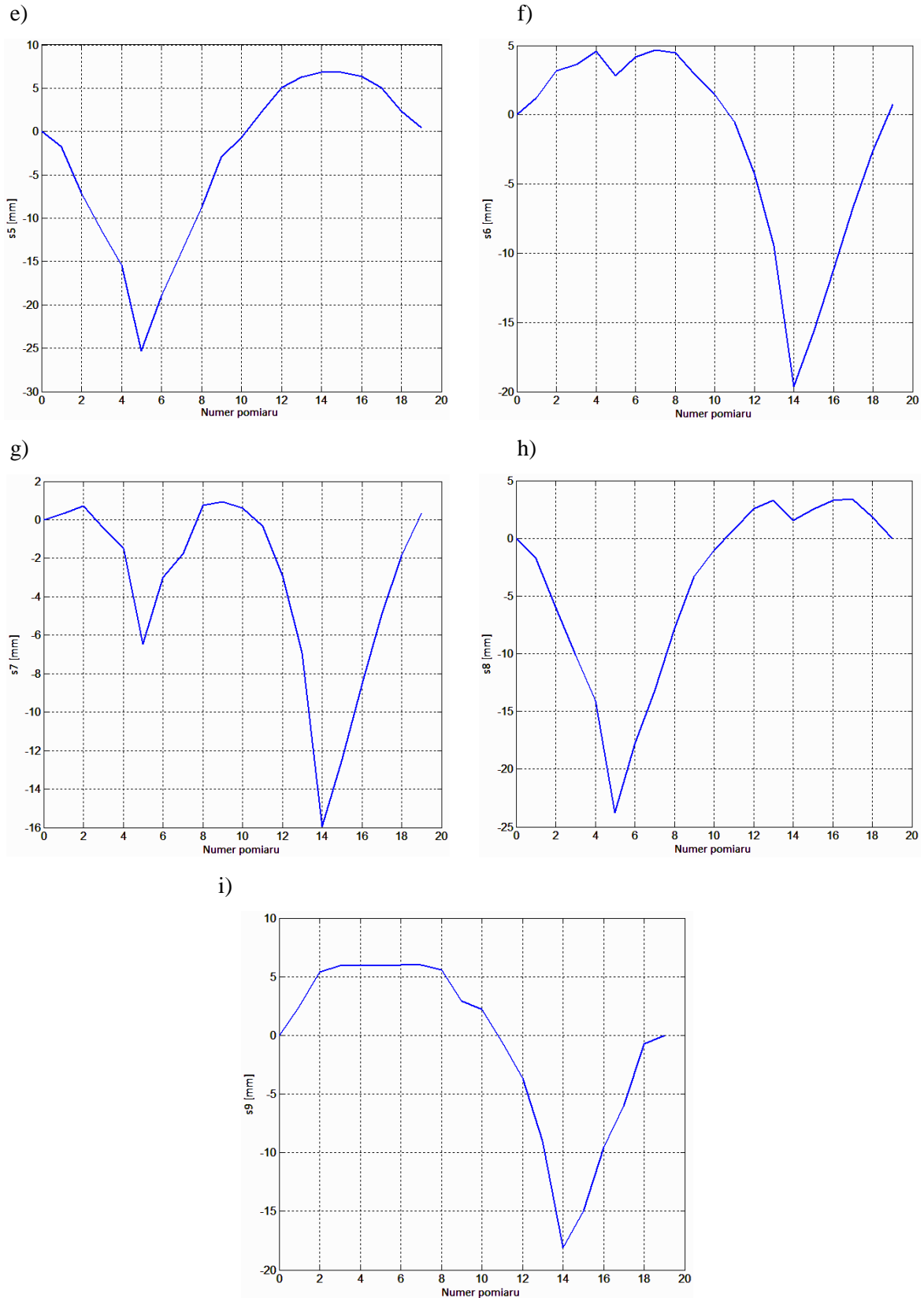
Rys. 39. Widok ogólny toru pomiarowego w trakcie badań stanowiskowych. 1- komputer przenośny, na którym rejestrowano dane z czujników, 2- przetwornik analogowo- cyfrowy, 3- prototypowy przyrząd pomiarowy zamocowany na pojeździe, 4- akumulator zasilający urządzenie.

Próby polegały na wykonywaniu skrętu kół kierowanych i rejestracji wydłużeń dziewięciu łączników przyrządu pomiarowego oraz przemieszczenia listwy zębatej przekładni kierowniczej. W celu weryfikacji uzyskanych wyników dokonywano pomiaru kąta skrętu lewego koła samochodu. Pomiar ten realizowano za pomocą kątomierza uniwersalnego o działce elementarnej noniusza $0^{\circ}05'$. Dane odczytywane były co około 2° kąta skrętu koła.

9.1. Badania wstępne

Próby badawcze rozpoczęto od badań wstępnych, których celem była weryfikacja funkcjonalności przyrządu pomiarowego. Zostały one przeprowadzone na samochodzie Skoda Octavia pierwszej generacji. Przednie zawieszenie tego pojazdu jest zawieszeniem niezależnym typu McPherson. W trakcie pomiarów, za pomocą czujników opisanych w rozdziale 0, rejestrowane były zmiany wydłużeń dziewięciu łączników przyrządu pomiarowego. Zmiany wydłużeń poszczególnych łączników zostały pokazane na Rys. 40. a) ÷ i). Przebiegi przedstawiono w funkcji kolejnych kroków pomiaru, pomiary dokonywane były co ok. 2° kąta skrętu koła. Wartości podano w milimetrach.

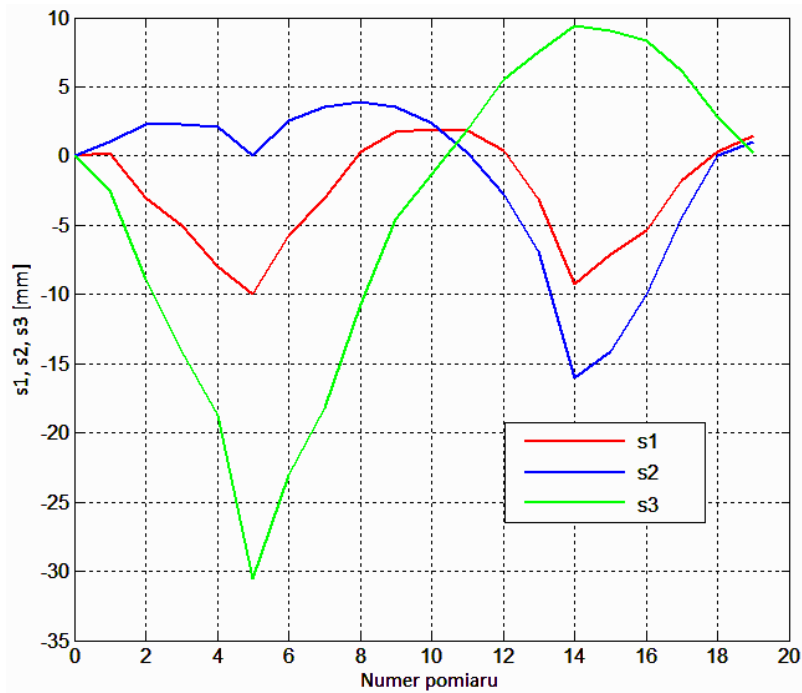




Rys. 40. Zmiany wydłużeń łączników prototypowego przyrządu pomiarowego.

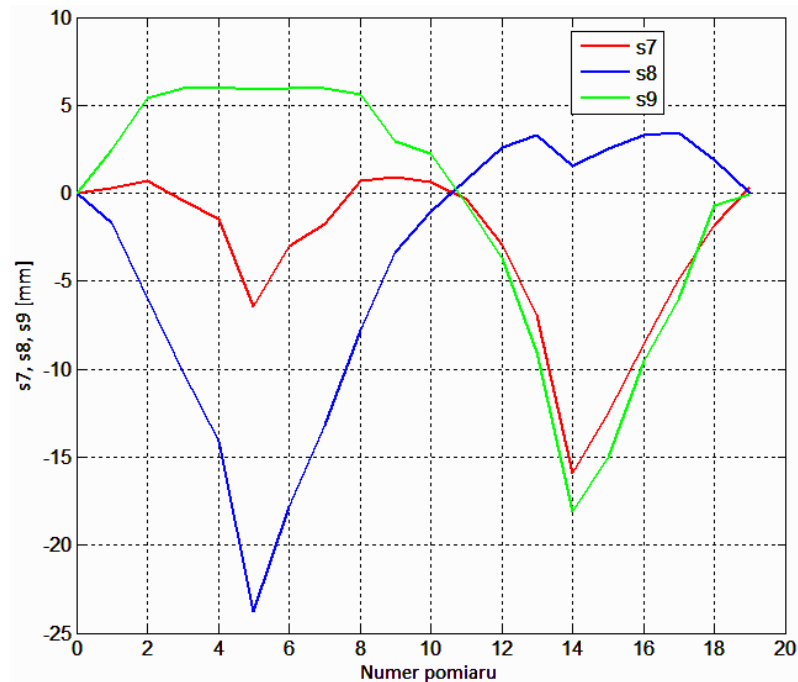
Na Rys. 41 ÷ Rys. 43 pokazano przebiegi zmian wydłużeń łączników przyrządu pomiarowego związanych z poszczególnymi przegubami D_j , $j=1(3)$. Przebiegi przedstawione zostały w funkcji kolejnych kroków pomiaru, wielkości podano w milimetrach.

Zmiany wydłużeń łączników przyrządu pomiarowego związanych z przegubem D_1 :



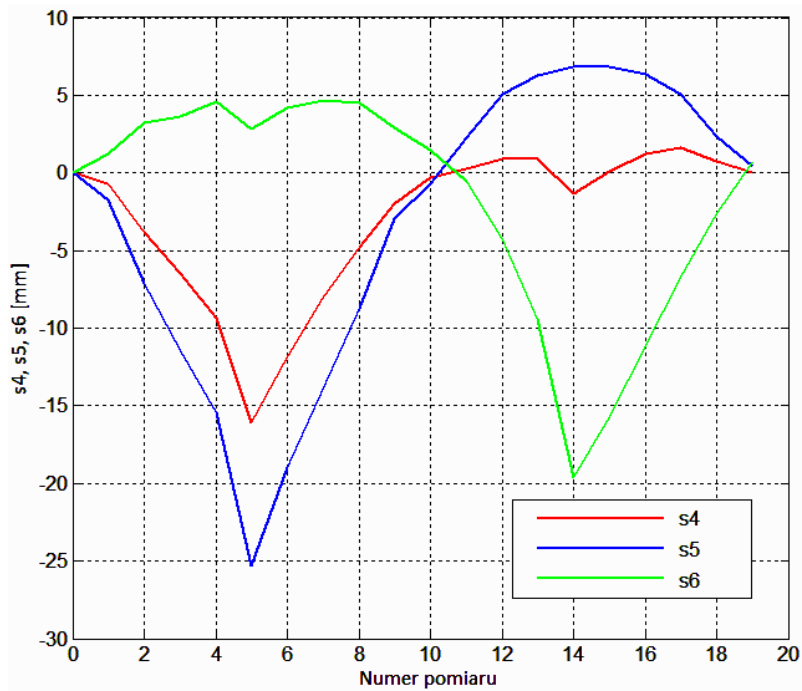
Rys. 41. Zmiany wydłużeń łączników l_1 , l_2 i l_3 prototypowego przyrządu pomiarowego, związanych z przegubem D_1 , w funkcji kolejnych kroków pomiaru.

Zmiany wydłużeń łączników przyrządu pomiarowego związanych z przegubem D_2 :



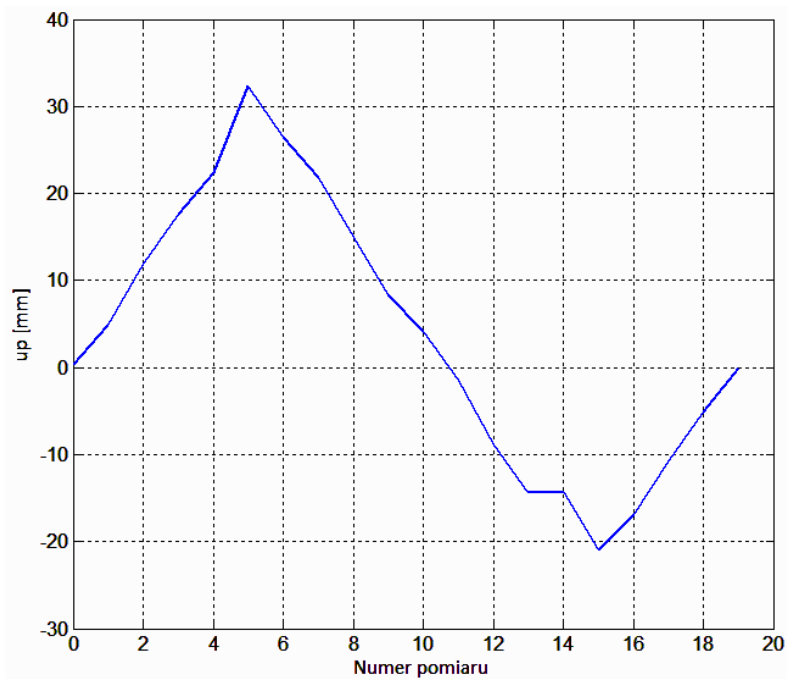
Rys. 42. Zmiany wydłużeń łączników l_7 , l_8 i l_9 prototypowego przyrządu pomiarowego, związanych z przegubem D_2 , w funkcji kolejnych kroków pomiaru.

Zmiany wydłużeń łączników przyrządu pomiarowego związanych z przegubem D_3 :



Rys. 43. Zmiany wydłużeń łączników l_4 , l_5 i l_6 prototypowego przyrządu pomiarowego, związanych z przegubem D_3 , w funkcji kolejnych kroków pomiaru.

Rys. 44 przedstawia przebieg przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p w funkcji kolejnych kroków pomiaru. Wartości przemieszczenia podano w milimetrach.



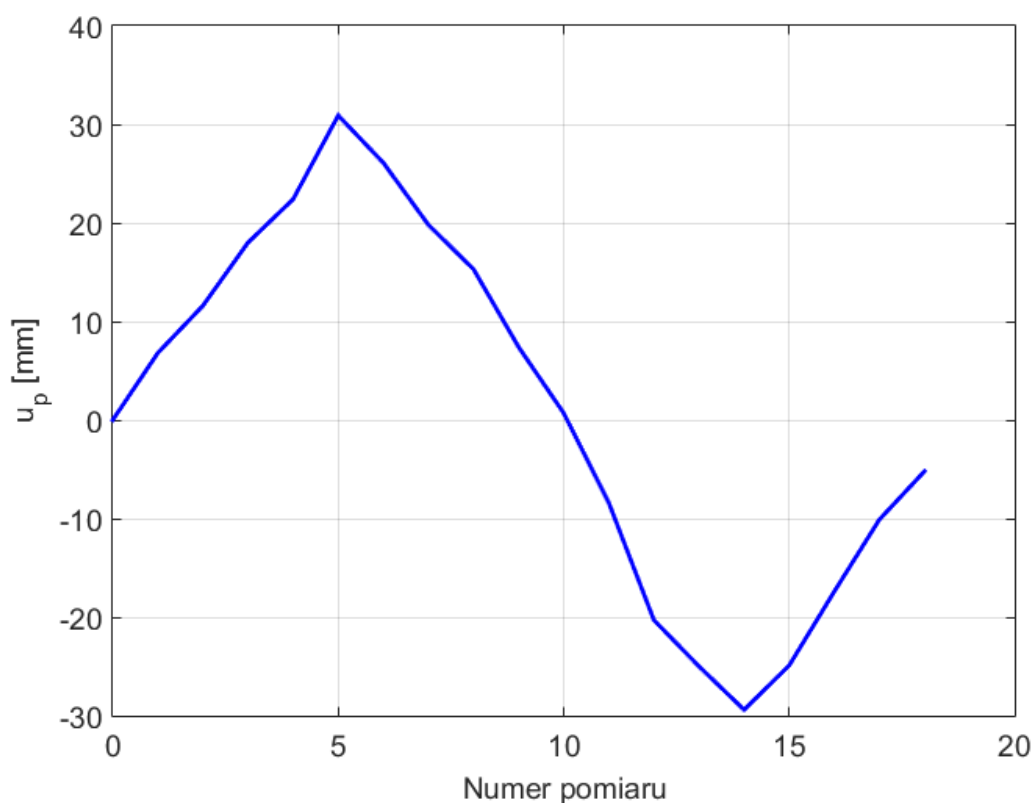
Rys. 44. Przemieszczenie listwy zębatej układu kierowniczego u_p w funkcji kolejnych kroków pomiaru.

9.2. Pomiary kątów skrętu i pochylenia koła kierowanego na samochodzie Skoda Octavia pierwszej generacji

Kolejnym etapem prac było przeprowadzenie „zasadniczych” prób, celem wyznaczenia charakterystyk kątów skrętu i pochylenia koła samochodu osobowego w zależności od ugięcia zawieszenia q oraz przesunięcia listwy zębatej mechanizmu zwrotniczego układu kierowniczego u_p . Próby, podobnie jak badania wstępne, przeprowadzono na samochodzie Skoda Octavia pierwszej generacji, wyposażonym w zawieszenie niezależne kół osi przedniej. Badania zostały przeprowadzone dla trzech wysokości zawieszenia: dla położenia neutralnego, dla położenia odpowiadającego skokowi „dobicia” zawieszenia równemu 43 mm w stosunku do położenia neutralnego oraz dla wysokości odpowiadającej skokowi „odbicia” zawieszenia wynoszącej 57 mm względem położenia neutralnego.

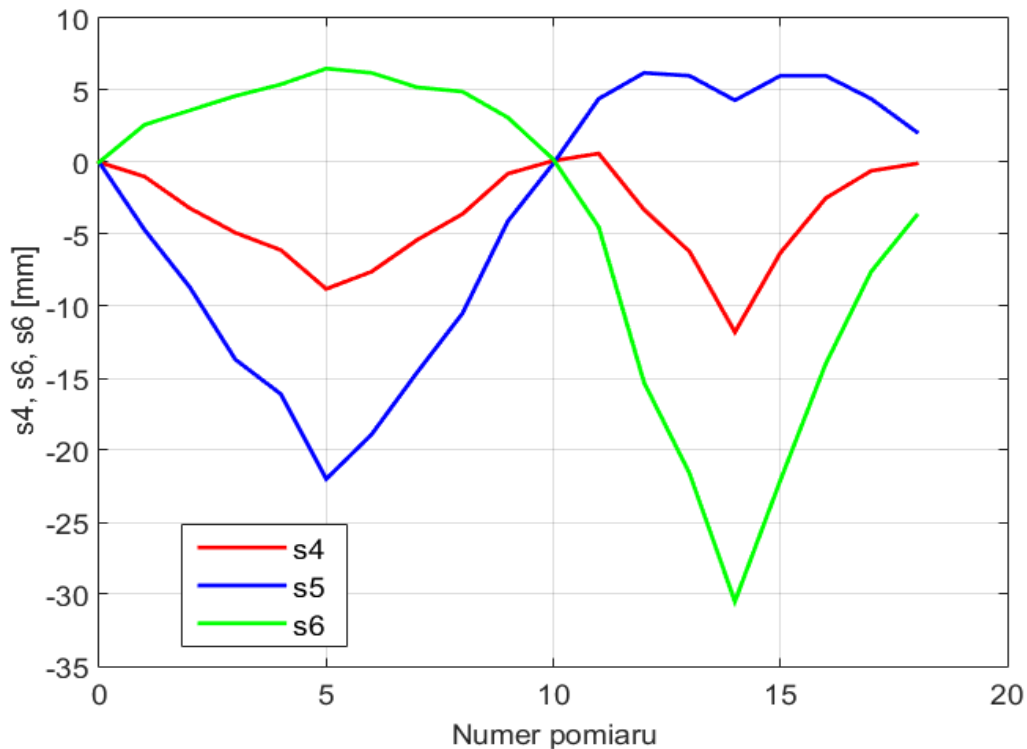
9.2.1. Zmiany wydłużeń łączników przyrządu- konstrukcyjne obciążenie pojazdu

Na Rys. 45. pokazano zmiany przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p w funkcji kolejnych kroków pomiaru.

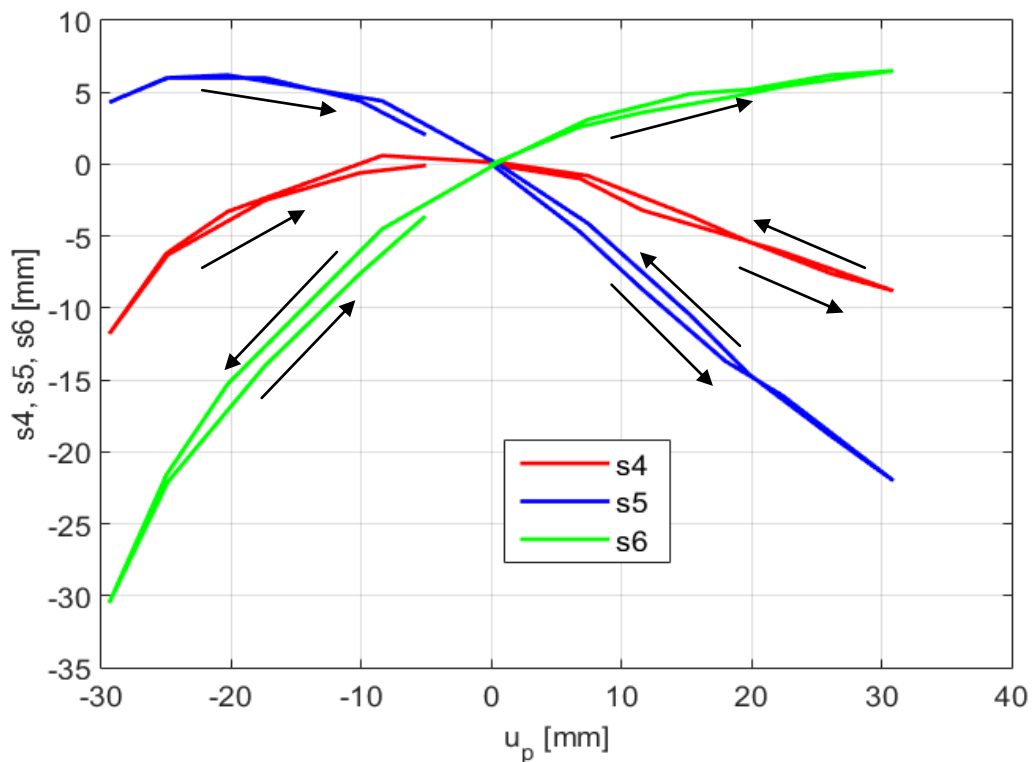


Rys. 45. Przesunięcie listwy zębatej układu kierowniczego u_p , w funkcji kolejnych kroków pomiaru, przy konstrukcyjnym obciążeniu pojazdu.

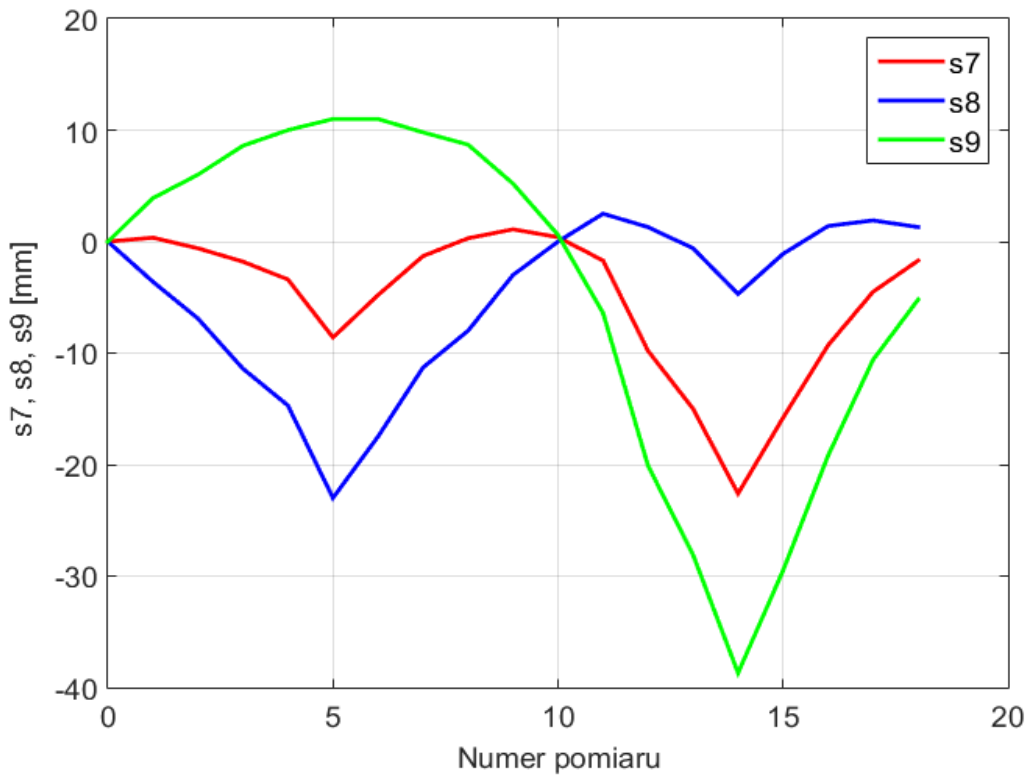
Kolejne wykresy przedstawiają przykładowe zmiany wydłużeń łączników przyrządu związanych z punktami D_j , $j=1(3)$ w zależności od kolejnych kroków pomiaru oraz przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p (Rys. 46. ÷ Rys. 49.).



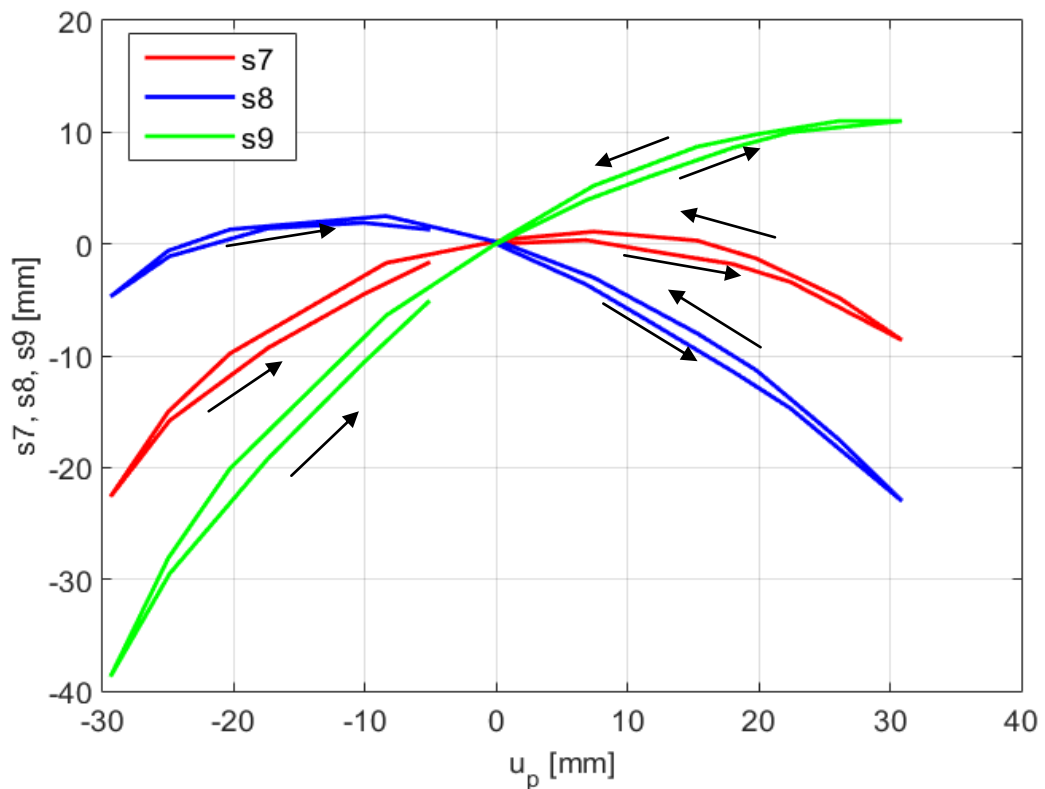
Rys. 46. Zmiany wydłużeń, związanych z punktem D_3 , łączników s_4 , s_5 , s_6 prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji kolejnych kroków pomiaru, przy konstrukcyjnym obciążeniu pojazdu.



Rys. 47. Zmiany wydłużeń, związanych z punktem D_3 , łączników s_4 , s_5 , s_6 prototypowego przyrządu pomiarowego, w zależności od przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p , przy konstrukcyjnym obciążeniu pojazdu.



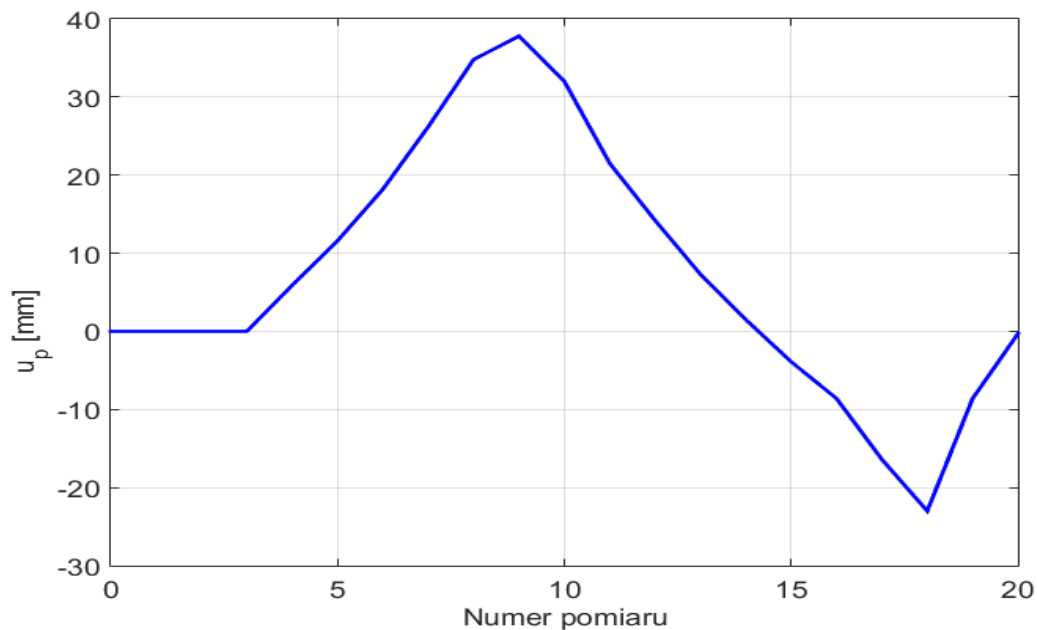
Rys. 48. Zmiany wydłużeń, związanych z punktem D_2 , łączników s_7 , s_8 , s_9 prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji kolejnych kroków pomiaru, przy konstrukcyjnym obciążeniu pojazdu.



Rys. 49. Zmiany wydłużeń, związanych z punktem D_2 , łączników s_7 , s_8 , s_9 prototypowego przyrządu pomiarowego, w zależności od przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p , przy konstrukcyjnym obciążeniu pojazdu.

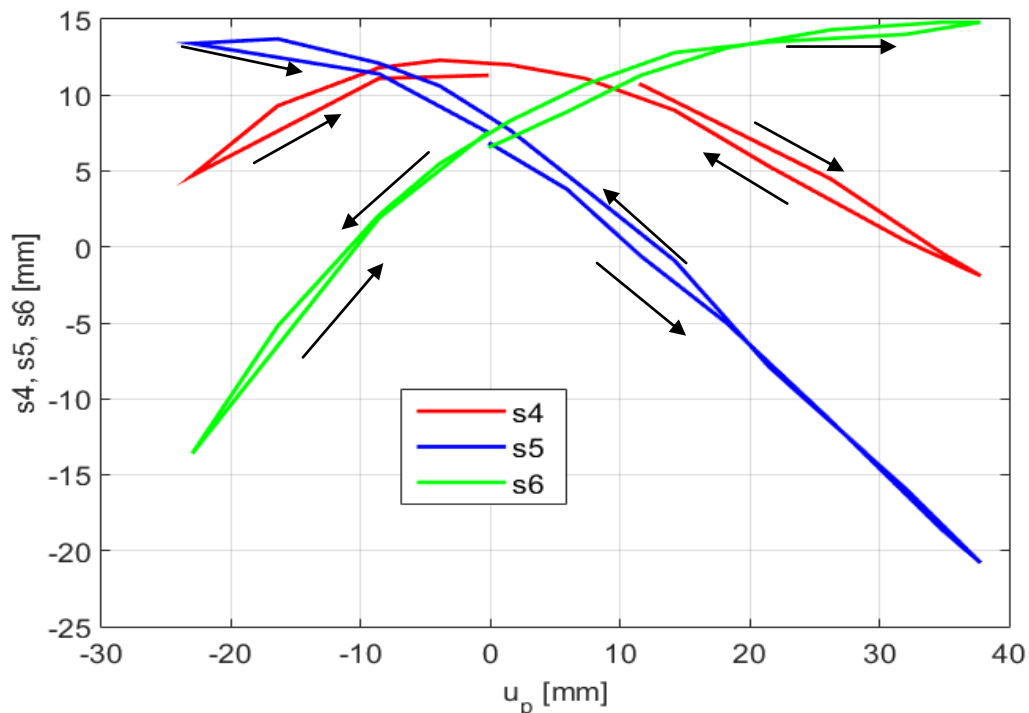
9.2.2. Zmiany wydłużeń łączników przyrządu- pojazd odciążony

Rys. 50. przedstawia zmiany przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p w funkcji kolejnych kroków pomiaru.

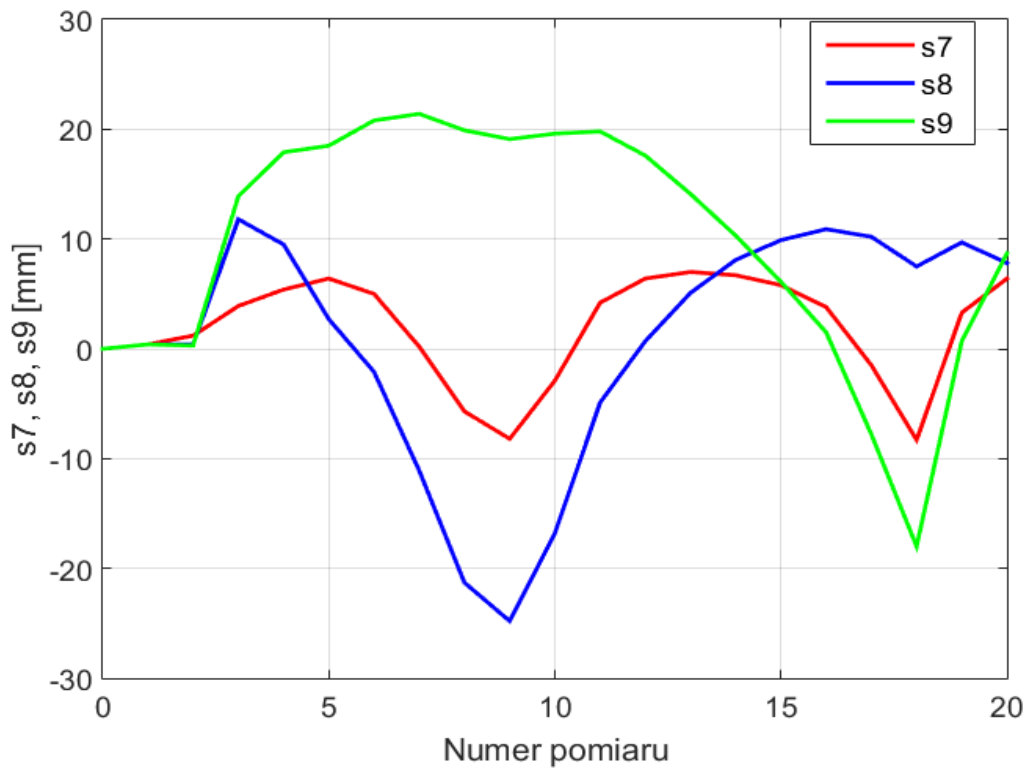


Rys. 50. Przesunięcie listwy zębatej układu kierowniczego u_p w funkcji kolejnych kroków pomiaru- pojazd odciążony.

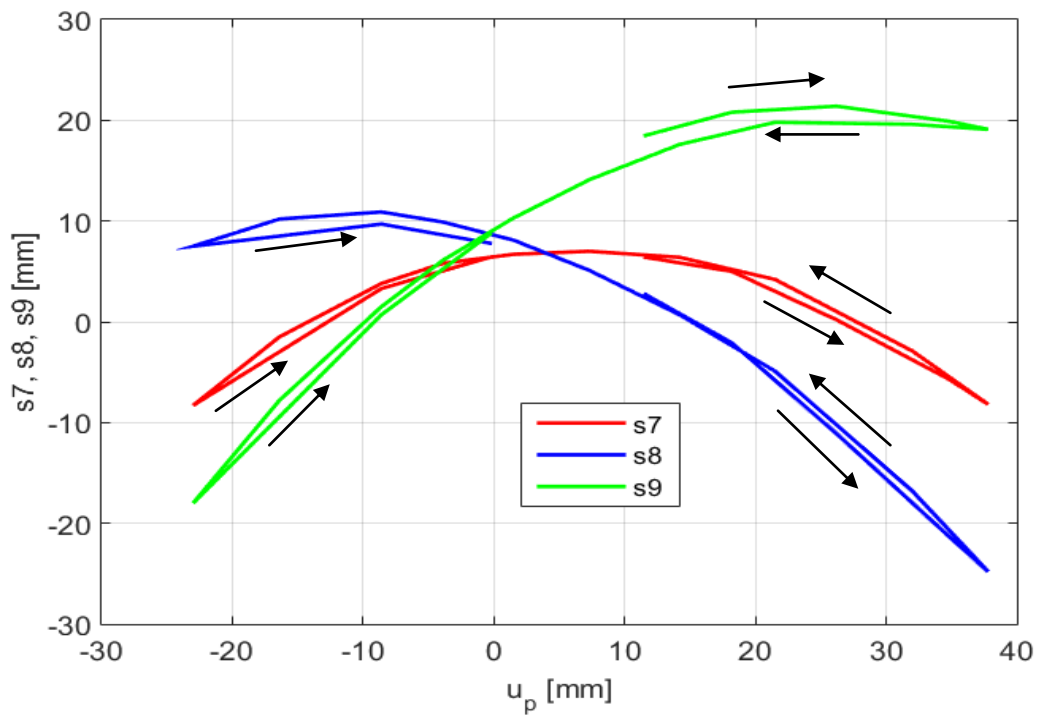
Poniżej (Rys. 51. ÷ Rys. 53.) pokazane zostały przykładowe zmiany wydłużeń łączników związanych z punktami D_j , $j=1(3)$ w zależności od kolejnych kroków pomiaru oraz przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p w przypadku pojazdu odciążonego. Skok „odbicia” zawieszenia wynosił 57 mm.



Rys. 51. Zmiany wydłużeń, związanych z punktem D_3 , łączników s_4 , s_5 , s_6 prototypowego przyrządu pomiarowego, w zależności od przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p - pojazd odciążony.



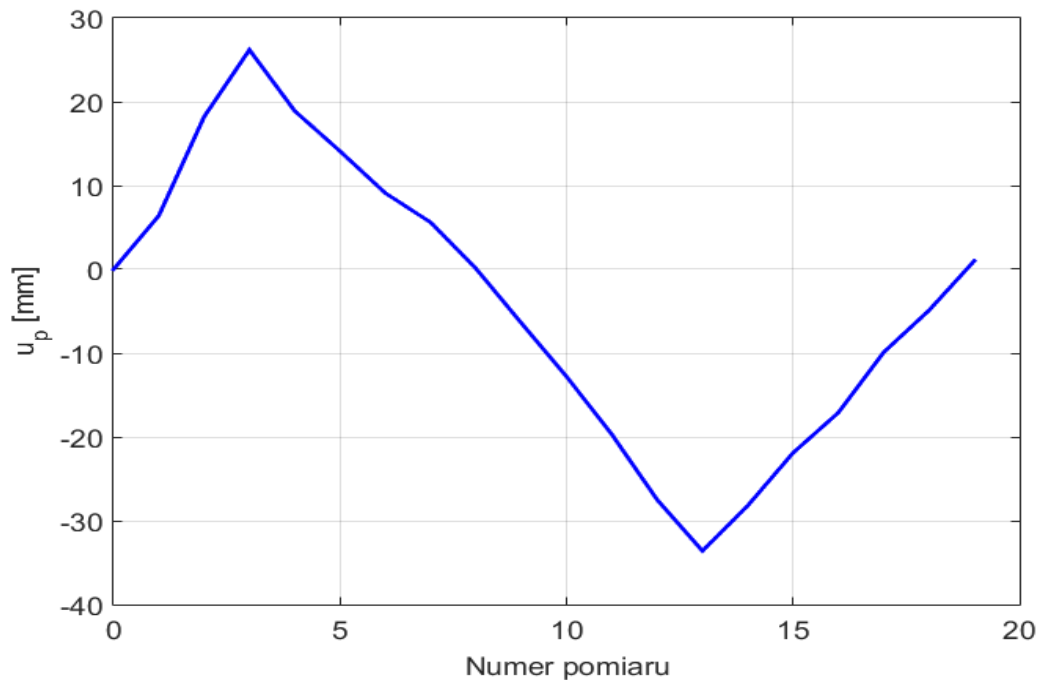
Rys. 52. Zmiany wydłużeń, związanych z punktem D_2 , łączników s_7, s_8, s_9 prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji kolejnych kroków pomiaru- pojazd odciążony.



Rys. 53. Zmiany wydłużeń, związanych z punktem D_2 , łączników s_7, s_8, s_9 prototypowego przyrządu pomiarowego, w zależności od przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p - pojazd odciążony.

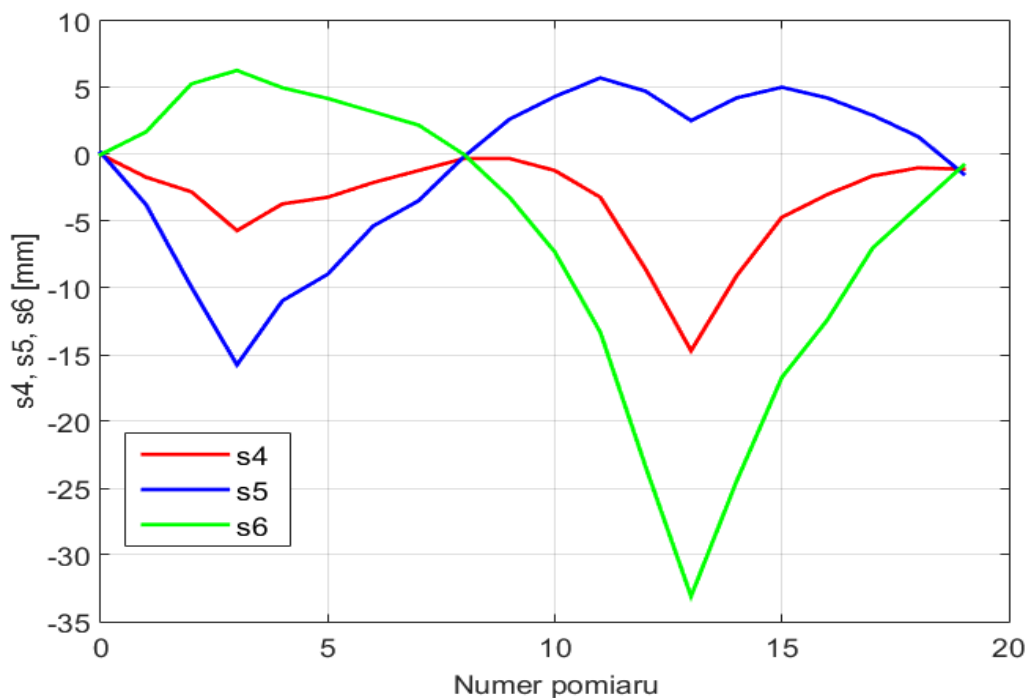
9.2.3. Zmiany wydłużeń łączników przyrządu- pojazd obciążony siłą 3 kN

Rys. 54. przedstawia zmiany przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p w funkcji kolejnych kroków pomiaru dla pojazdu obciążonego siłą 3 kN.

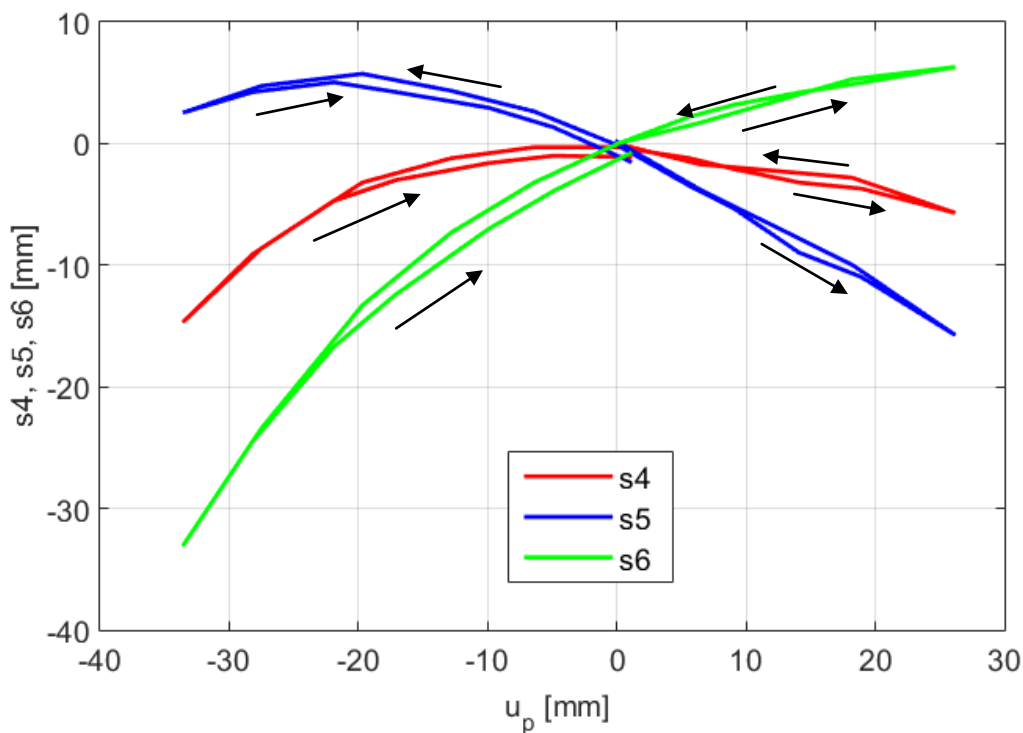


Rys. 54. Przemieszczenie listwy zębatej układu kierowniczego u_p w funkcji kolejnych kroków pomiaru, przy obciążeniu pojazdu siłą 3 kN.

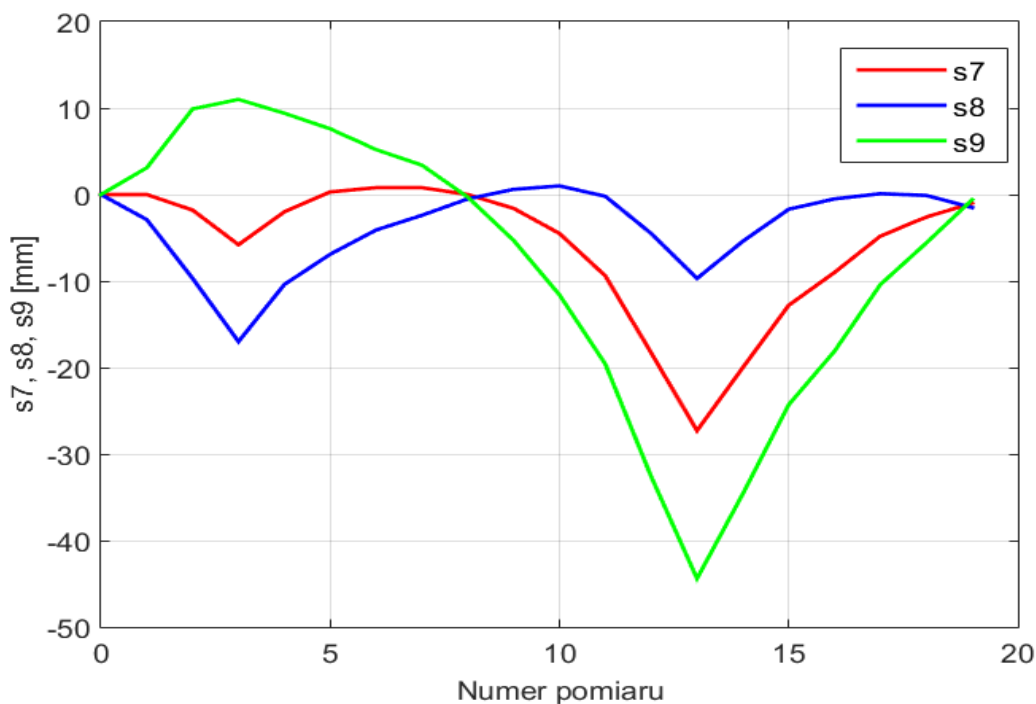
Rys. 55. ÷ Rys. 58. przedstawiają przykładowe zmiany wydłużeń łączników związanych z punktami D_j , $j=1(3)$ w zależności od kolejnych kroków pomiaru oraz przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p , w przypadku pojazdu obciążonego siłą 3 kN. Skok „dobicia” zawieszenia wynosił 43 mm.



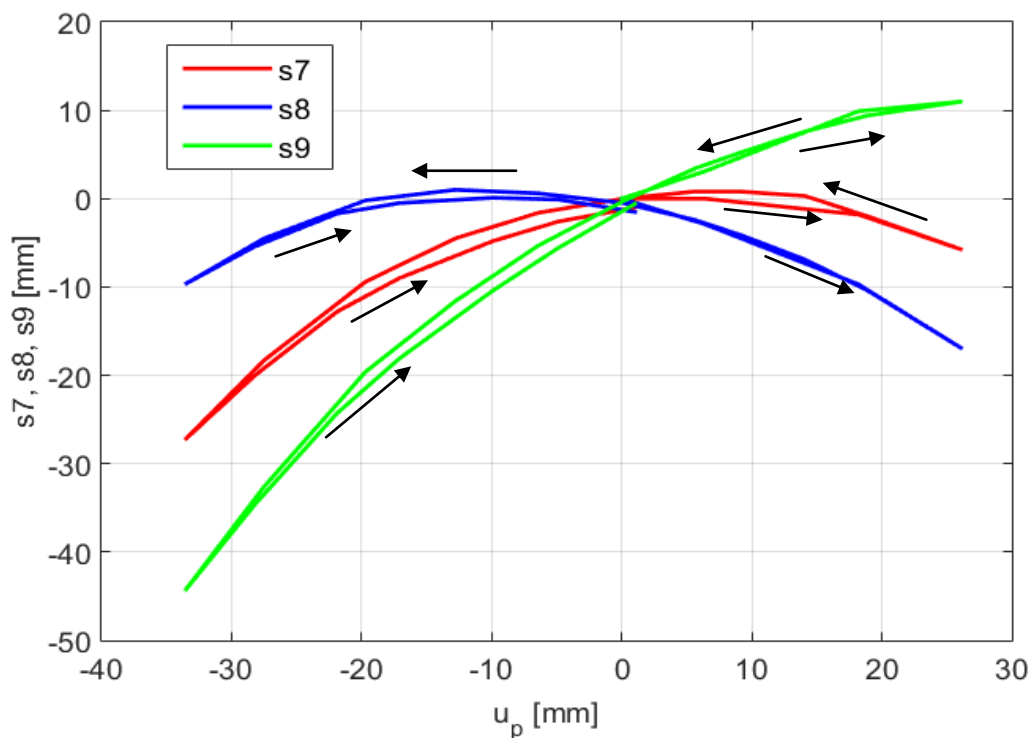
Rys. 55. Zmiany wydłużeń, związanych z punktem D_3 , łączników s_4 , s_5 , s_6 prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji kolejnych kroków pomiaru, przy obciążeniu pojazdu siłą 3 kN.



Rys. 56. Zmiany wydłużeń, związanych z punktem D_3 , łączników s_4, s_5, s_6 prototypowego przyrządu pomiarowego, w zależności od przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p , przy obciążeniu pojazdu siłą 3 kN.



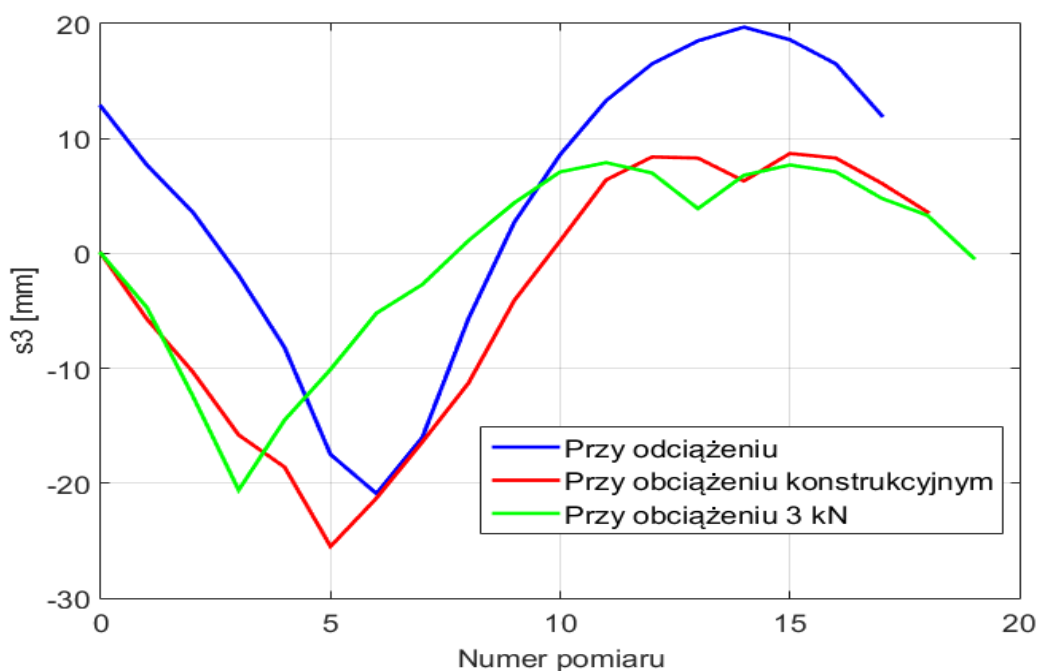
Rys. 57. Zmiany wydłużeń, związanych z punktem D_2 , łączników s_7, s_8, s_9 prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji kolejnych kroków pomiaru, przy obciążeniu pojazdu siłą 3 kN.



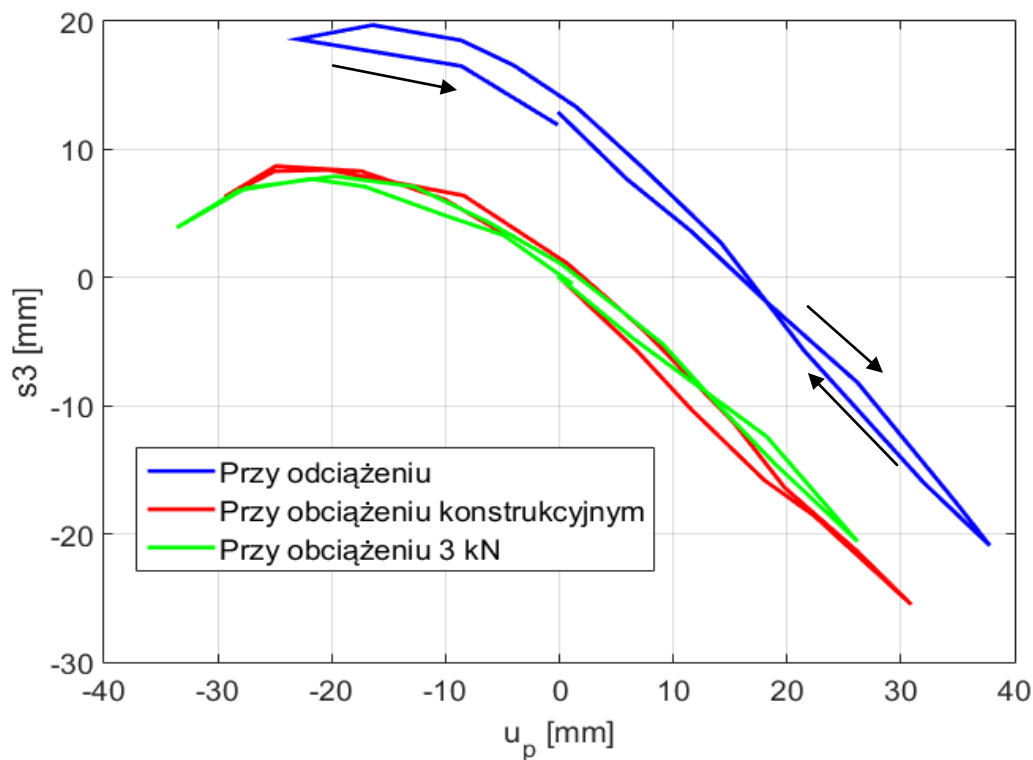
Rys. 58. Zmiany wydłużeń, związanych z punktem D₂, łączników s₇, s₈, s₉ prototypowego przyrządu pomiarowego, w zależności od przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p, przy obciążeniu pojazdu siłą 3 kN.

9.2.4. Zmiany wydłużeń łączników przyrządu w przestrzeni ruchów resorowania

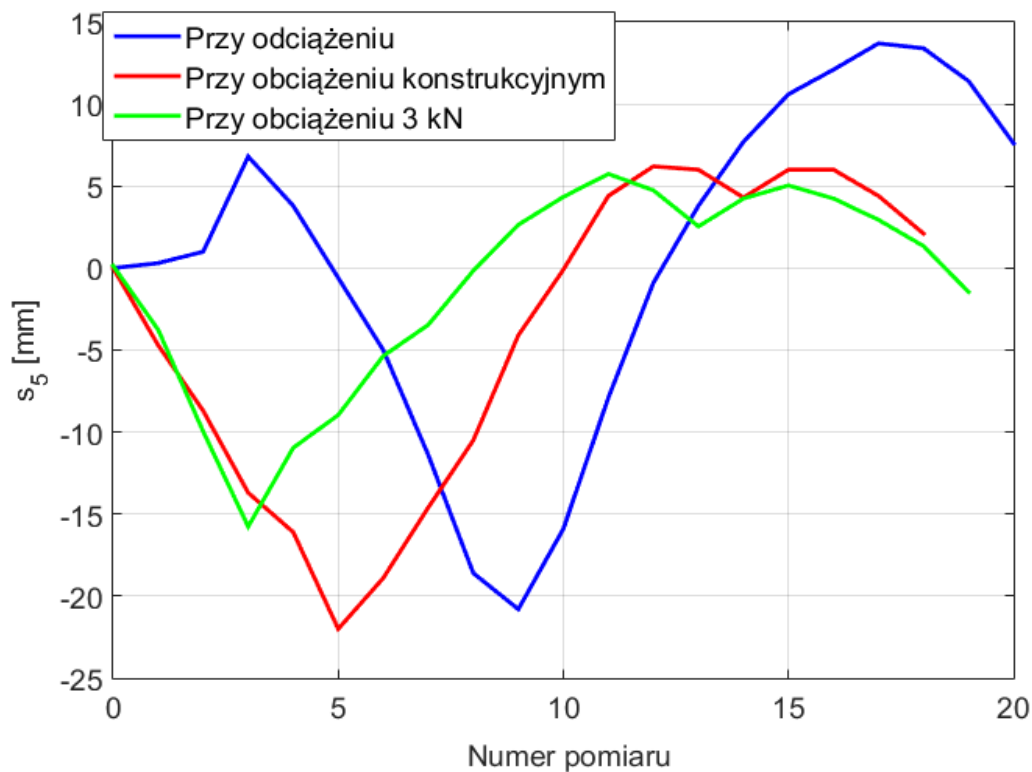
Na (Rys. 59. ÷ Rys. 67.) przedstawiono przykładowe zmiany wydłużeń łączników przyrządu pomiarowego dla trzech różnych ugięć zawieszenia. Przebiegi zostały przedstawione zarówno w funkcji przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego, jak i kolejnych kroków pomiaru.



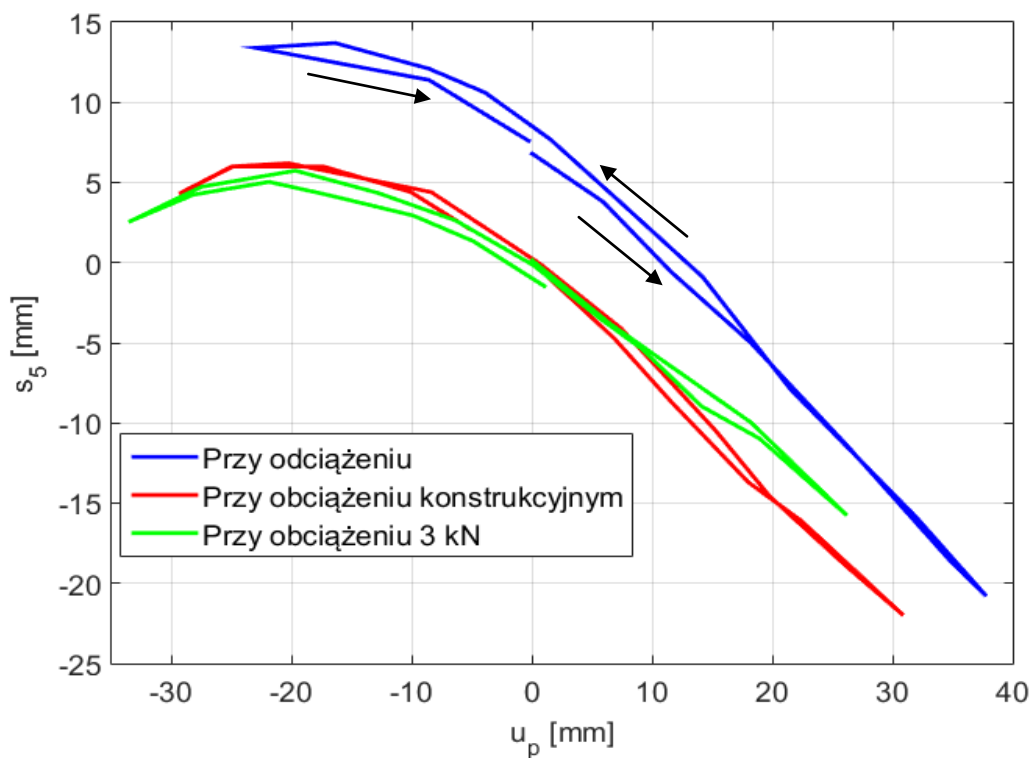
Rys. 59. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D₁, łącznika s₃ prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji kolejnych kroków pomiaru dla różnych ugięć zawieszenia.



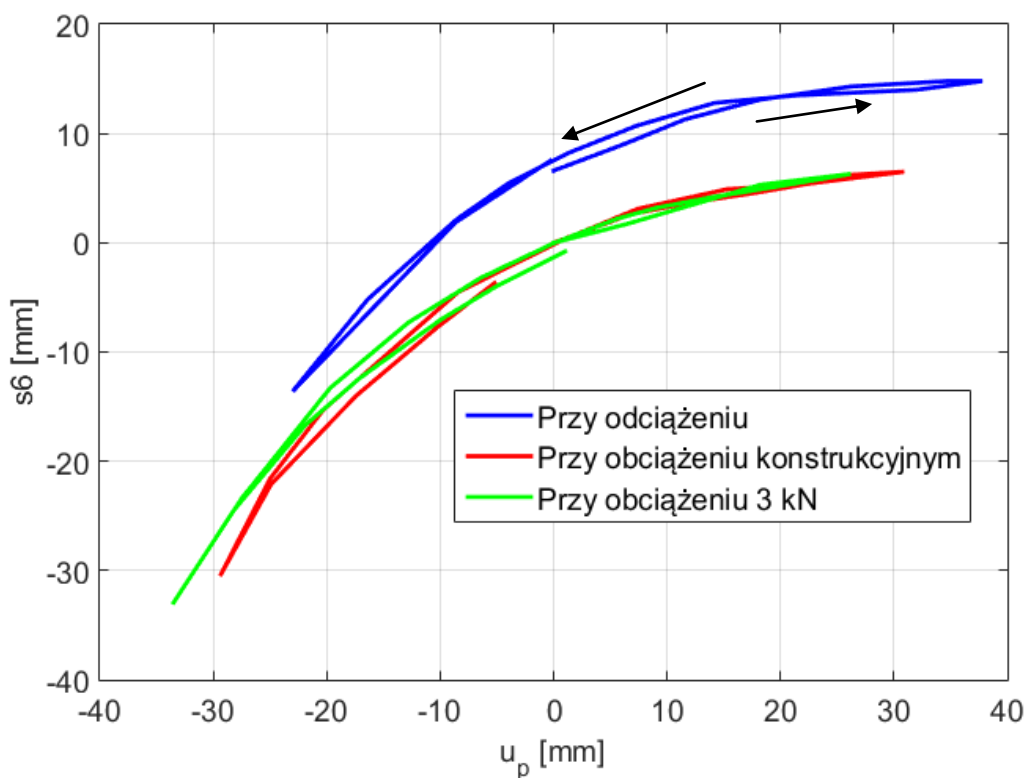
Rys. 60. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_1 , łącznika s_3 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczenia listwy zębatej u_p dla różnych ugięć zawieszenia.



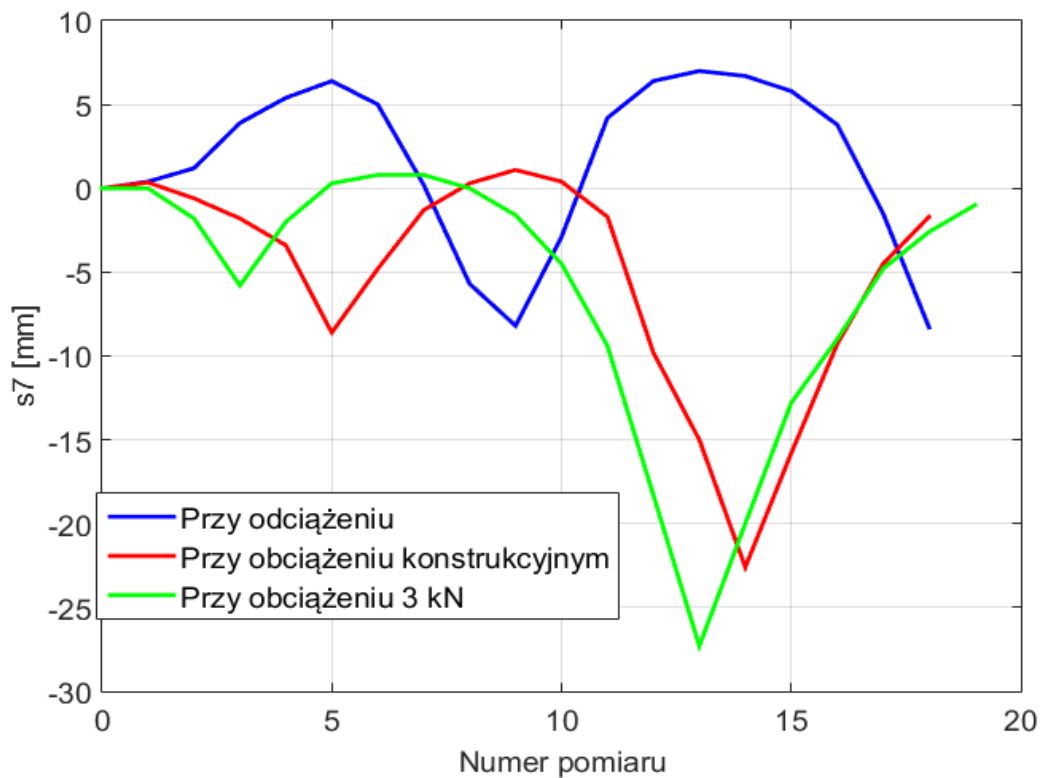
Rys. 61. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_3 , łącznika s_5 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji kolejnych kroków pomiaru dla różnych ugięć zawieszenia.



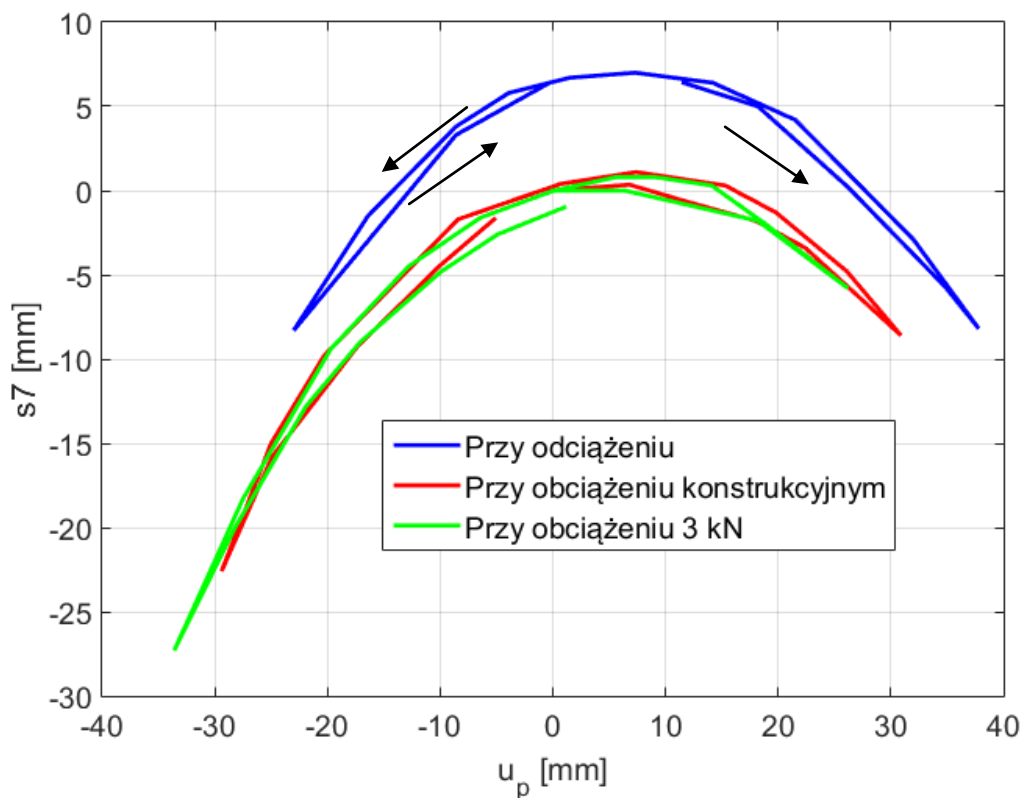
Rys. 62. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_3 , łącznika s_5 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczenia listwy zębatej u_p dla różnych ugięć zawieszenia.



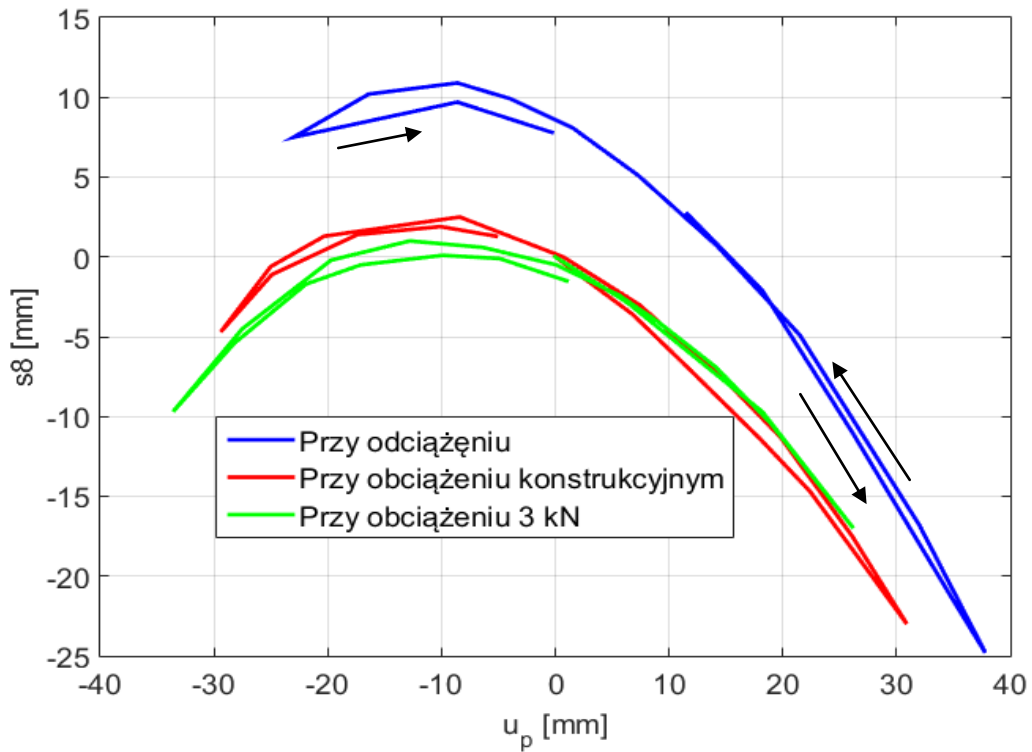
Rys. 63. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_3 , łącznika s_6 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczenia listwy zębatej u_p dla różnych ugięć zawieszenia.



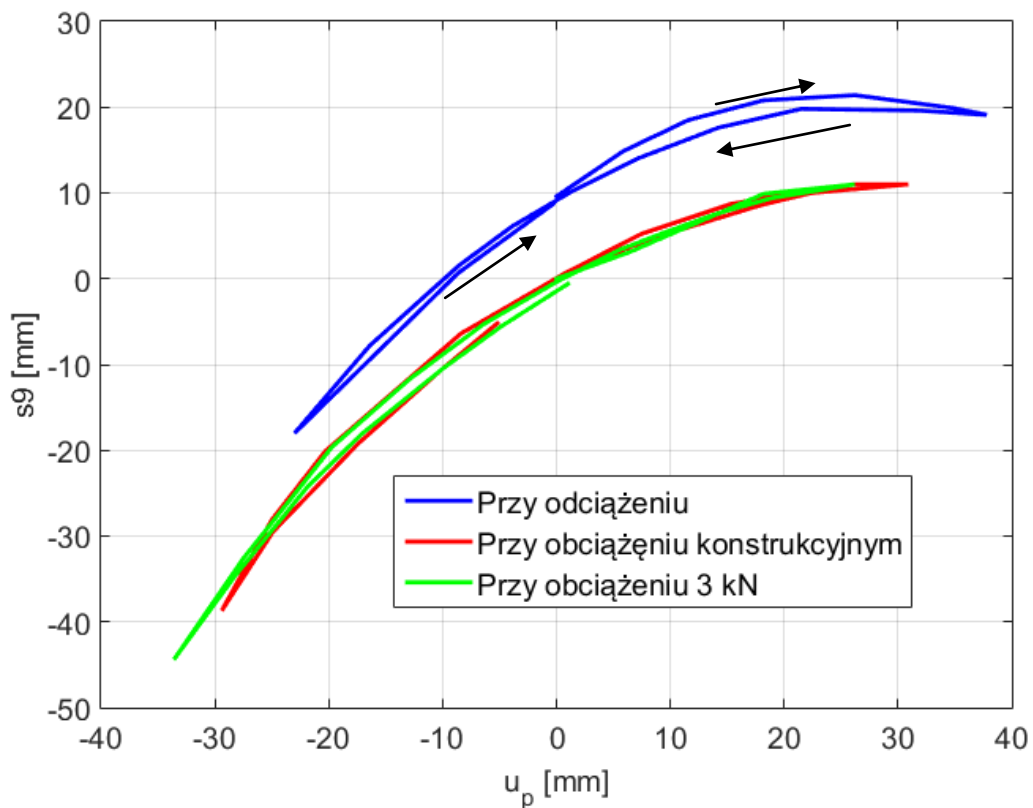
Rys. 64. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_2 , łącznika s_7 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji kolejnych kroków pomiaru dla różnych ugięć zawieszenia.



Rys. 65. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_2 , łącznika s_7 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczenia listwy zębatej u_p dla różnych ugięć zawieszenia.

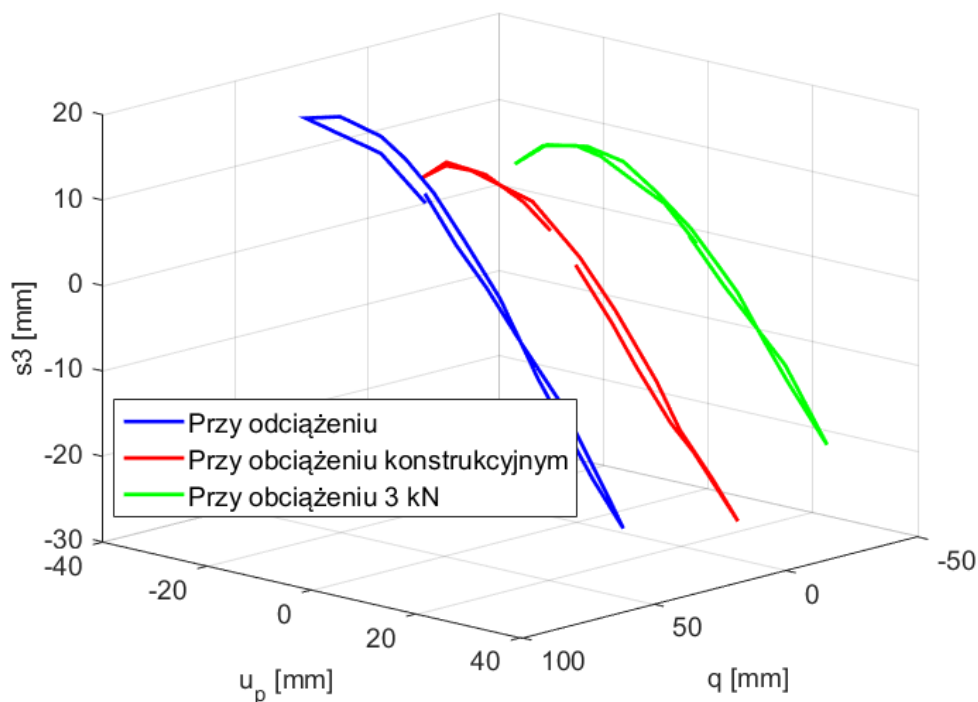


Rys. 66. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_2 , łącznika s_8 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczenia listwy zębatej u_p dla różnych ugięć zawieszenia.

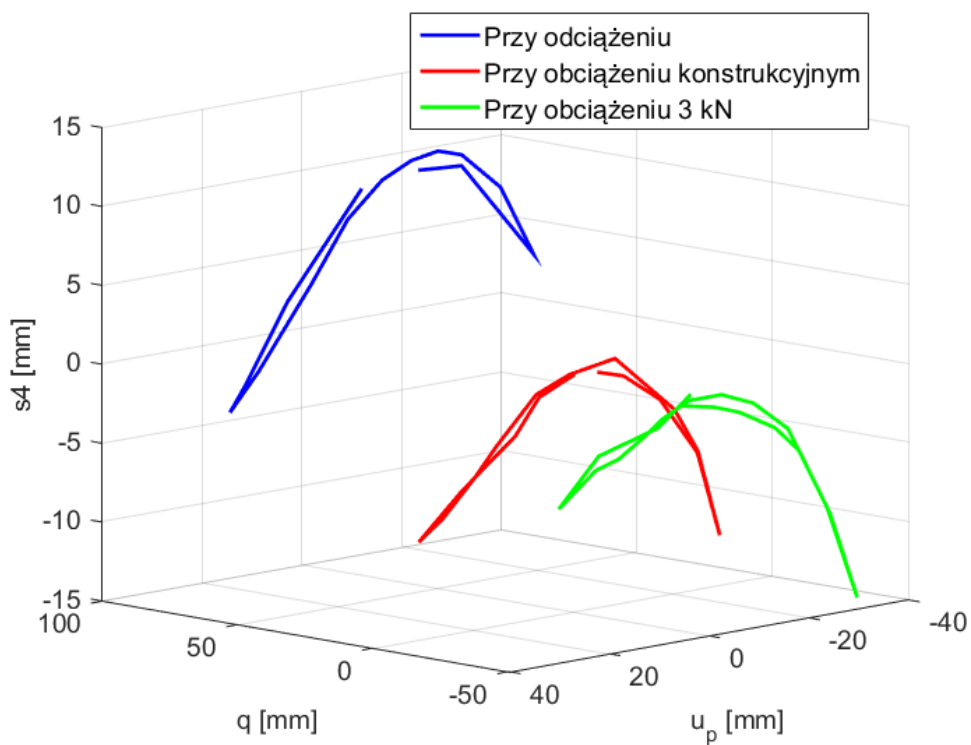


Rys. 67. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_2 , łącznika s_9 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczenia listwy zębatej u_p dla różnych ugięć zawieszenia.

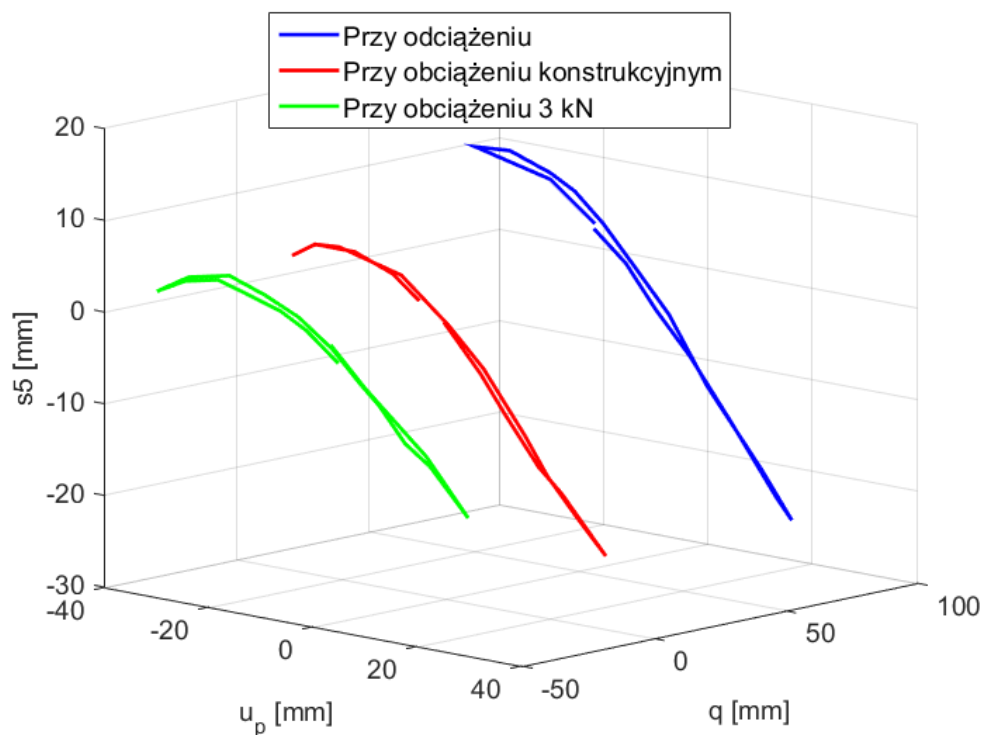
Poniżej, na (Rys. 68. ÷ Rys. 71.), przedstawiono przestrzenne charakterystyki wydłużeń wybranych łączników prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p oraz ugięcia zawieszenia q .



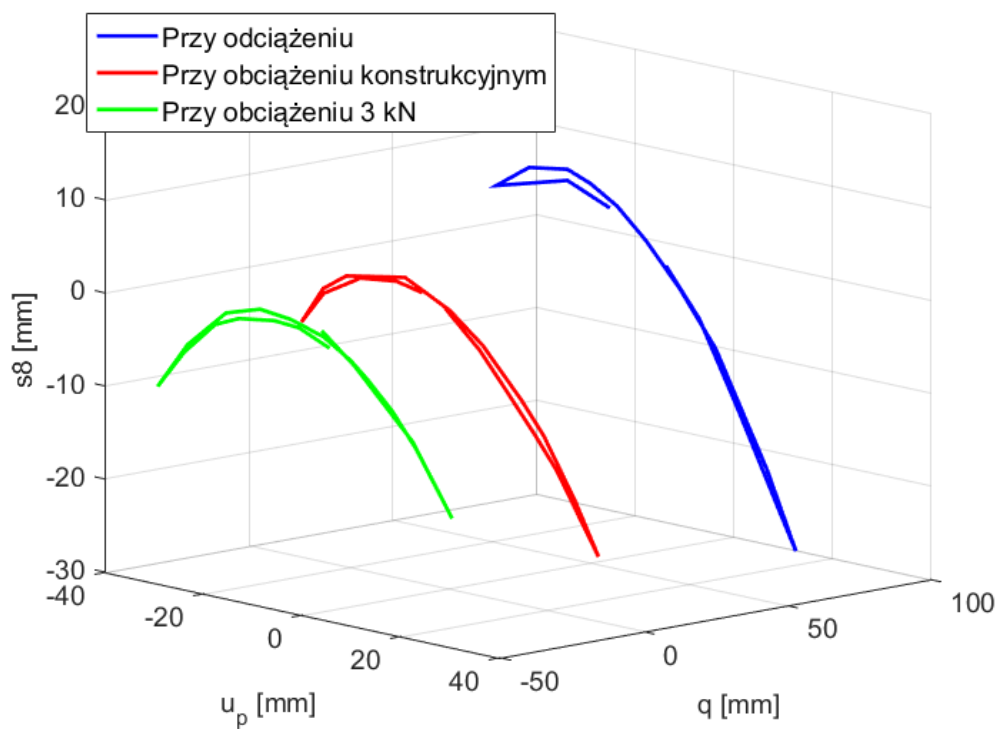
Rys. 68. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_1 , łącznika s_3 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p oraz ugięcia zawieszenia q .



Rys. 69. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_3 , łącznika s_4 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p oraz ugięcia zawieszenia q .



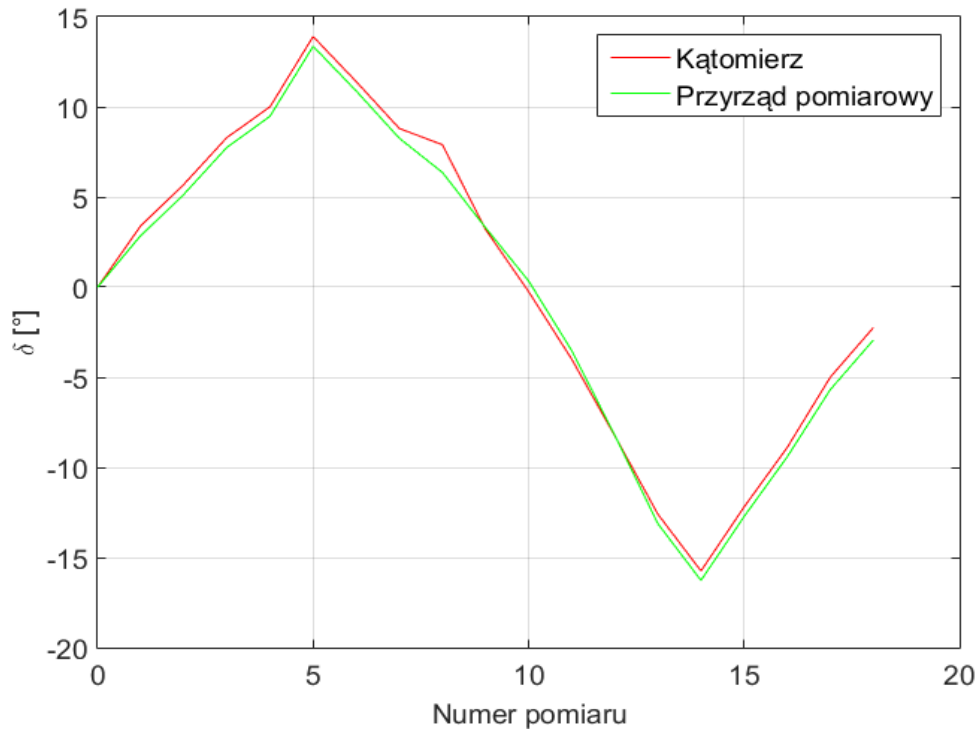
Rys. 70. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_3 , łącznika s_5 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p oraz ugięcia zawieszenia q .



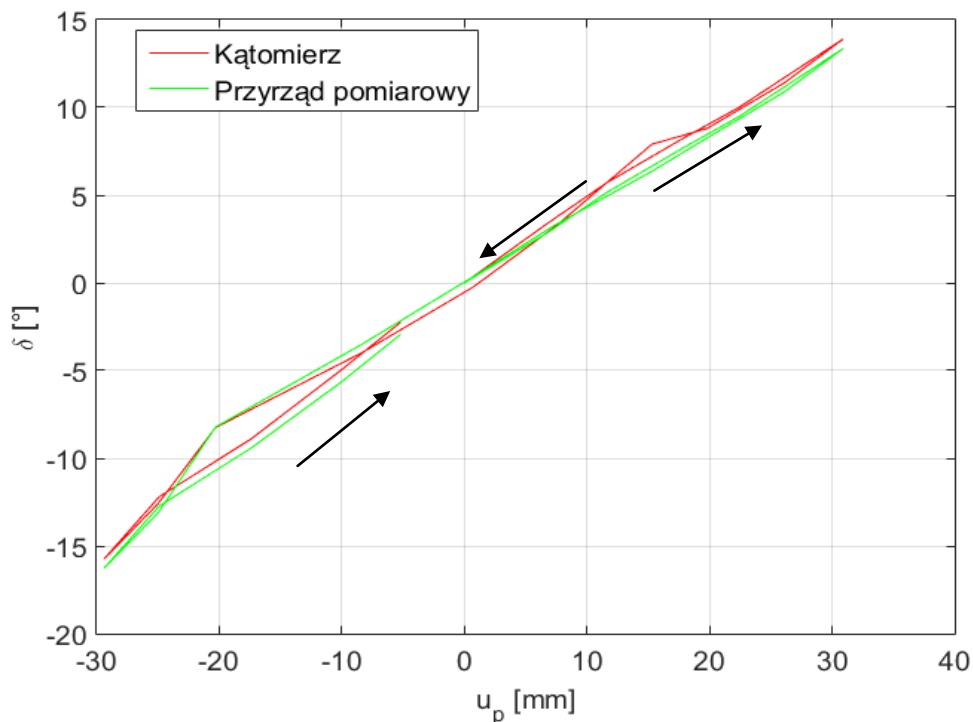
Rys. 71. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_2 , łącznika s_8 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p oraz ugięcia zawieszenia q .

9.2.5. Charakterystyki zawieszenia- konstrukcyjne obciążenie pojazdu

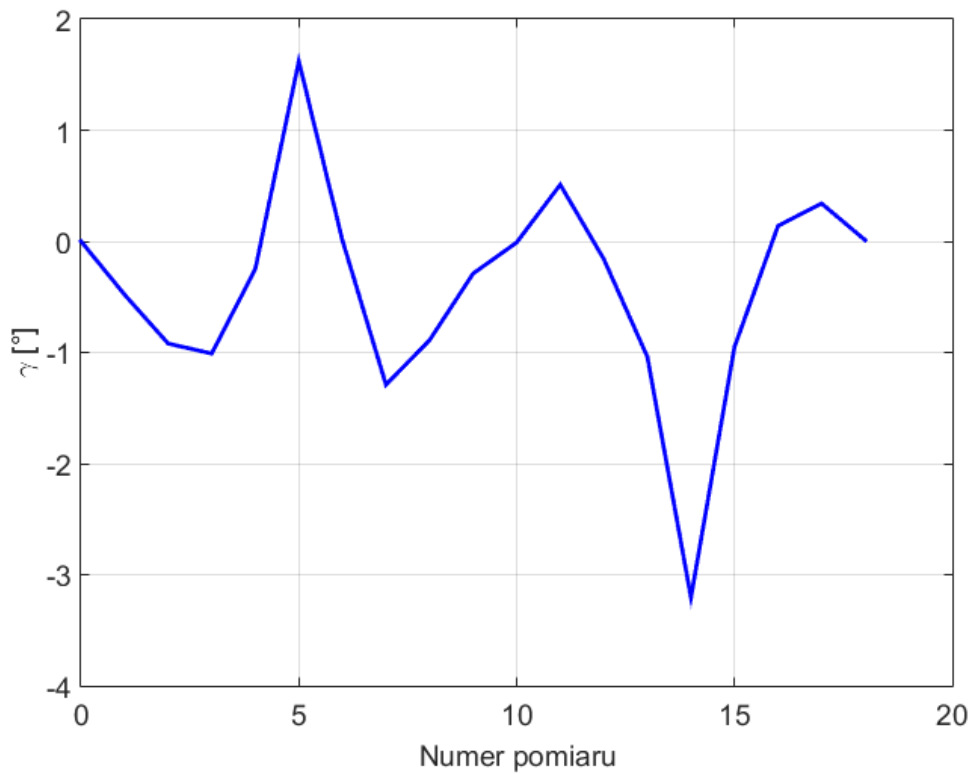
Rys. 72. ÷ Rys. 77. przedstawiają charakterystyki zawieszenia lewego koła samochodu Skoda Octavia I wyznaczone na podstawie wyników badań stanowiskowych w przypadku pojazdu obciążonego konstrukcyjnie.



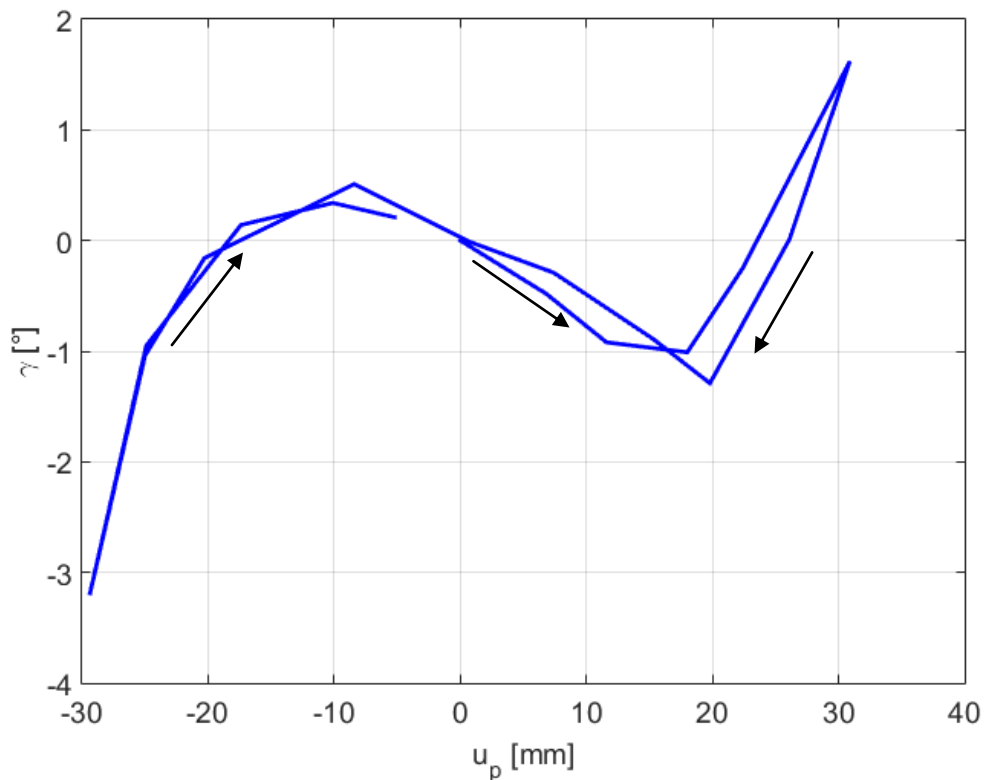
Rys. 72. Kąt skrętu δ lewego koła samochodu Skoda Octavia I, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego oraz na podstawie pomiarów referencyjnych, wykonanych przy użyciu kątomierza, w funkcji kolejnych kroków pomiaru, przy konstrukcyjnym obciążeniu pojazdu.



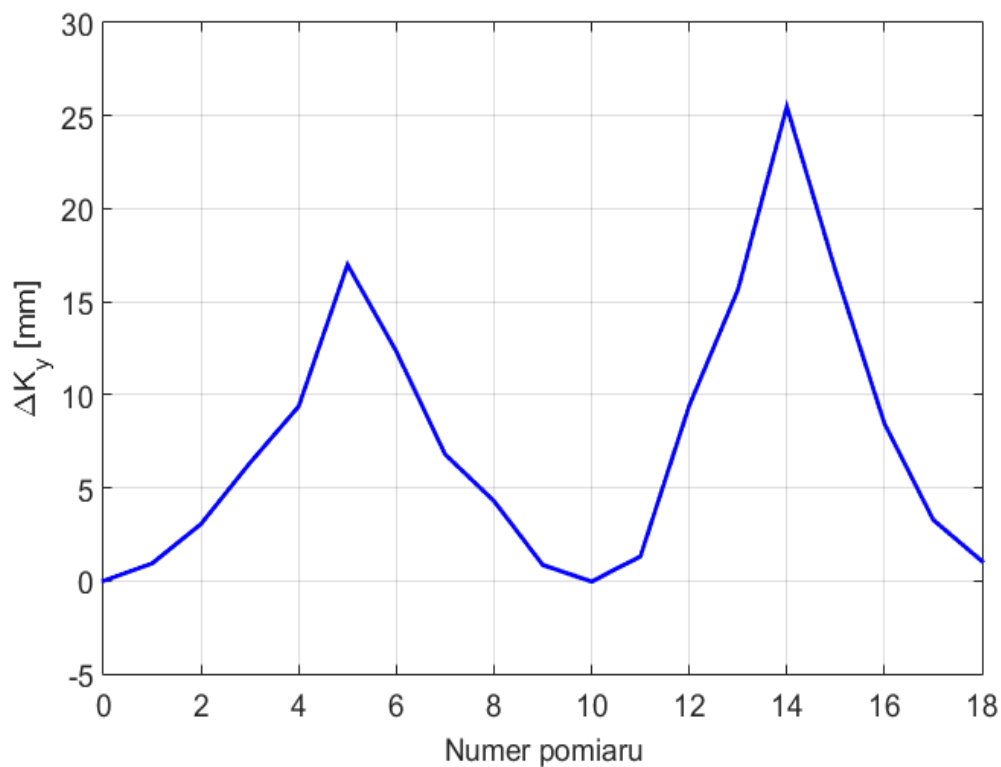
Rys. 73. Kąt skrętu δ lewego koła samochodu Skoda Octavia I, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego oraz na podstawie pomiarów referencyjnych, wykonanych przy użyciu kątomierza, w funkcji przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p , przy konstrukcyjnym obciążeniu pojazdu.



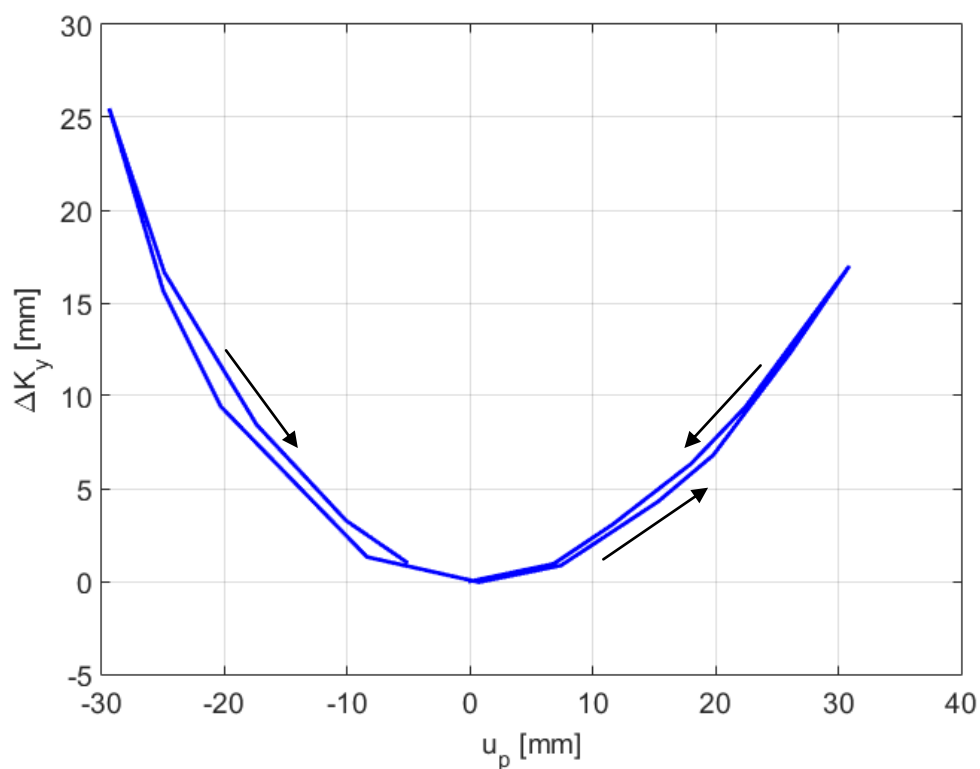
Rys. 74. Kąt pochylenia γ lewego koła samochodu Skoda Octavia I, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji kolejnych kroków pomiaru, przy konstrukcyjnym obciążeniu pojazdu.



Rys. 75. Kąt pochylenia γ lewego koła samochodu Skoda Octavia I, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p , przy konstrukcyjnym obciążeniu pojazdu.



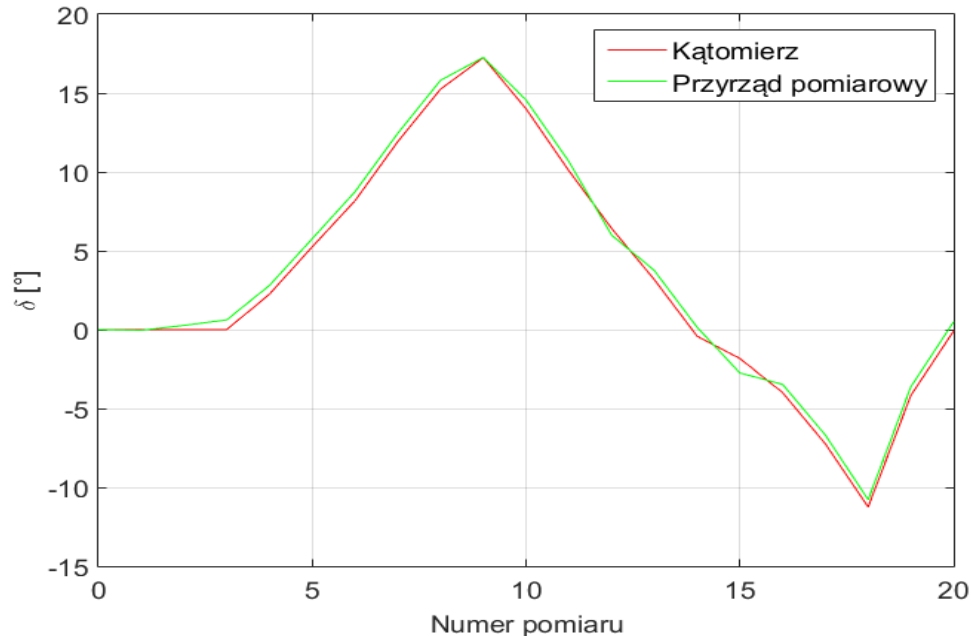
Rys. 76. Poprzeczne przemieszczenie ΔK_y punktu związanego z lewym kołem samochodu Skoda Octavia I, wyznaczone za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji kolejnych kroków pomiaru, przy konstrukcyjnym obciążeniu pojazdu.



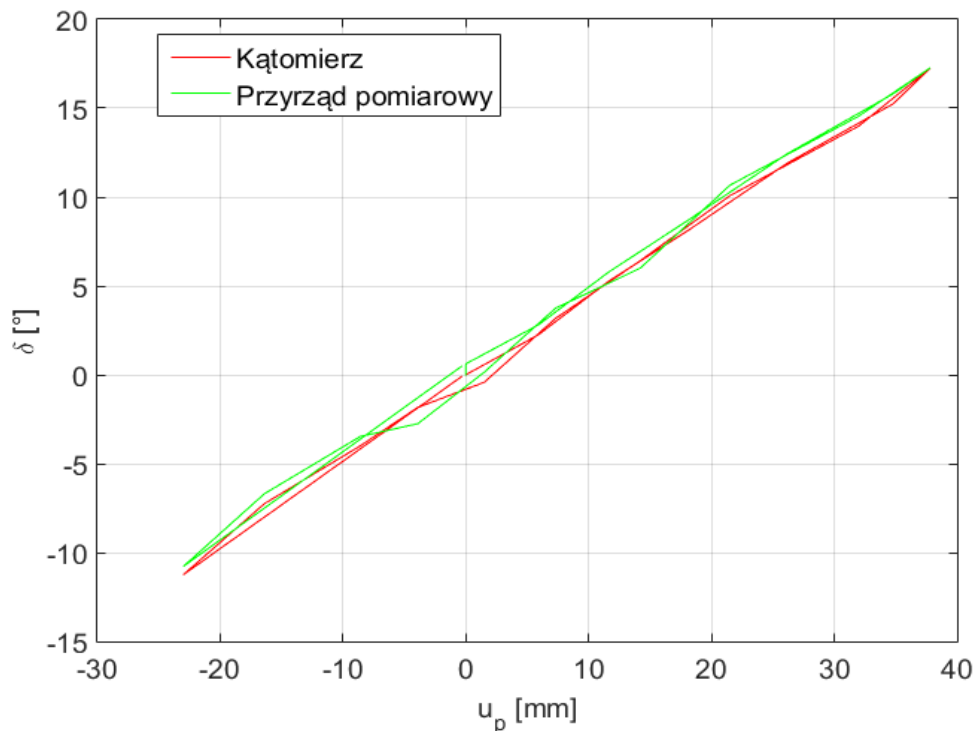
Rys. 77. Poprzeczne przemieszczenie ΔK_y punktu związanego z lewym kołem samochodu Skoda Octavia I, wyznaczone za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p , przy konstrukcyjnym obciążeniu pojazdu.

9.2.6. Charakterystyki zawieszenia- pojazd odciążony

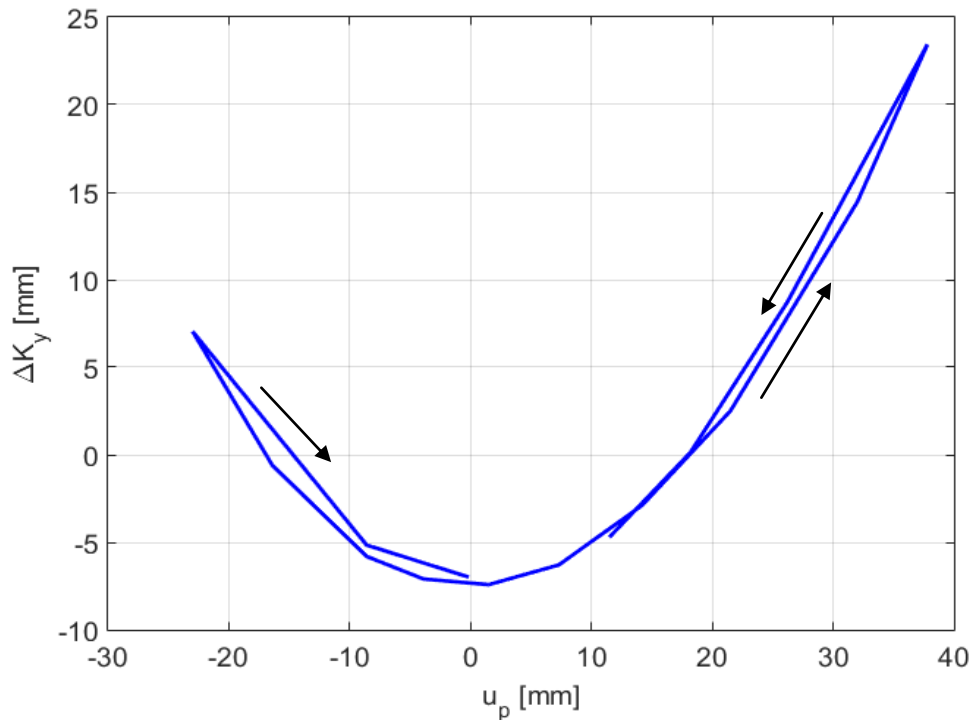
Na (Rys. 78. ÷ Rys. 80.) przedstawione zostały przykładowe charakterystyki zawieszenia lewego koła samochodu Skoda Octavia I wyznaczone na podstawie wyników badań stanowiskowych w przypadku pojazdu odciążonego- skok „odbicia” zawieszenia wynosił 57 mm.



Rys. 78. Kąt skrętu δ lewego koła samochodu Skoda Octavia I, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego oraz na podstawie pomiarów referencyjnych, wykonanych przy użyciu kątomierza, w funkcji kolejnych kroków pomiaru- pojazd odciążony.



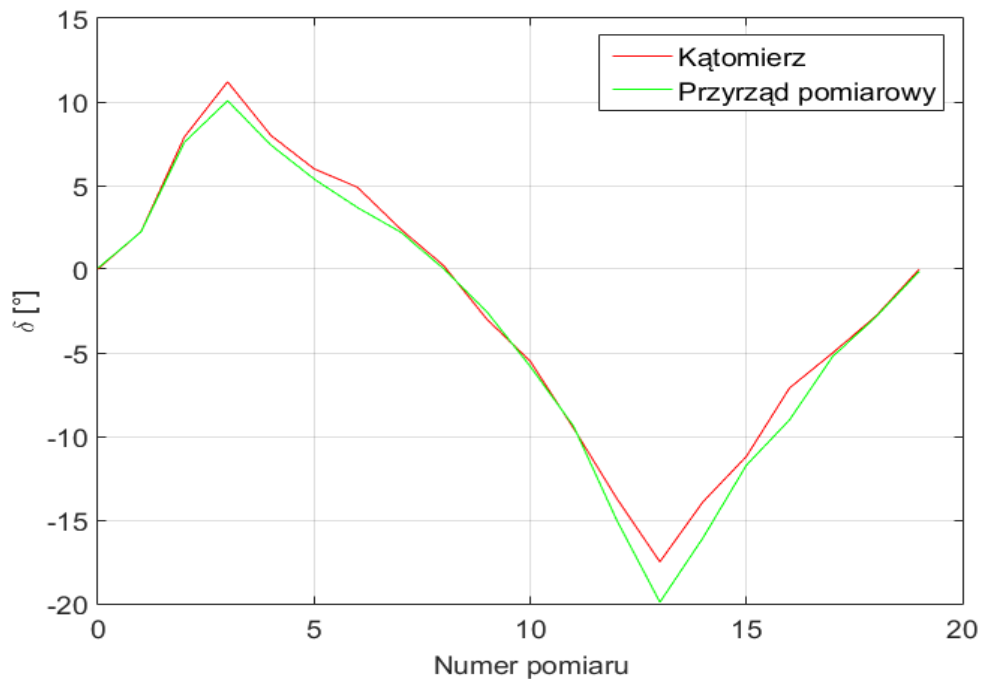
Rys. 79. Kąt skrętu δ lewego koła samochodu Skoda Octavia I, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego oraz na podstawie pomiarów referencyjnych, wykonanych przy użyciu kątomierza, w funkcji przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p - pojazd odciążony.



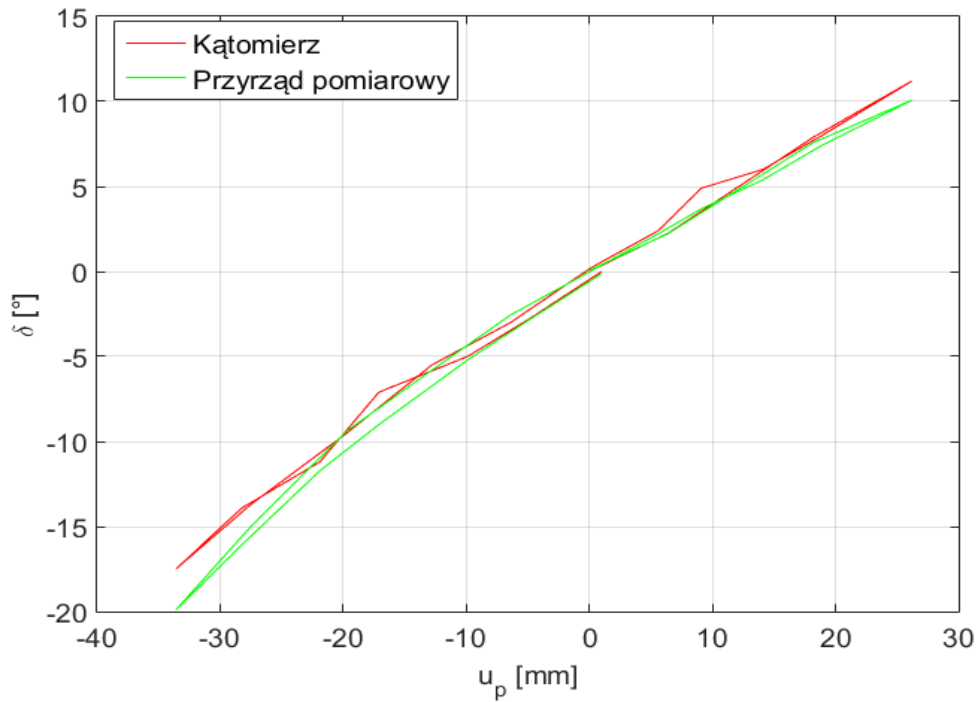
Rys. 80. Poprzeczne przemieszczenie ΔK_y punktu związanego z lewym kołem samochodu Skoda Octavia I, wyznaczone za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p - pojazd obciążony.

9.2.7. Charakterystyki zawieszenia- pojazd obciążony siłą 3 kN

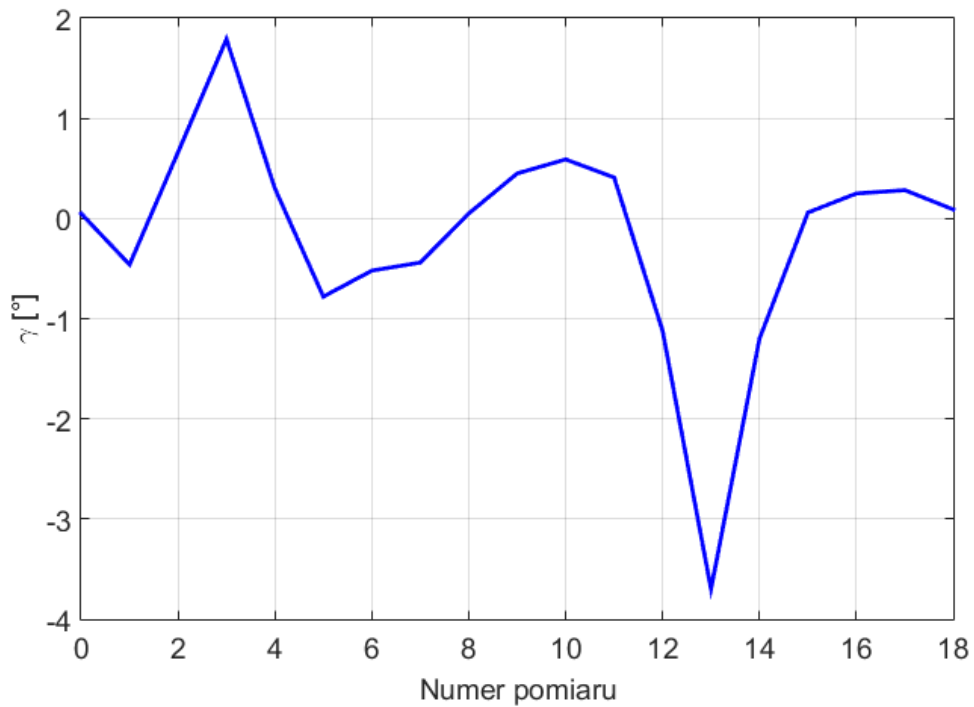
Rys. 81. ÷ Rys. 86. przedstawiają przykładowe charakterystyki zawieszenia lewego koła samochodu Skoda Octavia I wyznaczone na podstawie wyników badań stanowiskowych w przypadku pojazdu obciążonego siłą 3 kN.



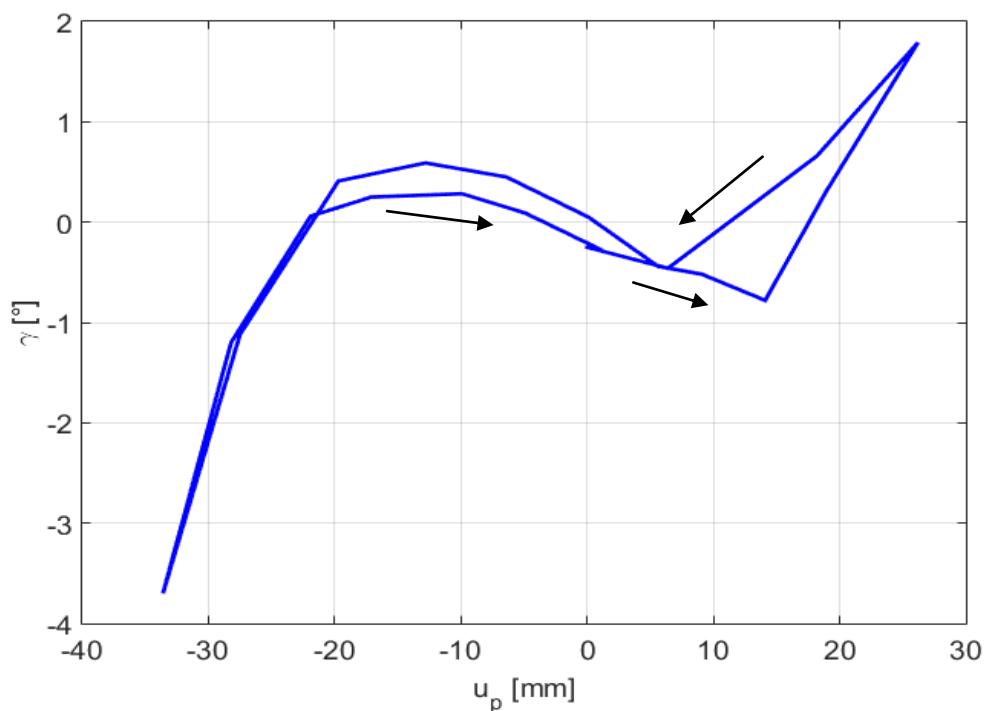
Rys. 81. Kąt skrętu δ lewego koła samochodu Skoda Octavia I, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego oraz na podstawie pomiarów referencyjnych, wykonanych przy użyciu kątomierza, w funkcji kolejnych kroków pomiaru, przy obciążeniu pojazdu siłą 3 kN.



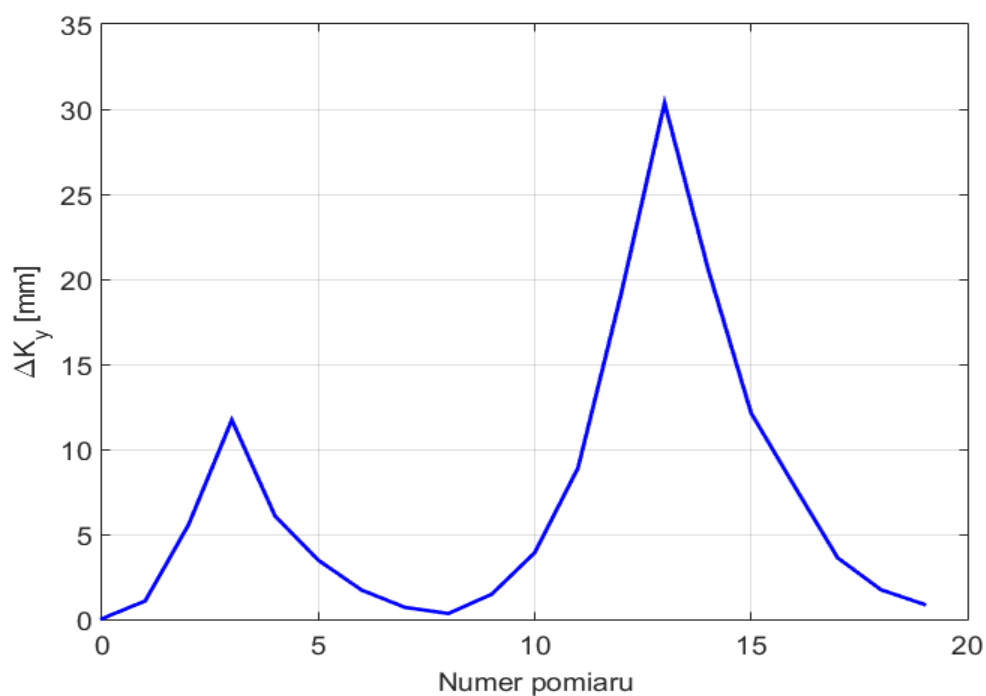
Rys. 82. Kąt skrętu δ lewego koła samochodu Skoda Octavia I, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego oraz na podstawie pomiarów referencyjnych, wykonanych przy użyciu kątomierza, w funkcji przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p , przy obciążeniu pojazdu siłą 3 kN.



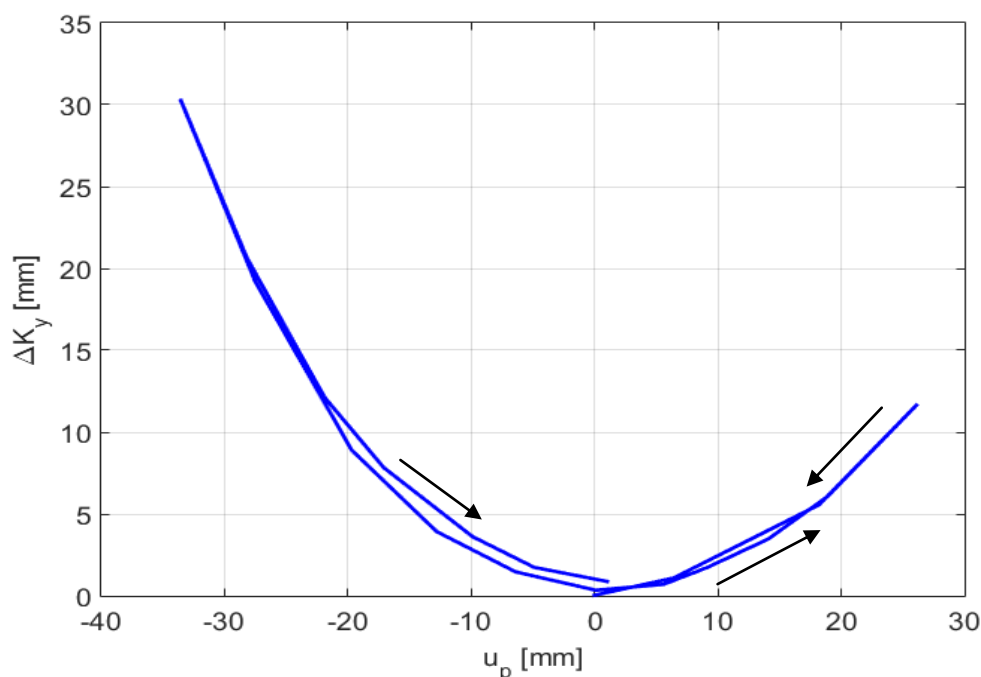
Rys. 83. Kąt pochylenia γ lewego koła samochodu Skoda Octavia I, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji kolejnych kroków pomiaru, przy obciążeniu pojazdu siłą 3 kN.



Rys. 84. Kąt pochylenia γ lewego koła samochodu Skoda Octavia I, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p , przy obciążeniu pojazdu siłą 3 kN



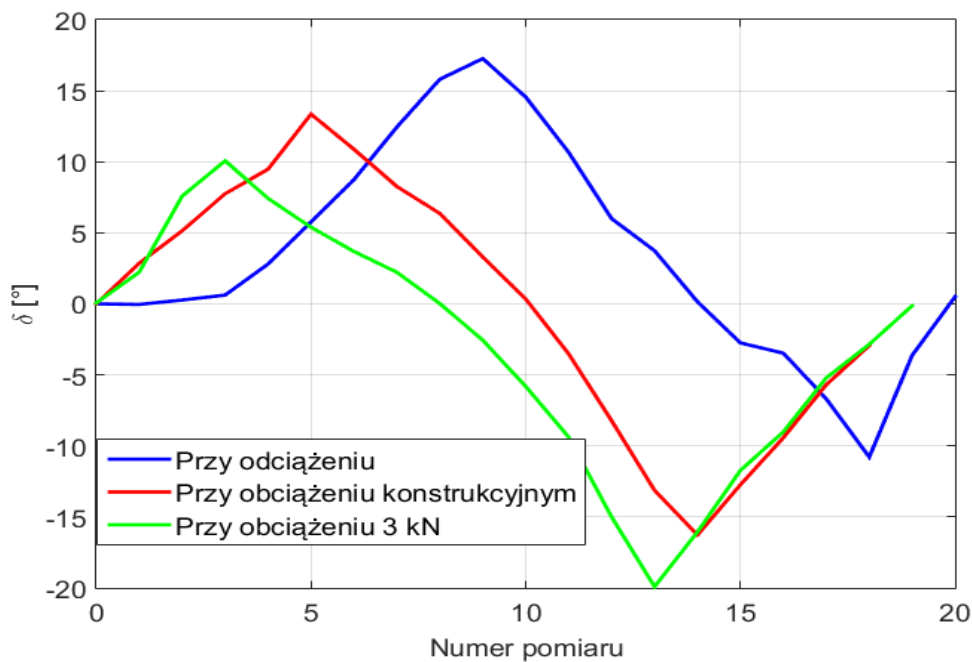
Rys. 85. Poprzeczne przemieszczenie ΔK_y punktu związanego z lewym kołem samochodu Skoda Octavia I, wyznaczone za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji kolejnych kroków pomiaru, przy obciążeniu pojazdu siłą 3 kN



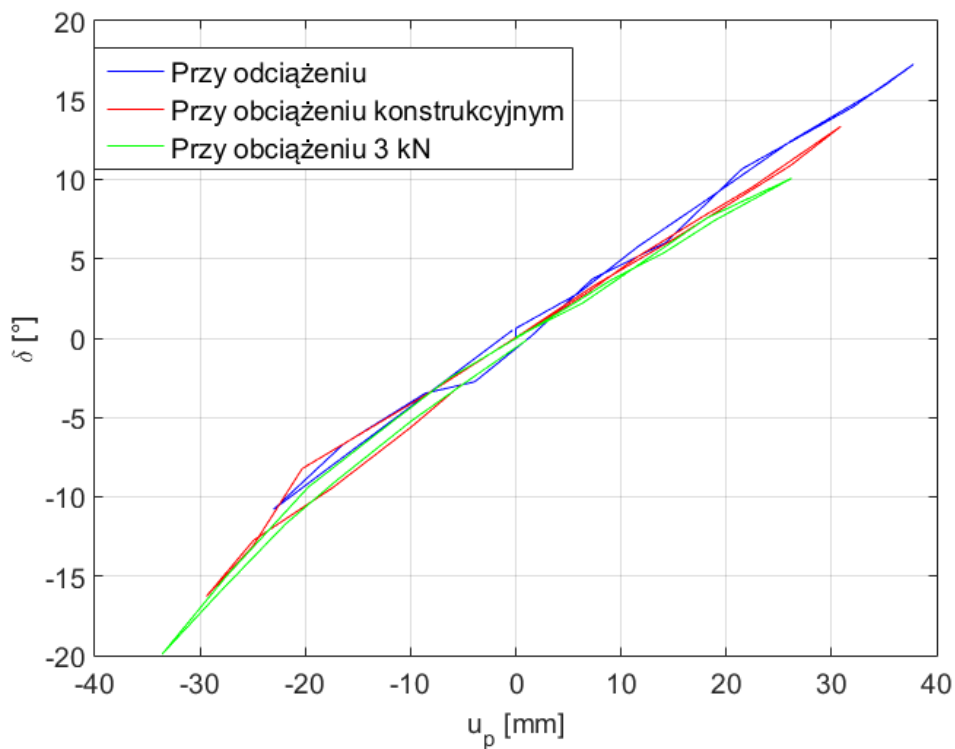
Rys. 86. Poprzeczne przemieszczenie ΔK_y punktu związanego z lewym kołem samochodu Skoda Octavia I, wyznaczone za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p , przy obciążeniu pojazdu siłą 3 kN.

9.2.8. Charakterystyki zawieszenia w przestrzeni ruchów resorowania

Na wykresach przedstawionych na Rys. 87. ÷ Rys. 92. zestawione zostały charakterystyki kątów skrętu δ i pochylenia koła γ oraz poprzecznego przemieszczenia ΔK_y punktu związanego z kołem dla różnych ugięć zawieszenia. Przebiegi przedstawiono zarówno w funkcji kolejnych kroków pomiaru, jak i przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p .



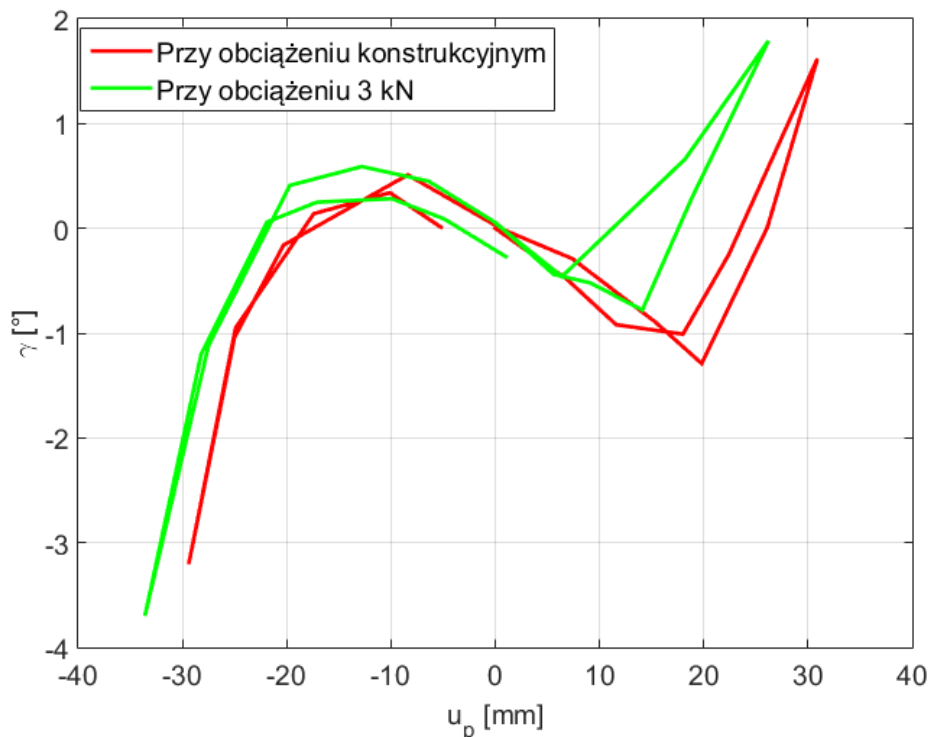
Rys. 87. Kąt skrętu δ lewego koła samochodu Skoda Octavia I, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji kolejnych kroków pomiaru dla różnych ugięć zawieszenia.



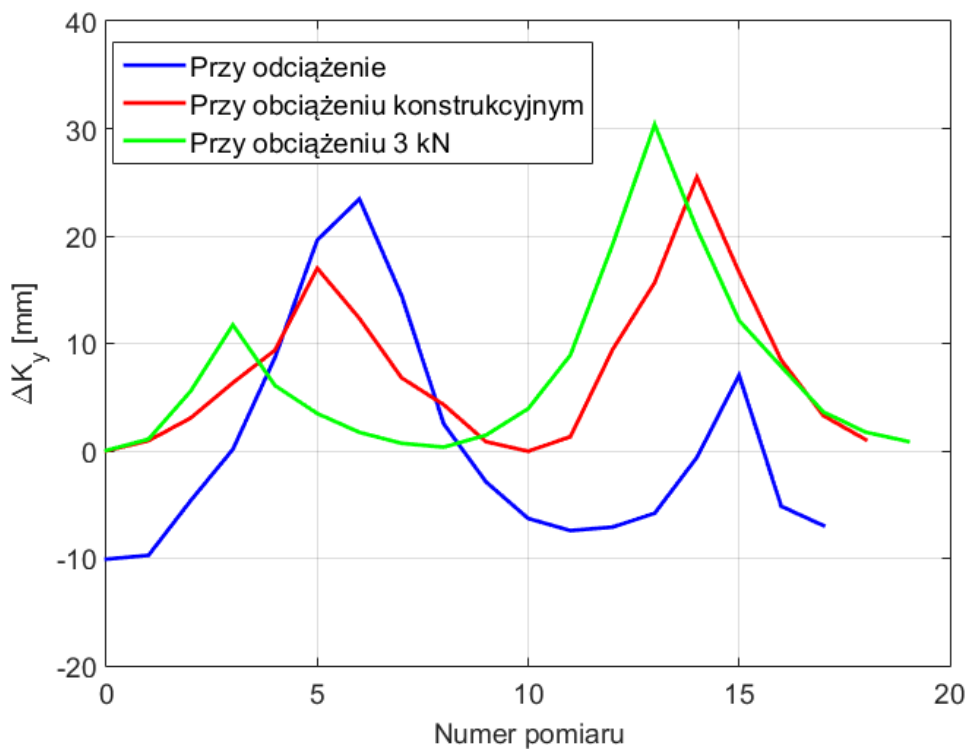
Rys. 88. Kąt skrętu δ lewego koła samochodu Skoda Octavia I, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p dla różnych ugięć zawieszenia.



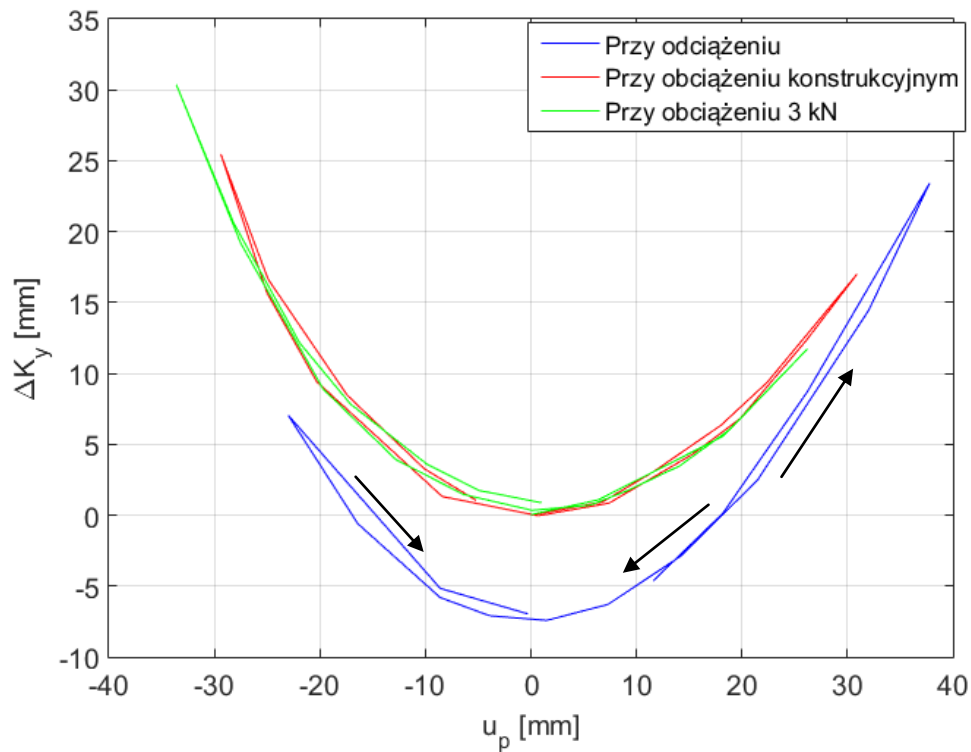
Rys. 89. Kąt pochylenia γ lewego koła samochodu Skoda Octavia I, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji kolejnych kroków pomiaru dla różnych ugięć zawieszenia.



Rys. 90. Kąt pochylenia γ lewego koła samochodu Skoda Octavia I, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p dla różnych ugięć zawieszenia.

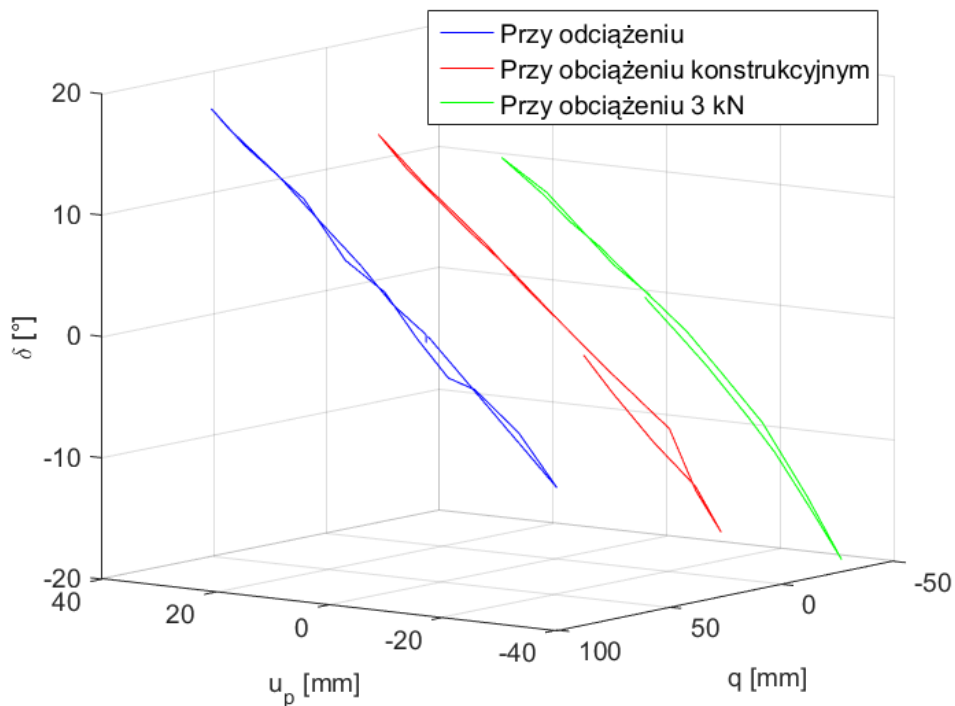


Rys. 91. Poprzeczne przemieszczenie ΔK_y punktu związanego z lewym kołem samochodu Skoda Octavia I, wyznaczone za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji kolejnych kroków pomiaru dla różnych ugięć zawieszenia.

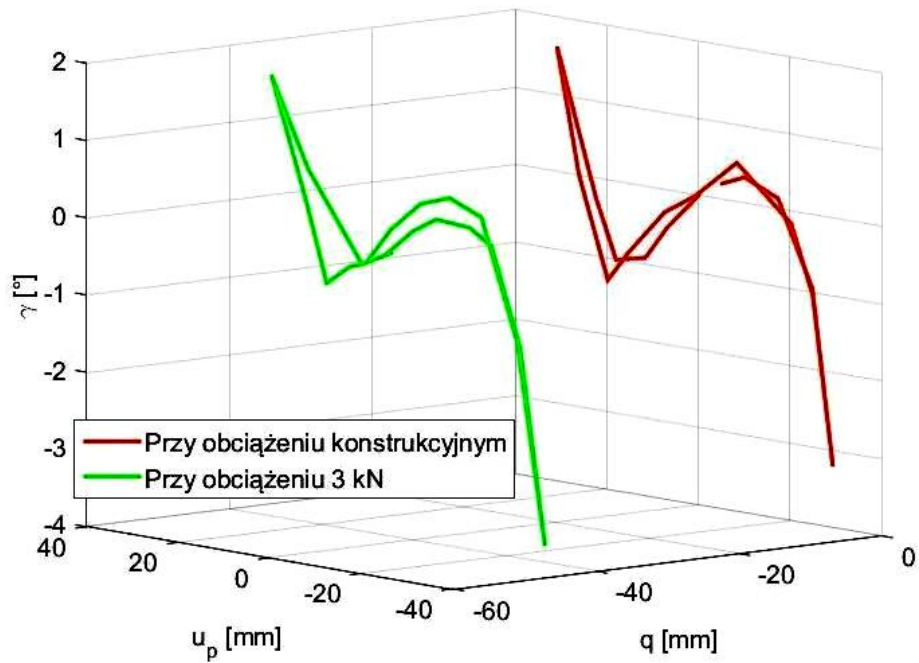


Rys. 92. Poprzeczne przemieszczenie ΔK_y punktu związanego z lewym kołem samochodu Skoda Octavia I, wyznaczone za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p dla różnych ugięć zawieszenia.

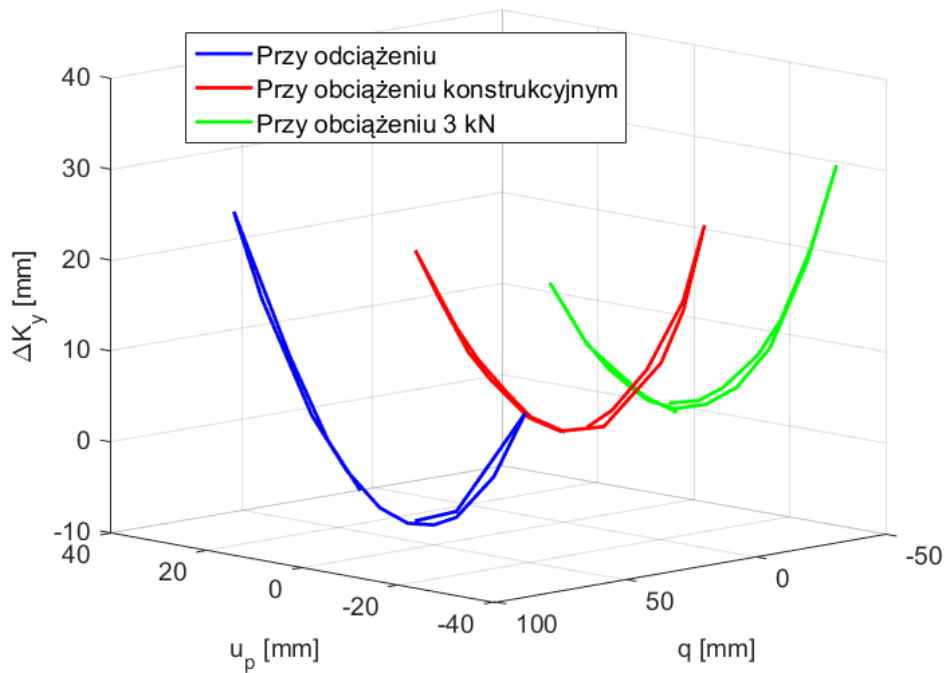
Poniżej (Rys. 93. ÷ Rys. 95.) przedstawiono przestrzenne charakterystyki kątów skrętu δ i pochylenia γ koła, a także poprzecznego przemieszczenia ΔK_y punktu związanego z kołem, w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p oraz ugięcia zawieszenia q .



Rys. 93. Kąt skrętu δ lewego koła samochodu Skoda Octavia I, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p oraz ugięcia zawieszenia q .



Rys. 94. Kąt pochylenia γ lewego koła samochodu Skoda Octavia I, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p oraz ugięcia zawieszenia q .



Rys. 95. Poprzeczne przemieszczenie ΔK_y punktu związanego z lewym kołem samochodu Skoda Octavia I, wyznaczone za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p oraz ugięcia zawieszenia q .

9.3. Pomiary kątów skrętu i pochylenia koła kierowanego na samochodzie Volkswagen Passat B5

Próby stacjonarne z wykorzystaniem prototypowego przyrządu pomiarowego przeprowadzono również na samochodzie Volkswagen Passat B5. Pojazd ten jest również wyposażony w niezależne zawieszenie kół osi przedniej, jednak w przeciwieństwie do Skody Octavii, jest to zawieszenie wielołącznikowe. Schemat strukturalny takiego zawieszenia zastał omówiony w rozdziale 4.1.

Na Rys. 96. przedstawiono, przygotowany do badań stanowiskowych, samochód Volkswagen Passat B5 z zamocowanym prototypowym przyrządem pomiarowym. Koła przedniej osi ustawiono na płytach obrotowo- przesuwnych, natomiast koła osi tylnej na najazdach tej o samej wysokości.



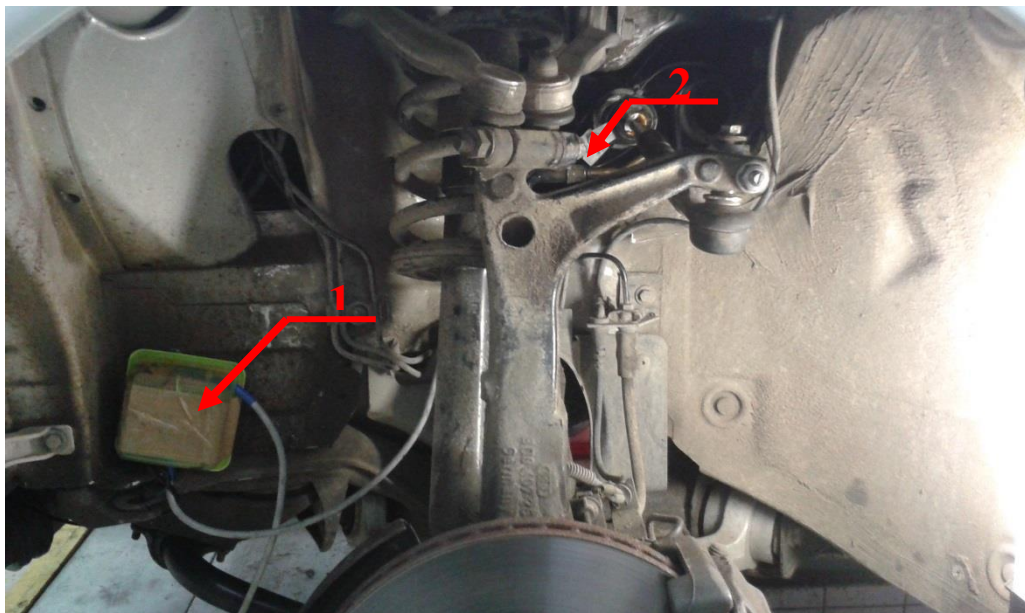
Rys. 96. Przygotowany do pomiarów stanowiskowych samochód Volkswagen Passat B5 w widoku ogólnym. Widoczny jest prototypowy przyrząd pomiarowy zamocowany przy lewym kole pojazdu, zestaw przetworników analogowo- cyfrowych, akumulator zasilający urządzenie oraz laptop, na dysku którego rejestrowano wyniki pomiarów. Pojazd ustawiony został na płytach obrotowo- przesuwnych oraz na specjalnych najazdach o takiej samej wysokości.

Na Rys. 97. przedstawiono zbliżenie na lewe koło samochodu wraz zamocowanym przyrządem, będącym przedmiotem niniejszej pracy. Płyta zewnętrzna przyrządu została unieruchomiona względem nadwozia za pomocą specjalnych uchwytów zamocowanych do błotnika.

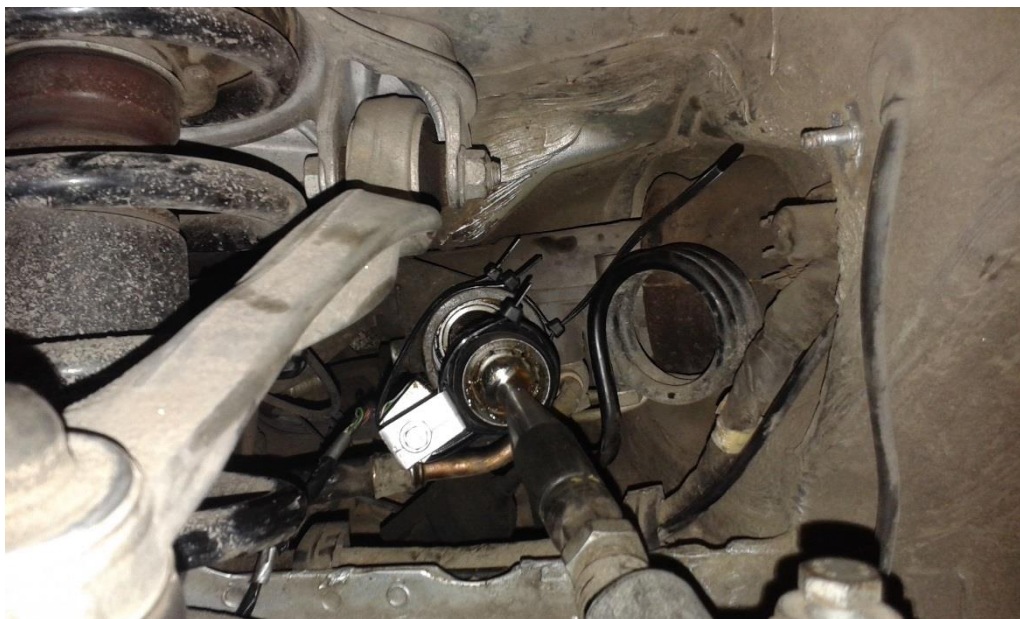


Rys. 97. Zbliżenie na lewe koło samochodu Volkswagen Passat z zamocowany przyrządem do pomiaru liniowych oraz kątowych przemieszczeń koła względem nadwozia. Widoczne są uchwyty, za pomocą których przyrząd został unieruchomiony względem nadwozia, jak również ramiona prowadzące, których zadaniem było odebranie płycie wewnętrznej przyrządu możliwości obrotu względem osi y pokrywającej się z osią obrotu koła.

Próby polegały na rejestracji wydłużeń dziewięciu łączników przyrządu pomiarowego podczas skrętu kół kierowanych. Dodatkowo w pojeździe zamocowano czujnik, za pomocą którego mierzone było przemieszczenie listwy zębatej układu kierowniczego. Wyniki pomiarów rejestrowano na dysku komputera przenośnego. W celach weryfikacji wyników uzyskanych za pomocą prototypowego przyrządu, podczas prób mierzono również wartości kąta skrętu lewego koła samochodu za pomocą kątomierza uniwersalnego. Sposób zamocowania czujnika mierzącego przemieszczenie listwy zębatej układu kierowniczego pokazano na Rys. 98. i Rys. 99.



Rys. 98. Zbliżenie na zawieszenie lewego przedniego koła samochodu Volkswagen Passat B5 przygotowanego do badań stanowiskowych. 1- przetwornik analogowo- cyfrowy, 2- optyczny czujnik przemieszczeń liniowych służący do pomiaru przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego.

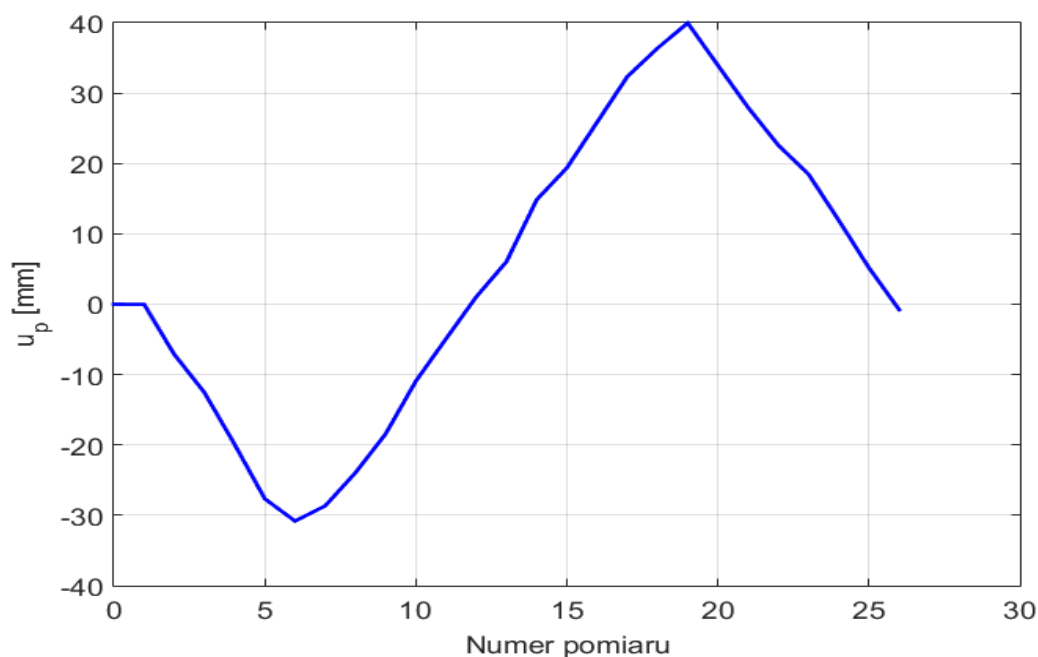


Rys. 99. Optyczny czujnik przemieszczeń liniowych przymocowany do obudowy przegubu kulowego łączącego listwę zębatą układu kierowniczego z lewym skrajnym drążkiem mechanizmu zwrotniczego. Zadaniem czujnika był pomiar przemieszczeń listwy zębatej mechanizmu zwrotniczego.

Badania zostały przeprowadzone dla trzech wysokości zawieszenia: dla obciążenia konstrukcyjnego, dla obciążenia wynoszącego 3 kN oraz dla pojazdu odciążonego. W przypadku pojazdu dociążonego skok „dobicia” zawieszenia wyniósł 43 mm, natomiast skok „odbicia”, w przypadku pojazdu odciążonego, to 57 mm w stosunku do konstrukcyjnej wysokości zawieszenia.

9.3.1. Zmiany wydłużeń łączników przyrządu- konstrukcyjne obciążenie pojazdu

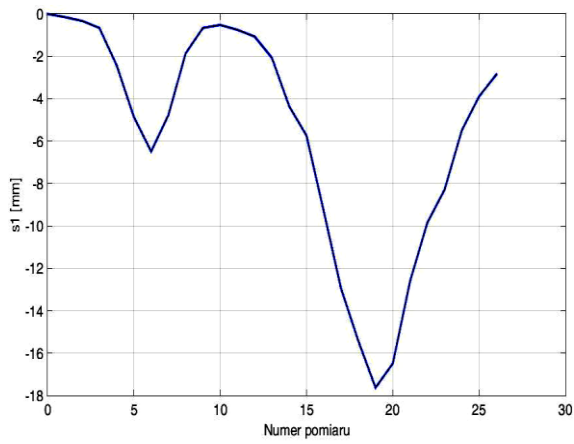
Na Rys. 100. pokazano zmiany przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p w funkcji kolejnych kroków pomiaru.



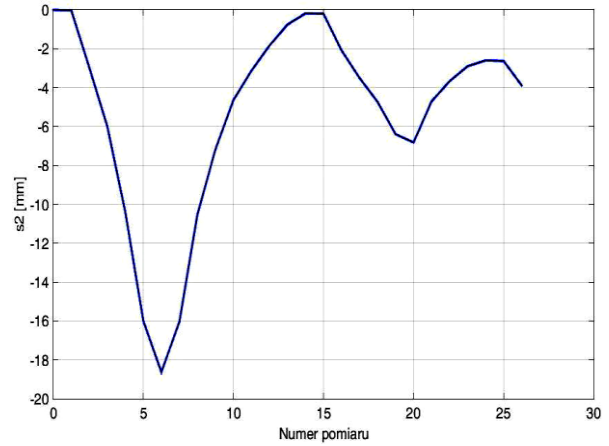
Rys. 100. Przemieszczenie listwy zębatej układu kierowniczego u_p , w funkcji kolejnych kroków pomiaru, przy konstrukcyjnym obciążeniu pojazdu.

Na Rys. 101. przedstawione zostały zmiany wydłużeń łączników prototypowego przyrządu pomiarowego, zarejestrowane podczas pomiarów przeprowadzonych w przypadku konstrukcyjnego obciążenia pojazdu.

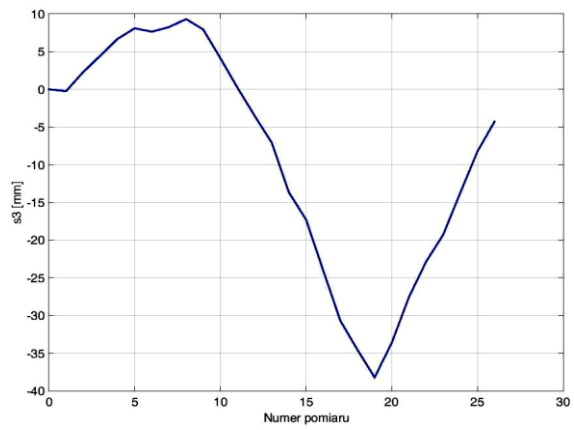
a)



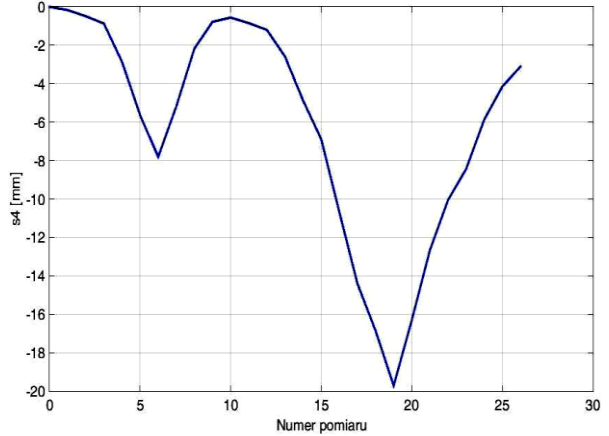
b)



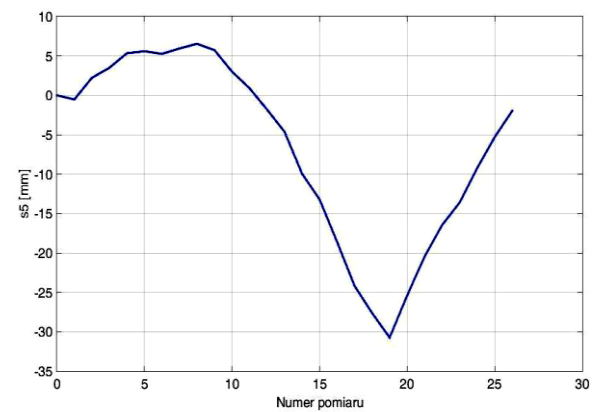
c)



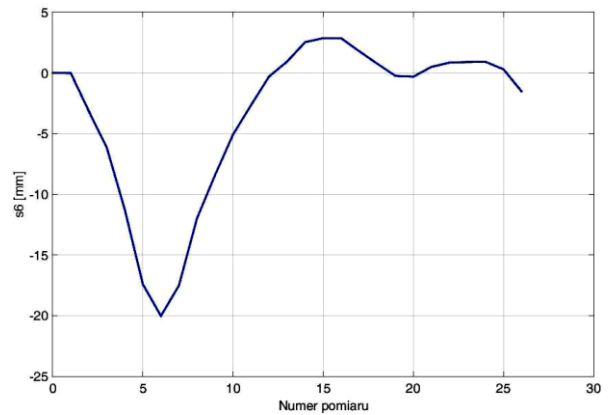
d)

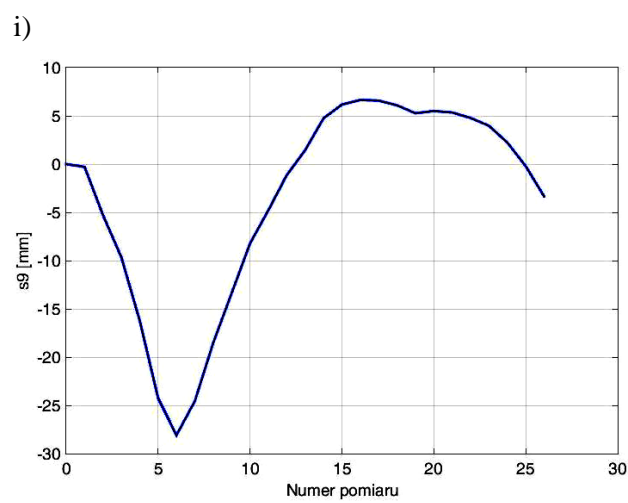
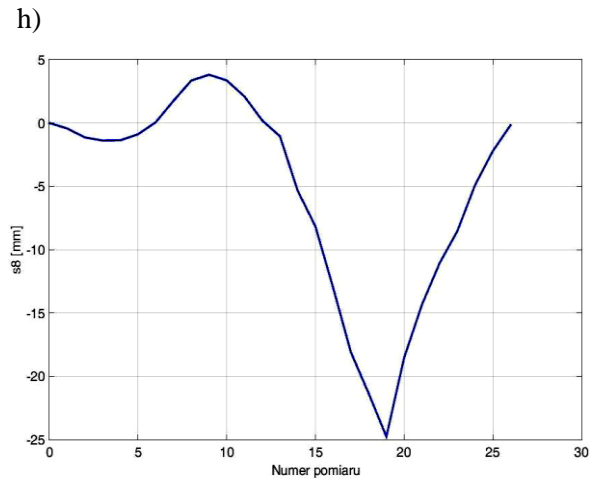
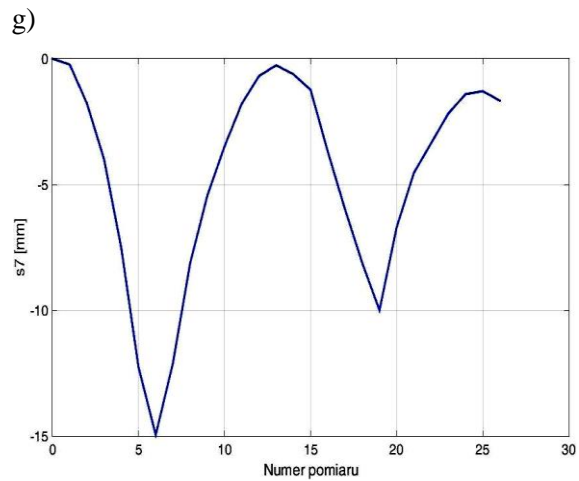


e)



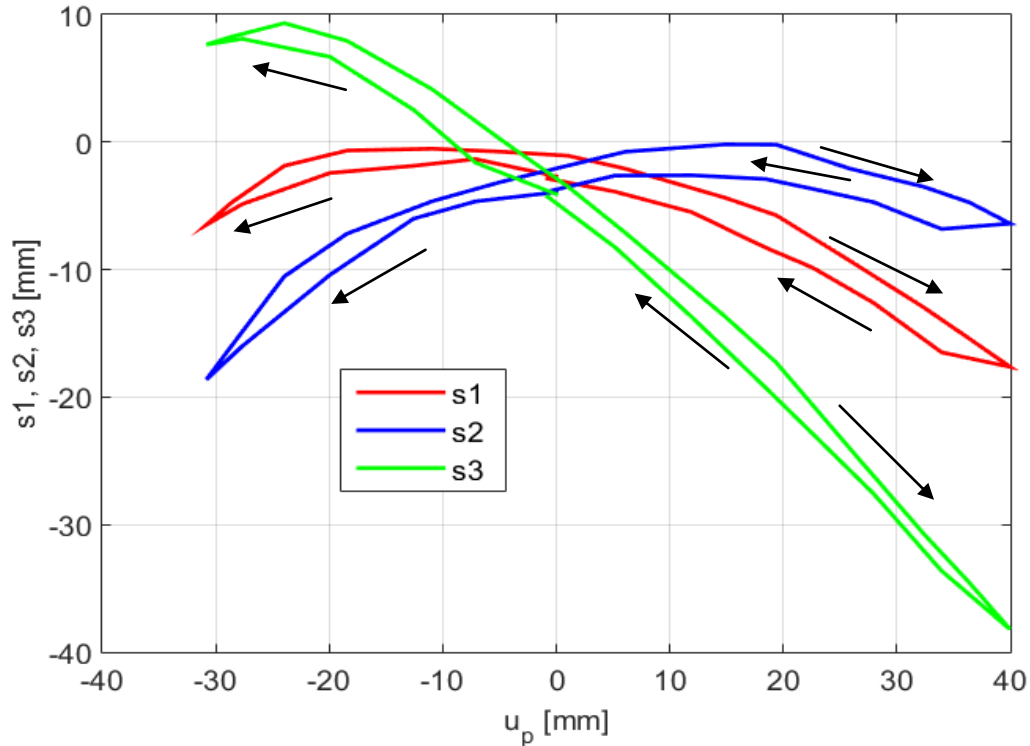
f)



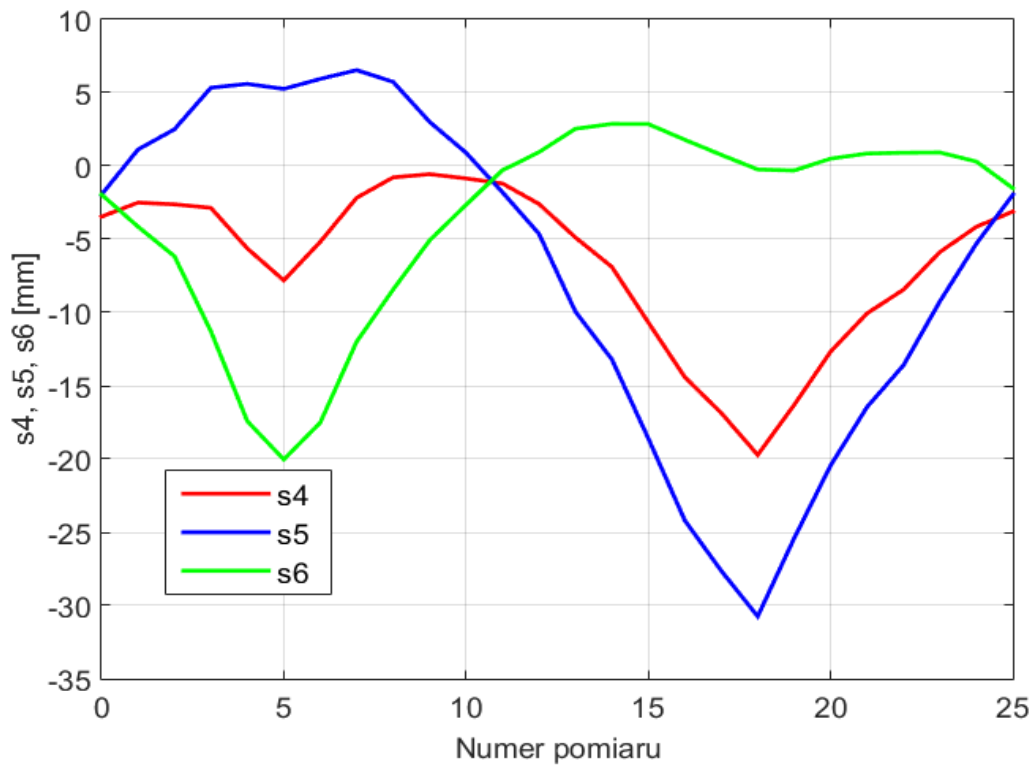


Rys. 101. Zmiany wydłużeń łączników przyrządu pomiarowego w przypadku prób stanowiskowych przeprowadzonych przy konstrukcyjnym obciążeniu pojazdu.

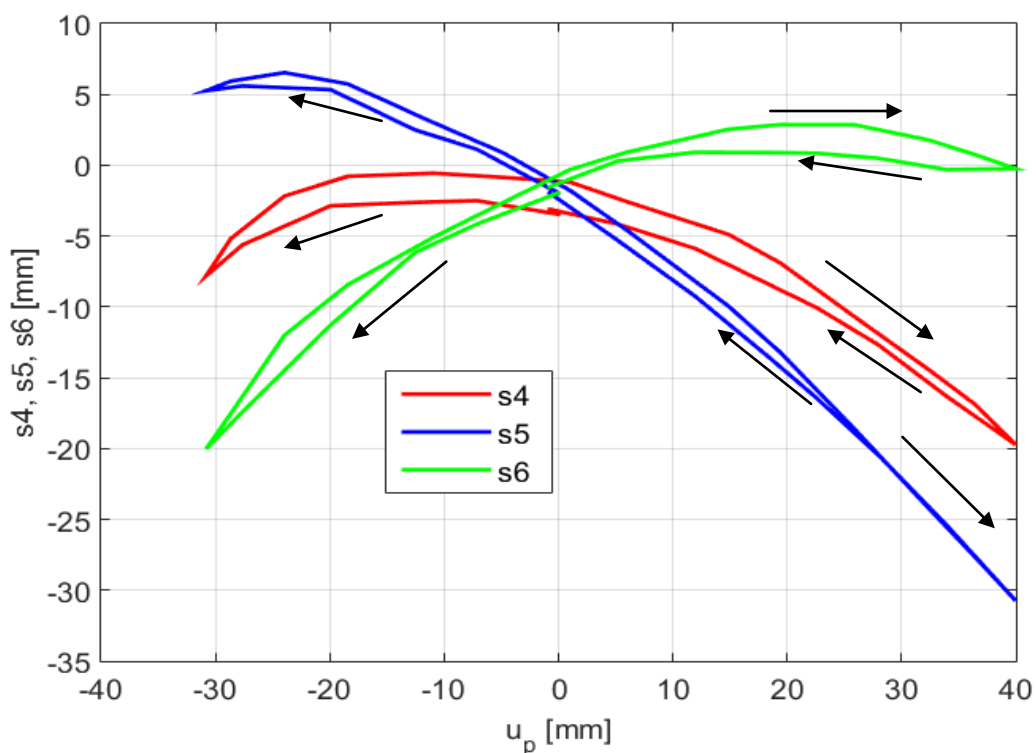
Kolejne wykresy przedstawiają przykładowe zmiany wydłużeń łączników przyrządu związanych z punktami D_j , $j=1(3)$ w zależności od kolejnych kroków pomiaru oraz przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p (Rys. 102.÷ Rys. 106.).



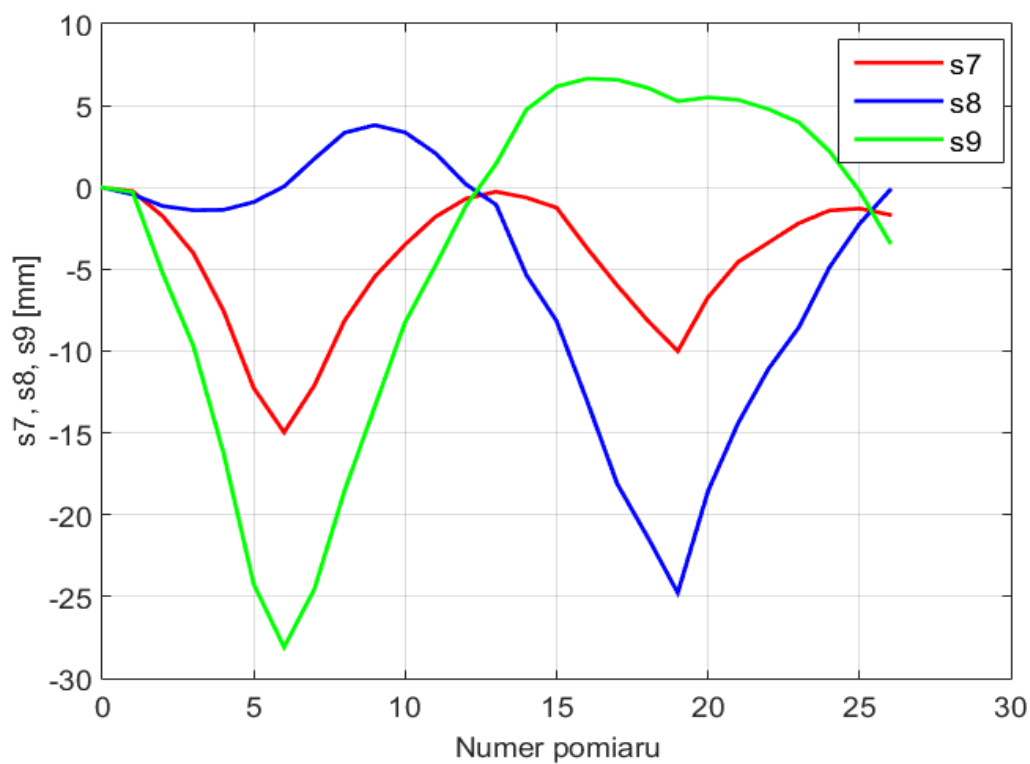
Rys. 102. Zmiany wydłużeń, związanych z punktem D_1 , łączników s_1 , s_2 , s_3 prototypowego przyrządu pomiarowego, w zależności od przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p , przy konstrukcyjnym obciążeniu pojazdu.



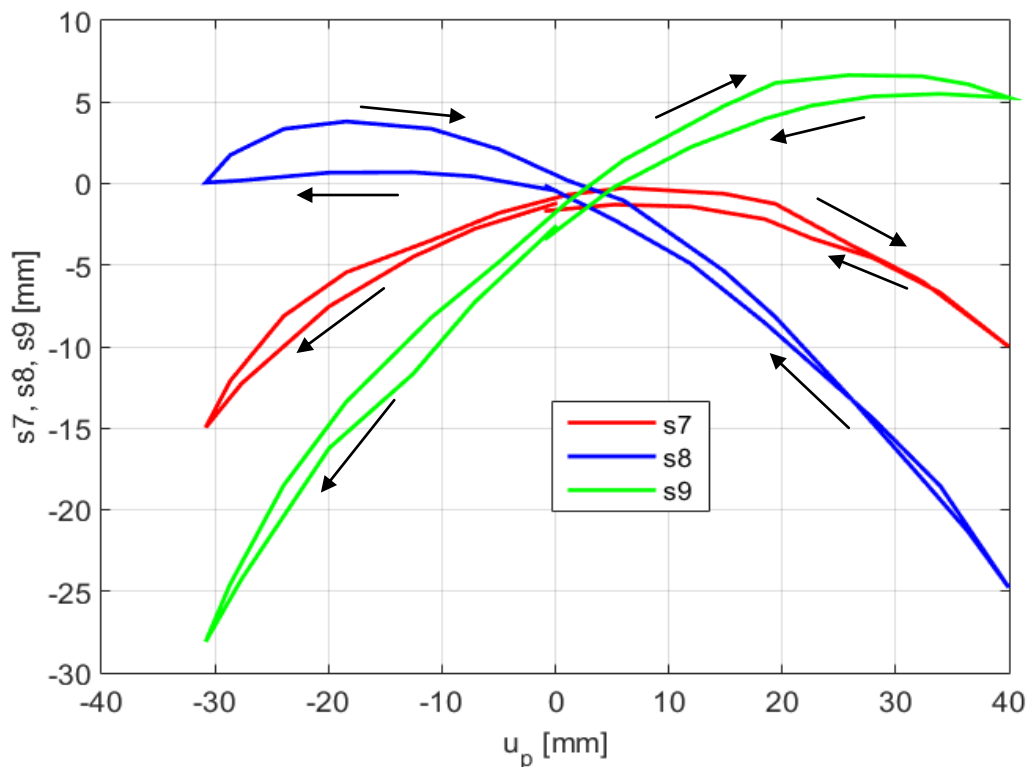
Rys. 103. Zmiany wydłużeń, związanych z punktem D_3 , łączników s_4 , s_5 , s_6 prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji kolejnych kroków pomiaru, przy konstrukcyjnym obciążeniu pojazdu.



Rys. 104. Zmiany wydłużeń, związanych z punktem D_3 , łączników s_4 , s_5 , s_6 prototypowego przyrządu pomiarowego, w zależności od przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p , przy konstrukcyjnym obciążeniu pojazdu.



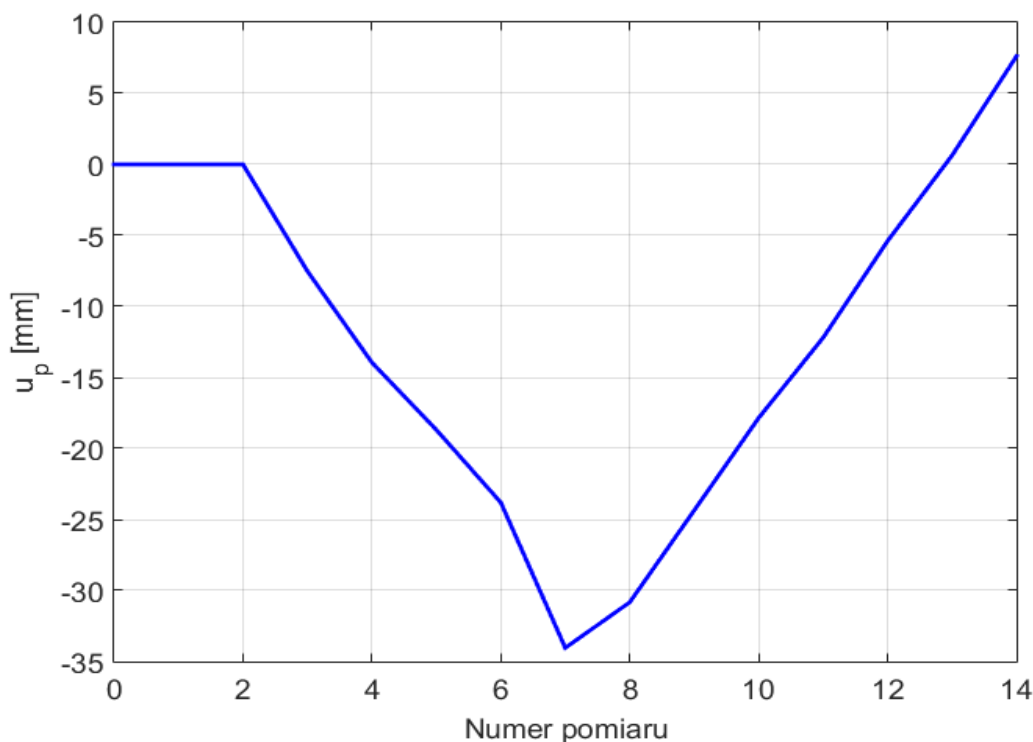
Rys. 105. Zmiany wydłużeń, związanych z punktem D_2 , łączników s_7 , s_8 , s_9 prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji kolejnych kroków pomiaru, przy konstrukcyjnym obciążeniu pojazdu.



Rys. 106. Zmiany wydłużeń, związanych z punktem D_2 , łączników s_7 , s_8 , s_9 prototypowego przyrządu pomiarowego, w zależności od przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p , przy konstrukcyjnym obciążeniu pojazdu.

9.3.2. Zmiany wydłużeń łączników przyrządu- pojazd odciążony

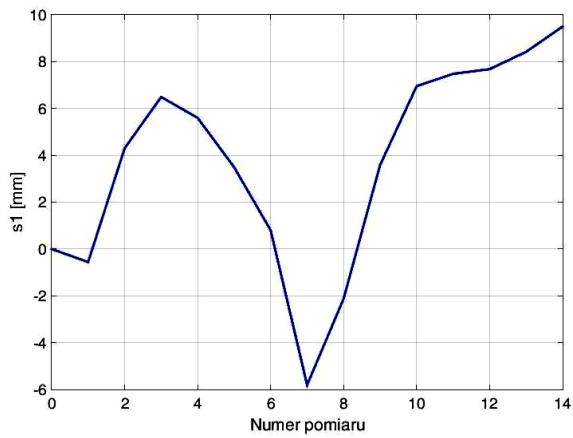
Na Rys. 107. pokazano zmiany przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p w przypadku prób przeprowadzonych na pojeździe odciążonym.



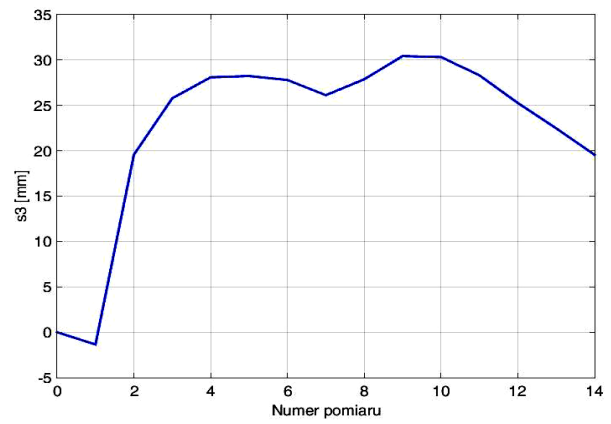
Rys. 107. Przeszczenie listwy zębatej układu kierowniczego u_p w funkcji kolejnych kroków pomiaru- pojazd odciążony.

Na Rys. 108. przedstawione zostały przykładowe zmiany wydłużeń łączników prototypowego przyrządu pomiarowego, zarejestrowane podczas pomiarów przeprowadzonych dla pojazdu odciążonego.

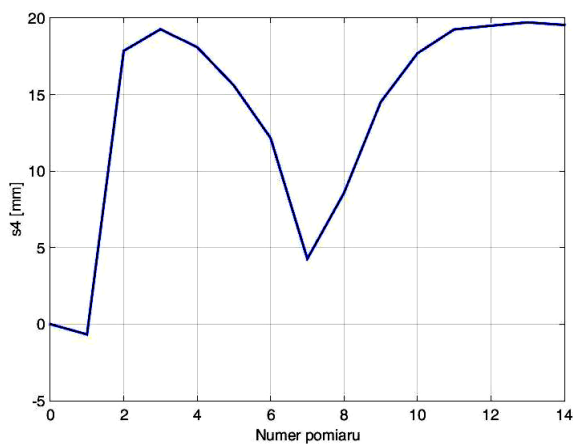
a)



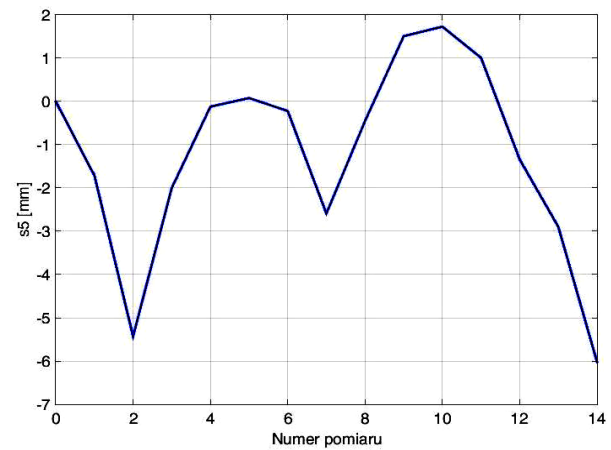
b)



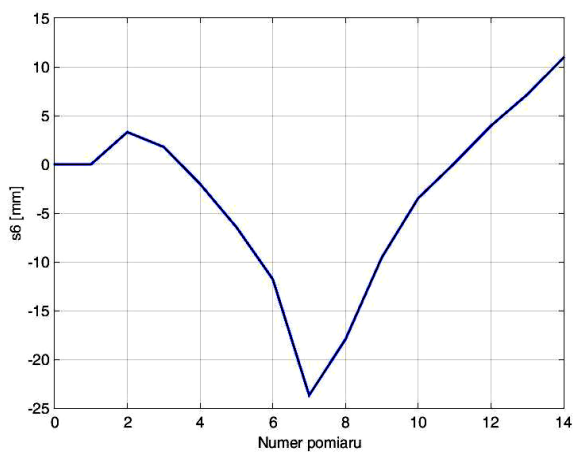
c)



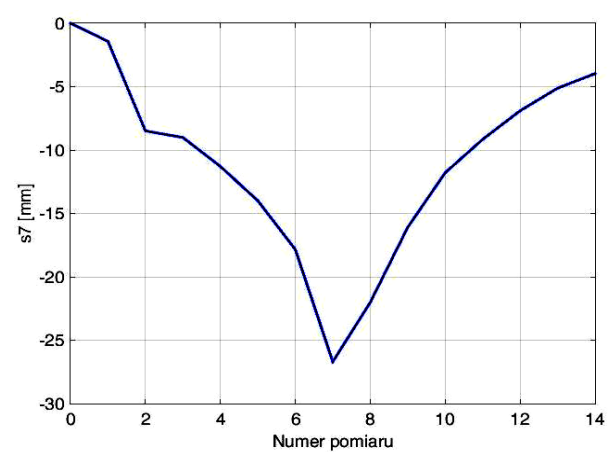
d)

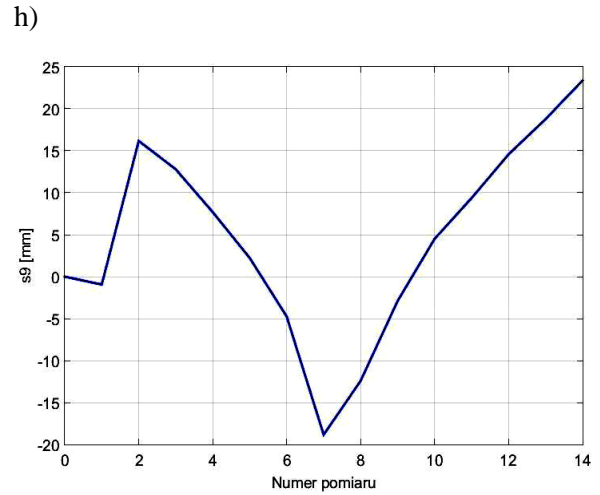
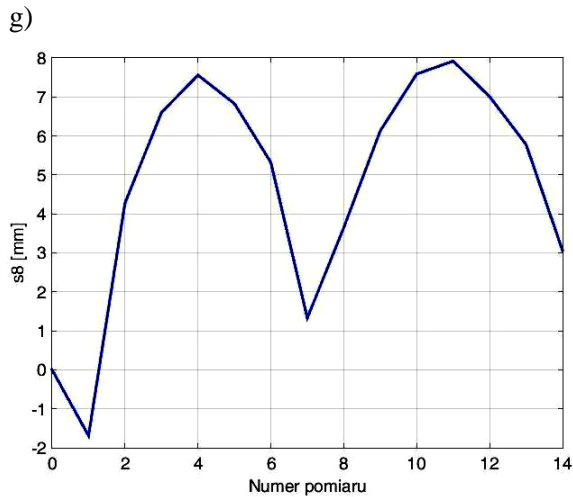


e)



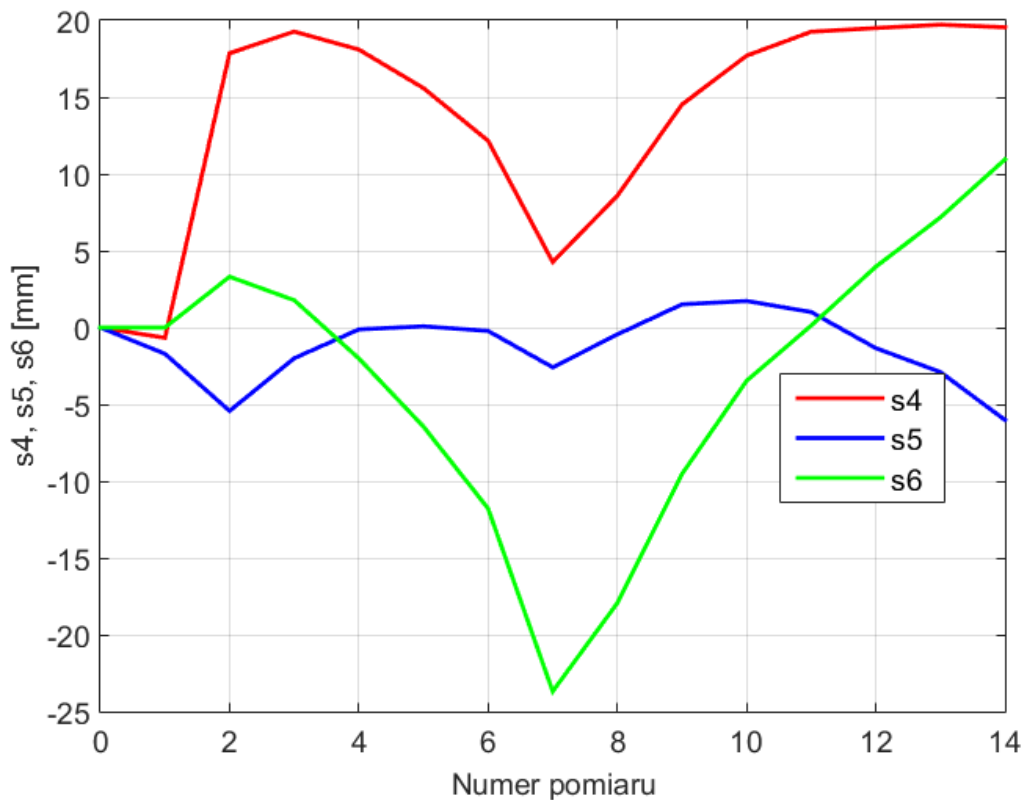
f)



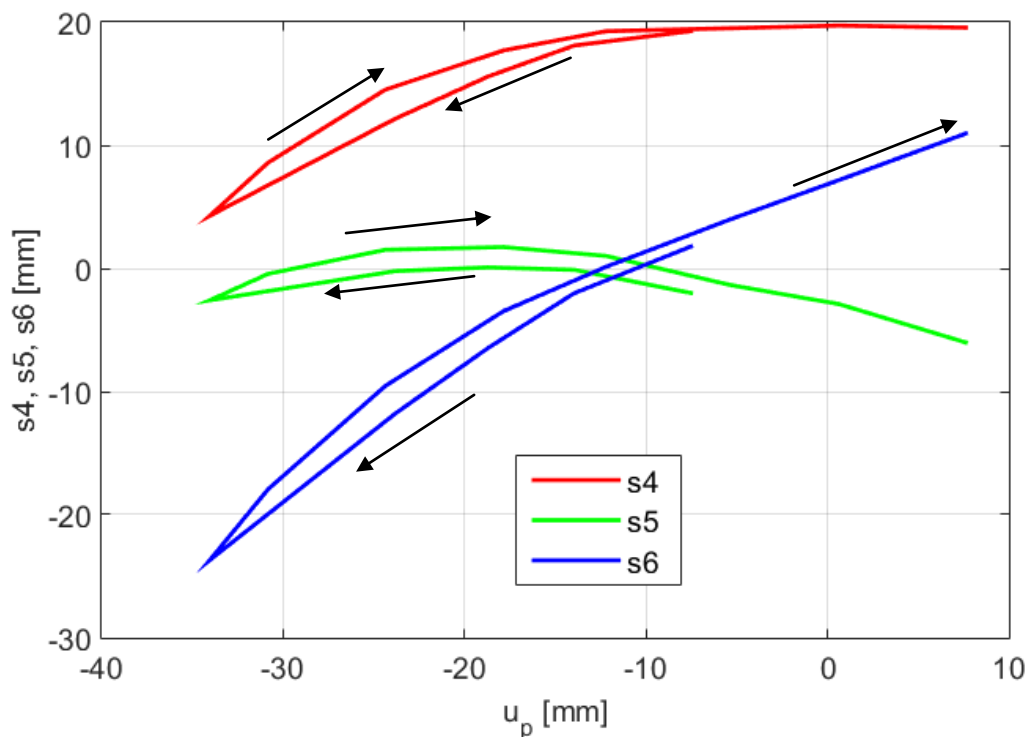


Rys. 108. Przykładowe zmiany wydłużeń łączników przyrządu pomiarowego w przypadku prób stanowiskowych przeprowadzonych dla pojazdu odciążonego.

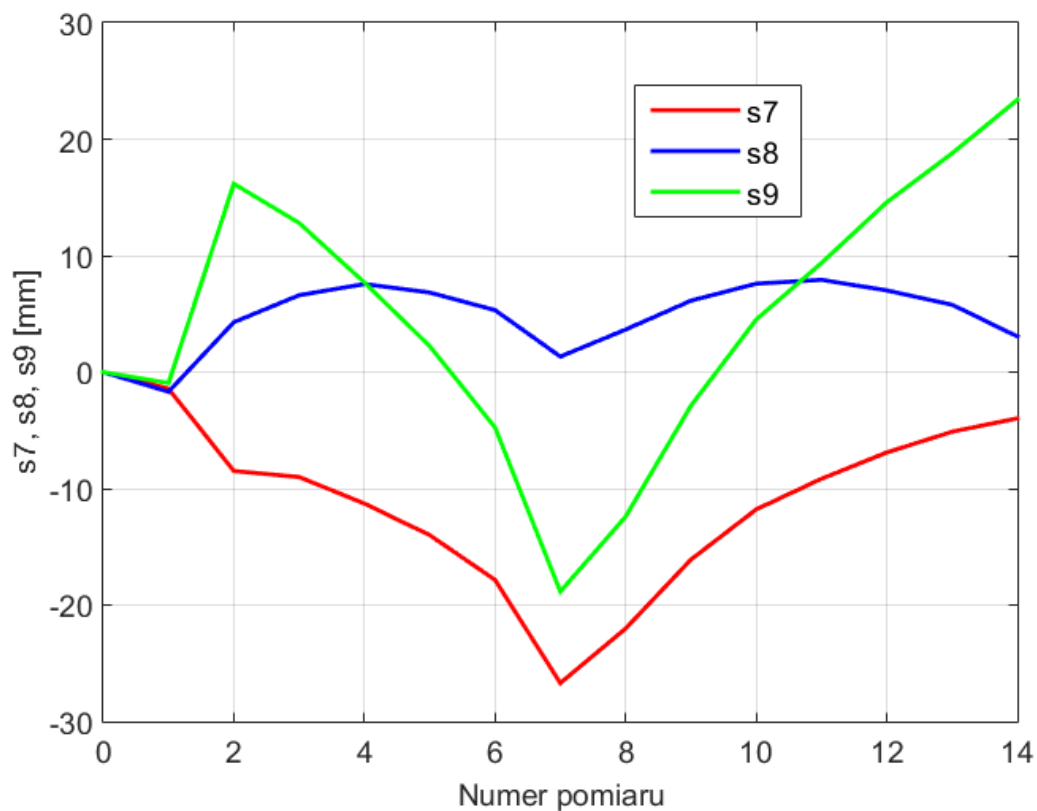
Wykresy (Rys. 109. ÷ Rys. 112.) przedstawiają przykładowe zmiany wydłużeń łączników przyrządu w zależności od kolejnych kroków pomiaru oraz przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p dla pojazdu odciążonego.



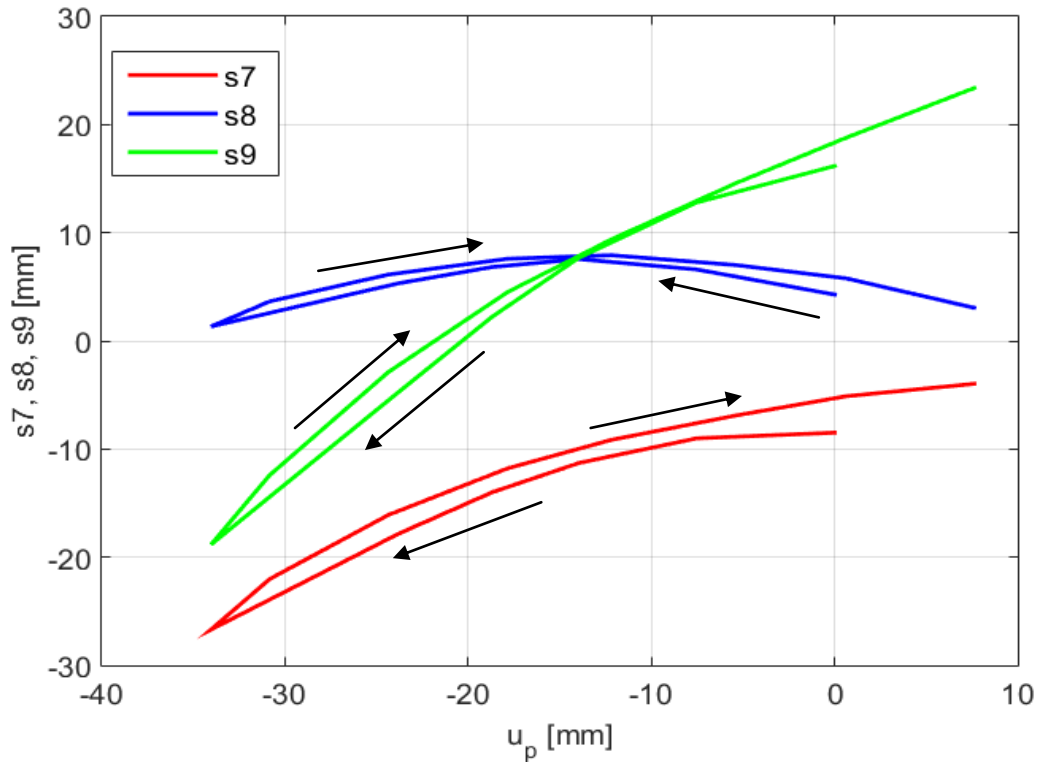
Rys. 109. Zmiany wydłużeń, związanych z punktem D_3 , łączników s_4 , s_5 , s_6 prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji kolejnych kroków pomiaru - pojazd odciążony.



Rys. 110. Zmiany wydłużeń, związanych z punktem D_3 , łączników s_4 , s_5 , s_6 prototypowego przyrządu pomiarowego, w zależności od przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p - pojazd odciążony.



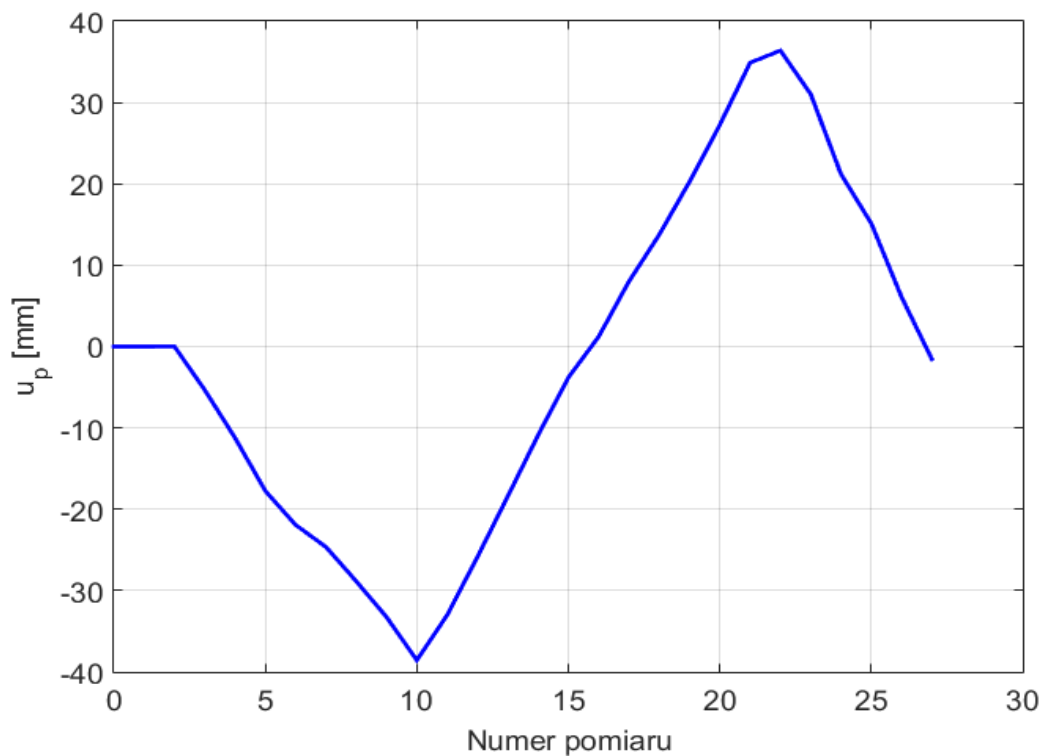
Rys. 111. Zmiany wydłużeń, związanych z punktem D_2 , łączników s_7 , s_8 , s_9 prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji kolejnych kroków pomiaru - pojazd odciążony.



Rys. 112. Zmiany wydłużeń, związanych z punktem D_2 , łączników s_7, s_8, s_9 prototypowego przyrządu pomiarowego, w zależności od przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p - pojazd odciążony.

9.3.3. Zmiany wydłużeń łączników przyrządu- pojazd obciążony siłą 3 kN

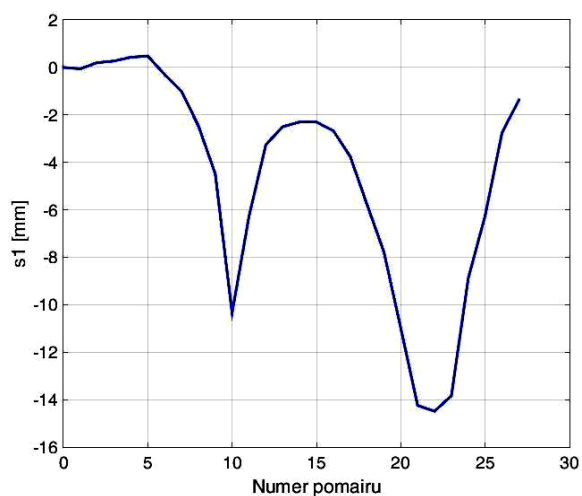
Na Rys. 113. pokazano zmiany przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p dla prób przeprowadzonych na pojeździe obciążonym siłą 3 kN.



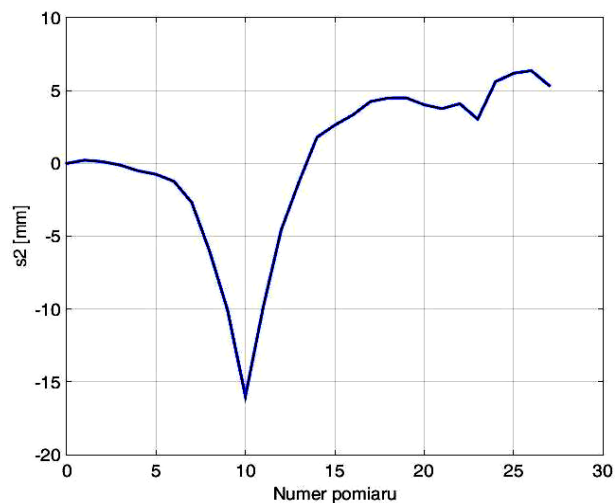
Rys. 113. Przemieszczenie listwy zębatej układu kierowniczego u_p w funkcji kolejnych kroków pomiaru, przy obciążeniu pojazdu siłą 3 kN.

Na Rys. 114. przedstawione zostały przykładowe zmiany wydłużeń łączników prototypowego przyrządu pomiarowego, zarejestrowane podczas pomiarów przeprowadzonych dla pojazdu odciążonego.

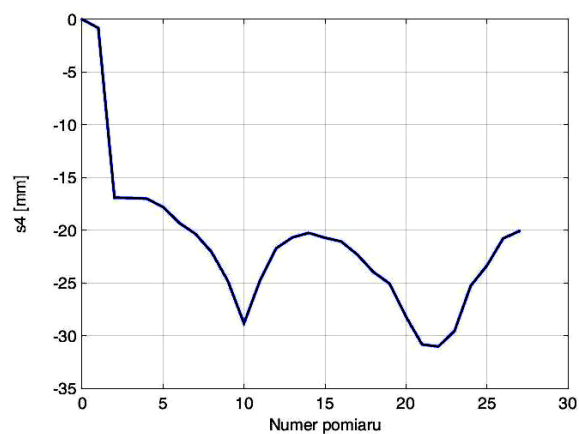
a)



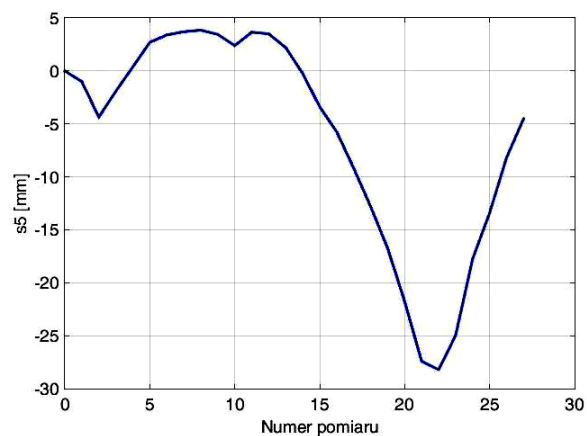
b)



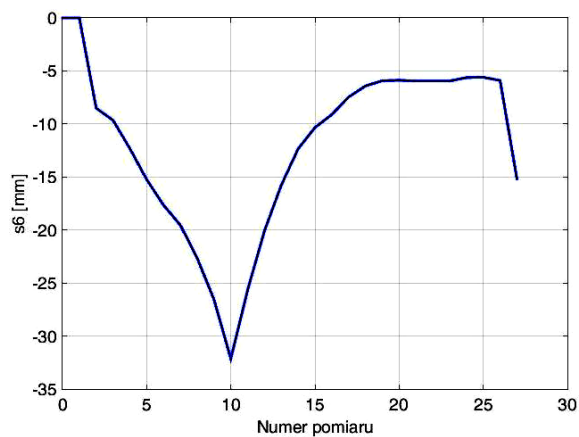
c)



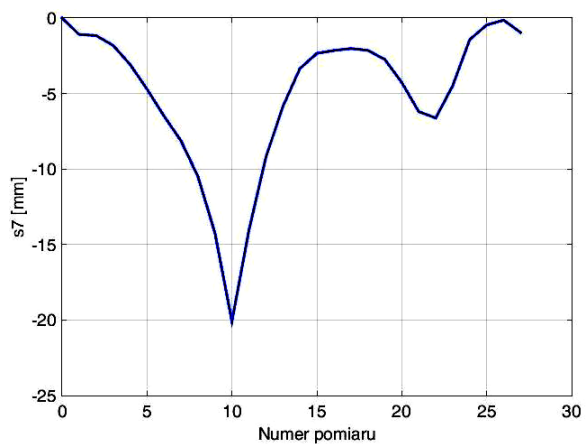
d)

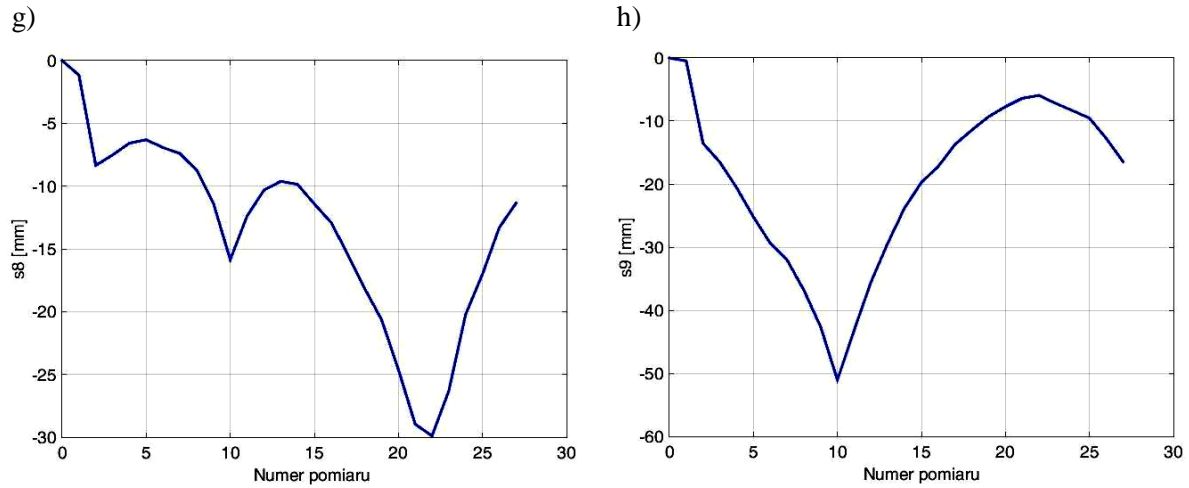


e)



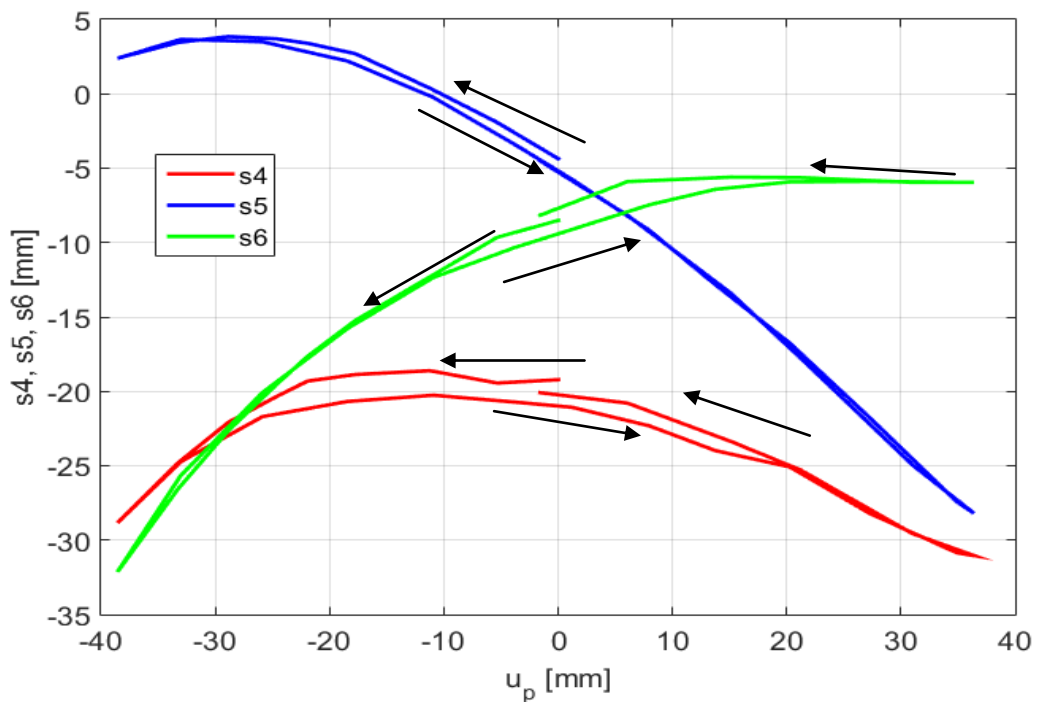
f)



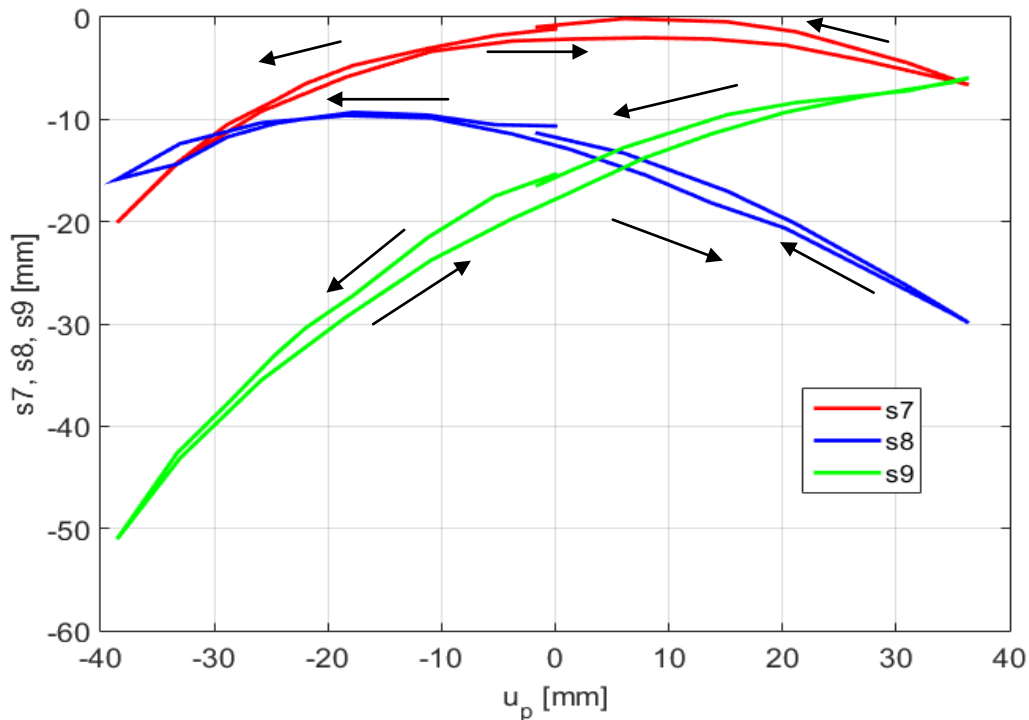


Rys. 114. Zmiany wydłużeń łączników przyrządu pomiarowego w przypadku prób stanowiskowych przeprowadzonych dla pojazdu dociążonego siłą 3 kN.

Wykresy (Rys. 115.÷ Rys. 116.) przedstawiają przykładowe zmiany wydłużeń łączników przyrządu pomiarowego w przypadku prób przeprowadzonych na pojeździe dociążonym.



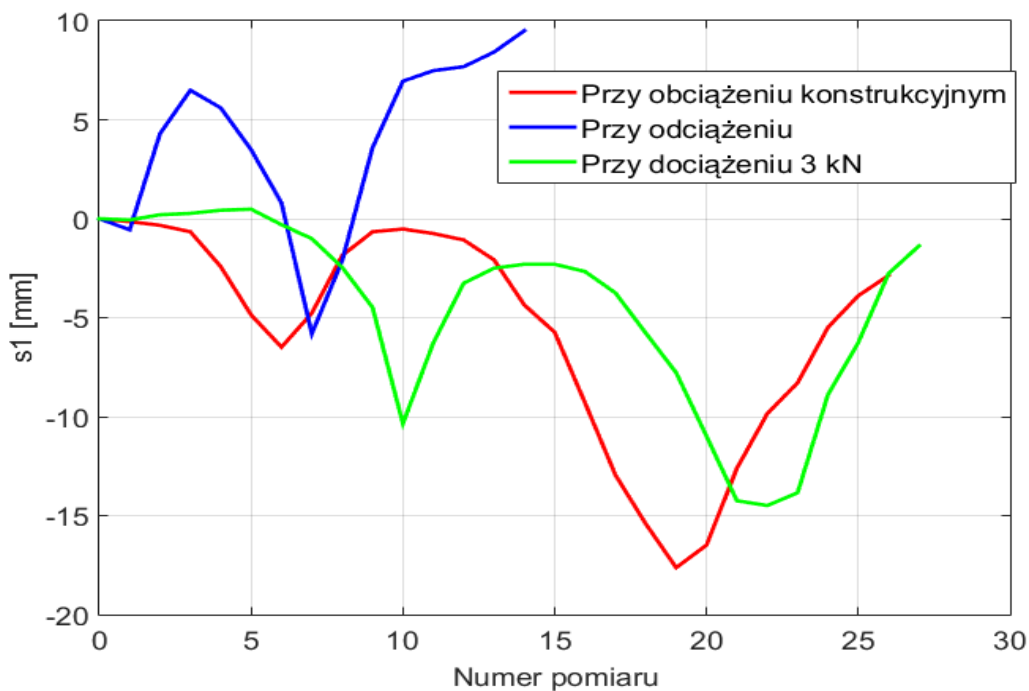
Rys. 115. Zmiany wydłużeń, związanych z punktem D_3 , łączników s_4 , s_5 , s_6 prototypowego przyrządu pomiarowego, w zależności od przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p , przy obciążeniu pojazdu siłą 3 kN.



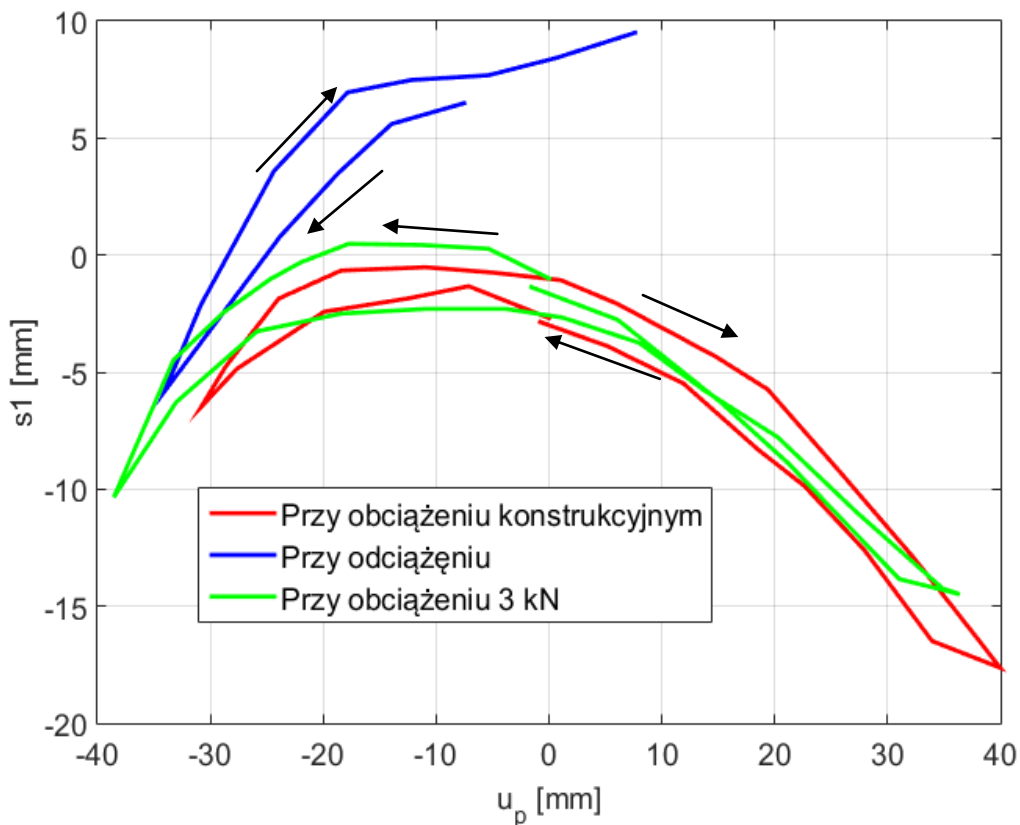
Rys. 116. Zmiany wydłużeń, związanych z punktem D_2 , łączników s_7 , s_8 , s_9 prototypowego przyrządu pomiarowego, w zależności od przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p , przy obciążeniu pojazdu siłą 3 kN.

9.3.4. Zmiany wydłużeń łączników przyrządu w przestrzeni ruchów resorowania

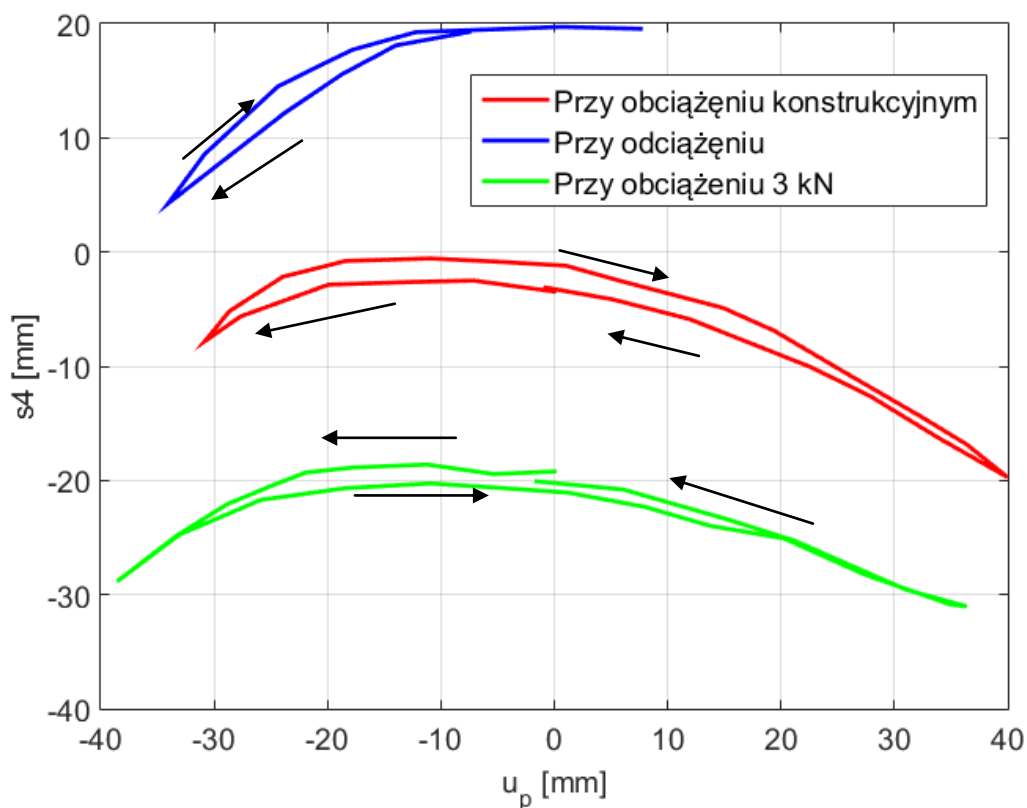
Wykresy pokazane na (Rys. 117. ÷ Rys. 127.) przedstawiają przykładowe zmiany wydłużeń łączników s_i prototypowego przyrządu pomiarowego dla różnych ugięć zawieszenia. Podobnie, jak poprzednio, przebiegi zostały przedstawione w funkcji kolejnych kroków pomiaru oraz przemieszczenia listwy zębatej mechanizmu zwrotniczego u_p .



Rys. 117. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_1 , łącznika s_1 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji kolejnych kroków pomiaru dla różnych ugięć zawieszenia.



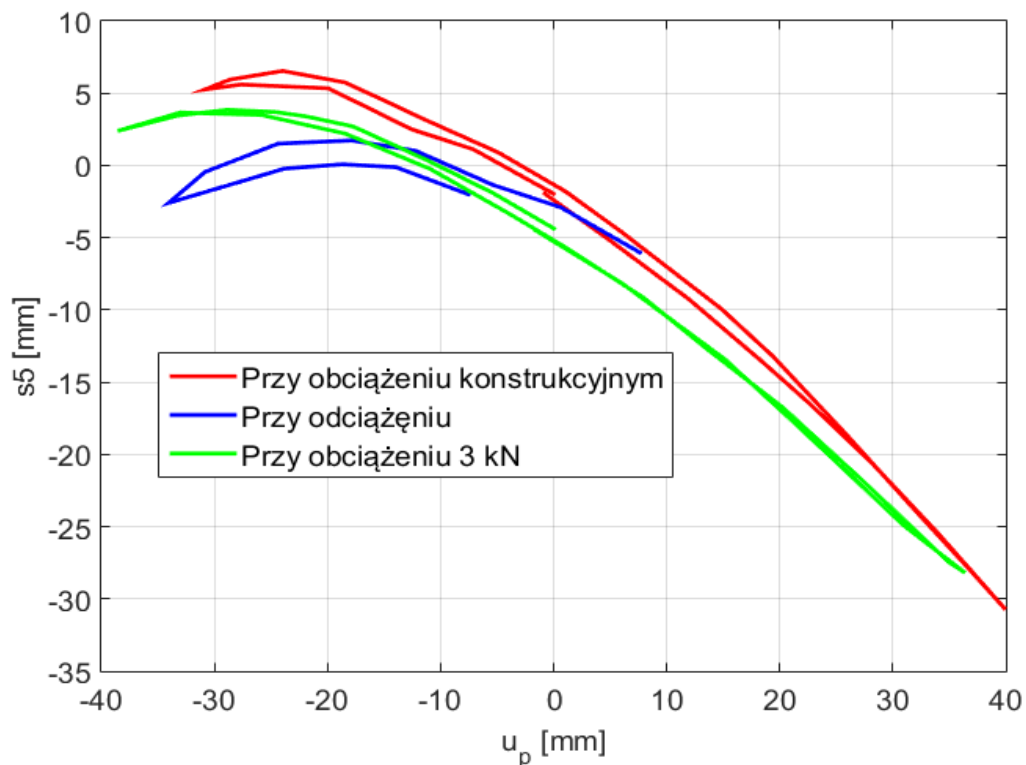
Rys. 118. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_1 , łącznika s_1 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p dla różnych ugięć zawieszenia.



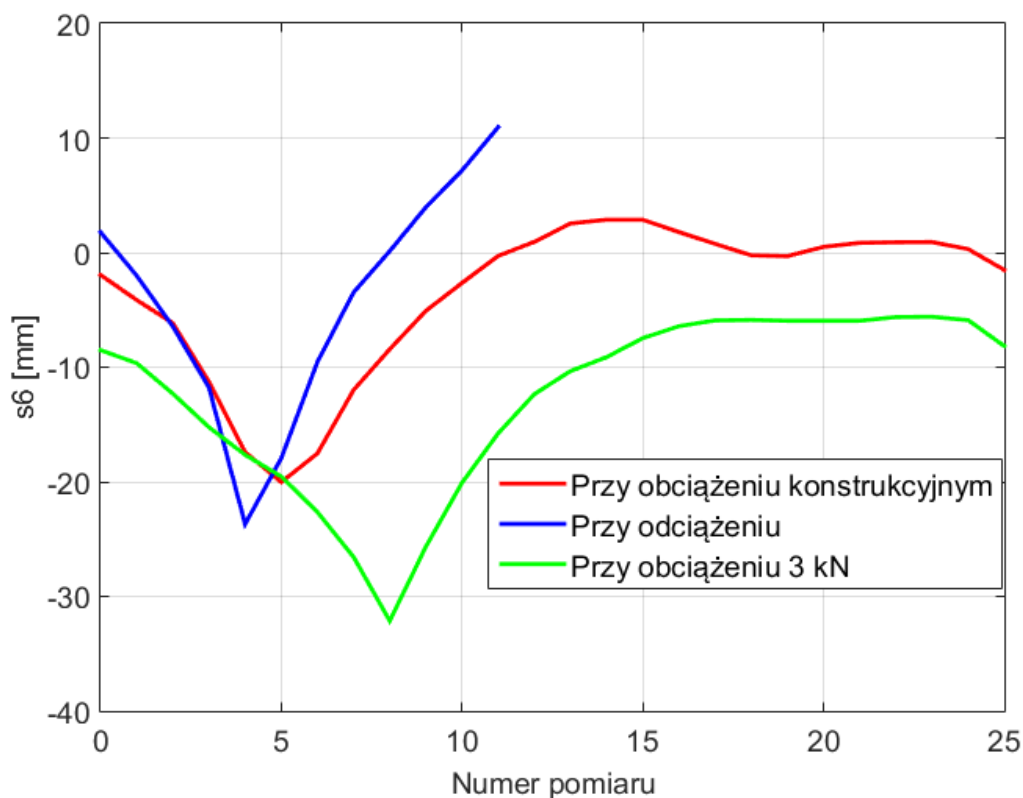
Rys. 119. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_3 , łącznika s_4 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p dla różnych ugięć zawieszenia.



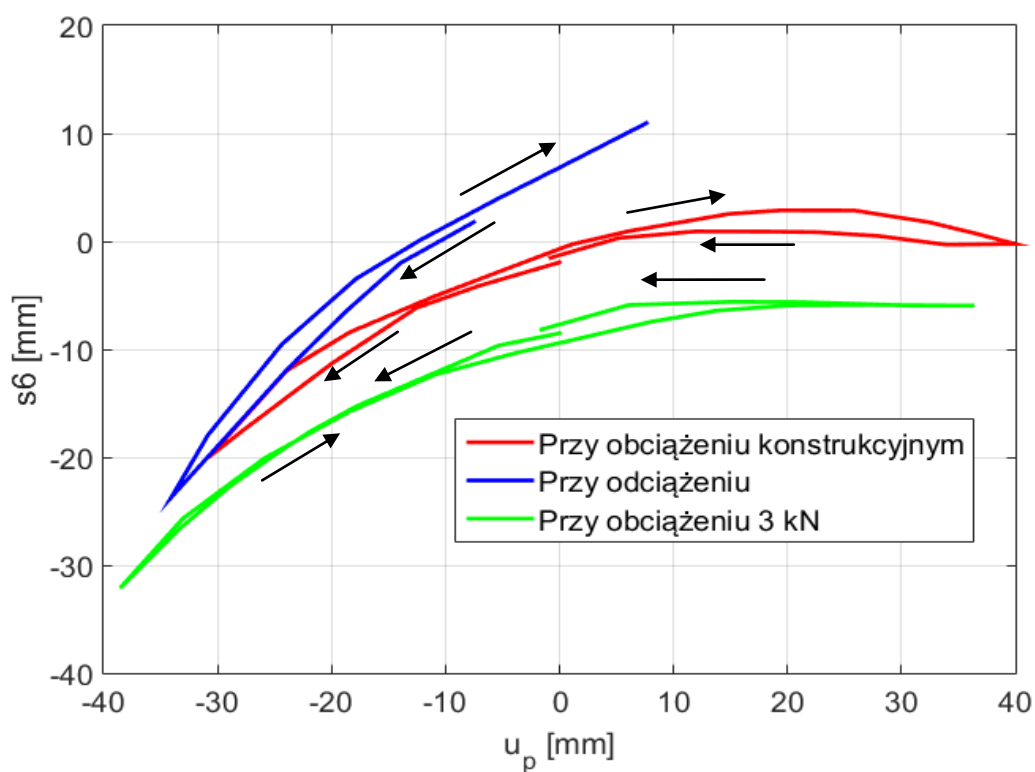
Rys. 120. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_3 , łącznika s_5 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji kolejnych kroków pomiaru dla różnych ugięć zawieszenia.



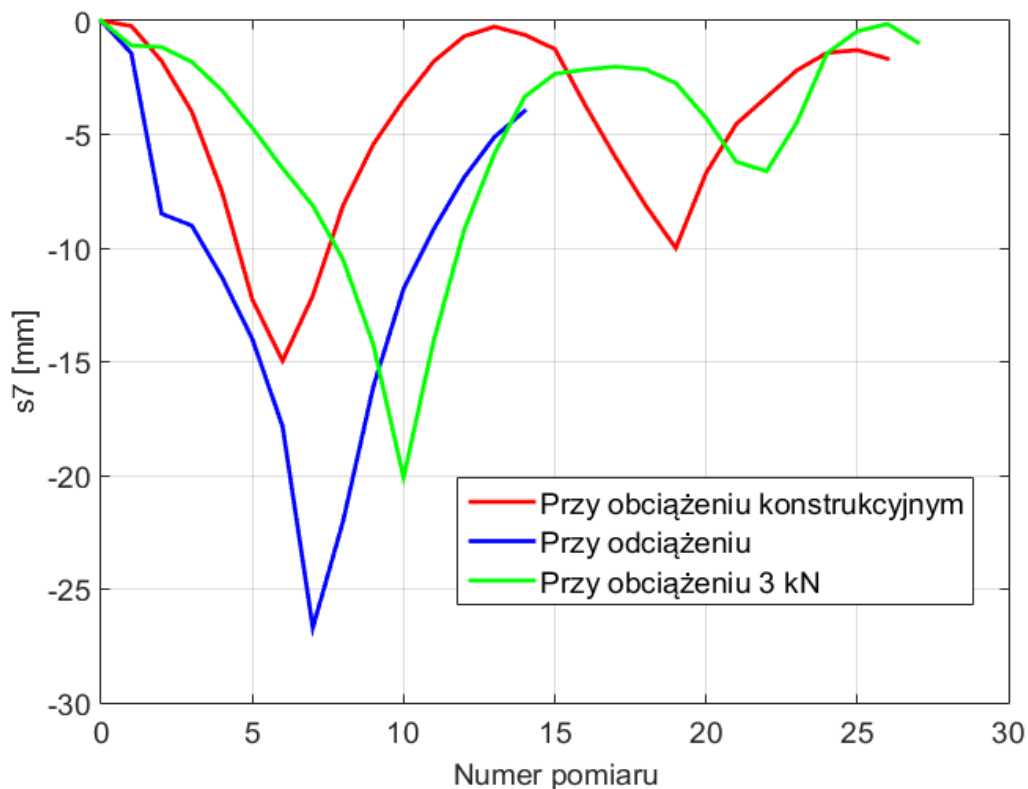
Rys. 121. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_3 , łącznika s_5 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p dla różnych ugięć zawieszenia.



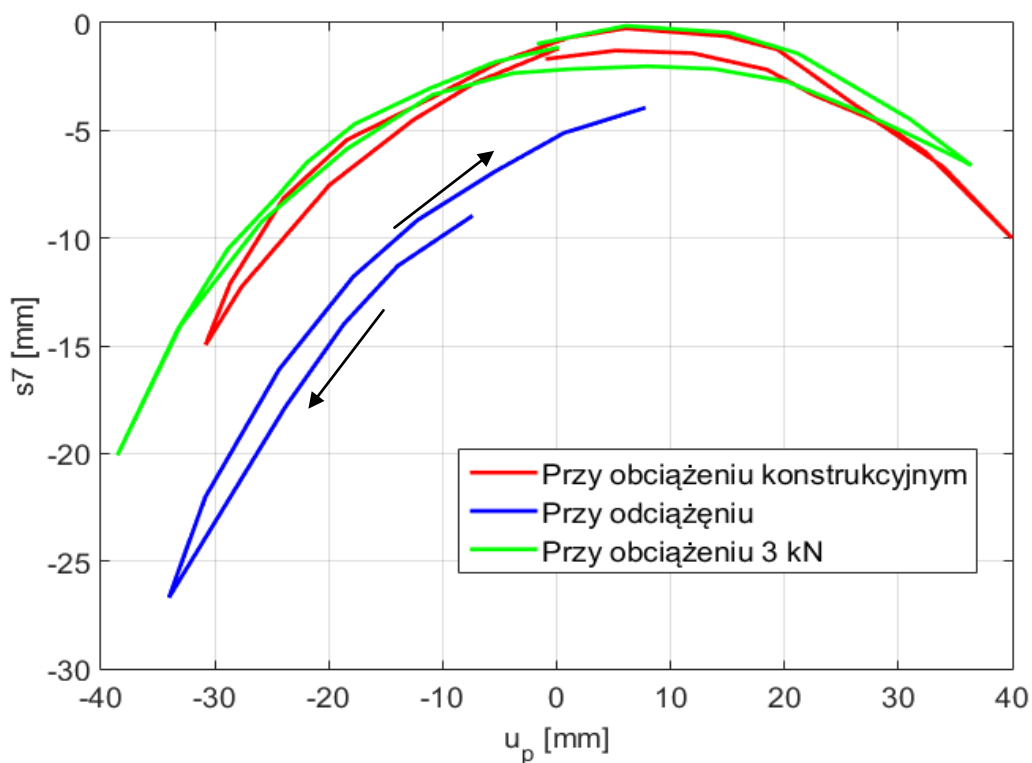
Rys. 122. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_3 , łącznika s_6 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji kolejnych kroków pomiaru dla różnych ugięć zawieszenia.



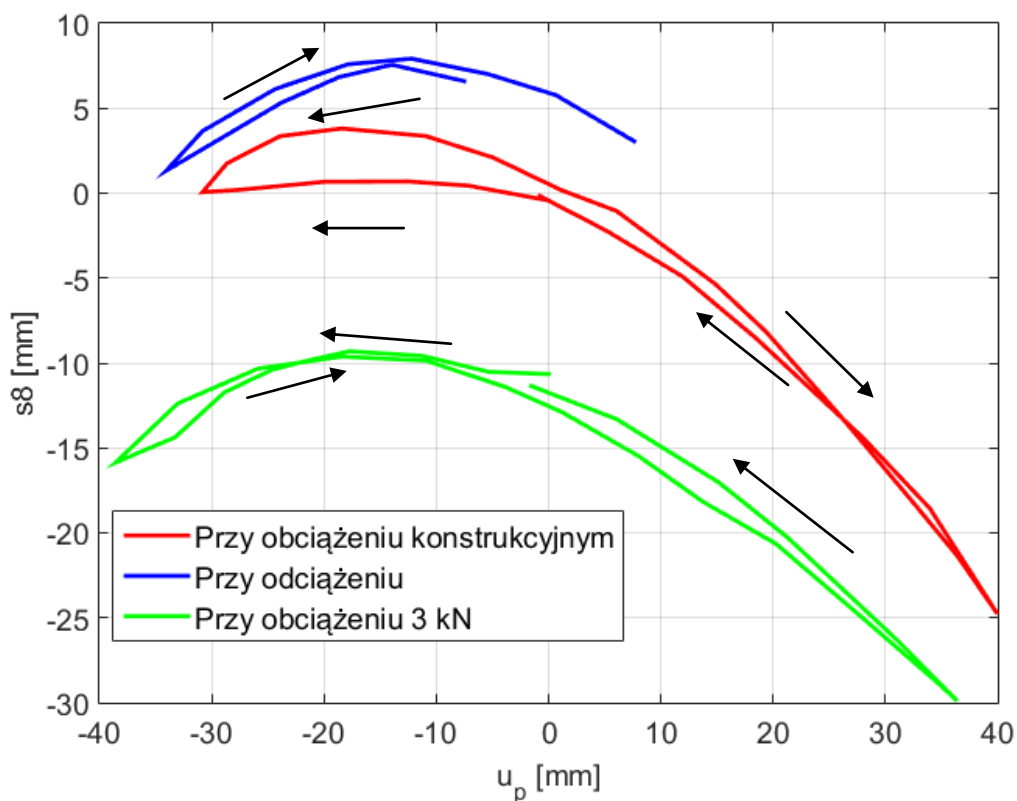
Rys. 123. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_3 , łącznika s_6 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p dla różnych ugięć zawieszenia.



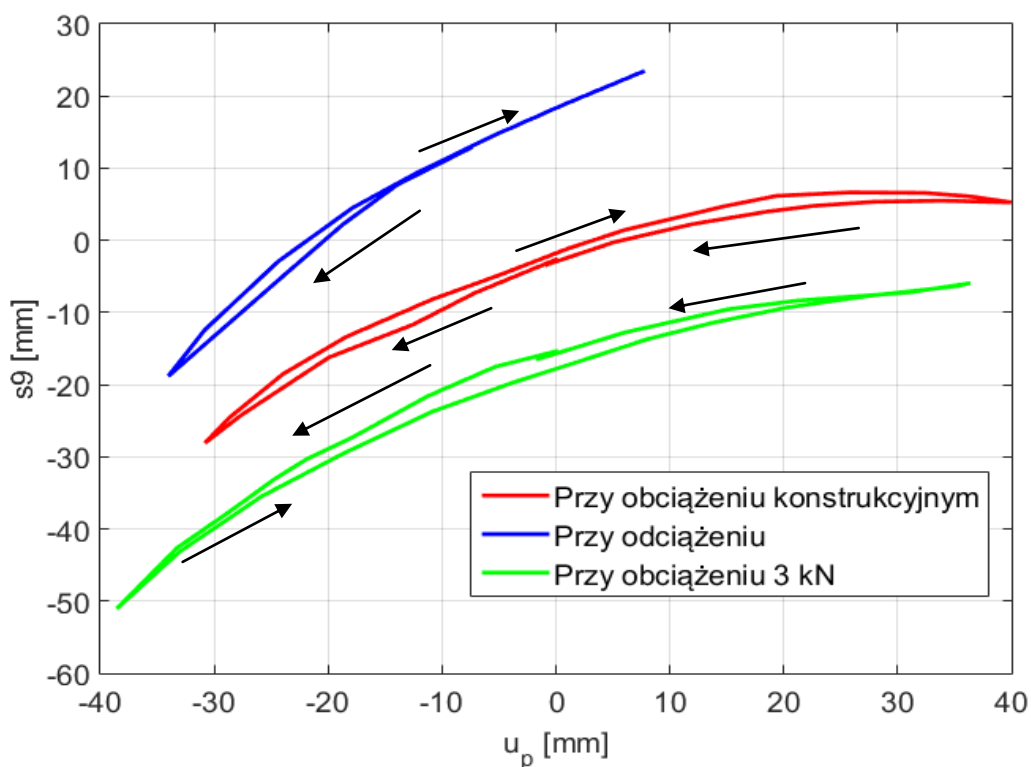
Rys. 124. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_2 , łącznika s_7 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji kolejnych kroków pomiaru dla różnych ugięć zawieszenia.



Rys. 125. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_2 , łącznika s_7 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p dla różnych ugięć zawieszenia.

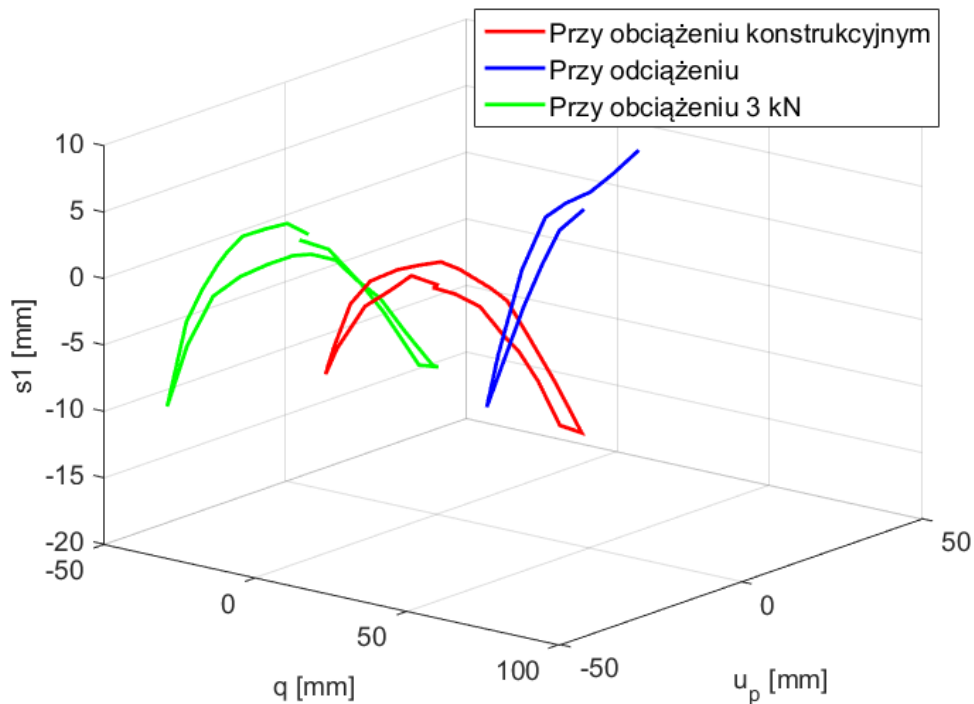


Rys. 126. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_2 , łącznika s_8 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p dla różnych ugięć zawieszenia.

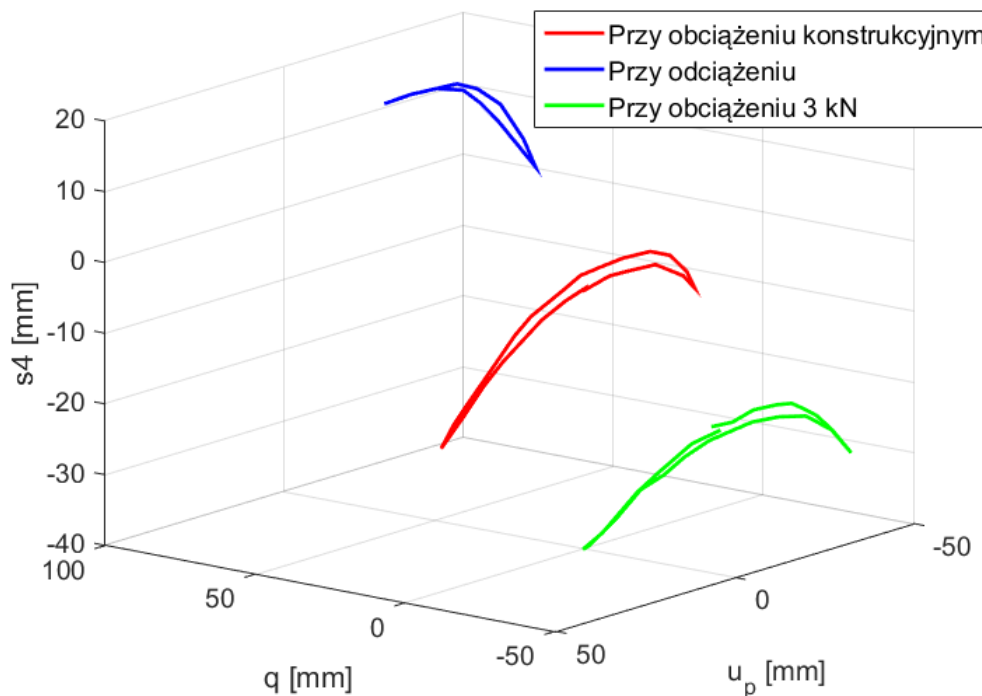


Rys. 127. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_2 , łącznika s_9 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p dla różnych ugięć zawieszenia.

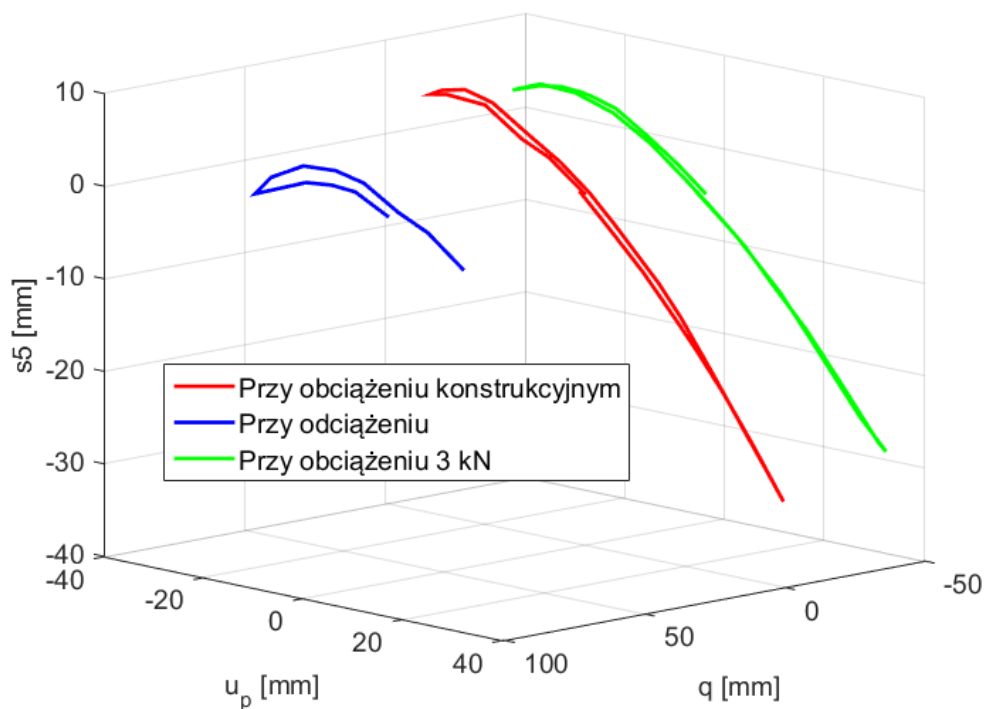
Poniżej, na (Rys. 128. ÷ Rys. 134.), przedstawiono przestrzenne charakterystyki wydłużeń wybranych łączników prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p oraz ugięcia zawieszenia q .



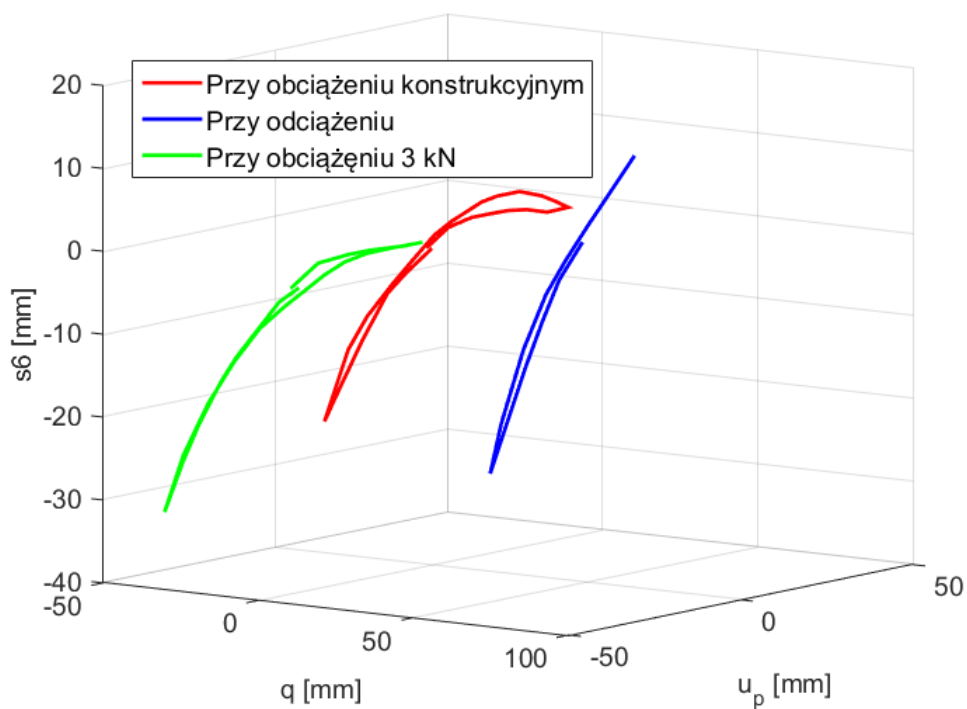
Rys. 128. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_1 , łącznika s_1 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p oraz ugięcia zawieszenia q .



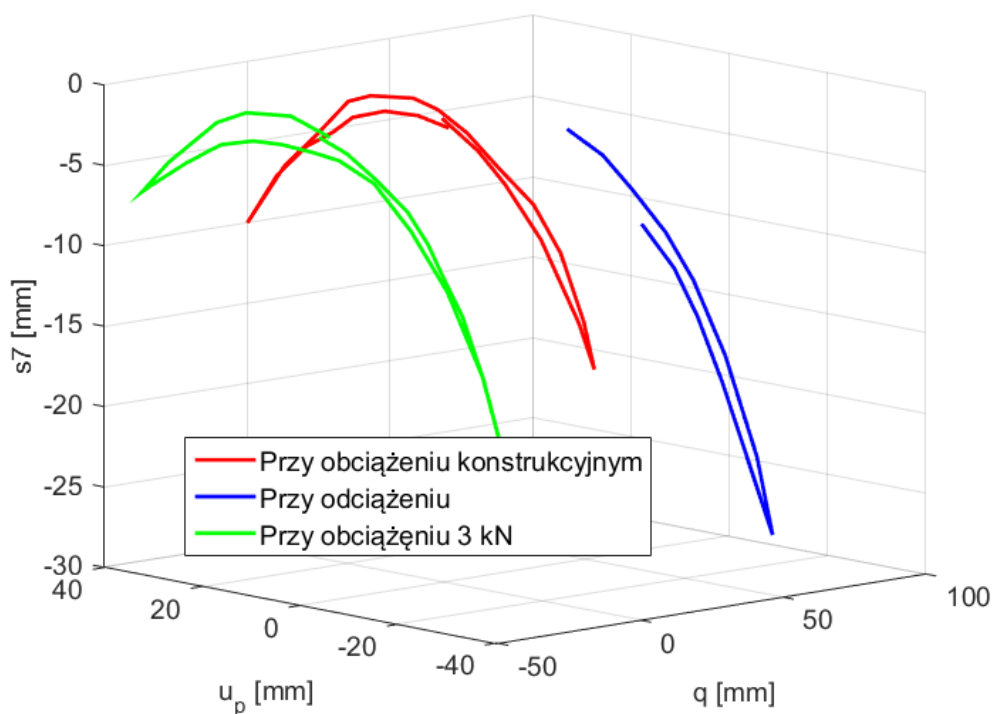
Rys. 129. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_3 , łącznika s_4 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p oraz ugięcia zawieszenia q .



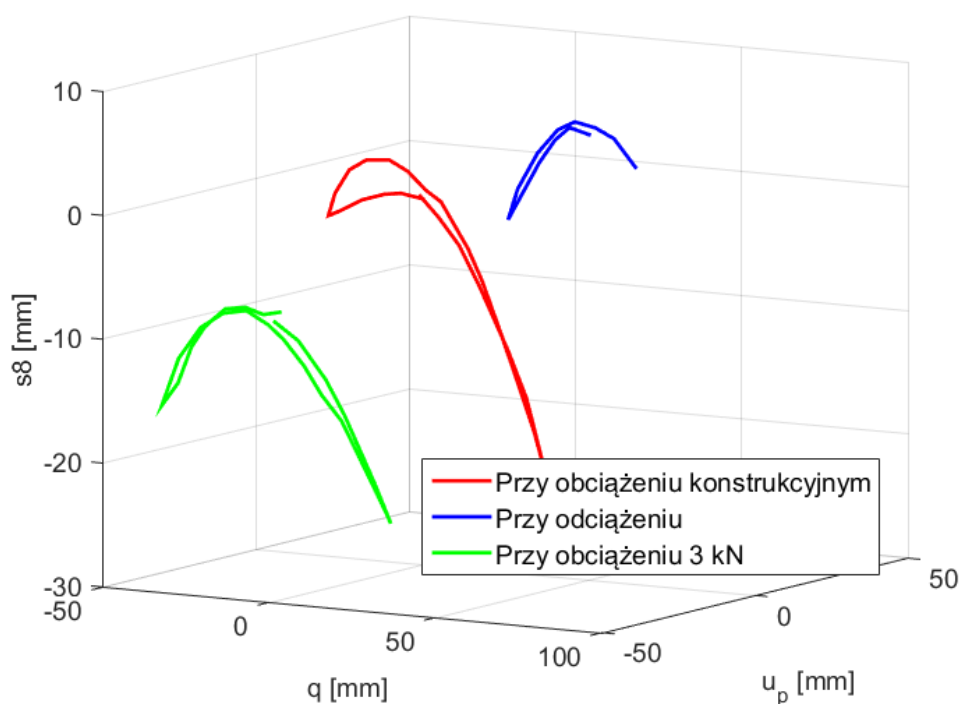
Rys. 130. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_3 , łącznika s_5 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p oraz ugięcia zawieszenia q .



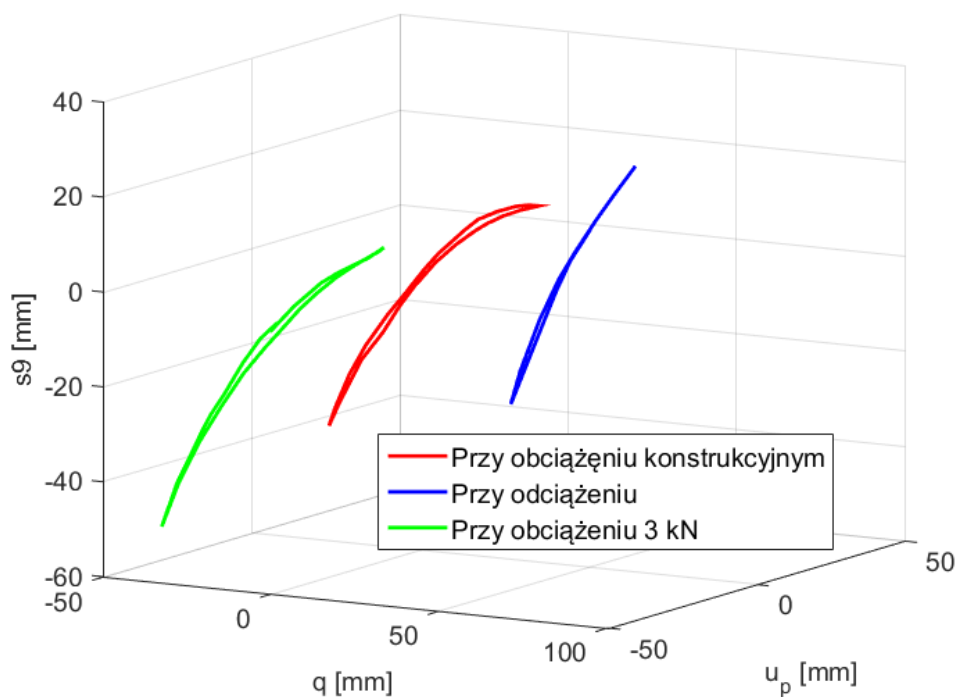
Rys. 131. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_3 , łącznika s_6 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p oraz ugięcia zawieszenia q .



Rys. 132. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_2 , łącznika s_7 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p oraz ugięcia zawieszenia q .



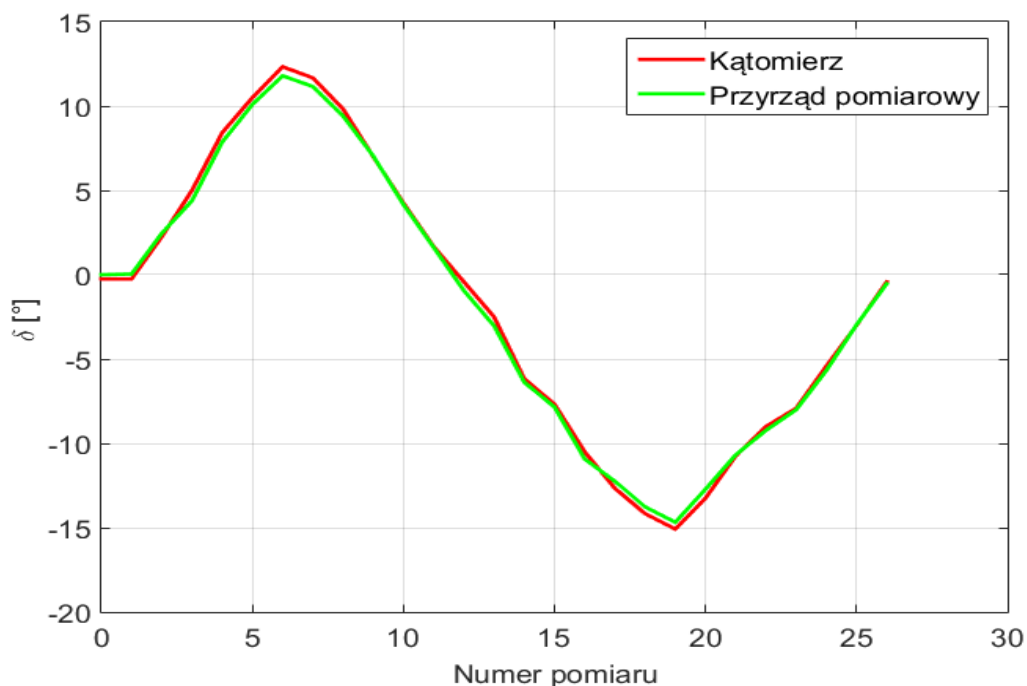
Rys. 133. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_2 , łącznika s_8 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p oraz ugięcia zawieszenia q .



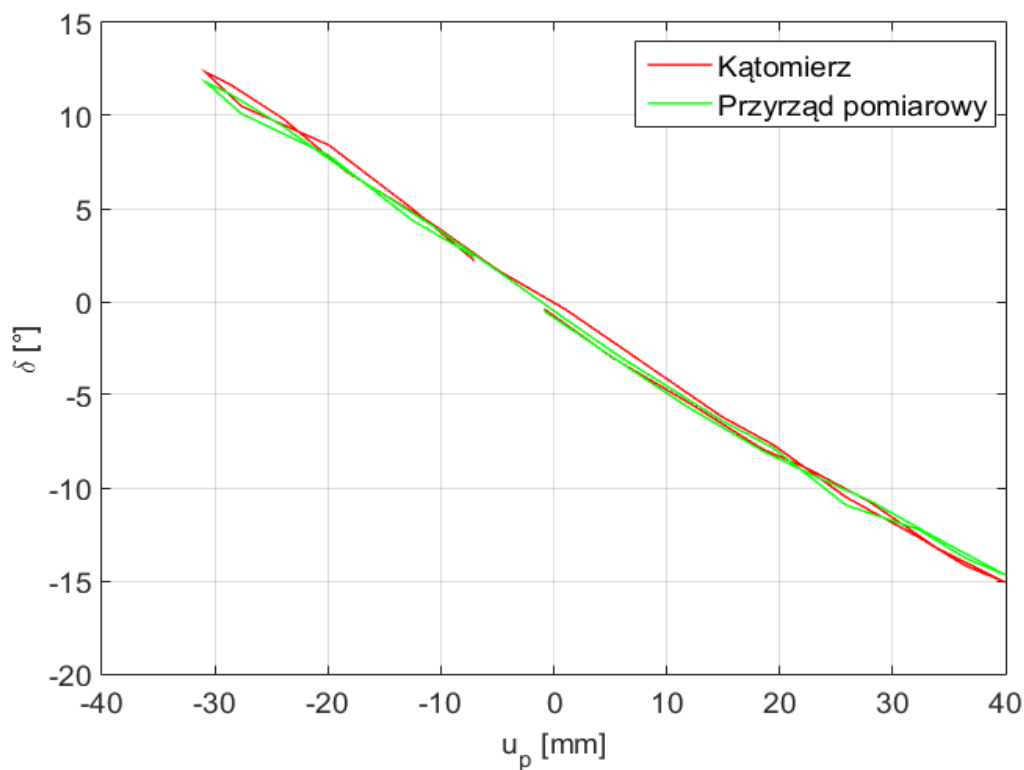
Rys. 134. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_2 , łącznika s_9 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p oraz ugięcia zawieszenia q .

9.3.5. Charakterystyki zawieszenia- konstrukcyjne obciążenie pojazdu

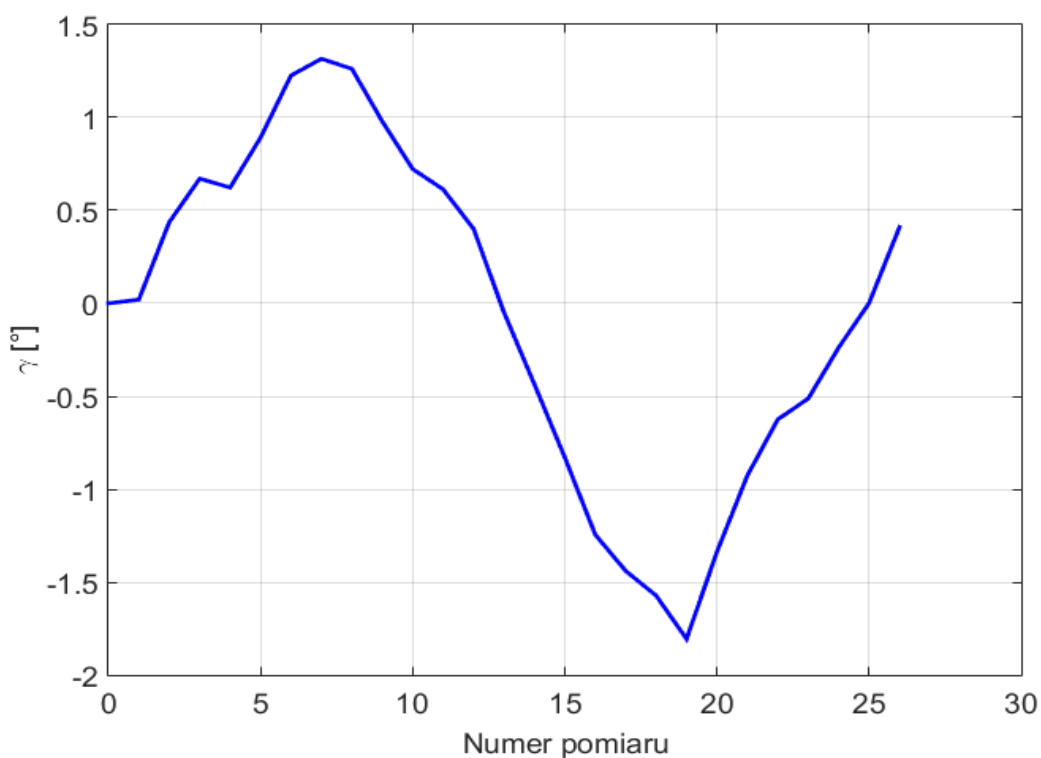
Zawarte w poniższym punkcie wykresy (Rys. 135. ÷ Rys. 139.) przedstawiają charakterystyki kątów skrętu δ oraz pochylenia γ lewego koła samochodu, jak również charakterystykę poprzecznego przemieszczenia ΔK_y punktu związanego z kołem, wyznaczone na podstawie wyników badań stanowiskowych w przypadku pojazdu obciążonego konstrukcyjnie.



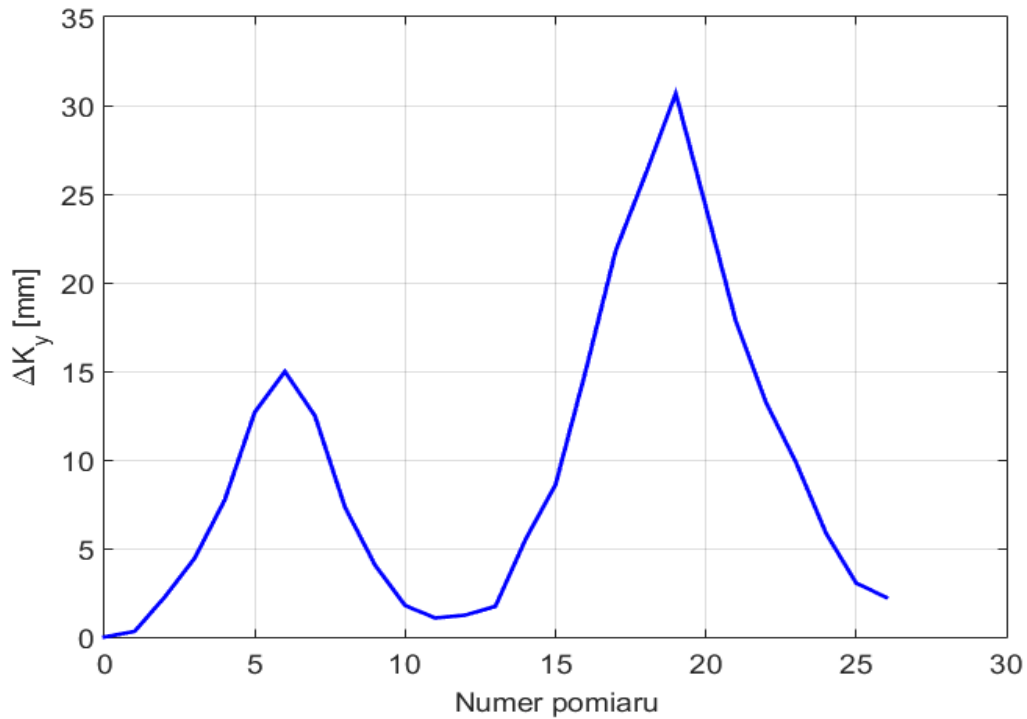
Rys. 135. Kąt skrętu δ lewego koła samochodu Volkswagen Passat, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego oraz na podstawie pomiarów referencyjnych, wykonanych przy użyciu kątomierza, w funkcji kolejnych kroków pomiaru, przy konstrukcyjnym obciążeniu pojazdu.



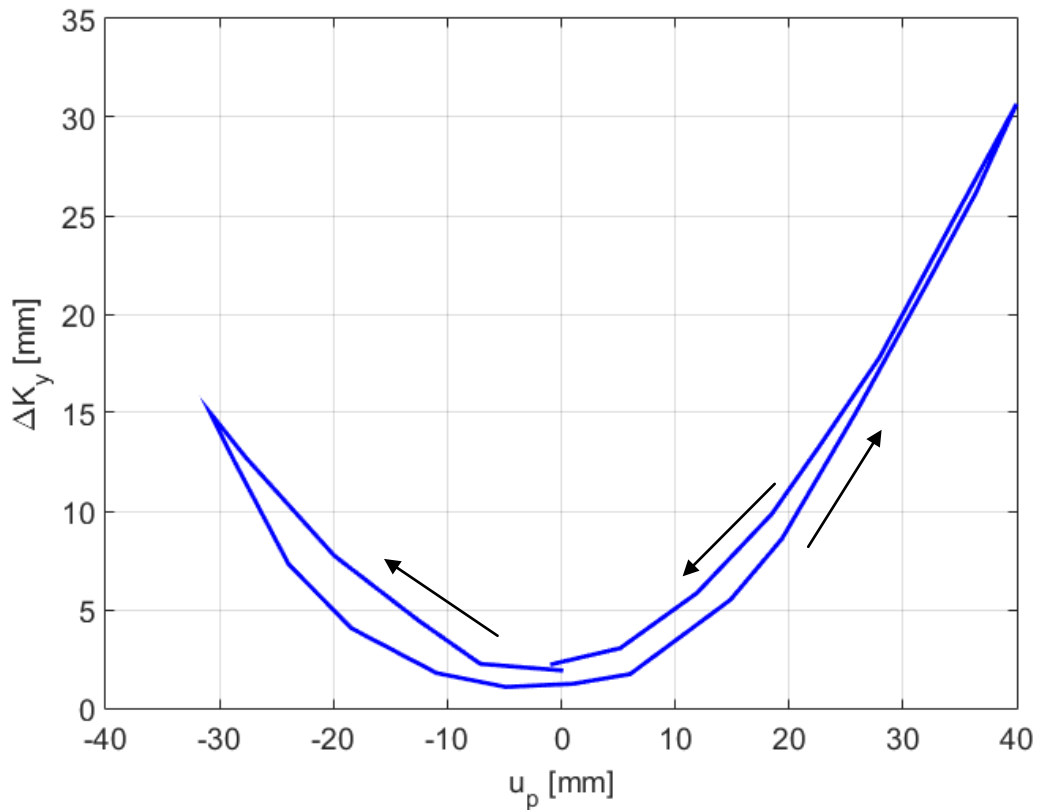
Rys. 136. Kąt skrętu δ lewego koła samochodu Volkswagen Passat, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego oraz na podstawie pomiarów referencyjnych, wykonanych przy użyciu kątomierza, w funkcji przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p , przy konstrukcyjnym obciążeniu pojazdu.



Rys. 137. Kąt pochylenia γ lewego koła samochodu Volkswagen Passat, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji kolejnych kroków pomiaru, przy konstrukcyjnym obciążeniu pojazdu.



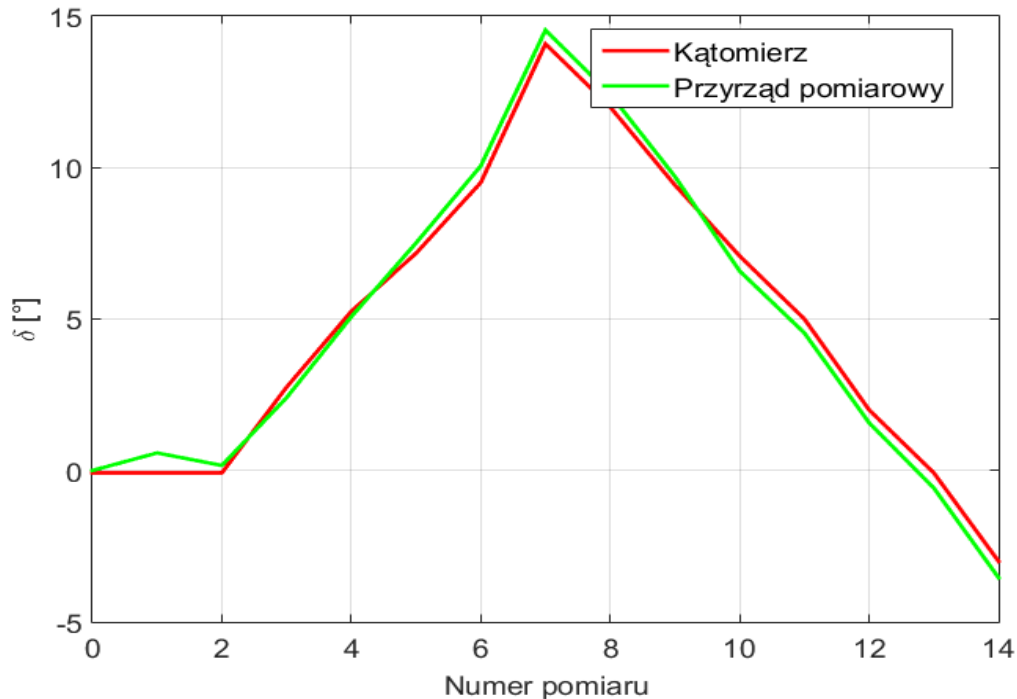
Rys. 138. Poprzeczne przemieszczenie ΔK_y punktu związanego z lewym kołem samochodu Volkswagen Passat, wyznaczone za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji kolejnych kroków pomiaru, przy konstrukcyjnym obciążeniu pojazdu.



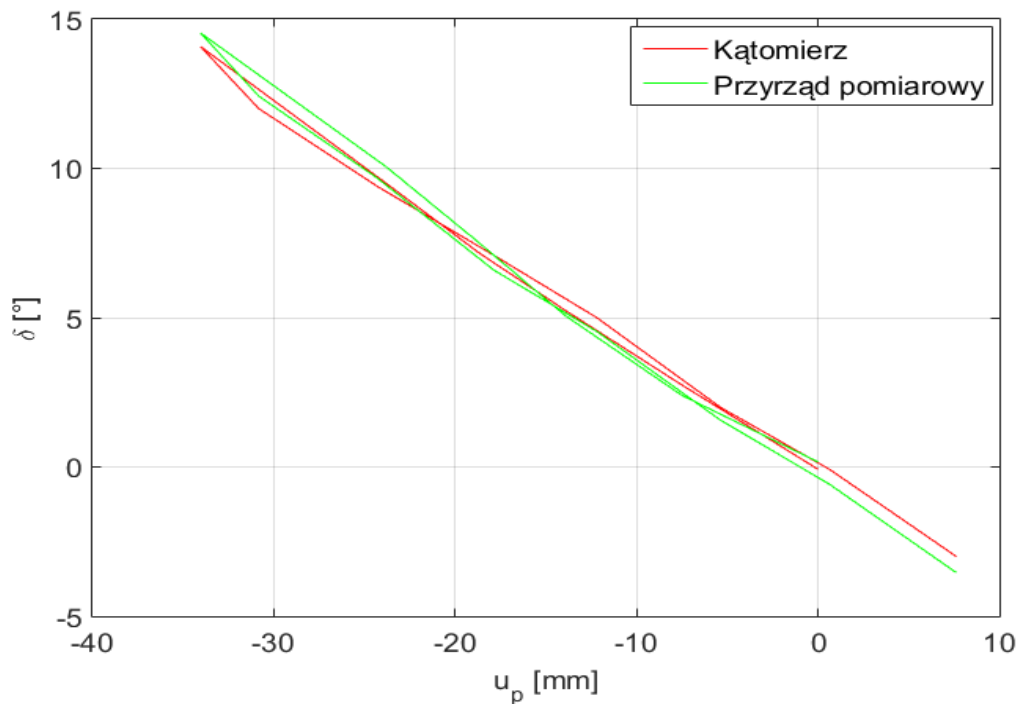
Rys. 139. Poprzeczne przemieszczenie ΔK_y punktu związanego z lewym kołem samochodu Volkswagen Passat, wyznaczone za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p , przy konstrukcyjnym obciążeniu pojazdu.

9.3.6. Charakterystyki zawieszenia- pojazd odciążony

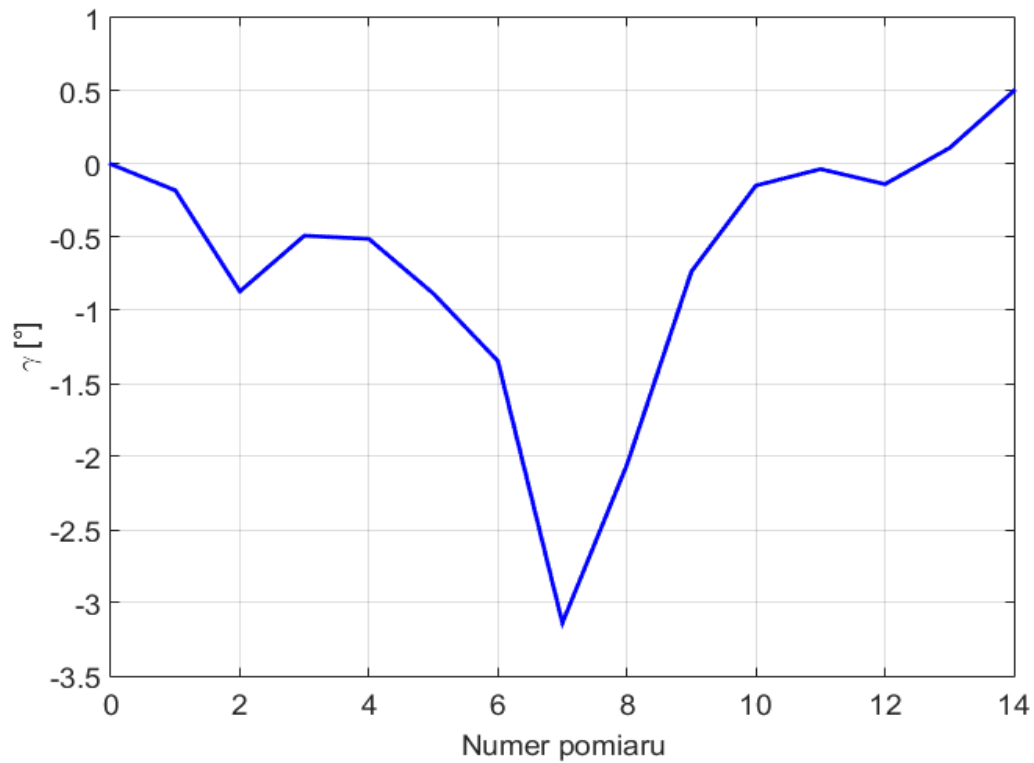
Poniżej przedstawiono charakterystyki kątów skrętu δ i pochylenia γ lewego koła samochodu osobowego oraz charakterystykę poprzecznego przemieszczenia ΔK_y punktu związanego z tym kołem wyznaczone na podstawie wyników badań stanowiskowych dla pojazdu odciążonego (Rys. 140. ÷ Rys. 145.).



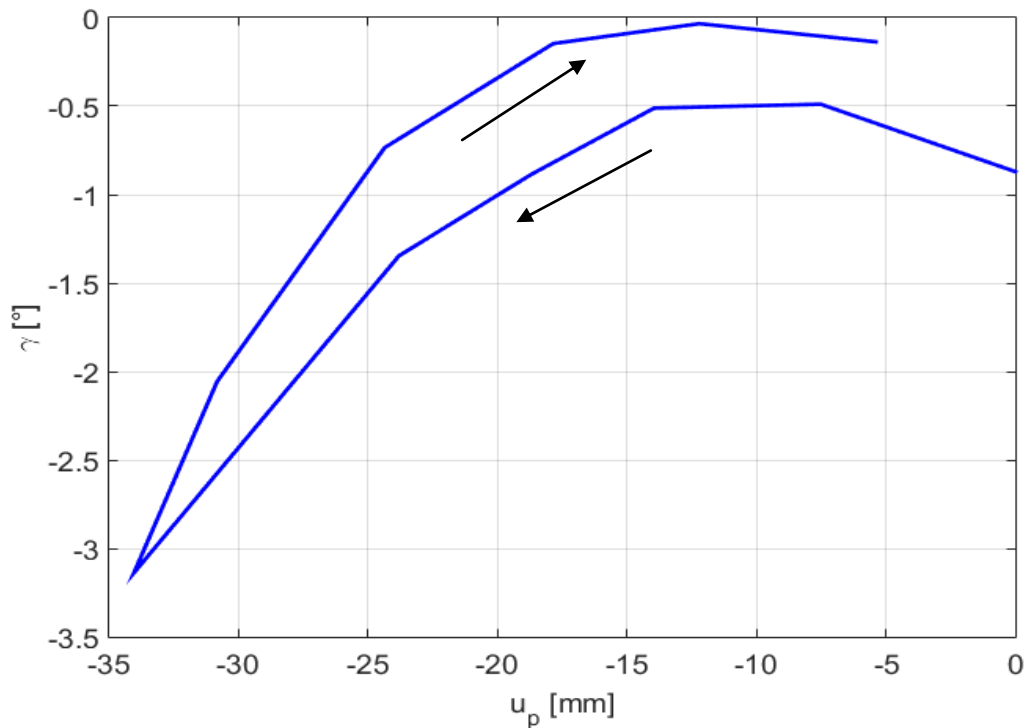
Rys. 140. Kąt skrętu δ lewego koła samochodu Volkswagen Passat, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego oraz na podstawie pomiarów referencyjnych, wykonanych przy użyciu kątomierza, w funkcji kolejnych kroków pomiaru- pojazd odciążony.



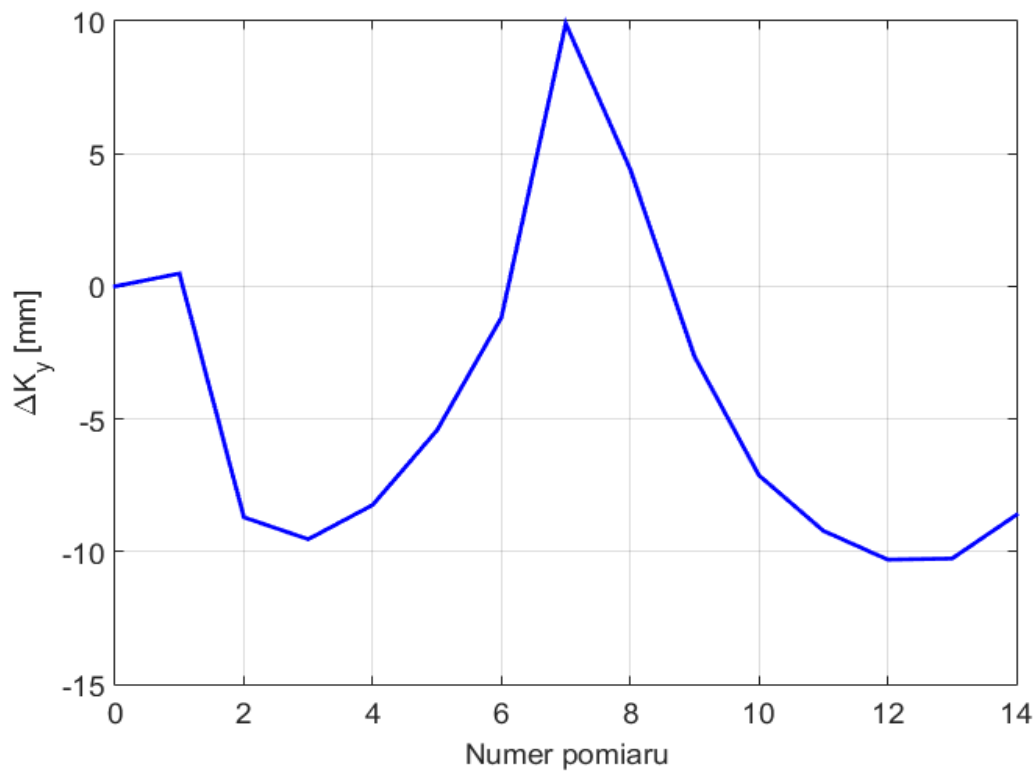
Rys. 141. Kąt skrętu δ lewego koła samochodu Volkswagen Passat, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego oraz na podstawie pomiarów referencyjnych, wykonanych przy użyciu kątomierza, w funkcji przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p - pojazd odciążony.



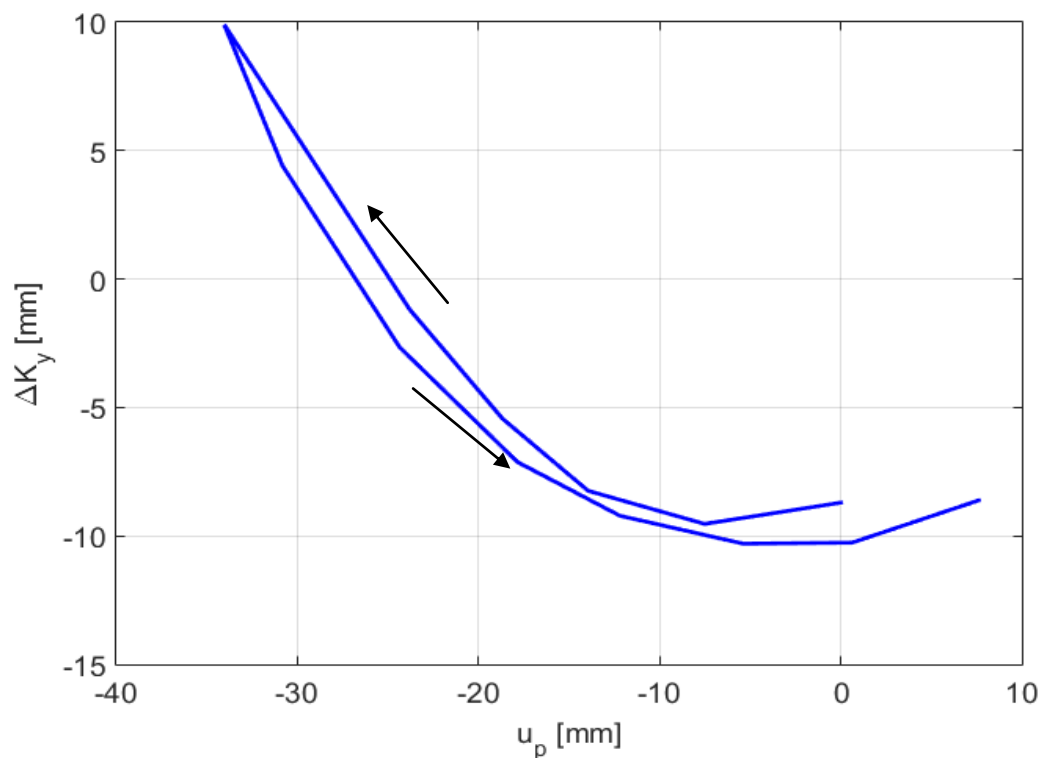
Rys. 142. Kąt pochylenia γ lewego koła samochodu Volkswagen Passat, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji kolejnych kroków pomiaru- pojazd odciążony.



Rys. 143. Kąt pochylenia γ lewego koła samochodu Volkswagen Passat, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p - pojazd odciążony.



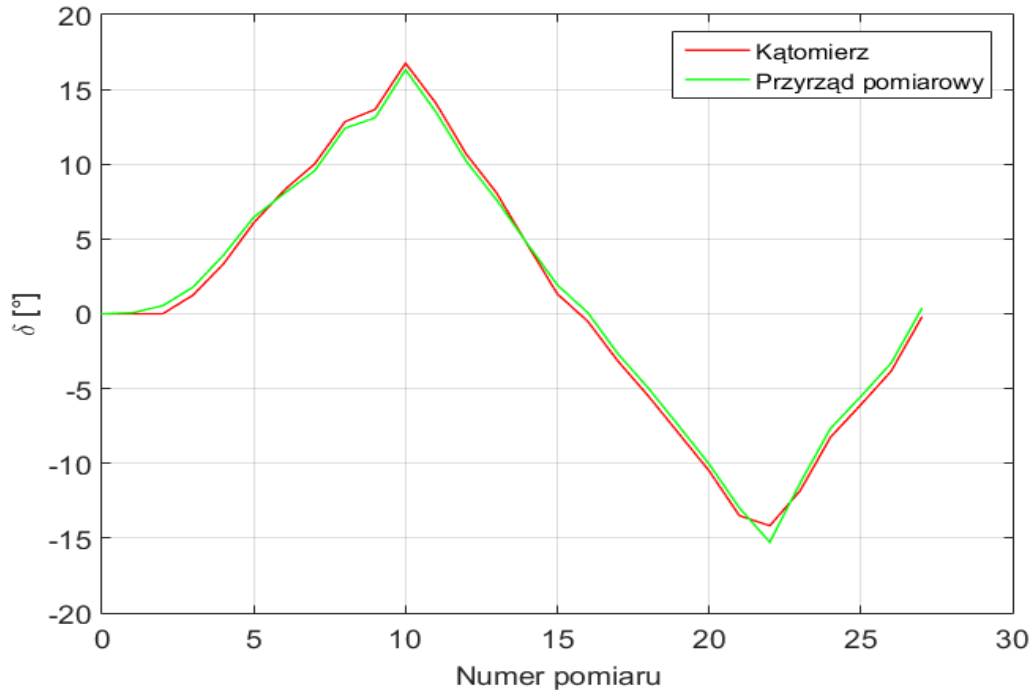
Rys. 144. Poprzeczne przemieszczenie ΔK_y punktu związanego z lewym kołem samochodu Volkswagen Passat, wyznaczone za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji kolejnych kroków pomiaru- pojazd odciążony.



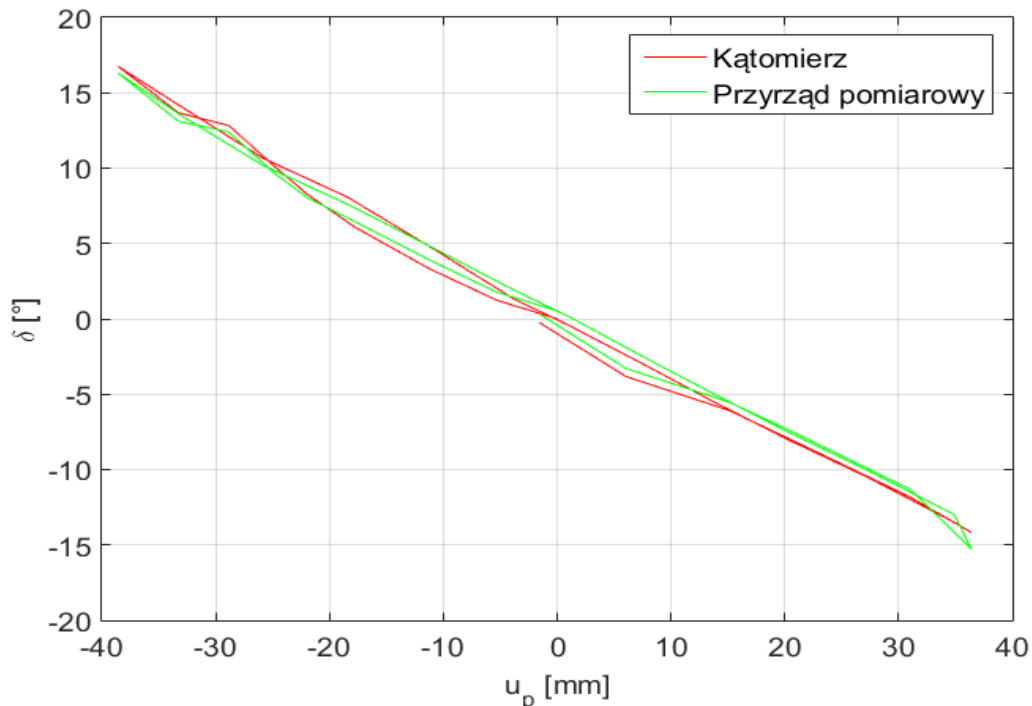
Rys. 145. Poprzeczne przemieszczenie ΔK_y punktu związanego z lewym kołem samochodu Volkswagen Passat, wyznaczone za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p - pojazd odciążony.

9.3.7. Charakterystyki zawieszenia- pojazd obciążony siłą 3 kN

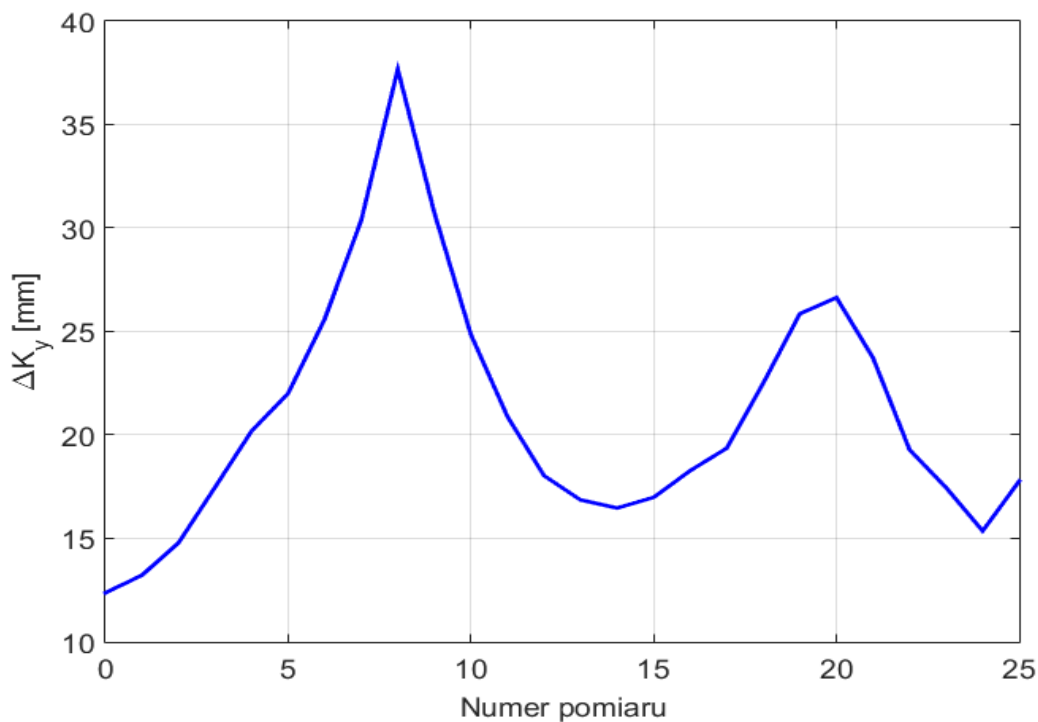
Rys. 146. ÷ Rys. 149. przedstawiają charakterystyki lewego koła samochodu osobowego oraz charakterystykę poprzecznego przemieszczenia ΔK_y punktu związanego z tym kołem, wyznaczone na podstawie wyników badań stanowiskowych dla pojazdu obciążonego siłą 3 kN.



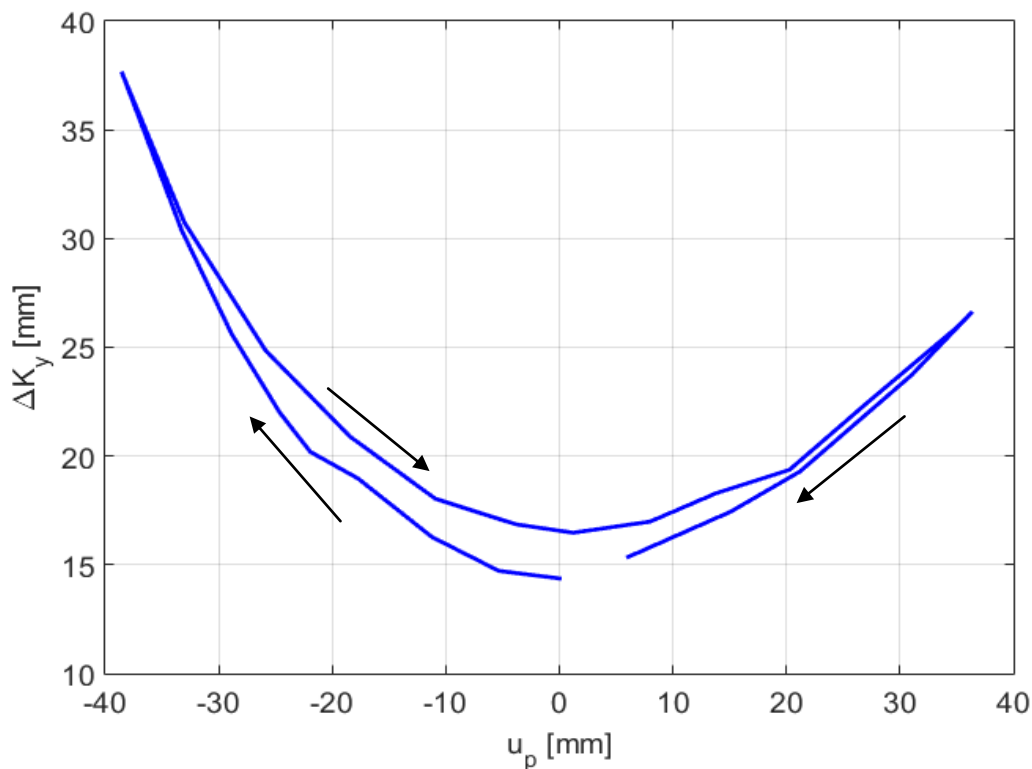
Rys. 146. Kąt skrętu δ lewego koła samochodu Volkswagen Passat, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego oraz na podstawie pomiarów referencyjnych, wykonanych przy użyciu kątomierza, w funkcji kolejnych kroków pomiaru, przy obciążeniu pojazdu siłą 3 kN.



Rys. 147. Kąt skrętu δ lewego koła samochodu Volkswagen Passat, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego oraz na podstawie pomiarów referencyjnych, wykonanych przy użyciu kątomierza, w funkcji przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p , przy obciążeniu pojazdu siłą 3 kN.



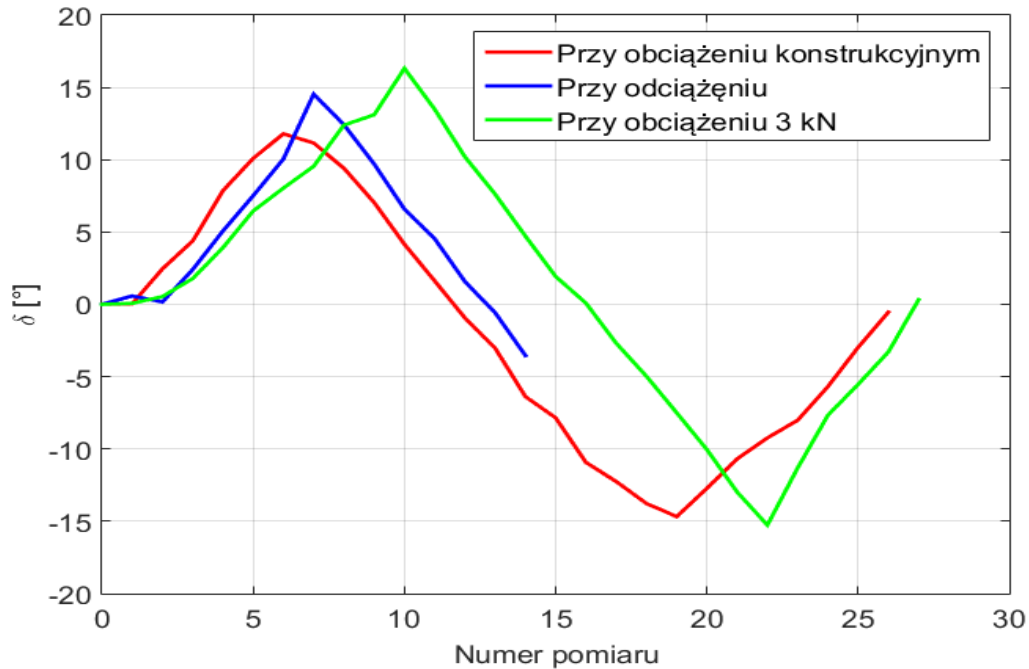
Rys. 148. Poprzeczne przemieszczenie ΔK_y punktu związanego z lewym kołem samochodu Volkswagen Passat, wyznaczone za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji kolejnych kroków pomiaru, przy obciążeniu pojazdu siłą 3 kN.



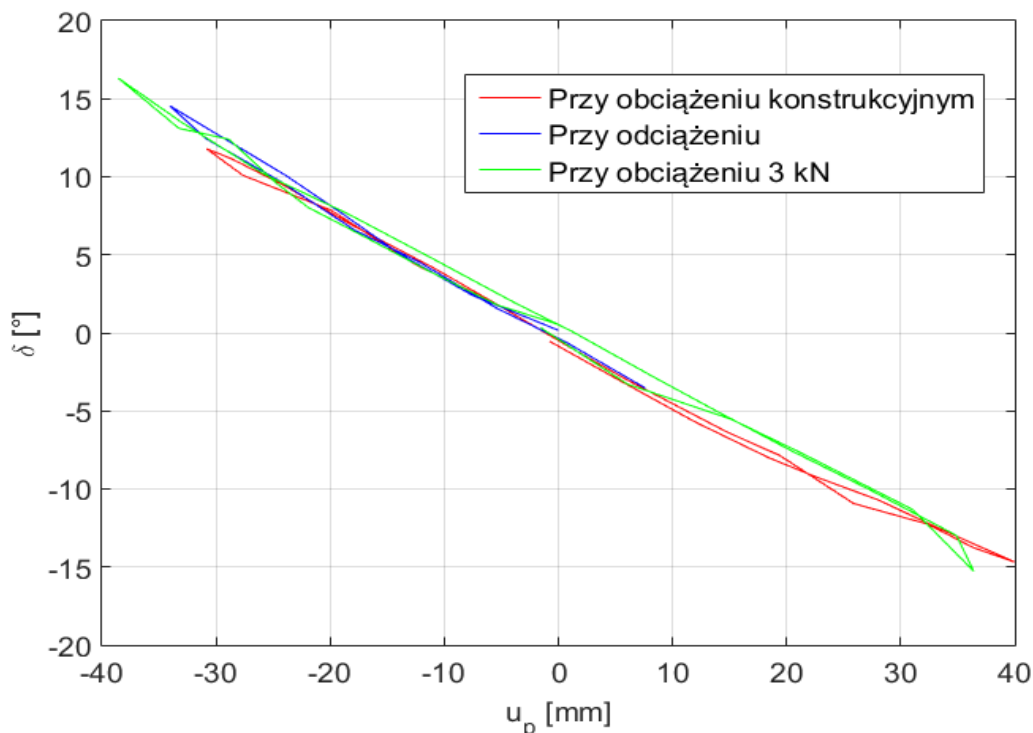
Rys. 149. Poprzeczne przemieszczenie ΔK_y punktu związanego z lewym kołem samochodu Volkswagen Passat, wyznaczone za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p , przy obciążeniu pojazdu siłą 3 kN.

9.3.8. Charakterystyki zawieszenia w przestrzeni ruchów resorowania

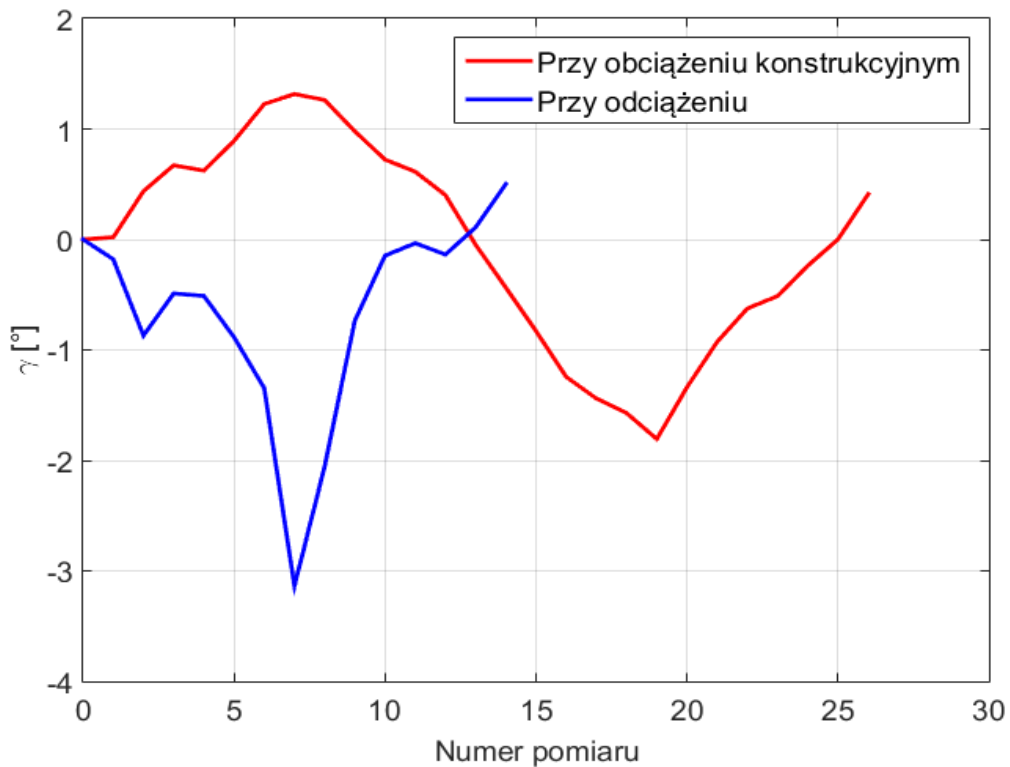
Na wykresach przedstawionych na Rys. 150. ÷ Rys. 155. zestawione zostały charakterystyki kątów skrętu δ i pochylenia γ lewego koła samochodu osobowego oraz charakterystyka poprzecznego przemieszczenia ΔK_y punktu związanego z tym kołem, dla różnych ugięć zawieszenia. Przebiegi przedstawiono zarówno w funkcji kolejnych kroków pomiaru, jak i przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p .



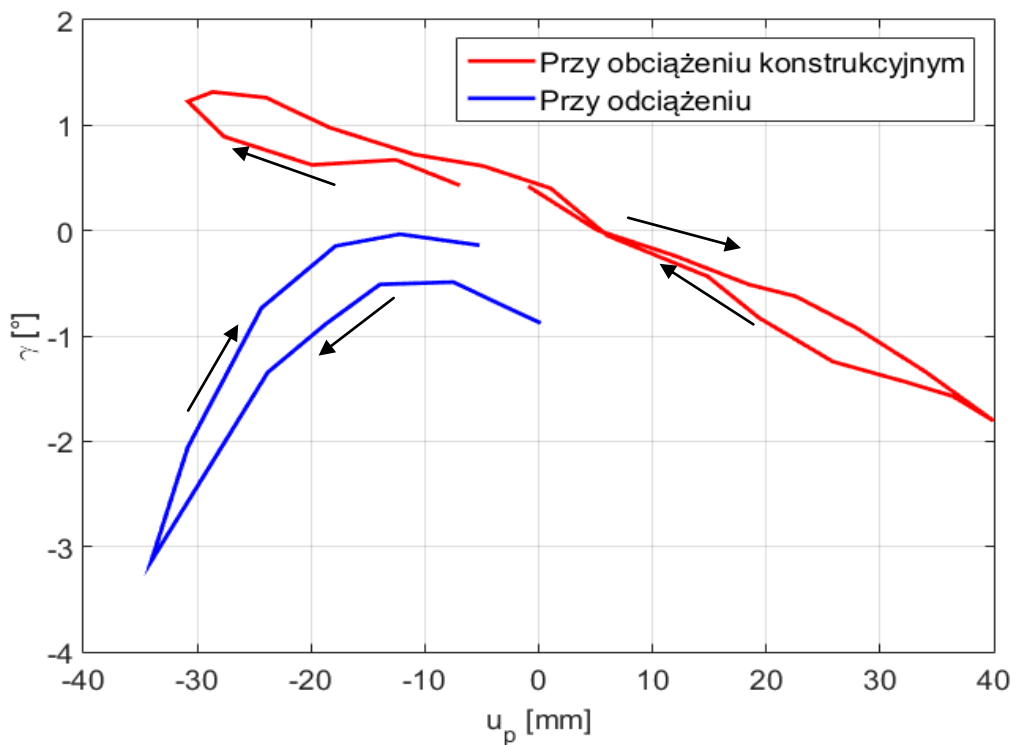
Rys. 150. Kąt skrętu δ lewego koła samochodu Volkswagen Passat, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji kolejnych kroków pomiaru dla różnych ugięć zawieszenia.



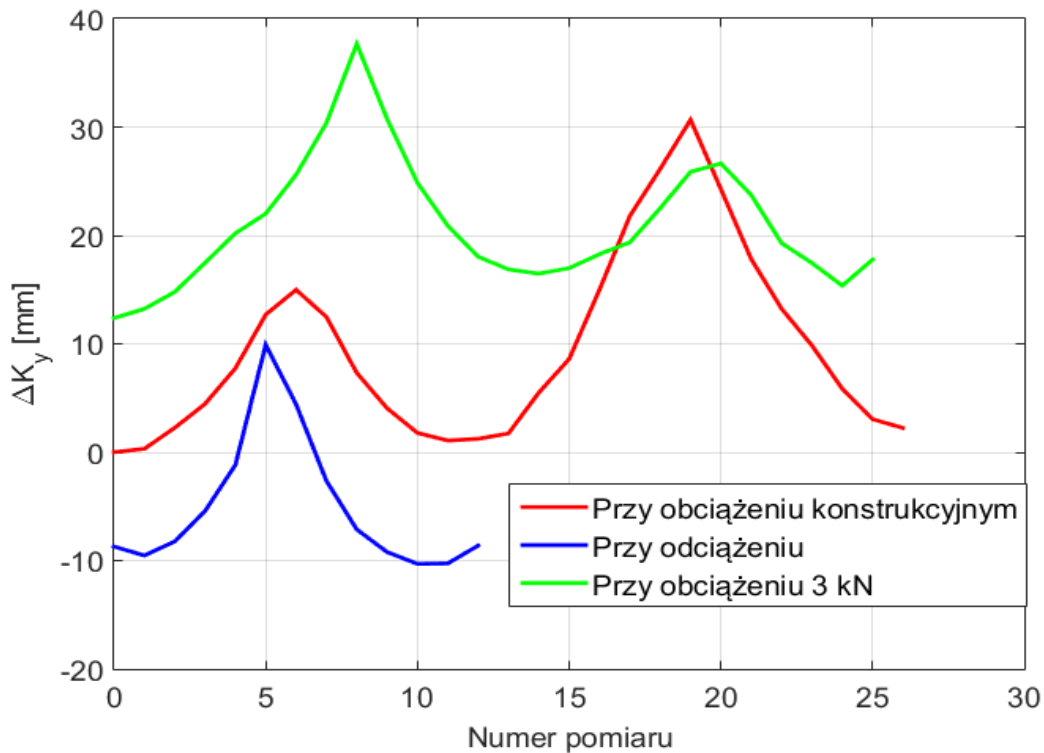
Rys. 151. Kąt skrętu δ lewego koła samochodu Volkswagen Passat, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p dla różnych ugięć zawieszenia.



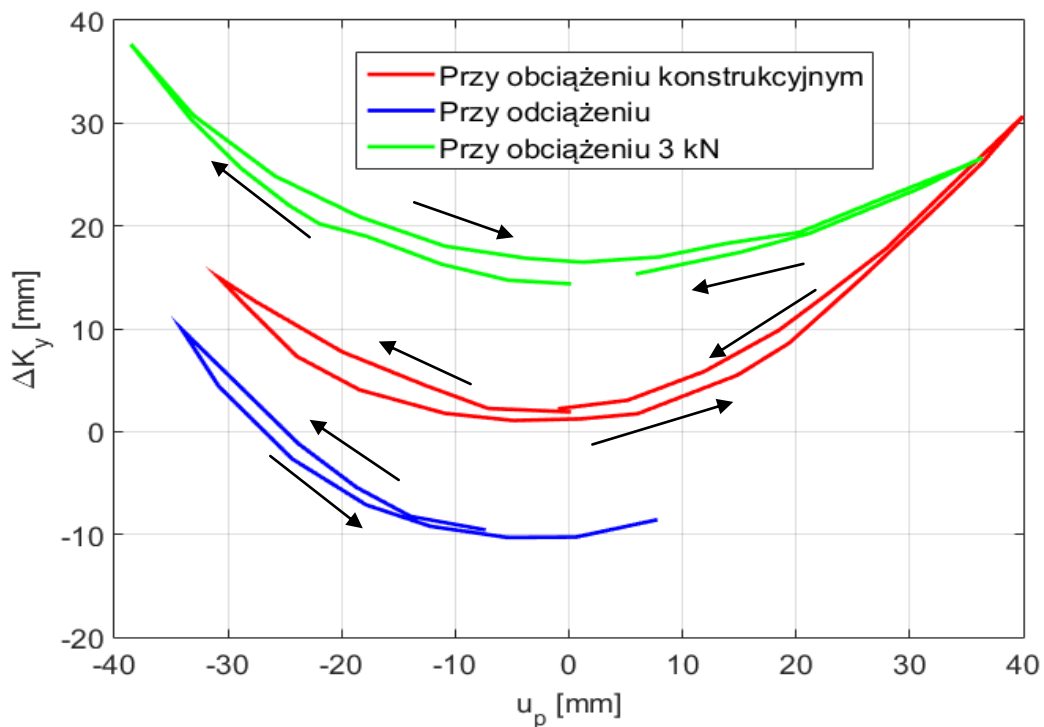
Rys. 152. Kąt pochylenia γ lewego koła samochodu Volkswagen Passat, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji kolejnych kroków pomiaru dla różnych ugięć zawieszenia.



Rys. 153. Kąt pochylenia γ lewego koła samochodu Volkswagen Passat, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p dla różnych ugięć zawieszenia.

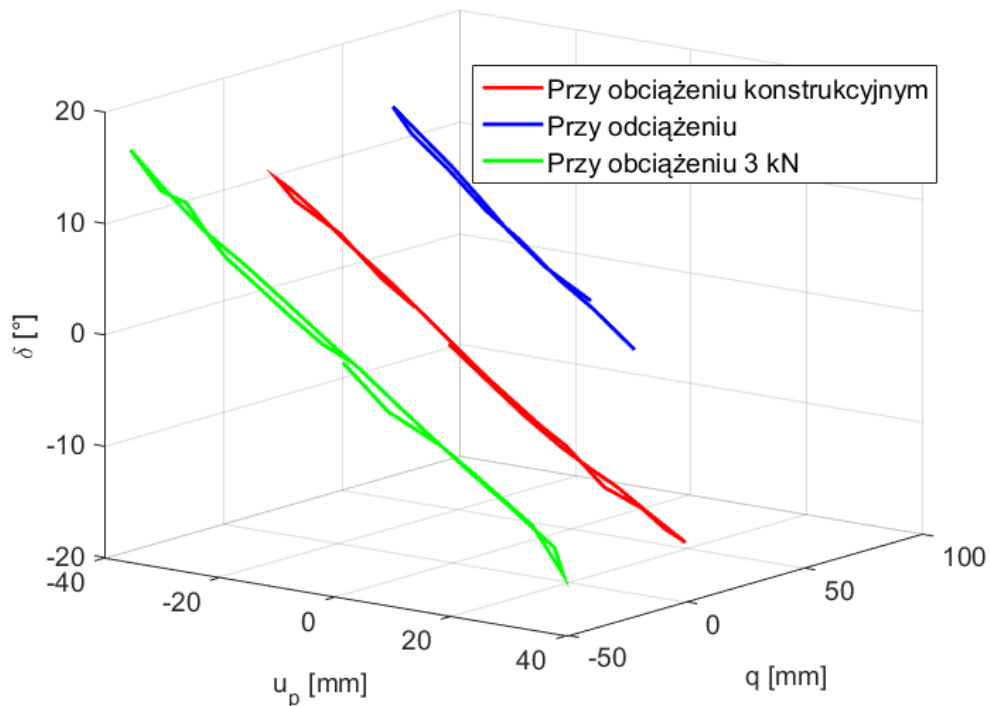


Rys. 154. Poprzeczne przemieszczenie ΔK_y punktu związanego z lewym kołem samochodu Volkswagen Passat, wyznaczone za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji kolejnych kroków pomiaru dla różnych ugięć zawieszenia.

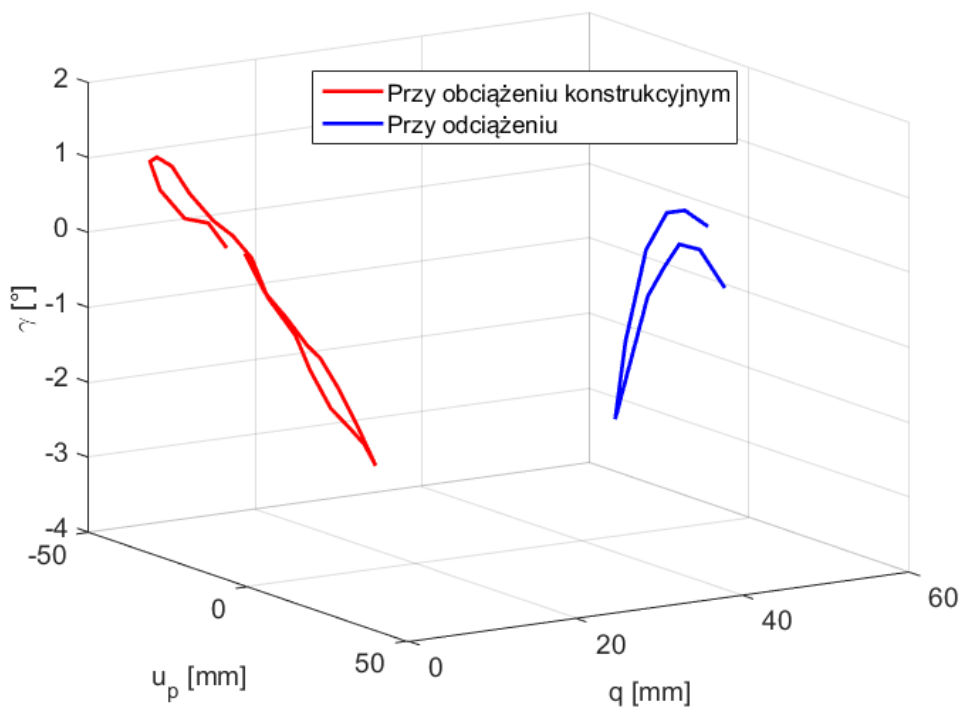


Rys. 155. Poprzeczne przemieszczenie ΔK_y punktu związanego z lewym kołem samochodu Volkswagen Passat, wyznaczone za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p dla różnych ugięć zawieszenia.

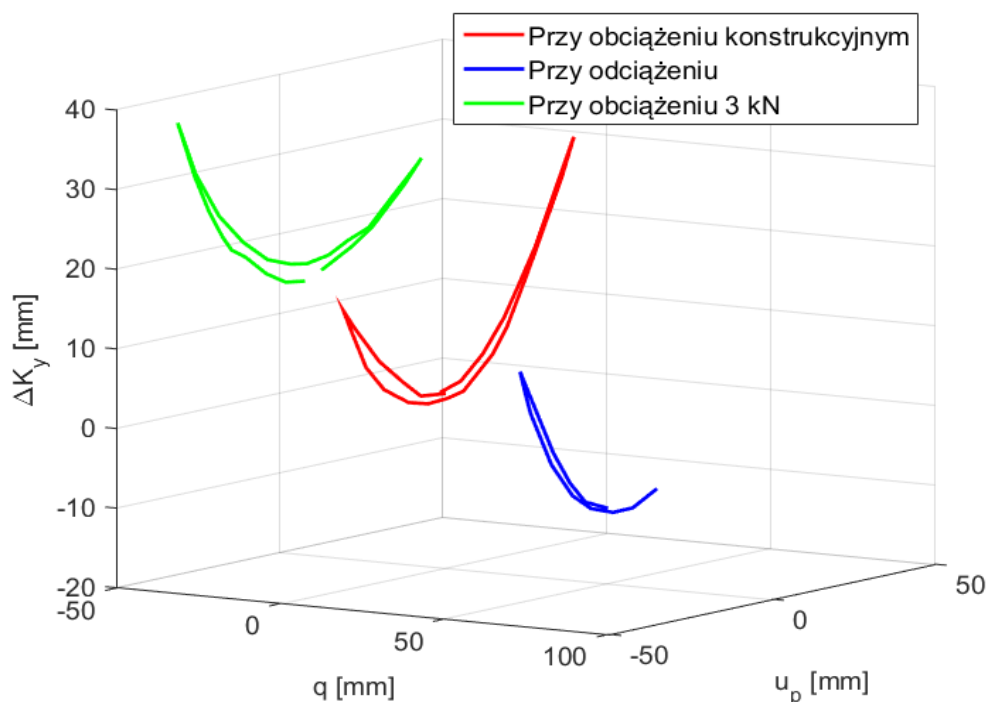
Poniżej (Rys. 156. ÷ Rys. 158.) przedstawiono przestrzenne charakterystyki kątów skrętu δ i pochylenia γ lewego koła samochodu osobowego oraz charakterystykę poprzecznego przemieszczenia ΔK_y punktu związanego z tym kołem, w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p oraz ugięcia zawieszenia q .



Rys. 156. Kąt skrętu δ lewego koła samochodu Volkswagen Passat, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p oraz ugięcia zawieszenia q .



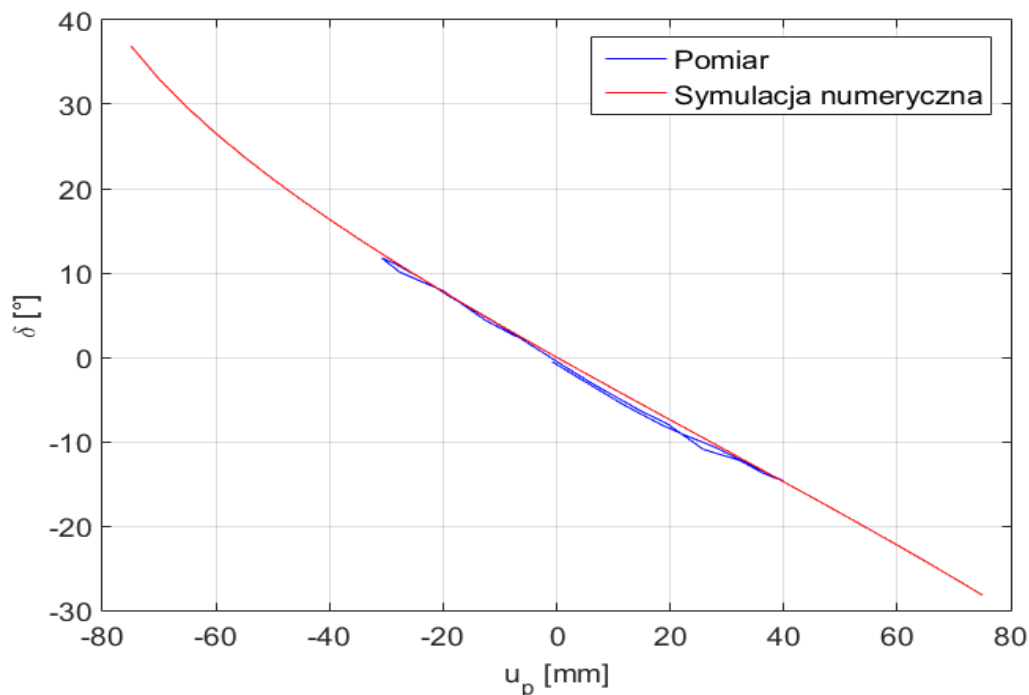
Rys. 157. Kąt pochylenia γ lewego koła samochodu Volkswagen Passat, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p oraz ugięcia zawieszenia q .



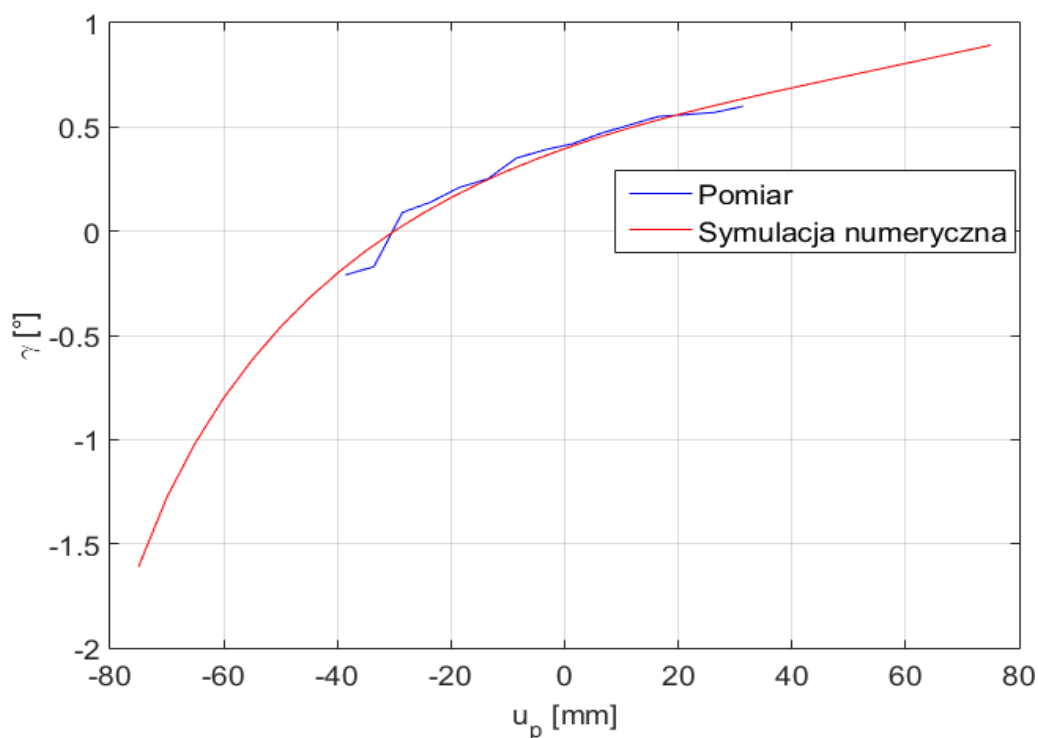
Rys. 158. Poprzeczne przemieszczenie ΔK_y punktu związanego z lewym kołem samochodu Volkswagen Passat, wyznaczone za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p oraz ugięcia zawieszenia q .

9.3.9. Porównanie wyników pomiaru z wynikami symulacji numerycznych

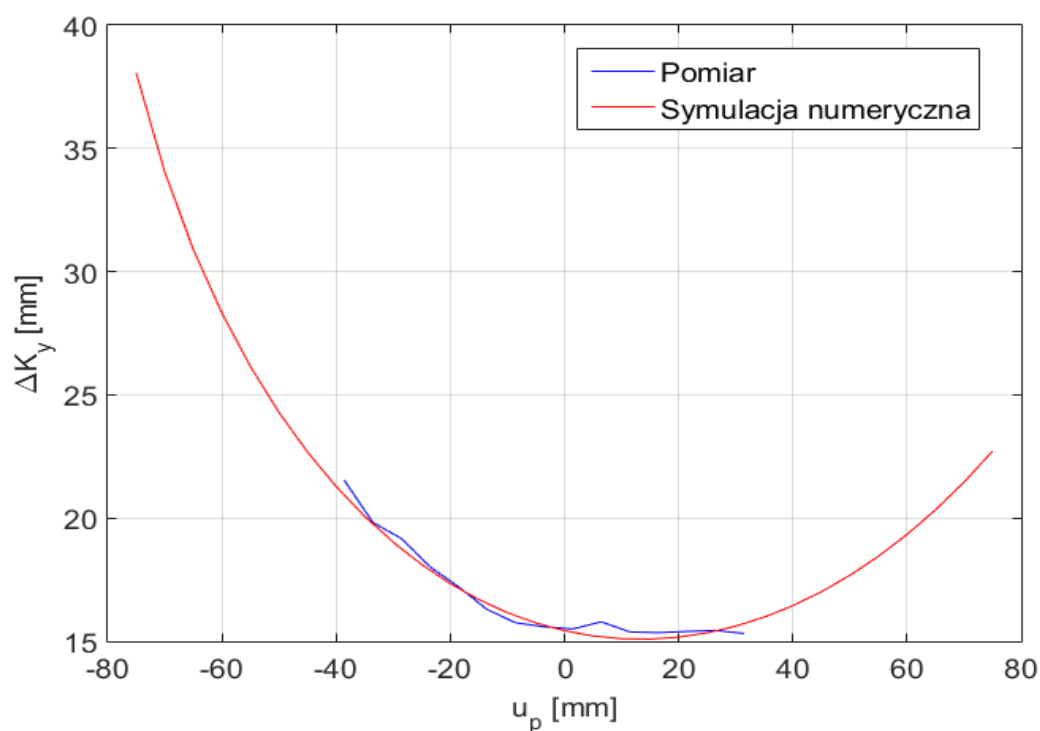
W niniejszym rozdziale przedstawione zostały przykładowe wyniki porównań pomiędzy na podstawie pomiaru z wykorzystaniem prototypowego przyrządu pomiarowym, a tymi samymi charakterystykami otrzymanymi na drodze symulacji numerycznych.



Rys. 159. Porównanie charakterystyki kąta skrętu δ lewego koła samochodu osobowego Volkswagen Passat, wyznaczonej na podstawie wyników pomiaru z wykorzystaniem prototypowego przyrządu pomiarowego oraz na drodze symulacji numerycznej, w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p . Pojazd obciążony masą własną.



Rys. 160. Porównanie charakterystyki kąta pochylenia γ lewego koła samochodu osobowego Volkswagen Passat, wyznaczonej na podstawie wyników pomiaru z wykorzystaniem prototypowego przyrządu pomiarowego oraz na drodze symulacji numerycznej, w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p . Pojazd obciążony siłą 3 kN.



Rys. 161. Porównanie charakterystyki poprzecznego przemieszczenia ΔK_y punktu związanego z lewym kołem samochodu osobowego Volkswagen Passat, wyznaczonej na podstawie wyników pomiaru z wykorzystaniem prototypowego przyrządu pomiarowego oraz na drodze symulacji numerycznej, w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p . Pojazd obciążony siłą 3 kN.

10. Analiza niepewności pomiaru

Pomiary przemieszczeń liniowych oraz kątowych koła kierowanego w przestrzeni ruchów resorowania polegały na wyznaczeniu charakterystyk kątów skrętu i pochylenia koła oraz przemieszczeń punktu związanego z kołem w kartezjańskim układzie współrzędnych związanym z nadwoziem pojazdu. Charakterystyki te określono na podstawie wyznaczonej orientacji, połączonej z kołem samochodu, płyty zewnętrznej przyrządu pomiarowego w układzie współrzędnych związanym z nadwoziem pojazdu. W celu określenia orientacji płyty zewnętrznej przyrządu, rejestrowane były zmiany wydłużeń dziewięciu jego łączników s_i , $i=1(9)$. Wartości wyznaczonych parametrów obarczone są niepewnością pomiaru, której główne przyczyny wynikają z:

- błędów określenia współrzędnych konfiguracyjnych mechanizmu przyrządu pomiarowego, w tym:
 - błędów wyznaczenia współrzędnych środków przegubów kulowych H_i , $i=1(9)$ stanowiących połączenie łączników przyrządu z płytą zewnętrzną zamocowaną, w sposób nieruchomy, do nadwozia pojazdu (Patrz rozdział 7);
 - błędów wyznaczenia środków przegubów kulowych D_j , $j=1(3)$ stanowiących połączenie łączników przyrządu z płytą zewnętrzną zamocowaną do tarczy koła pojazdu;
- niepewności pomiaru wydłużeń łączników przyrządu za pomocą zabudowanych w nich optycznych czujników przemieszczeń;
- podatności łączników przyrządu oraz jego płyty zewnętrznej i wewnętrznej
- idealizacji par kinematycznych D_j dla $j=1(3)$, H_i dla $i=1(9)$ oraz s_i dla $i=1(9)$, polegającej na założeniu braku luzów oraz tarcia w ich wnętrzach;
- propagacji błędów pomiarów bezpośrednich.

Niepewność standardowa pośredniego pomiaru przemieszczeń liniowych oraz kątowych koła kierowanego względem nadwozia pojazdu została wyznaczona w oparciu o prawo przenoszenia niepewności. Założono, iż sygnały z optycznych czujników przemieszczeń podlegają rozkładowi normalnemu.

Niepewność standardowa obliczona została jako suma geometryczna pochodnych cząstkowych zgodnie ze wzorem 54:

$$\Delta f = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^9 \left[\frac{\partial f}{\partial s_i} \Delta s_i \right]^2} \quad (54)$$

gdzie:

- f - odpowiednio:
- kąt skrętu koła $\delta(s_1, \dots, s_9)$;
 - kąt pochylenia koła $\gamma(s_1, \dots, s_9)$;
 - poprzeczne przemieszczenie punktu związanego z kołem $\Delta K_y(s_1, \dots, s_9)$;
- s_i - wydłużenie i -tego łącznika przyrządu pomiarowego;
- Δs_i - dokładność i -tego czujnika przemieszczeń, dla każdego z czujników założona na poziomie $\pm 0,02$ [mm].

Poniżej zestawione zostały przykładowe wartości niepewności wyznaczenia przemieszczeń liniowych oraz kątowych koła samochodu Volkswagen Passat za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego. Przedstawione obliczenia wykonano dla przypadku konstrukcyjnego obciążenia samochodu. Wyniki zestawiono w Tab. 3.:

Tab. 3. Przykładowe, maksymalne, wartości niepewności pośredniego pomiaru kąta skrętu koła $\Delta\delta$, kąta pochylenia koła $\Delta\gamma$ oraz poprzecznego przemieszczenia punktu związanego z kołem $\Delta\Delta K_y$.

	$\Delta\delta$ [°]	$\Delta\gamma$ [°]	$\Delta\Delta K_y$ mm
Maksymalna wartość niepewności pomiaru w przypadku maksymalnego kąta skrętu koła w lewo	$\pm 0,14$	$\pm 0,03$	$\pm 0,18$
Maksymalna wartość niepewności pomiaru w przypadku powrotu kół do kierunku jazdy na wprost	$\pm 0,16$	$\pm 0,02$	$\pm 0,02$
Maksymalna wartość niepewności pomiaru w przypadku maksymalnego kąta skrętu koła w prawo	$\pm 0,04$	$\pm 0,01$	$\pm 0,18$

ZAKOŃCZENIE





11. Wnioski

Celem pracy było przeprowadzenie teoretycznej analizy możliwości zbudowania przyrządu umożliwiającego pomiar przemieszczeń liniowych oraz kątowych koła kierowanego samochodu osobowego w przestrzeni ruchów resorowania. Analiza teoretyczna wykazała, iż istnieje kilka możliwych struktur mechanizmu tego typu urządzenia, wśród nich, między innymi, struktura zbliżona do struktury mechanizmu platformy Stewarta, czy struktura mechanizmu składająca się z dziewięciu łączników z zabudowanymi czujnikami przemieszczeń liniowych. Struktury te zostały szczegółowo omówione w rozdziale 5. Przyrządy, których struktura zbliżona jest do struktury mechanizmu platformy Stewarta charakteryzują się osobliwościami równań więzów geometrycznych ich mechanizmów w pewnych obszarach ruchów resorowania zawieszenia (patrz punkt 5.2 i 5.3). Możliwość rozwiązania powyższych równań uzależniona jest od konfiguracji konstrukcyjnej mechanizmu. Przyrząd, którego mechanizm składa się z dziewięciu łączników, pozbawiony jest wspomnianego problemu. Niezależnie od jego konfiguracji konstrukcyjnej, zawsze istnieje rozwiązanie układu równań więzów geometrycznych jego mechanizmu.

Teza pracy zakładała, iż istnieje możliwość zbudowania przyrządu do pomiaru przemieszczeń liniowych oraz kątowych koła kierowanego w przestrzeni ruchów resorowania, którego uwarunkowanie układu równań więzów geometrycznych nie będzie zależne od konfiguracji konstrukcyjnej jego mechanizmu. Dla jej potwierdzenia, na podstawie wcześniejszych analiz teoretycznych, zbudowano przyrząd, składający się z dziewięciu łączników z zabudowanymi czujnikami przemieszczeń liniowych, którego opis zamieszczony został w rozdziale 0.

Przeprowadzone zostały badania stanowiskowe z wykorzystaniem prototypowego przyrządu (patrz rozdział 9). Analiza ich wyników prowadzi do następujących wniosków:

- istnieje możliwość rozwiązania więzów geometrycznych mechanizmu prototypowego przyrządu bez względu na jego konfigurację konstrukcyjną,
- uzyskane wyniki pokrywają się jakościowo z wynikami prób referencyjnych oraz wynikami teoretycznymi uzyskanymi na drodze symulacji numerycznych,
- w niektórych obszarach przestrzeni ruchów resorowania pojawiły się rozbieżności pomiędzy wynikami uzyskanymi za pomocą pomiarów prototypowym przyrządem pomiarowym i wynikami pomiarów referencyjnych oraz wynikami symulacji numerycznych,

Przyczynami uzyskanych rozbieżności są w głównej mierze:

- podatność łączników mechanizmu przyrządu,
- podatność płyty zewnętrznej i wewnętrznej przyrządu,
- podatność mocowań płyty zewnętrznej do nadwozia pojazdu,
- idealizacja par kinematycznych mechanizmu przyrządu,
- tarcie w przegubach kulowych mechanizmu przyrządu pomiarowego oraz w wykorzystanych czujnikach przemieszczeń liniowych,
- tarcie w mechanizmie zwrotniczym układu kierowniczego oraz występujące podatności układu.

W założeniach teoretycznych, stanowiących podstawę przeprowadzonych symulacji numerycznych, założono, iż mechanizm przyrządu pomiarowego pozbawiony jest elementów podatnych oraz, że w jego połączeniach nie występuje tarcie. Podobnie, założono brak tarcia w mechanizmie zwrotniczym układu kierowniczego. Skutkiem tych założeń są uzyskane różnice pomiędzy teoretycznymi charakterystykami zawieszenia samochodu osobowego

Volkswagen Passat oraz charakterystykami uzyskanymi na podstawie pomiarów z wykorzystaniem prototypowego przyrządu pomiarowego.

Tarcie występujące w mechanizmach przyrządu pomiarowego, jak również w układzie kierowniczym, powoduje pojawienie się wyraźnej histerezy, widocznej na charakterystykach otrzymanych w drodze analizy wyników otrzymanych podczas pomiarów stanowiskowych.

Wyniki przeprowadzonych prób wskazują na słuszność założonej tezy niniejszej pracy. Jednak konstrukcja przyrządu, którego mechanizm składa się z dziewięciu łączników, jest mocno skomplikowana, co w negatywny sposób wpływa na uzyskiwane wyniki pomiarów. Ze względu, iż istnieje możliwość ustalenia stałych punktów mocowania łączników przyrządu do jego płyty wewnętrznej i zewnętrznej, możliwe jest zbudowanie urządzenia, którego mechanizm zbudowany będzie jedynie z sześciu łączników- tego typu konstrukcja będzie posiadała mniejszy stopień komplikacji, co powinno w pozytywny sposób wpłynąć na wartości uzyskiwanych wyników. Możliwe jest również zoptymalizowanie konstrukcji przegubów zespolonych stanowiących połączenie trzech przegubów kulowych o wspólnym środku. Tego typu optymalizacja zapewni powiększenie zakresu przemieszczeń łączników przyrządu pomiarowego, a co za tym idzie, zakresu pomiarowego przedmiotowego przyrządu.

12. Plan dalszych prac

Planowane są dalsze prace dotyczące pomiarów przemieszczeń liniowych i kątowych koła kierowanego względem nadwozia pojazdu. W pierwszej kolejności zmodyfikowany zostanie sam przyrząd pomiarowy. Modyfikacje polegać będą na:

- zwiększeniu sztywności przyrządu, zarówno jego łączników, jak i płyt zewnętrznej i wewnętrznej, przy jednoczesnej redukcji jego masy;
- wykorzystaniu lżejszych przegubów kulowych z tworzywa sztucznego;
- zwiększeniu sztywności elementów mocujących przyrząd do nadwozia pojazdu.

Przeprowadzone zostaną analizy numeryczne, które pozwolą na wyznaczenie punktów mocowania łączników do płyty zewnętrznej i wewnętrznej w taki sposób, aby możliwe było rozwiązanie równań więzów geometrycznych mechanizmu przyrządu w całej przestrzeni ruchów resorowania dla mechanizmu zbudowanego z sześciu łączników z zabudowanym czujnikami przemieszczeń liniowych.

Po przeprowadzeniu wymienionych wyżej modyfikacji powtórzone zostaną badania stanowiskowe, a następnie wykonane zostaną próby drogowe z wykorzystaniem prototypowego urządzenia pomiarowego, które zweryfikowane zostaną za pomocą przyrządu pomiarowego RV-3 firmy Datron.

13. Literatura

- [1] Blumenfeld W., Schneider W., *Opto- elektroniczne Verfahren zur Spur- und Sturzwinkelmessung am fahrenden Fahrzeug*. ATZ 87 (1985) 1, str. 17-21.
- [2] *CORSYS- DATRON RV-3 Wheel Vector Sensor and RV-3 Interface box with CAN for Simultaneous Measurement of all Wheel Positions and Orientations*, User manual, Wetzlar, Germany 2006.
- [3] *CORSYS- DATRON RV-4 Wheel Vector Sensor for Simultaneous Measurement of all Wheel Positions and Orientations in 5 Axes*. User manual volume I, Wetzlar, Germany 2008.
- [4] Fallah M. S., Bhat R., Xie W. F.: *New nonlinear model of Macpherson suspension system for ride control applications*. American Control Conference, IEEE 2008, p. 3921-3926.
- [5] Góra M.: *Analiza kinematyczna wielowahaczowych mechanizmów zawieszonych samochodów*. Politechnika Krakowska. Rozprawa doktorska. Kraków 2008.
- [6] Góra M., Knapczyk J.: *Analiza wrażliwości wymiarowej mechanizmu zawieszenia 5-wahaczowego*. Teka Komisji Naukowo- Problemowej Motoryzacji PAN, Kraków 2003, z. 26-27, str. 197-202.
- [7] Góra M., Knapczyk J., Maniowski M.: *Estimation of platform spatial pose and displacement of parallel mechanism using wire-based sensors*. Archiwum Budowy Maszyn Vol. 54, nr 4 2007, str. 365-389.
- [8] Góra M., Maniowski M.: *Verification of 6DOF platform with wire- based sensors for spatial tracking*. The Archive of Mechanical Engineering 2 (2011) VOL. LVIII.
- [9] Grzyb A.: *On a perturbation method for the analysis of the kinetostatics of mechanisms*. Akademie Verlag, ZAMM, Z. Angew. Math. Mech. 72, T615-T618, 1992.
- [10] Grzyb A., Struski J.: *Metody wyznaczania kinematyki wielowahaczowych zawieszonych kół ogumionych*. Teka Komisji Naukowo-Problemowej Motoryzacji 16, Kraków 1998, str. 9-17.
- [11] Guan H., He R., Guo R.: *Hysteresis Characteristic Model of Suspension for Vehicle Dynamics Simulation*. Advanced Materials Research, Vols. 706-708, p. 1385-1388, 2013
- [12] Hee G. Lee, Chong J. Won, Jung W. Kim: *Design sensitivity analysis and optimization of McPherson Suspension System*. Proceedings of the World Congress on Engineering 2009 Vol II, WCE 2009, July 1 - 3, 2009, London, U.K.
- [13] Janczur R.: *Analityczno- eksperymentalna metoda badań sterowności samochodu*. Politechnika Krakowska. Rozprawa doktorska. Kraków 2002.
- [14] Janczur R.: *Badanie charakterystyk elastokinematycznych mechanizmu 5-wahaczowego prowadzenia kół samochodu*. Czasopismo Techniczne PK, z. 6-M/2008, str. 57-64.
- [15] Janczur R., Struski J.: *Analityczno- eksperymentalna metoda badań sterowności samochodu*. Zesz. Nauk. Politechniki Świętokrzyskiej, Mech. 76, str. 207-222.
- [16] Janczur R., Struski J.: *Teoretyczne podstawy pomiaru rzeczywistego kąta skrętu koła kierowanego*. Teka Komisji Naukowo- Problemowej Motoryzacji PAN, Kraków 1998, z. 16, str. 87-95.
- [17] Jeong W. J., Kim. H. S., Kwak K. Y.: *Kinematic and workspace analysis of a parallel wire mechanism for measuring a robot pose*. Mechanism and Machine Theory 34 (1999), p. 825-841.
- [18] Jeong W. J., Kim. H. S., Kwak K. Y., Smith C. C.: *Development of a parallel wire mechanism for measuring position and orientation of a robot end- effector*. Mechatronics 8 (1998), p. 845-861.

- [19] Jimenez J.M., Alvarez G., Cardenal J., Cuadrado J.: *A simple and general method for kinematic synthesis of spatial mechanisms*, Mechanism and Machine Theory, Elsevier, Vol. 32, 1997, p. 323–341.
- [20] Kazemi R., Raʿat M., Zolghart H.: *Optimization of suspension of suspension system of sport car in three dimensional reactions space*. International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology, Vol. 7, No. 3, 2014.
- [21] Knapczyk J., Dzierżek S.: *Displacement and force analysis of five-rod suspension with flexible joints*. Journal of Mechanical Design 117 (1995), p. 532-538.
- [22] Knapczyk J., Kuranowski A., Struski J.: *Analiza wpływu parametrów konstrukcyjnych mechanizmów prowadzenia kół na stateczność i kierowalność samochodu*. Materiały konferencyjne: Międzynarodowe Sympozjum Naukowe "Kierowalność i modelowanie dynamiki ruchu pojazdów i maszyn roboczych", Radziejowice, 4-6.05.1988. – ISSN 0208-774x.
- [23] Knapczyk J., Maniowski M.: *Charakterystyka elastokinematyczna wielowahaczowego zawieszenia koła samochodu z ramą pomocniczą*. Teza Komisji Naukowo-Problemovej Motoryzacji PAN, Kraków 2005, z. 29-30.
- [24] Knapczyk J., Maniowski M.: *Elastokinematic modelling and study of five-rod suspension with subframe*. Mechanism and Machine Theory, Elsevier, Vol. 41, 2006.
- [25] Knapczyk J., Maniowski M.: *Synthesis of five-rod suspension for given load-displacement characteristics*. Part D: Journal of Automobile Engineering, Proc. ImechE, Vol 220, 2006.
- [26] Kotulski Z., Szczepański W., *Rachunek błędów dla inżynierów*. WNT, Warszawa 2004.
- [27] Kowalski M.: *Optymalizacja wymiarowa wybranych mechanizmów wielowahaczowych zawiesznień samochodów*. Rozprawa doktorska. Kraków 2005.
- [28] Leyko J. *Mechanika ogólna t.1 Statyka i kinematyka*. Wydaw. Naukowe PWN, Warszawa 2012.
- [29] Li L., Xia C., Qin W.: *Analysis of kinetic Characteristic and structural parameter optimization of multi-link suspension*. SAE Technical Paper 2007-01-3558, 2007.
- [30] Meissonnier J. et. al.: *Geometric identification of an elastokinematic model in a car suspension*. Part D: Journal of Automobile Engineering, Proc. ImechE, Vol 220, 2006.
- [31] Mohamed M.G., Attia H.A.: *Numerical kinematic analysis of the motor-vehicle multilink suspension system*. ASME Design Engineering Technical Conferences 82 (1995), p. 883–889.
- [32] Młynarski T., Listwa A., Pazderski E.: *Teoria maszyn i mechanizmów. Cz. 1, Synteza i analiza strukturalna mechanizmów*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 1987.
- [33] PN-ISO 8855 *Pojazdy drogowe. Dynamika zachowania się podczas jazdy*. Terminologia.
- [34] Pusey J. Fattah A., Agraval S., Messyna E.: *Design and workspace analysis of a 6-6 cable- suspended parallel robot*. Mechanism and Machine Theory, Vol. 39, 2004, p. 761-778.
- [35] Raghavan M.: *Number and dimensional synthesis of independent suspension mechanism*. Mechanism and Machine Theory, Elsevier, Vol. 31, No. 8 1996, p. 1141-1153.
- [36] Raghavan M.: *Suspension kinematic structure for passive control of vehicle attitude*. International Journal of Vehicle Design 12 (1991), p. 525-547.
- [37] Raghavan M.: *Suspension design for linear toe curve: a case study in mechanism synthesis*. Trans. ASME, Journal of Mechanical Design, 126(2), 2004, p. 278-282.

- [38] Ratajczyk E.: *Współrzędnościowa technika pomiarowa*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
- [39] Reimpell J., Betzler W.: *Podwozia samochodów. Podstawy konstrukcji*. WKiŁ, Warszawa 2002.
- [40] Rill G.: *Steady State Cornering on Uneven Roadways*. SEA Technical Paper No.860575, Warrendale PA 1986.
- [41] Roethof D., Sezer T., Ali Arat M., Shyrokau B.: *Steering feel with variable camber suspension: Driving simulator study*. SEA Technical Paper 2016-01-0466.
- [42] Sancibrian R., Garcia P., Viadero F., Fernandez A.: *Suspension system vehicle design using a local optimization procedure*. ASME 2005, Paper No. DETC2005-84441, p. 227-236
- [43] Simionescu P.A., Beale D.: *Synthesis and analysis of five-link rear suspension system used in automobiles*. Mechanism and Machine Theory, Elsevier, Vol. 37, 2002, p. 815-832.
- [44] Sładek J.: *Dokładność pomiarów współrzędnościowych*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2012 r.
- [45] Sobczyk Mieczysław, *Statystyka. Podstawy teoretyczne, przykłady, zadania*. Wydawnictwo UMCS, Lublin 1998 r.
- [46] Struski J.: *Przyrząd do pomiaru dynamicznego kąta skrętu koła kierowanego*. Patent nr P-267693.
- [47] Struski J.: *Quasi- statyczne modelowanie sterowności samochodu*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Monografia 144, Kraków 1993.
- [48] Struski J.: *Kinematics of independent suspension of the rear drive wheels*. Teka Komisji Naukowo-Problemovej Motoryzacji 5, Kraków 1995, str. 161-169.
- [49] Struski J.: *Kinematyka pięciolącznikowego zawieszenia tylnych kół napędowych*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Monografia 210, str. 147-156, Kraków 1996.
- [50] Struski J, Kowalski M.: *Podstawy teoretyczne uogólnionych zagadnień z zakresu parametryzacji układów prowadzenia kół względem nadwozia*. Czasopismo Techniczne PK, z. 6-M/2008, str. 119-129.
- [51] Struski J, Kowalski M.: *Wpływ struktury równań więzów geometrycznych mechanizmów wielowahaczowych zawieszonych kół na efektywność numeryczną*. Materiały konferencyjne XV Warsztatów Naukowych PTSK. Krynica Zdrój, 7-8 wrzesień 2010.
- [52] Struski J, Kowalski M.: *Analiza kinematyki czterowahaczowego zawieszenia kół kierowanych za pomocą układów równań więzów geometrycznych o różnej strukturze*. Czasopismo Techniczne PK, z. 3-M/2012, str. 9-18.
- [53] Struski J, Kowalski M.: *Rozwiązywanie kinematyki zawieszonych kół za pomocą metody perturbacji*. Praca zbiorowa pod red. Władysława Mitiańca, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2014, str. 227-239.
- [54] Struski J., Wach K.: *Analiza przestrzenna mechanizmu pomiarowego translacji i rotacji kierowanego koła samochodu*, Opublikowane w Materiałach Konferencyjnych VIII Konferencji Naukowo - Technicznej „Problemy bezpieczeństwa w pojazdach samochodowych” Kielce 2012, str. 303-310.
- [55] Struski J., Wach K.: *Theoretical basis of determining the translation and rotation of steering wheel stub axle*. Engineering Transactions, 1(60)/2012, Warszawa 2012, str. 40-54.
- [56] Struski J., Wach K.: *Analiza mechanizmu przyrządu pomiarowego do wyznaczania translacji i rotacji zwrotnicy z kołem kierowanym*. Czasopismo Techniczne Politechniki Krakowskiej Zeszyt 8, Mechanika, Zeszyt 3-M, 2012.

- [57] Struski J., Wach K.: *Teoretyczne podstawy wyznaczania przemieszczeń liniowych oraz kątowych koła kierowanego*, Logistyka [Dokument elektroniczny]. – Dysk optyczny CD. – 2015, Nr 4, str. 5840-5849.
- [58] Struski J., Walczak S.: *Porównanie metod wyznaczania kinematyki zawieszenia kół kierowanych z kolumną McPhersona*. VII Międzynarodowe Sympozjum Instytutu Pojazdów Mechanicznych, Warszawa - Rynia, 8-10 grudzień 1999. Cz. 2, doskonalenie konstrukcji oraz metod eksploatacji pojazdów mechanicznych. - Warszawa : WAT, 1999. - str. 560-569.
- [59] Struski J., Wolak S.: *Kinematyka pięciowahaczowego zawieszenia kół kierowanych*. VII Międzynarodowe Sympozjum Instytutu Pojazdów Mechanicznych, Warszawa-Rynia, 8-10 grudzień 1999. Cz. 2, doskonalenie konstrukcji oraz metod eksploatacji pojazdów mechanicznych. - Warszawa : WAT, 1999. - str. 570-580.
- [60] Struski J. Wach W.: *Multidimensional optimization of the steered wheel multi-link suspension system*. SAE Technical Paper 2007-01-0849, 2007.
- [61] Suh C.H.: *Synthesis and analysis of suspension mechanisms with use of displacement matrices*, SAE Technical Paper 890098, 1989, p. 189–200.
- [62] Varziri S.M., Notash L.: *Kinematic calibration of a wire- actuated parallel robot*. Mechanism and Machine Theory 42 (2007), p. 960-976.
- [63] Wach W., Struski J.: *Rear Wheels Multi-Link Suspension Synthesis with the Application of a Virtual Mechanism*. SAE Technical Paper 2006-01-1376, 2006.
- [64] Walczak S.: *Analiza dynamicznych obciążeń różnych typów niezależnego zawieszenia kół samochodu*. Politechnika Krakowska. Rozprawa doktorska. Kraków 2003.
- [65] Zhao J-S., Jin H-Z., Zhao S., Chu F., Fen Z-J.: *Innovative concept design of an independent front suspension and steering system*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering 2010 224, p. 1487-1500.
- [66] Zhao J-S., Chu F., Feng Z.-J., Zhao S.: *Synthesis of a rear wheel suspension mechanism with pure rectilinear motion*. Trans. ASME, Journal of Mechanical Design, 131(10), 2009, 101007–1–101007–9.
- [67] <http://www.iskra-zmils.com.pl/>
- [68] <http://www.kistler.com/>
- [69] <http://lmw.mech.pk.edu.pl/>
- [70] <http://www.romer.com>
- [71] http://apps.hexagon.se/downloads123/hxmt/romer/romer-multi-gage/brochures/ROMER_Multi_Gage_brochure_pl.pdf

Spis ilustracji

Rys. 1. Schemat przyrządu TRS-1 do dynamicznego pomiaru kąta skrętu koła. Schemat został przedstawiony na tle elementów zawieszenia McPherson prawego przedniego koła samochodu [13]. a)- widok z przodu, b)- widok z góry	12
Rys. 2. Przyrządu TRS-1 zamocowany po wewnętrznej stronie koła kierowanego samochodu osobowego [13].	13
Rys. 3. Schemat przyrządu pomiarowego RV-3 firmy Corrsys- Datron [13].	13
Rys. 4. Widok przyrządu pomiarowego RV-3 zamocowanego na pojeździe [13]. a) Widok ogólny. b) Zbliżenie na koło badanego pojazdu. Widoczny jest również przyrząd pomiarowy TRS-1 zamontowany po wewnętrznej stronie koła.	14
Rys. 5. Schemat przyrządu pomiarowego RV-4 z zaznaczonymi pięcioma czujnikami kątów obrotu [3].	15
Rys. 6. Widok przyrządu pomiarowego RV-4 zamocowanego na pojeździe [3].	16
Rys. 7. Przyrząd do pomiaru translacji i rotacji koła kierowanego samochodu osobowego zamocowany na stanowisku pomiarowym [5], [8].	17
Rys. 8. Schemat mechanizmu czterowahaczowego zawieszenia kół kierowanych.	18
Rys. 9. Zależności kąta skrętu- δ_k i pochylenia- γ_k koła oraz względnych zmian poprzecznego położenia punktu związanego kołem ΔK_{yd} od ugięcia zawieszenia- q i przesunięcia listwy zębatej- u_p , wyznaczone na podstawie rozwiązania kinematyki zawieszenia.	22
Rys. 10. Zależności kątów rotacji zwrotnicy koła od ugięcia zawieszenia- q i przesunięcia listwy zębatej przekładni kierowniczej- u_p	22
Rys. 11. Schemat mechanizmu przyrządu służącego do wyznaczania przemieszczeń liniowych oraz kątowych koła kierowanego, którego struktura wzorowana jest na strukturze mechanizmu platformy Stewarta. 1- tarcza mocowana do obręczy koła, 2- płyta nieruchoma względem zwrotnicy koła.	24
Rys. 12. Zmiany wydłużeń łączników przyrządu pomiarowego o strukturze opartej o strukturę platformy Stewarta w zależności od ugięcia zawieszenia- q i przesunięcia listwy zębatej przekładni kierowniczej- u_p	27
Rys. 13. Schemat mechanizmu przyrządu służącego do wyznaczania przemieszczeń liniowych oraz kątowych koła kierowanego. Punkt D_1 jest wspólnym środkiem trzech przegubów kulowych, natomiast punkt D_2 jest środkiem dwóch takich przegubów. 1- tarcza mocowana do obręczy koła, 2- płyta nieruchoma względem zwrotnicy koła.	28
Rys. 14. Zmiany wydłużeń łączników przyrządu pomiarowego zbudowanego z sześciu łączników z zabudowanymi czujnikami przemieszczeń w zależności od ugięcia zawieszenia- q i przesunięcia listwy zębatej przekładni kierowniczej- u_p	30
Rys. 15. Schemat mechanizmu przyrządu służącego do wyznaczania przemieszczeń liniowych oraz kątowych koła kierowanego. Punkty D_i , $i=1(3)$ są środkami trzech współosiowych przegubów kulowych. 1- tarcza mocowana do obręczy koła, 2- tarcza nieruchoma względem zwrotnicy koła.	31
Rys. 16. Zmiany wydłużeń łączników przyrządu pomiarowego zbudowanego z dziewięciu łączników z zabudowanymi czujnikami przemieszczeń w zależności od ugięcia zawieszenia- q i przesunięcia listwy zębatej przekładni kierowniczej- u_p	34
Rys. 17. Zależności kątów skrętu δ_d i pochylenia γ_d koła oraz względnych zmian poprzecznego położenia punktu związanego z kołem ΔK_{yd} od ugięcia zawieszenia- q i przesunięcia listwy zębatej- u_p , wyznaczone za pomocą przyrządu pomiarowego o strukturze mechanizmu platformy Stewarta. Dla danych punktów mocowania przyrządu do koła i do nadwozia uzyskanie charakterystyk odpowiadających pełnemu zakresowi ruchów resorowania zawieszenia nie jest możliwe.	35
Rys. 18. Zależności kątów skrętu δ_d i pochylenia γ_d koła oraz względnych zmian poprzecznego położenia punktu związanego z kołem ΔK_{yd} od ugięcia zawieszenia- q i	

- przesunięcia listwy zębatej- u_p , wyznaczone za pomocą przyrządu pomiarowego zbudowanego z dziewięciu łączników z zabudowanymi czujnikami przemieszczeń liniowych. 37
- Rys. 19. Ułożyskowana piasta, za pomocą której mocowana jest wewnętrzna płyta przyrządu. Widoczna jest również nakrętka łącząca piastę z osią piasty koła badanego pojazdu. 41
- Rys. 20. Widok jednego z trzech przegubów D_j , $j=1(3)$. Ich charakterystyczną cechą jest to, że realizują zadanie kinematyczne trzech przegubów kulowych o wspólnym środku. 42
- Rys. 21. Przegubowe łożyska ślizgowe PGE 16X firmy ISKRA [67] wykorzystane do mocowania łączników przyrządu z płytą zewnętrzną i wewnętrzną. a) Widok ogólny. b) Wymiary. 42
- Rys. 22. a) Widok ogólny prototypu przyrządu pomiarowego. 1- płyta zewnętrzna przyrządu mocowana do nadwozia pojazdu, 2- płyta wewnętrzna przyrządu mocowana do koła pojazdu, 3- listwa pomiarowa czujnika optycznego. b) Zestaw przetworników analogowo- cyfrowych. 43
- Rys. 23. Jeden z dziewięciu optycznych czujników przemieszczeń liniowych wchodzących w skład przyrządu. Widoczna obudowa czujnika oraz listwa pomiarowa. 44
- Rys. 24. Zestaw przetworników analogowo- cyfrowych. 1- gniazdo typu USB B do komunikacji z komputerem, 2- gniazdo zasilania, 3- złącze DB9 – wejście sygnału z czujnika przemieszczenia liniowego środkowego drążka mechanizmu zwrotniczego (listwy zębatej), 4- złącza DB9- wejścia sygnałów z optycznych czujników zmian długości łączników przyrządu pomiarowego. 44
- Rys. 25. Ramię pomiarowe firmy ROMER Multi Gage, za pomocą którego wyznaczone zostały współrzędne punktów H_i dla $i=1(9)$. a) Widok ogólny. b) Zbliżenie na końcówkę pomiarową. 45
- Rys. 26. Płyta zewnętrzna przyrządu wraz z przymocowanymi, za pomocą przegubów kulowych, optycznymi czujnikami przemieszczeń liniowych unieruchomiona na stole pomiarowym. Widoczne jest również ramię firmy ROMER, za pomocą którego realizowano pomiary oraz komputer przenośny wraz z odpowiednim oprogramowaniem, na dysku którego rejestrowane były wyniki pomiarów. 46
- Rys. 27. Zrzut ekranu programu, za pomocą którego rejestrowano wyniki pomiarów wykonywanych ramieniem firmy ROMER. Widoczna płaszczyzna PLN1, okręgi CIR1 i CIR2, odcinek LIN1, początek układu współrzędnych PNT3 oraz kierunki i zwroty osi x i z, kierunek i zwrot osi y został przyjęty w ten sposób, aby układ był prawoskrętny i ortogonalny. Szczegółowy opis w tekście. 47
- Rys. 28. Pomiar współrzędnych środków przegubów kulowych H_i dla $i=1(9)$ za pomocą ramienia współrzędnościowego firmy ROMER. 48
- Rys. 29. Okno programu, za pomocą którego rejestrowano wyniki pomiarów wykonywanych ramieniem firmy ROMER. Widoczny jest układ współrzędnych, obiekty, które zostały wykorzystane do jego zbudowania (Patrz Rys. 27.) oraz położenie przegubów kulowych, których współrzędnych poszukiwano (oznaczenia SPH1÷SPH9. 50
- Rys. 30. Płyta zewnętrzna przyrządu pomiarowego w widoku ogólnym. Na zdjęcie naniesiony został układ współrzędnych kartezjańskich (Nieprzedstawiona na rysunku oś y układu skierowana jest w stronę obserwatora.) oraz położenia przegubów kulowych łączących płytę z łącznikami przyrządu. 50
- Rys. 31. Poglądowy rysunek płyty wewnętrznej przyrządu pomiarowego mocowanej na kole badanego pojazdu. Zaznaczono osie x_w oraz z_w układu współrzędnych płyty, początek układu znajduje się w osi piasty koła, oś y_w pokrywa się z osią y układu związanego z płytą zewnętrzną i usytuowana jest w taki sposób, aby układ był układem prawoskrętnym i ortogonalnym. Na rysunku zaznaczone zostały również położenia punktów D_j ; $j=1(3)$ 51

Rys. 32. Widok ogólny płyty wewnętrznej przyrządu pomiarowego mocowanej na kole badanego pojazdu. Zaznaczono osie x_w oraz z_w układu współrzędnych płyty, początek układu znajduje się w osi piasty koła (pokrywającej się z osią, widoczną na zdjęciu, ułożyskowanej piasty mocującej płytę), oś y_w pokrywa się z osią y układu związanego z płytą zewnętrzną i usytuowana jest w taki sposób, aby układ był układem prawoskrętnym i ortogonalnym. Na rysunku zaznaczone zostały również położenia punktów D_j ; $j=1(3)$.	52
Rys. 33. Widok ogólny pojazdu z zamocowanym prototypowym przyrządem pomiarowym. Widoczne obrotnice pod kołami osi przedniej oraz odpowiedniej wysokości płyty pod kołami osi tylnej.	54
Rys. 34. Prototypowy przyrząd pomiarowy zamocowany na lewym kole samochodu osobowego.	54
Rys. 35. Trzpień ustalający położenie początku układu współrzędnych $\{xyz\}$ związanego z, unieruchomioną względem nadwozia, płytą zewnętrzną przyrządu pomiarowego.	55
Rys. 36. Zamocowany w badanym pojeździe optyczny przetwornik przemieszczeń liniowych do pomiaru przemieszczeń środkowego drążka mechanizmu zwrotniczego układu kierowniczego. Widok z tyłu. 1- przetwornik analogowo- cyfrowy, 2- obudowa przetwornika przemieszczeń liniowych, 3- przesuwna listwa czujnika optycznego, 4- obudowa zębatkowej przekładni kierowniczej.	56
Rys. 37. Zamocowany w badanym pojeździe optyczny przetwornik przemieszczeń liniowych do pomiaru przemieszczeń środkowego drążka mechanizmu zwrotniczego układu kierowniczego. Widok z boku. 1- przegub kulowy łączący środkowy i skrajny (lewy) drążek mechanizmu zwrotniczego układu kierowniczego. 2- obudowa przekładni kierowniczej, 3- obudowa przetwornika przemieszczeń liniowych, 4- przesuwna listwa czujnika optycznego, 5- przetwornik analogowo- cyfrowy.	56
Rys. 38. Schemat toru pomiarowego.	57
Rys. 39. Widok ogólny toru pomiarowego w trakcie badań stanowiskowych. 1- komputer przenośny, na którym rejestrowano dane z czujników, 2- przetwornik analogowo- cyfrowy, 3- prototypowy przyrząd pomiarowy zamocowany na pojeździe, 4- akumulator zasilający urządzenie.	57
Rys. 40. Zmiany wydłużeń łączników prototypowego przyrządu pomiarowego.	59
Rys. 41. Zmiany wydłużeń łączników l_1 , l_2 i l_3 prototypowego przyrządu pomiarowego, związanych z przegubem D_1 , w funkcji kolejnych kroków pomiaru.	60
Rys. 42. Zmiany wydłużeń łączników l_7 , l_8 i l_9 prototypowego przyrządu pomiarowego, związanych z przegubem D_2 , w funkcji kolejnych kroków pomiaru.	60
Rys. 43. Zmiany wydłużeń łączników l_4 , l_5 i l_6 prototypowego przyrządu pomiarowego, związanych z przegubem D_3 , w funkcji kolejnych kroków pomiaru.	61
Rys. 44. Przemieszczenie listwy zębatej układu kierowniczego u_p w funkcji kolejnych kroków pomiaru.	61
Rys. 45. Przemieszczenie listwy zębatej układu kierowniczego u_p , w funkcji kolejnych kroków pomiaru, przy konstrukcyjnym obciążeniu pojazdu.	62
Rys. 46. Zmiany wydłużeń, związanych z punktem D_3 , łączników s_4 , s_5 , s_6 prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji kolejnych kroków pomiaru, przy konstrukcyjnym obciążeniu pojazdu.	63
Rys. 47. Zmiany wydłużeń, związanych z punktem D_3 , łączników s_4 , s_5 , s_6 prototypowego przyrządu pomiarowego, w zależności od przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p , przy konstrukcyjnym obciążeniu pojazdu.	63
Rys. 48. Zmiany wydłużeń, związanych z punktem D_2 , łączników s_7 , s_8 , s_9 prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji kolejnych kroków pomiaru, przy konstrukcyjnym obciążeniu pojazdu.	64

Rys. 49. Zmiany wydłużeń, związanych z punktem D_2 , łączników s_7, s_8, s_9 prototypowego przyrządu pomiarowego, w zależności od przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p , przy konstrukcyjnym obciążeniu pojazdu.	64
Rys. 50. Przemieszczenie listwy zębatej układu kierowniczego u_p w funkcji kolejnych kroków pomiaru- pojazd odciążony.	65
Rys. 51. Zmiany wydłużeń, związanych z punktem D_3 , łączników s_4, s_5, s_6 prototypowego przyrządu pomiarowego, w zależności od przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p - pojazd odciążony.	65
Rys. 52. Zmiany wydłużeń, związanych z punktem D_2 , łączników s_7, s_8, s_9 prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji kolejnych kroków pomiaru- pojazd odciążony.	66
Rys. 53. Zmiany wydłużeń, związanych z punktem D_2 , łączników s_7, s_8, s_9 prototypowego przyrządu pomiarowego, w zależności od przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p - pojazd odciążony.	66
Rys. 54. Przemieszczenie listwy zębatej układu kierowniczego u_p w funkcji kolejnych kroków pomiaru, przy obciążeniu pojazdu siłą 3 kN.	67
Rys. 55. Zmiany wydłużeń, związanych z punktem D_3 , łączników s_4, s_5, s_6 prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji kolejnych kroków pomiaru, przy obciążeniu pojazdu siłą 3 kN.	67
Rys. 56. Zmiany wydłużeń, związanych z punktem D_3 , łączników s_4, s_5, s_6 prototypowego przyrządu pomiarowego, w zależności od przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p , przy obciążeniu pojazdu siłą 3 kN.	68
Rys. 57. Zmiany wydłużeń, związanych z punktem D_2 , łączników s_7, s_8, s_9 prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji kolejnych kroków pomiaru, przy obciążeniu pojazdu siłą 3 kN.	68
Rys. 58. Zmiany wydłużeń, związanych z punktem D_2 , łączników s_7, s_8, s_9 prototypowego przyrządu pomiarowego, w zależności od przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p , przy obciążeniu pojazdu siłą 3 kN.	69
Rys. 59. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_1 , łącznika s_3 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji kolejnych kroków pomiaru dla różnych ugięć zawieszenia.	69
Rys. 60. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_1 , łącznika s_3 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczenia listwy zębatej u_p dla różnych ugięć zawieszenia.	70
Rys. 61. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_3 , łącznika s_5 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji kolejnych kroków pomiaru dla różnych ugięć zawieszenia.	70
Rys. 62. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_3 , łącznika s_5 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczenia listwy zębatej u_p dla różnych ugięć zawieszenia.	71
Rys. 63. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_3 , łącznika s_6 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczenia listwy zębatej u_p dla różnych ugięć zawieszenia.	71
Rys. 64. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_2 , łącznika s_7 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji kolejnych kroków pomiaru dla różnych ugięć zawieszenia.	72
Rys. 65. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_2 , łącznika s_7 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczenia listwy zębatej u_p dla różnych ugięć zawieszenia.	72
Rys. 66. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_2 , łącznika s_8 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczenia listwy zębatej u_p dla różnych ugięć zawieszenia.	73

Rys. 67. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_2 , łącznika s_9 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczenia listwy zębatej u_p dla różnych ugięć zawieszenia.....	73
Rys. 68. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_1 , łącznika s_3 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p oraz ugięcia zawieszenia q	74
Rys. 69. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_3 , łącznika s_4 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p oraz ugięcia zawieszenia q	74
Rys. 70. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_3 , łącznika s_5 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p oraz ugięcia zawieszenia q	75
Rys. 71. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_2 , łącznika s_8 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p oraz ugięcia zawieszenia q	75
Rys. 72. Kąt skrętu δ lewego koła samochodu Skoda Octavia I, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego oraz na podstawie pomiarów referencyjnych, wykonanych przy użyciu kątomierza, w funkcji kolejnych kroków pomiaru, przy konstrukcyjnym obciążeniu pojazdu.....	76
Rys. 73. Kąt skrętu δ lewego koła samochodu Skoda Octavia I, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego oraz na podstawie pomiarów referencyjnych, wykonanych przy użyciu kątomierza, w funkcji przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p , przy konstrukcyjnym obciążeniu pojazdu.....	76
Rys. 74. Kąt pochylenia γ lewego koła samochodu Skoda Octavia I, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji kolejnych kroków pomiaru, przy konstrukcyjnym obciążeniu pojazdu.....	77
Rys. 75. Kąt pochylenia γ lewego koła samochodu Skoda Octavia I, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p , przy konstrukcyjnym obciążeniu pojazdu.....	77
Rys. 76. Poprzeczne przemieszczenie ΔK_y punktu związanego z lewym kołem samochodu Skoda Octavia I, wyznaczone za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji kolejnych kroków pomiaru, przy konstrukcyjnym obciążeniu pojazdu.....	78
Rys. 77. Poprzeczne przemieszczenie ΔK_y punktu związanego z lewym kołem samochodu Skoda Octavia I, wyznaczone za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p , przy konstrukcyjnym obciążeniu pojazdu.....	78
Rys. 78. Kąt skrętu δ lewego koła samochodu Skoda Octavia I, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego oraz na podstawie pomiarów referencyjnych, wykonanych przy użyciu kątomierza, w funkcji kolejnych kroków pomiaru- pojazd odciążony.....	79
Rys. 79. Kąt skrętu δ lewego koła samochodu Skoda Octavia I, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego oraz na podstawie pomiarów referencyjnych, wykonanych przy użyciu kątomierza, w funkcji przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p - pojazd odciążony.....	79
Rys. 80. Poprzeczne przemieszczenie ΔK_y punktu związanego z lewym kołem samochodu Skoda Octavia I, wyznaczone za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p - pojazd odciążony.....	80
Rys. 81. Kąt skrętu δ lewego koła samochodu Skoda Octavia I, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego oraz na podstawie pomiarów referencyjnych,	

wykonanych przy użyciu kątomierza, w funkcji kolejnych kroków pomiaru, przy obciążeniu pojazdu siłą 3 kN.	80
Rys. 82. Kąt skrętu δ lewego koła samochodu Skoda Octavia I, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego oraz na podstawie pomiarów referencyjnych, wykonanych przy użyciu kątomierza, w funkcji przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p , przy obciążeniu pojazdu siłą 3 kN.	81
Rys. 83. Kąt pochylenia γ lewego koła samochodu Skoda Octavia I, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji kolejnych kroków pomiaru, przy obciążeniu pojazdu siłą 3 kN.	81
Rys. 84. Kąt pochylenia γ lewego koła samochodu Skoda Octavia I, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p , przy obciążeniu pojazdu siłą 3 kN.	82
Rys. 85. Poprzeczne przemieszczenie ΔK_y punktu związanego z lewym kołem samochodu Skoda Octavia I, wyznaczone za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji kolejnych kroków pomiaru, przy obciążeniu pojazdu siłą 3 kN.	82
Rys. 86. Poprzeczne przemieszczenie ΔK_y punktu związanego z lewym kołem samochodu Skoda Octavia I, wyznaczone za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p , przy obciążeniu pojazdu siłą 3 kN.	83
Rys. 87. Kąt skrętu δ lewego koła samochodu Skoda Octavia I, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji kolejnych kroków pomiaru dla różnych ugięć zawieszenia.	83
Rys. 88. Kąt skrętu δ lewego koła samochodu Skoda Octavia I, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p dla różnych ugięć zawieszenia.	84
Rys. 89. Kąt pochylenia γ lewego koła samochodu Skoda Octavia I, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji kolejnych kroków pomiaru dla różnych ugięć zawieszenia.	84
Rys. 90. Kąt pochylenia γ lewego koła samochodu Skoda Octavia I, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p dla różnych ugięć zawieszenia.	85
Rys. 91. Poprzeczne przemieszczenie ΔK_y punktu związanego z lewym kołem samochodu Skoda Octavia I, wyznaczone za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji kolejnych kroków pomiaru dla różnych ugięć zawieszenia.	85
Rys. 92. Poprzeczne przemieszczenie ΔK_y punktu związanego z lewym kołem samochodu Skoda Octavia I, wyznaczone za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p dla różnych ugięć zawieszenia.	86
Rys. 93. Kąt skrętu δ lewego koła samochodu Skoda Octavia I, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p oraz ugięcia zawieszenia q	86
Rys. 94. Kąt pochylenia γ lewego koła samochodu Skoda Octavia I, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p oraz ugięcia zawieszenia q	87
Rys. 95. Poprzeczne przemieszczenie ΔK_y punktu związanego z lewym kołem samochodu Skoda Octavia I, wyznaczone za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p oraz ugięcia zawieszenia q	87
Rys. 96. Przygotowany do pomiarów stanowiskowych samochód Volkswagen Passat B5 w widoku ogólnym. Widoczny jest prototypowy przyrząd pomiarowy zamocowany przy	

lewym kole pojazdu, zestaw przetworników analogowo- cyfrowych, akumulator zasilający urządzenie oraz laptop, na dysku którego rejestrowano wyniki pomiarów. Pojazd ustawiony został na płytach obrotowo- przesuwnych oraz na specjalnych najazdach o takiej samej wysokości.....	88
Rys. 97. Zbliżenie na lewe koło samochodu Volkswagen Passat z zamocowany przyrządem do pomiaru liniowych oraz kątowych przemieszczeń koła względem nadwozia. Widoczne są uchwyty, za pomocą których przyrząd został unieruchomiony względem nadwozia, jak również ramiona prowadzące, których zadaniem było odebranie płycie wewnętrznej przyrządu możliwości obrotu względem osi y pokrywającej się z osią obrotu koła.....	89
Rys. 98. Zbliżenie na zawieszenie lewego przedniego koła samochodu Volkswagen Passat B5 przygotowanego do badań stanowiskowych. 1- przetwornik analogowo- cyfrowy, 2- optyczny czujnik przemieszczeń liniowych służący do pomiaru przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego.	89
Rys. 99. Optyczny czujnik przemieszczeń liniowych przymocowany do obudowy przegubu kulowego łączącego listwę zębatą układu kierowniczego z lewym skrajnym drążkiem mechanizmu zwrotniczego. Zadaniem czujnika był pomiar przemieszczeń listwy zębatej mechanizmu zwrotniczego.	90
Rys. 100. Przemieszczenie listwy zębatej układu kierowniczego u_p , w funkcji kolejnych kroków pomiaru, przy konstrukcyjnym obciążeniu pojazdu.	90
Rys. 101. Zmiany wydłużeń łączników przyrządu pomiarowego w przypadku prób stanowiskowych przeprowadzonych przy konstrukcyjnym obciążeniu pojazdu.	92
Rys. 102. Zmiany wydłużeń, związanych z punktem D_1 , łączników s_1, s_2, s_3 prototypowego przyrządu pomiarowego, w zależności od przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p , przy konstrukcyjnym obciążeniu pojazdu.	93
Rys. 103. Zmiany wydłużeń, związanych z punktem D_3 , łączników s_4, s_5, s_6 prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji kolejnych kroków pomiaru, przy konstrukcyjnym obciążeniu pojazdu.	93
Rys. 104. Zmiany wydłużeń, związanych z punktem D_3 , łączników s_4, s_5, s_6 prototypowego przyrządu pomiarowego, w zależności od przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p , przy konstrukcyjnym obciążeniu pojazdu.	94
Rys. 105. Zmiany wydłużeń, związanych z punktem D_2 , łączników s_7, s_8, s_9 prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji kolejnych kroków pomiaru, przy konstrukcyjnym obciążeniu pojazdu.	94
Rys. 106. Zmiany wydłużeń, związanych z punktem D_2 , łączników s_7, s_8, s_9 prototypowego przyrządu pomiarowego, w zależności od przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p , przy konstrukcyjnym obciążeniu pojazdu.	95
Rys. 107. Przemieszczenie listwy zębatej układu kierowniczego u_p w funkcji kolejnych kroków pomiaru- pojazd odciążony.	95
Rys. 108. Przykładowe zmiany wydłużeń łączników przyrządu pomiarowego w przypadku prób stanowiskowych przeprowadzonych dla pojazdu odciążonego.	97
Rys. 109. Zmiany wydłużeń, związanych z punktem D_3 , łączników s_4, s_5, s_6 prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji kolejnych kroków pomiaru - pojazd odciążony.	97
Rys. 110. Zmiany wydłużeń, związanych z punktem D_3 , łączników s_4, s_5, s_6 prototypowego przyrządu pomiarowego, w zależności od przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p - pojazd odciążony.	98
Rys. 111. Zmiany wydłużeń, związanych z punktem D_2 , łączników s_7, s_8, s_9 prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji kolejnych kroków pomiaru - pojazd odciążony.	98

Rys. 112. Zmiany wydłużeń, związanych z punktem D_2 , łączników s_7, s_8, s_9 prototypowego przyrządu pomiarowego, w zależności od przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p - pojazd odciążony.....	99
Rys. 113. Przemieszczenie listwy zębatej układu kierowniczego u_p w funkcji kolejnych kroków pomiaru, przy obciążeniu pojazdu siłą 3 kN.....	99
Rys. 114. Zmiany wydłużeń łączników przyrządu pomiarowego w przypadku prób stanowiskowych przeprowadzonych dla pojazdu dociążonego siłą 3 kN.....	101
Rys. 115. Zmiany wydłużeń, związanych z punktem D_3 , łączników s_4, s_5, s_6 prototypowego przyrządu pomiarowego, w zależności od przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p , przy obciążeniu pojazdu siłą 3 kN.	101
Rys. 116. Zmiany wydłużeń, związanych z punktem D_2 , łączników s_7, s_8, s_9 prototypowego przyrządu pomiarowego, w zależności od przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p , przy obciążeniu pojazdu siłą 3 kN.	102
Rys. 117. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_1 , łącznika s_1 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji kolejnych kroków pomiaru dla różnych ugięć zawieszenia....	102
Rys. 118. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_1 , łącznika s_1 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p dla różnych ugięć zawieszenia.	103
Rys. 119. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_3 , łącznika s_4 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p dla różnych ugięć zawieszenia.	103
Rys. 120. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_3 , łącznika s_5 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji kolejnych kroków pomiaru dla różnych ugięć zawieszenia....	104
Rys. 121. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_3 , łącznika s_5 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p dla różnych ugięć zawieszenia.	104
Rys. 122. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_3 , łącznika s_6 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji kolejnych kroków pomiaru dla różnych ugięć zawieszenia....	105
Rys. 123. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_3 , łącznika s_6 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p dla różnych ugięć zawieszenia.	105
Rys. 124. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_2 , łącznika s_7 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji kolejnych kroków pomiaru dla różnych ugięć zawieszenia....	106
Rys. 125. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_2 , łącznika s_7 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p dla różnych ugięć zawieszenia.	106
Rys. 126. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_2 , łącznika s_8 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p dla różnych ugięć zawieszenia.	107
Rys. 127. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_2 , łącznika s_9 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p dla różnych ugięć zawieszenia.	107
Rys. 128. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_1 , łącznika s_1 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p oraz ugięcia zawieszenia q	108
Rys. 129. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_3 , łącznika s_4 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p oraz ugięcia zawieszenia q	108

Rys. 130. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_3 , łącznika s_5 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p oraz ugięcia zawieszenia q .	109
Rys. 131. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_3 , łącznika s_6 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p oraz ugięcia zawieszenia q .	109
Rys. 132. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_2 , łącznika s_7 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p oraz ugięcia zawieszenia q .	110
Rys. 133. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_2 , łącznika s_8 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p oraz ugięcia zawieszenia q .	110
Rys. 134. Zmiany wydłużeń, związanego z punktem D_2 , łącznika s_9 prototypowego przyrządu pomiarowego w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p oraz ugięcia zawieszenia q .	111
Rys. 135. Kąt skrętu δ lewego koła samochodu Volkswagen Passat, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego oraz na podstawie pomiarów referencyjnych, wykonanych przy użyciu kątomierza, w funkcji kolejnych kroków pomiaru, przy konstrukcyjnym obciążeniu pojazdu.	111
Rys. 136. Kąt skrętu δ lewego koła samochodu Volkswagen Passat, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego oraz na podstawie pomiarów referencyjnych, wykonanych przy użyciu kątomierza, w funkcji przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p , przy konstrukcyjnym obciążeniu pojazdu.	112
Rys. 137. Kąt pochylenia γ lewego koła samochodu Volkswagen Passat, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji kolejnych kroków pomiaru, przy konstrukcyjnym obciążeniu pojazdu.	112
Rys. 138. Poprzeczne przemieszczenie ΔK_y punktu związanego z lewym kołem samochodu Volkswagen Passat, wyznaczone za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji kolejnych kroków pomiaru, przy konstrukcyjnym obciążeniu pojazdu.	113
Rys. 139. Poprzeczne przemieszczenie ΔK_y punktu związanego z lewym kołem samochodu Volkswagen Passat, wyznaczone za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p , przy konstrukcyjnym obciążeniu pojazdu.	113
Rys. 140. Kąt skrętu δ lewego koła samochodu Volkswagen Passat, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego oraz na podstawie pomiarów referencyjnych, wykonanych przy użyciu kątomierza, w funkcji kolejnych kroków pomiaru- pojazd odciążony.	114
Rys. 141. Kąt skrętu δ lewego koła samochodu Volkswagen Passat, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego oraz na podstawie pomiarów referencyjnych, wykonanych przy użyciu kątomierza, w funkcji przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p - pojazd odciążony.	114
Rys. 142. Kąt pochylenia γ lewego koła samochodu Volkswagen Passat, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji kolejnych kroków pomiaru- pojazd odciążony.	115
Rys. 143. Kąt pochylenia γ lewego koła samochodu Volkswagen Passat, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p - pojazd odciążony.	115
Rys. 144. Poprzeczne przemieszczenie ΔK_y punktu związanego z lewym kołem samochodu Volkswagen Passat, wyznaczone za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji kolejnych kroków pomiaru- pojazd odciążony.	116

- Rys. 145. Poprzeczne przemieszczenie ΔK_y punktu związanego z lewym kołem samochodu Volkswagen Passat, wyznaczone za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p - pojazd odciążony... 116
- Rys. 146. Kąt skrętu δ lewego koła samochodu Volkswagen Passat, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego oraz na podstawie pomiarów referencyjnych, wykonanych przy użyciu kątomierza, w funkcji kolejnych kroków pomiaru, przy obciążeniu pojazdu siłą 3 kN. 117
- Rys. 147. Kąt skrętu δ lewego koła samochodu Volkswagen Passat, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego oraz na podstawie pomiarów referencyjnych, wykonanych przy użyciu kątomierza, w funkcji przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p , przy obciążeniu pojazdu siłą 3 kN. 117
- Rys. 148. Poprzeczne przemieszczenie ΔK_y punktu związanego z lewym kołem samochodu Volkswagen Passat, wyznaczone za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji kolejnych kroków pomiaru, przy obciążeniu pojazdu siłą 3 kN..... 118
- Rys. 149. Poprzeczne przemieszczenie ΔK_y punktu związanego z lewym kołem samochodu Volkswagen Passat, wyznaczone za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p , przy obciążeniu pojazdu siłą 3 kN..... 118
- Rys. 150. Kąt skrętu δ lewego koła samochodu Volkswagen Passat, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji kolejnych kroków pomiaru dla różnych ugięć zawieszenia. 119
- Rys. 151. Kąt skrętu δ lewego koła samochodu Volkswagen Passat, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p dla różnych ugięć zawieszenia. 119
- Rys. 152. Kąt pochylenia γ lewego koła samochodu Volkswagen Passat, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji kolejnych kroków pomiaru dla różnych ugięć zawieszenia. 120
- Rys. 153. Kąt pochylenia γ lewego koła samochodu Volkswagen Passat, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p dla różnych ugięć zawieszenia. 120
- Rys. 154. Poprzeczne przemieszczenie ΔK_y punktu związanego z lewym kołem samochodu Volkswagen Passat, wyznaczone za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji kolejnych kroków pomiaru dla różnych ugięć zawieszenia. 121
- Rys. 155. Poprzeczne przemieszczenie ΔK_y punktu związanego z lewym kołem samochodu Volkswagen Passat, wyznaczone za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego u_p dla różnych ugięć zawieszenia..... 121
- Rys. 156. Kąt skrętu δ lewego koła samochodu Volkswagen Passat, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p oraz ugięcia zawieszenia q 122
- Rys. 157. Kąt pochylenia γ lewego koła samochodu Volkswagen Passat, wyznaczony za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p oraz ugięcia zawieszenia q 122
- Rys. 158. Poprzeczne przemieszczenie ΔK_y punktu związanego z lewym kołem samochodu Volkswagen Passat, wyznaczone za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego, w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p oraz ugięcia zawieszenia q 123
- Rys. 159. Porównanie charakterystyki kąta skrętu δ lewego koła samochodu osobowego Volkswagen Passat, wyznaczonej na podstawie wyników pomiaru z wykorzystaniem prototypowego przyrządu pomiarowego oraz na drodze symulacji numerycznej, w

funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p . Pojazd obciążony masą własną.....	123
Rys. 160. Porównanie charakterystyki kąta pochylenia γ lewego koła samochodu osobowego Volkswagen Passat, wyznaczonej na podstawie wyników pomiaru z wykorzystaniem prototypowego przyrządu pomiarowego oraz na drodze symulacji numerycznej, w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p . Pojazd obciążony siłą 3 kN.....	124
Rys. 161. Porównanie charakterystyki poprzecznego przemieszczenia ΔK_y punktu związanego z lewym kołem samochodu osobowego Volkswagen Passat, wyznaczonej na podstawie wyników pomiaru z wykorzystaniem prototypowego przyrządu pomiarowego oraz na drodze symulacji numerycznej, w funkcji przemieszczeń listwy zębatej układu kierowniczego u_p . Pojazd obciążony siłą 3 kN.....	124

Spis tabel

Tab. 1. Porównanie podstawowych cech przyrządów RV-3 i RV-4.....	16
Tab. 2. Wyniki pomiarów współrzędnych środków przegubów H_i , $i = 1(9)$ uzyskane za pomocą manipulatora firmy ROMER. Wyniki pomiarów z WRP były zmierzone z dokładnością 3 miejsc po przecinku. Z punktu widzenia realizacji celu zostały zaokrąglone do jednego miejsca po przecinku.....	48
Tab. 3. Przykładowe, maksymalne, wartości niepewności pośredniego pomiaru kąta skrętu koła $\Delta\delta$, kąta pochylenia koła $\Delta\gamma$ oraz poprzecznego przemieszczenia punktu związanego z kołem $\Delta\Delta K_y$	126

Streszczenie

Praca dotyczy pomiaru przemieszczeń liniowych oraz kątowych koła kierowanego względem nadwozia samochodu osobowego. W części teoretycznej rozwiązane zostały równania więzów geometrycznych mechanizmu czterowahaczowego zawieszenia kół kierowanych oraz wykonane jego charakterystyki. Przeprowadzono analizę możliwych struktur mechanizmów przyrządu pomiarowego, a następnie na jej podstawie zbudowane zostało prototypowe urządzenie. Przeprowadzone zostały próby stanowiskowe z wykorzystaniem zaproponowanego przyrządu, na podstawie których wyznaczono charakterystyki zawieszenia samochodu w funkcji jego ugięcia oraz przemieszczenia listwy zębatej układu kierowniczego. Przeprowadzona została analiza niepewności uzyskanych wyników.

Summary

The work concerns measurements of angular and linear displacements of a steered wheel against a passenger vehicle body. In the theoretical part, equations of geometrical constraints of a four-link suspension mechanism of a steered wheels were solved and a suspension's characteristics were made. An analysis of possible structures of a measuring instrument's mechanism was conducted and then, basing on it, the prototype device was build. A bench testing using the proposed instrument were conducted, on the basis of which characteristics of vehicle's suspension as a function of its deflection and a rack displacement were made. An analysis of the measurements uncertainty was conducted.

Zusammenfassung

Der Gegenstand der Arbeit ist die Messung von linearen und axialen Verlagerungen des Lenkrades in bezug auf den Fahrzeugaufbau. In dem theoretischen Teil wurden Gleichungen geometrischer Knoten einer 4-LenkerAufhängung gelöst sowie ihre Charakteristik dargestellt. Analysiert wurden im weiteren mögliche Strukturen von den in den Messgeräten verwendeten Mechanismen und aufgrund der erzielten Ergebnisse ein prototypisches Messgerät konstruiert. Durchgeführt wurden dann Prüfstand-Versuche unter Anwendung des Messgeräts und auf deren Grundlage Kennlinien für die Fahrzeugaufhängung bezüglich ihrer Verformung sowie Verlagerung des Zahnstange des Lenkrades ermittelt. Zum Schluss wurde die Messgenauigkeit der Ergebnisse überprüft.



