

# PROJEKT I WALIDACJA URZĄDZEŃ POMIAROWYCH – SIŁY W LINIE I KĄTA WYCHYLENIA LINY ZAWIESIA SUWNICY

Grzegorz Gembalczyk<sup>1a</sup>, Sławomir Duda<sup>1b</sup>

<sup>1</sup>Katedra Mechaniki Stosowanej, Politechnika Śląska

<sup>a</sup>Grzegorz.Gembalczyk@polsl.pl, <sup>b</sup>Sławomir.Duda@polsl.pl

## Streszczenie

W artykule przedstawiono rozwiązania konstrukcyjne dwóch urządzeń pomiarowych, zaprojektowanych dla układu sterowania zawiesiem suwnicy specjalnego przeznaczenia. Pierwszym z nich jest urządzenie służące do pomiaru kąta wychYLENIA liny zawiesia suwnicy, natomiast drugie to tensometryczny czujnik do pomiaru siły w linie. Pokazano rezultaty przeprowadzonych analiz stereomechanicznych obu konstrukcji, a także rezultaty testów mających na celu zweryfikowanie poprawności działania urządzeń.

**Słowa kluczowe:** urządzenia pomiarowe, projektowanie, walidacja

## DESIGN AND VALIDATION OF DEVICES FOR MEASURING THE FORCE AND THE ANGLE OF INCLINATION ROPE IN CRANE

### Summary

The paper presents design solutions of two measuring devices, designed for mechatronic crane control system. The first device is use for measuring the angle of the rope deviation. The second designed device is a strain gauge load cell, dedicated to measure the force in the rope. To check that the devices are working properly, tested it. In the paper shown the results of this tests. The article contained also results of the optimization of the superstructure.

**Keywords:** measuring devices, design, validation

### 1. WSTĘP

Urządzenia mechatroniczne, dzięki zastosowaniu elektronicznych układów regulacji, cechują się możliwością aktywnego sterowania ruchem układów mechanicznych. Do prawidłowego działania takiego systemu niezbędna jest znajomość współrzędnych stanu urządzenia. Zmierzone wartości przesyłane są do układu regulacji, który wytwarza sygnał sterujący  $u(t)$ , wprowadzany dalej do obiektu regulacji w celu zmniejszenia uchybu regulacji. Sygnał wejściowy takiego systemu sterowania jest różnicą pomiędzy wartością zadaną a rzeczywistą.

Integralną częścią urządzeń mechatronicznych są zatem sensory, które przetwarzają mierzalne wielkości mechaniczne na sygnał elektryczny. Nierzadko elemen-

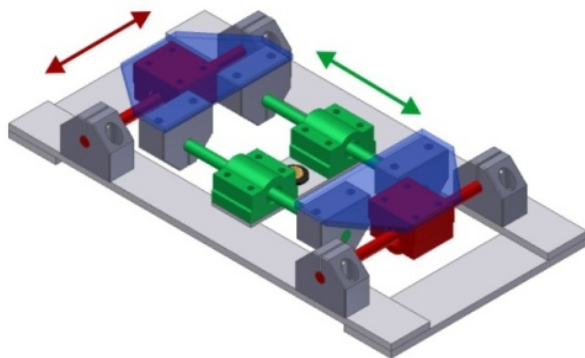
ty pomiarowe dedykowane są pod konkretne urządzenia. Zdarza się tak w sytuacjach, kiedy pomiaru wymaganych wielkości nie da się zrealizować za pomocą typowych, dostępnych na rynku rozwiązań. Podobnie jest w sytuacji, kiedy typowe czujniki z różnych względów nie dają się zaaplikować w maszynie. Urządzenia pomiarowe trzeba wtedy zaprojektować. W artykule omówiono projekty dwóch urządzeń, skonstruowanych z powodów wyżej wymienionych. Oba przetworniki pomiarowe budowano pod konkretny układ mechatroniczny.

Urządzenia do pomiaru kąta wychYLENIA liny, stosowane w podobnych konstrukcjach, nie spełniały postawionych wymagań. W przypadku czujnika do

pomiaru siły w linii podstawowym ograniczeniem był sposób montażu. Przetworniki siły dostępne są na rynku w bardzo wielu kształtach, lecz bez elementów przejściowych nie dałoby się ich zamontować na żądanej pozycji. Stosowanie adapterów podnosi jednak koszty, w związku z czym bardziej ekonomicznym rozwiązaniem było zaprojektowanie czujnika siły, dostosowanego pod urządzenie docelowe.

## 2. URZĄDZENIE DO POMIARU KĄTA WYCHYLENIA LINY ZAWIESIA SUWNICY

Koncepcja urządzenia do pomiaru kąta wychYLENIA liny zawiesia suwnicy opiera się na pomiarze współrzędnych kartezjańskich osi liny w płaszczyźnie poziomej, oddalonej o pewną odległość od tzw. punktu stałego. Punktem stałym jest tu nazwany otwór o ustalonym położeniu, przez który przechodzi lina. Pomiar ten w sposób pośredni pozwala wyznaczyć kąt wychYLENIA liny. Urządzenie wyposażone zostało w dwoje sań, które umożliwiają pomiar przemieszczenia w dwóch prostopadłych kierunkach. Kierunki ruchów sań zaznaczono strzałkami na zamieszczonym rysunku. W saniach zainstalowano przegub kulisty, przez który przechodzi lina, wprawiając cały układ w ruch. Do pomiaru przemieszczeń liniowych wykorzystano czujniki indukcyjne transformatorowe o zakresie pomiarowym 30 mm. W urządzeniu zastosowano łożyska ślizgowe z wkładkami polimerowymi o niskich współczynnikach tarcia.



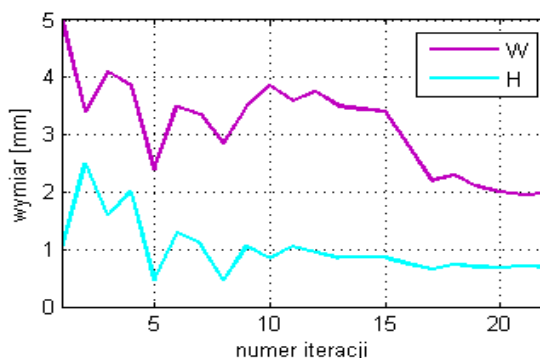
Rys. 1. Koncepcja urządzenia do pomiaru kąta wychYLENIA liny

Platformę całego urządzenia, do której zamontowana jest wspomniana para sań, wycięto z arkusza blachy. Platforma montowana jest do mechanizmu podnoszenia suwnicy za pośrednictwem prętów okrągłych, na których końcach zamontowano odpowiednie łączniki. W celu zabezpieczenia czujników przed zbyt dużymi przemieszczeniami sań, w dolnej części platformy zaprojektowano dodatkowy element ograniczający możliwe pole przemieszczeń liny. Biorąc pod uwagę, że maksymalne kąty wychYLENIA liny nie powinny przekroczyć 5°, odległość punktu stałego od

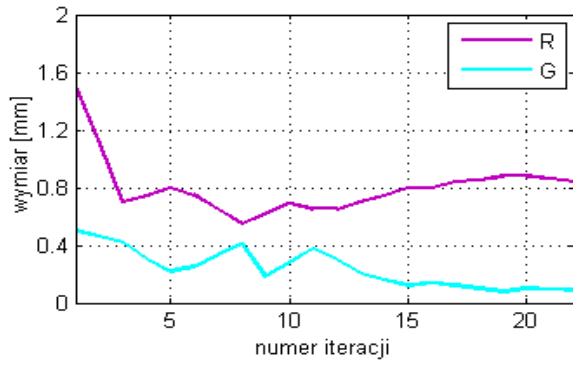
płaszczyzny pomiarowej wynosi 170 mm, a grubość liny to 8 mm, element ograniczający ma średnicę 35 mm. Aby zapewnić możliwość zmiany zakresu pomiaru kąta wychYLENIA liny, wysokość platformy urządzenia jest regulowana.

W związku z tym, że jednym z wymogów stawianych wobec tego urządzenia była jak najmniejsza masa, konstrukcję nośną poddano optymalizacji. Obliczenia te przeprowadzono w oprogramowaniu ANSYS, przy wykorzystaniu metody Sub-problem. W metodzie tej funkcja celu oraz zmienne stanu są aproksymowane, a poprzez użycie funkcji kary problem ograniczony przekształcany jest w zadanie bez ograniczeń. Za zmienne decyzyjne przyjęto promień (R) i grubość (G) profili okrągłych oraz szerokość (W) i wysokość (H) płaskowników. Funkcją celu była minimalizacja objętości. Warunkiem ograniczającym były dopuszczalne naprężenia maksymalne, które przyjęto na poziomie 120 MPa. Profile wykonane są z gatunku aluminium 5754 H22. Model obliczeniowy utworzono z elementów belkowych. Obciążenie o wartości 500 N zadane zostało w punkcie, gdzie znajduje się element ograniczający wychYLENIE liny. Wartość siły obciążającej wynika z geometrii układu pomiarowego oraz założenia, że pozioma siła powodująca wychYLENIE liny ma wartość 1000 N. Punkt przyłożenia siły zaznaczono na rys. 5.

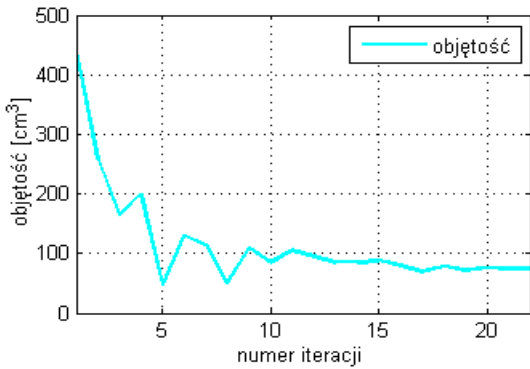
Przeprowadzony proces optymalizacji konstrukcji nośnej urządzenia pozwolił na dobór odpowiednich profili i grubości platformy urządzenia. Po uwzględnieniu zoptymalizowanych grubości przekrojów uszczegółowiono model konstrukcji, uwzględniając łączniki i wycięcie ograniczające przemieszczenie sań. Naprężenia maksymalne tak zamodelowanej konstrukcji, w odniesieniu do modelu uzyskanego w czasie optymalizacji, nie uległy znaczącej zmianie i wyniosły ok. 122 MPa. Rozkład tych naprężeń również przedstawia rys. 5.



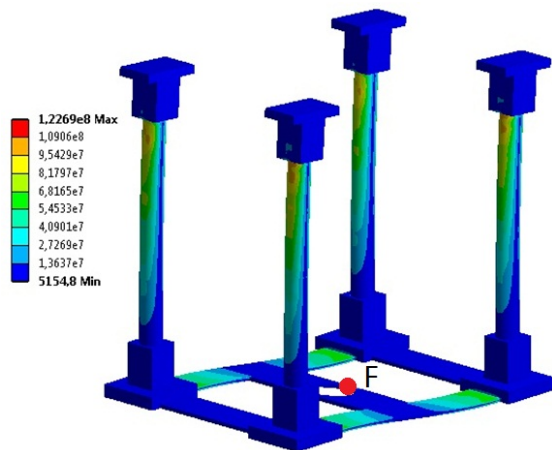
Rys. 2. Zmiana parametrów W i H w kolejnych iteracjach



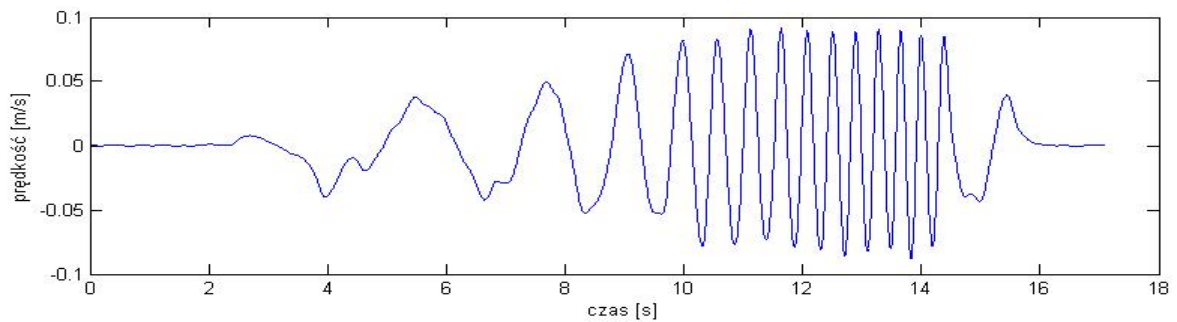
Rys. 3. Zmiana parametrów R i G w kolejnych iteracjach



Rys. 4. Zmiana objętości w kolejnych iteracjach



Rys. 5. Naprężenia zredukowane zoptymalizowanej konstrukcji

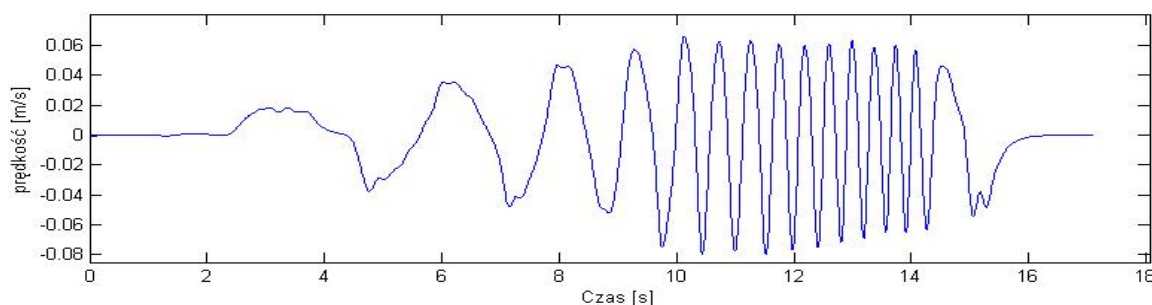


Rys. 6. Przebieg zmiany prędkości w osi X

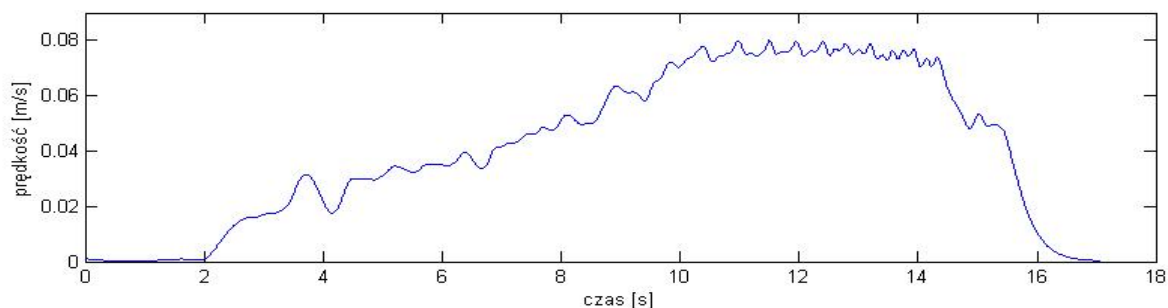
Weryfikacja poprawności działania urządzenia polegała na przeprowadzeniu testu, podczas którego wymuszono ruch obrotowy o zmiennych parametrach kinematycznych. Zamieszczone poniżej wykresy obrazują zarejestrowane wartości prędkości sań w czasie zadanego ruchu po okręgu (rys. 6, 7, 8).

Jak widać, wartość prędkości wypadkowej nie zmienia się w sposób liniowy, lecz cały czas pojawiają się zakłócenia. Efekt ten może być spowodowany faktem, że element wymuszający ruch miał średnicę ok. 7 mm, czyli mniej niż średnica przegubu kulistego, który był wprawiany w ruch. Różnica ta powodowała, że punkt przyłożenia wymuszenia ulegał pewnym przemieszczeniom. Drugą przyczyną było niewątpliwie to, że zastosowane czujniki przemieszczeń posiadają w swej budowie sprężynę zwrotną. Ruch w jedną stronę odbywał się więc znacznie łatwiej. Potwierdza to fakt, że rozkład prędkości w osiach X oraz Y nie jest symetryczny. Dodatkowym problemem jest siła tarcia, której wartość jest zmienna na skutek braku współliniowości prowadnic.

Pomiar położenia przegubu w czasie ruchu wykazał jednak, że urządzenie przemieszcza się po całym zakresie pomiarowym, co pokazano na rys. 9. Dodatkowo na rysunku tym zaznaczono również trajektorie, po której teoretycznie powinien przemieszczać się punkt związany ze środkiem przegubu kulistego.



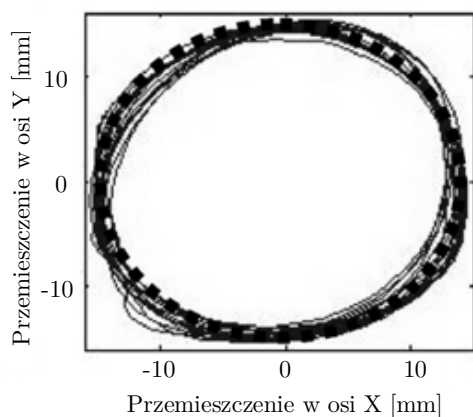
Rys. 7. Przebieg zmiany prędkości w osi Y



Rys. 8. Przebieg zmiany prędkości wypadkowej

Zakładając, że w czasie normalnej eksploatacji urządzenia pomiarowego średnica liny będzie dopasowana do zamontowanego przegubu, a siła wymuszająca będzie znacznie większa od siły wynikającej z ugięcia sprężyn, to urządzenie powinno działać poprawnie.

Wartość tego parametru wyniosła  $0,6 \text{ mm}^2$ , a odchylenie standardowe  $\sigma = 0,7746 \text{ mm}$ . W odniesieniu do pomiaru kąta wychylenia liny odchylenie standardowe wynosi  $0,257^\circ$ . Biorąc pod uwagę fakt, że w docelowym urządzeniu średnica liny będzie porównywalna ze średnicą wykorzystanego przegubu, oczekuje się dokładności na wyższym poziomie.



Rys. 9. Zmiana położenia punktu pomiarowego w czasie ruchu

Chcąc wstępnie oszacować dokładność pomiarową zaprojektowanego urządzenia, na podstawie przeprowadzonych prób wyznaczona została wariancja oraz odchylenie standardowe. Biorąc pod uwagę, że średnica elementu wymuszającego ruch wynosiła  $7 \text{ mm}$ , to promień zataczanych okręgów powinien wynosić  $14 \text{ mm}$ . Wielkość tę przyjęto do obliczeń jako wartość średnią  $\bar{r}$ . Wariancję obliczono z zależności:

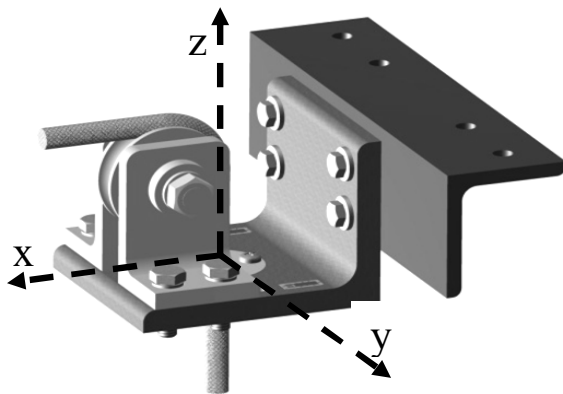
$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(\sqrt{(x_i^2 + y_i^2)} - \bar{r})^2}{n} \quad (1)$$

### 3. URZĄDZENIE DO POMIARU SIŁY W LINIE

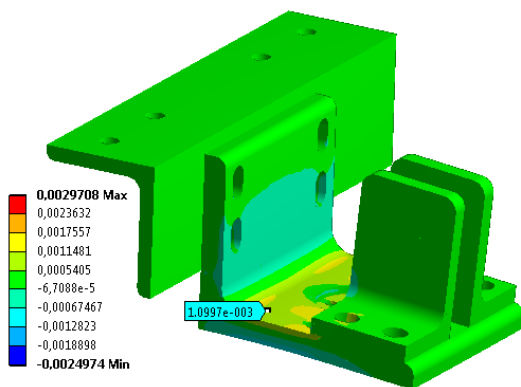
Do pomiaru siły, z jaką wyciągarka suwnicy działa na obiekt, zaprojektowano tensometryczny czujnik siły. W przetwornikach tego typu mierzona siła oddziałuje bezpośrednio na korpus czujnika, powodując jego odkształcanie. Do pomiaru odkształceń stosuje się tensometry naklejone w miejscach koncentracji odkształceń. Aby zapewnić liniowość i powtarzalność pomiarów, naprężenia w korpusie nie mogą przekroczyć granicy sprężystości.

Opracowując koncepcję kształtu korpusu czujnika siły, należało się dostosować do istniejącej konstrukcji kompletnego urządzenia. Pierwszym elementem determinującym kształt korpusu był sposób zamocowania czujnika. Drugim ważnym aspektem była konieczność poprowadzenia liny w taki sposób, aby zagwarantować jej stateczność przy wychyleniach i dynamicznym nawijaniu. Równie istotnym kryterium była możliwość łatwego i taniego wykonania całego urządzenia. Spośród przeanalizowanych koncepcji najlepszym rozwiązaniem okazało się wykorzystanie typowego kątownika  $60 \times 80$ . W korpusie czujnika zamontowany jest pierścień teflonowy, przez który przechodzi lina. Element

ten odpowiedzialny jest za stabilizację pozycji liny, a zarazem stanowi początek układu współrzędnych, względem którego mierzony jest kąt wychylenia liny. Środek symetrii dolnej podstawy tej tulei jest wspomnianym wcześniej „punktem stałym”.

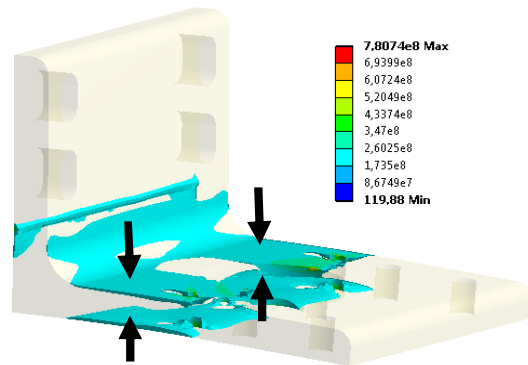


Rys. 10. Koncepcja urządzenia do pomiaru siły w linie



Rys. 11. Odształcenia normalne na kierunku działania tensometrów

Niezbędnym etapem projektowania każdego urządzenia jest analiza wytrzymałościowa konstrukcji, zwykle przeprowadzana metodami numerycznymi. W budowie tensometrycznych czujników siły ważne jest też poznanie pola odkształceń korpusu, istotne z punktu widzenia wskazania obszarów przeznaczonych pod naklejenie tensometrów. Równoległe należy pamiętać, aby maksymalne naprężenia nie przekroczyły granicy sprężystości (wykorzystany kształtownik wykonany jest ze stali konstrukcyjnej S355JR). Jak pokazały przeprowadzone analizy wytrzymałościowe, postawione założenia konstrukcyjne najlepiej spełnia kątownik 60x80x7. Na rys. 12 wyszczególniono obszary, w których naprężenia mają najwyższe wartości. Zgodnie z prawem Hooke'a, pola te pokrywają się z obszarami o największych odkształceniach. W miejscach tych (zaznaczonych strzałkami na rys. 12) nakleją tensometry połączone w pełny mostek, co gwarantuje większą wartość napięcia pomiarowego oraz kompensuje wpływ temperatury.



Rys. 12. Największe naprężenia zredukowane

Przeprowadzono kalibrację wykonanego urządzenia, mającą na celu zweryfikowanie liniowości sygnału wyjściowego z czujnika siły. Proces kalibracji polegał na dobraniu odpowiedniego wzmocnienia i wyzerowaniu sygnału mierzonego na nieobciążonym czujniku oraz przeprowadzeniu procedury wzorcowania.

Model matematyczny urządzenia pomiarowego w warunkach odniesienia ma następującą formułę:

$$y_0 = f_0(x) \quad (2)$$

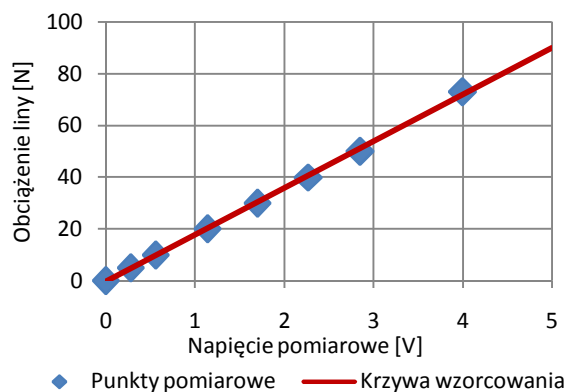
Charakterystykę, zwaną krzywą wzorcowania, opisuje się najczęściej funkcją odwrotną:

$$x^* = \varphi(y_0) \quad (3)$$

Utrwalenie tej charakterystyki pozwala na uzyskanie wskazań urządzenia pomiarowego  $x^*$  w jednostkach wielkości mierzonej.

Procedurę wzorcowania czujnika siły przeprowadzono z wykorzystaniem innego siłomierza (działającego na rozciąganie). Siłomierz ten z jednej strony zawieszono na linie z suwnicy, a do drugiej zamocowano ciężar o masie 71 kg. Zmianę naciągu liny wykonywano za pomocą wyciągarki suwnicy. Wykorzystanie siłomierza pozwoliło na jednoczesne odczytanie wartości napięcia rejestrowanego w systemie oraz rzeczywistego obciążenia liny w dowolnych punktach pomiarowych. Pomiary te pozwoliły na wykreślenie krzywej wzorcowania, która przy obciążeniu do 710 N jest funkcją liniową o współczynniku równym 17,6 N/V. Otrzymaną charakterystykę krzywej wzorcowania wraz z zarejestrowanymi wartościami w punktach pomiarowych pokazano na rys. 13.





Rys. 13. Krzywa wzorcowania z wartościami w punktach pomiarowych

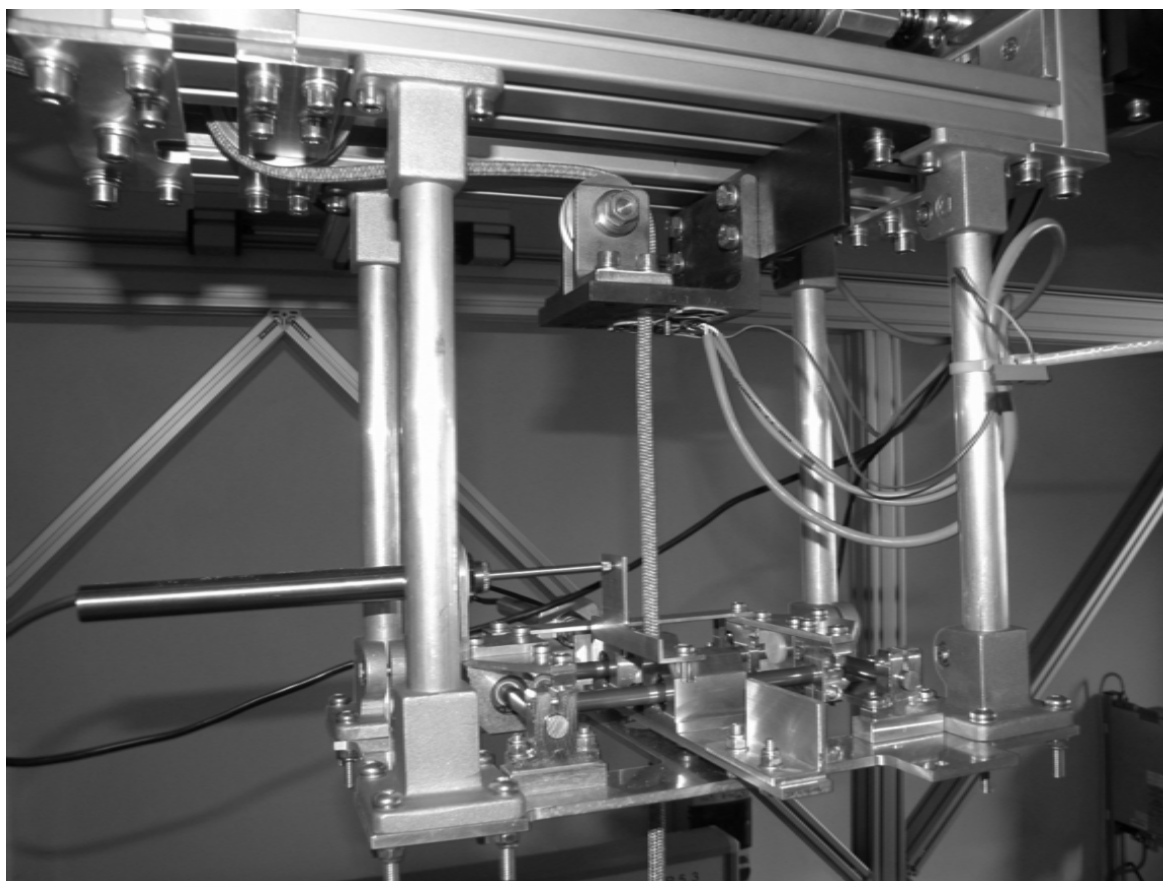
#### 4. WNIOSKI

Przeprowadzone testy, które miały na celu weryfikację poprawności działania urządzenia, wykazały, że przedstawione urządzenia zostały zaprojektowane poprawnie. Wykorzystanie programów CAD pomogło w szybki i precyzyjny sposób zaprojektować wymiary

gabarytowe urządzeń, tak aby mogły one współpracować z urządzeniem docelowym. Na rys. 14 pokazano oba urządzenia pomiarowe zamontowane na obiekcie.

Zastosowanie metody elementów skończonych w procesie optymalizacji konstrukcji nośnej urządzenia pozwoliło w szybki sposób dobrać optymalne przekroje wykorzystanych profili, co wiąże się z redukcją masy konstrukcji. Urządzenie do pomiaru kąta wychylenia liny zawiesia suwnicy może mierzyć wychylenia liny w dwóch płaszczyznach, jednak do poprawnego działania konieczna jest odpowiednia grubość liny oraz siła napinająca linę. Wyliczone odchylenie standardowe ma dość dużą wartość. W związku z powyższym, w układzie sterującym wymagającym dużej dokładności pomiaru, zaaplikowanie skonstruowanego urządzenia może się wiązać z zakłóceniami poprawnego działania systemu sterującego.

Zaprojektowany czujnik do pomiaru siły w linie charakteryzuje się liniowością sygnału wyjściowego w całym zakresie pomiarowym oraz bardzo małą histerezą



Rys. 14. Widok obiektu z zainstalowanymi urządzeniami pomiarowymi

*Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2011 – 2013 jako projekt badawczy rozwojowy NR03-040-10.*

## Literatura

---

1. Gembalcyk G.: Zarys tensometrii oporowej i budowa tensometrycznych czujników siły. W: II Warsztaty Naukowe Studenckiego Koła Mechatroniki. Gliwice: KMS Pol. Śl., 2011, s. 29-36.
2. Gommola G.: The application and installation of load cells. Frankfurt/Main: Zarbock, 2000.
3. Heimann B., Gerth W., Popp K.: Mechatronika: komponenty, metody, przykłady. Warszawa: PWN, 2001.
4. Kostyrko K., Piotrowski J.: Wzorcowanie aparatury pomiarowej. Warszawa: PWN, 2012.
5. Kusiak J., Danielewska-Tulecka A., Oprocha P.: Optymalizacja: wybrane metody z przykładami zastosowań. Warszawa: PWN, 2009.
6. Styburski W.: Przetworniki tensometryczne. Warszawa: WNT, 1971.
7. Świtoński E.: Modelowanie mechatronicznych układów napędowych. Monografie nr 70. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2004.