

## Ocena jakości sprężania połączeń śrubowych

**Streszczenie.** W publikacji opisano prace dotyczące projektu oraz budowy nasadki pomiarowej służącej do kontroli sprężania połączeń śrubowych. Dodatkowo przedstawione zostało stanowisko laboratoryjne, które zostało zbudowane specjalnie do strojenia nasadki. Przedstawiono także przebieg oraz wyniki wstępnego strojenia nasadki pomiarowej. Prace opisane w artykule były prowadzone przez Akademię Górniczo-Hutniczą oraz Zakład Budowy Maszyn OSSA i są one kontynuacją prac nad inteligentnymi zakrętkami elektromechanicznymi.

**Abstract.** The paper describes the work on the design and construction of a measuring device for evaluation of the tightening of bolted joints. In addition, a laboratory test bench is presented, which was constructed especially for adjusting of the measuring device. The process and results of the initial adjusting of the measuring device are also presented. The work described in the paper was carried out by the AGH University of Science and Technology and the OSSA Machinery Works and is a continuation of the work on intelligent electric torque tool. (**Evaluation Of The Tightening Quality Of Bolted Joints**).

**Słowa kluczowe:** pomiar momentu obrotowego, połączenia śrubowe, inteligentne narzędzia, zakrętarka elektryczna.

**Keywords:** torque measurement, bolted joints, intelligent power tools, electric torque tool.

### Wstęp

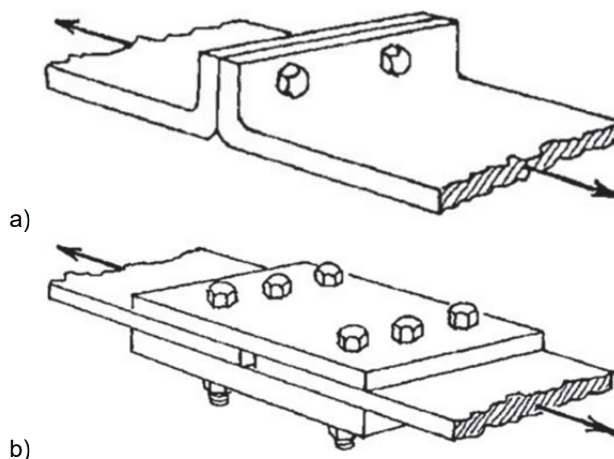
Połączenia gwintowe są jedną z najpopularniejszych metod łączenia różnego rodzaju konstrukcji. W przypadku konstrukcji budowlanych, przemysłowych, reaktorów chemicznych, instalacji petrochemicznych, czy też w przypadku różnego rodzaju maszyn, sprężanie połączeń jest wrażliwym procesem rzutującym na bezpieczeństwo eksploatacji. Zakręcenia śrub (często o rozmiarach większych niż M30) można wykonać z wykorzystaniem elektromechanicznych zakrętarek wysokomomentowych, kluczy hydraulicznych, kluczy dynamometrycznych (często z przekładaniami zwielokrotniającymi moment roboczy), kluczy pneumatycznych. Dokładność zakręcenia, czyli precyzja dotrzymania zadanego momentu sprężania jest kluczowa w procesie dokręcania. Prace nad poprawą dokładności oraz powtarzalności skręcania połączeń śrubowych są prowadzone od kilku lat przez Akademię Górniczo-Hutniczą oraz Zakład Budowy Maszyn OSSA z Tychów. Prace te dotyczyły konstrukcji nowych typów zakrętarek elektromechanicznych [1], [2], [3], [4]. Zaprezentowana w niniejszej publikacji nasadka pomiarowa jest efektem kontynuacji tych prac. W rozdziale pierwszym przedstawiono teoretyczne właściwości połączeń śrubowych. W kolejnych dwóch rozdziałach przedstawiono zalecane metody sprężania połączeń oraz praktycznie wykorzystywane metody kontroli jakości. Rozdział czwarty zawiera opis budowy i właściwości skonstruowanej nasadki pomiarowej. W rozdziale piątym przedstawiono z kolei opis budowy stanowiska laboratoryjnego przeznaczonego do strojenia nasadki. Rozdział szósty zawiera opis procesu wstępnej kalibracji oraz wyniki. Ostatni rozdział to wnioski oraz plany dalszych prac.

### Połączenia śrubowe

Połączenia śrubowe mogą występować w dwóch wersjach i są różniane w zależności od kierunku obciążeń zewnętrznych lub sił działających na połączenie. Jeśli kierunek działania sił na połączenie jest równoległy do osi śruby jest to połączenie rozciągane. Jeśli linia działania sił jest prostopadła do osi śruby, wtedy jest to połączenie ścinane [5]. Rysunek 1 przedstawia oba typy połączeń.

Niezależnie od wersji, na to czy połączenie śrubowe zostanie wykonane poprawnie, czy też nie, ma wpływ kilka czynników. Niepoprawnie sprężone połączenie może spowodować, że w materiale powstają naprężenia, które

w najgorszym przypadku doprowadzą do zerwania materiału, z którego wykonana jest śruba. Wady, które mogą powstać w połączeniu nie zawsze są widoczne. Z tego powodu bardzo istotne jest, aby sprężenie połączenia było wykonane z momentem przewidzianym w projekcie i odpowiednią dokładnością.



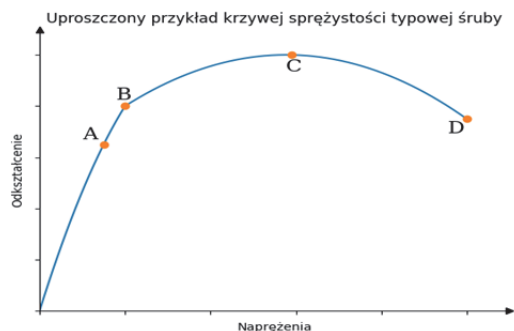
Rys. 1. Dwa typy połączeń, a) połączenie rozciągane, b) połączenie ścinane. [5]

Prawo Hooke'a opisuje zależność między naprężeniem i odkształceniem ciała sprężystego przy odkształceniach nieprzekraczających granicy proporcjonalności. Jest to granica, która nie powinna zostać przekroczona w momencie zakręcania. Jeśli się tak stanie, jest to równoznaczne z uszkodzeniem połączenia. Na rysunku 2 została ona oznaczona literą A.

Na rysunku 2, zaprezentowana została uproszczona krzywa sprężystości typowej śruby. Przedstawia ona charakterystykę odkształcania się materiału śruby w zależności od naprężeń. Punkty A, B, C oraz D są to punkty graniczne oznaczające zmianę charakterystyki śruby, co jest interpretowane jako zmiana zachowania materiału śruby, będą to kolejno:

- Od 0 do A – przedział sprężystości - przedział, w którym nie powstają trwałe odkształcenia,
- Od A do B – przedział proporcjonalny – przedział, w którym w materiale śruby następują odkształcenia plastyczne proporcjonalne do naprężeń,

- Od B do C – przedział nieproporcjonalny – przedział, w którym nie następuje zerwanie materiału, ale odkształcenia nie są proporcjonalne,
- Od C do D – przedział, w którym następuje zerwanie materiału, punkt D to punkt, w którym materiał został zerwany.



Rys. 2. Uproszczona krzywa sprężystości typowej śruby. Punkty A-D reprezentują kolejne zakresy dla charakterystyki śruby.

W celu umożliwienia wstępnego obciążenia połączenia śrubowego, należy wyliczyć (jeśli nie jest podany), a później zastosować parametr  $F_{p,C}$ , czyli nominalną minimalną siłę sprężania. Wzór podany jest w normie PN-EN 1993-1-8 (1). (1)

$$F_{p,C} = 0.7 f_{ub} A_S$$

gdzie:  $F_{p,C}$  – nominalna wartość minimalnego sprężenia,  $f_{ub}$  – nominalna wytrzymałość na rozciąganie materiału śruby,  $A_S$  – pole przekroju czynnego śruby, obliczane ze wzoru (2). (2)

$$A_S = 0.7854(d - 0.938p)^2$$

gdzie:  $d$  – nominalna średnica śruby,  $p$  – skok gwintu w [mm].

Aby wyliczyć odpowiedni moment dokręcenia, należy posłużyć się wzorem z normy. Wzór ten został przedstawiony w równaniu (3). (3)

$$T_f = 0.35 \mu \left( 1 + \frac{1}{Q} \right) f_{ub} A_S d$$

gdzie:  $T_f$  – moment dokręcania,  $\mu$  – współczynnik tarcia (od 0.12 do 0.2 w zależności od powierzchni i użytych smarów),  $Q$  – współczynnik dokręcania,  $f_{ub}$  – maksymalna wytrzymałość na rozciąganie,  $A_S$  – efektywna powierzchnia przekroju śruby,  $d$  – nominalna średnica śruby.

Wzory (1), (2) oraz (3) opisują zależność momentu dokręcania, jaki należy wykorzystać do sprężania, z parametrami śruby.

Producenci urządzeń np. zakrętarek zwykle udostępniają specjalne tablice dla operatorów ich sprzętu. Są to tablice mające ułatwić proces zakręcania i są przygotowane na podstawie obecnie obowiązujących norm. Część takiej tablicy przedstawiona została w Tabeli 1. Została ona przygotowana dla nowej, niesmarowanej śruby, współczynnik tarcia  $\mu=0.17$  i granica plastyczności śruby  $Q=0.9$ . W tabeli zawarte są informacje na temat tego, jakie nastawy powinno się użyć podczas zakręcania, jeśli założenia konstrukcyjno-technologiczne nie mówią o innych wymaganiach [6].

Tabela 1. Część tabeli z siłą rozciągania oraz momentem dokręcenia wyliczona dla parametrów  $\mu=0.14$  oraz  $Q=0.9$ . Na podstawie [6]

Wielkość	Klasa wytrzymałości	Siła rozciągania [kN]	Moment dokręcający [Nm]
M14	8.8	51.7	138
	10.9	72.7	194
	12.9	87.3	235
M16	8.8	71.2	210
	10.9	100	299
	12.9	120.1	357
M18	8.8	86.5	289
	10.9	121.6	411
	12.9	146.1	490
-----			
M80	8.8	2045.7	29314
	10.9	2876.8	41222
	12.9	3452.1	49467
M90	8.8	2647.5	42525
	10.9	3723	59801
	12.9	4467.6	71761
M100	8.8	3326.6	59200
	10.9	4678.1	83250
	12.9	5613.7	99900

### Metody sprężania połączeń śrubowych

Sposoby skręcania konstrukcji są zdefiniowane normie PN-EN 1090-2 pt. „Wykonanie konstrukcji stalowych i aluminiowych” [7] oraz normie EN ISO 6789 [8]. Stosowane są dwie metody zakręcania:

- metoda kontrolowanego momentu – śrubę zakręca się jednostajnie z dokładnością nie gorszą niż 4% w całym procesie zakręcania,
- metoda kombinowana – śrubę zakręca się w dwóch etapach:
  - etap I – śrubę zakręca się do wartości 0,75 momentu docelowego z dokładnością nie gorszą niż 10%,
  - etap II – nakrętkę przekręca się o odpowiedni kąt względem śruby. Kąt zależy od średnicy śruby.

Wybór metody dokręcania jest uzależniony od rodzaju konstrukcji, połączenia i innych czynników. Konstruktor odpowiedzialny za projekt danej konstrukcji decyduje o zastosowanej metodzie sprężania.

### Kontrola jakości sprężania

W przypadku metody kontrolowanego momentu dokładność dokręcania jest zależna od jakości wykorzystanego narzędzia. Śruba skręcona ze zbyt niskim momentem może nie zapewnić odpowiedniej wytrzymałości. Z kolei śruba dokręcona ze zbyt dużym momentem może zostać uszkodzona. W niektórych sytuacjach istnieje potrzeba dokonania sprawdzenia czy połączenie śrubowe zostało sprężone z wystarczającą dokładnością.

W praktyce kontrolę jakości sprężania można wykonać na kilka sposobów.

1. Pomiar momentu w trakcie skręcania połączenia śrubowego z wykorzystaniem specjalnego urządzenia do pomiaru momentu.
2. Wykorzystanie specjalistycznego urządzenia do pomiaru wydłużenia śruby po zakończeniu procesu skręcania.
3. Wykorzystanie wskazania urządzenia dokręcającego w trakcie procesu sprężania,
4. Odkręcenie zakręconej już śruby urządzeniem z kontrolowanym momentem i określenie momentu dokręcenia na podstawie momentu zmierzonego w trakcie odkręcania,

5. Próba ponownego dokręcenia śruby z momentem zadany ustawionym na takim samym poziomie jak moment ustawiony podczas właściwego skręcania.

Ze względu na precyzję najlepsze są sposoby pierwszy i drugi. W pierwszej metodzie, w trakcie skręcania do pomiaru momentu można wykorzystać urządzenia mierzące moment obrotowy przykładany bezpośrednio do połączenia śrubowego. Takim urządzeniem jest przedstawiona w dalszej części artykułu nasadka pomiarowa.

W drugiej metodzie kontroli, po dokonaniu zakręcenia można dokonać pomiaru wydłużenia śruby powstałego w wyniku dokręcania i na podstawie prawa Hooke'a oraz parametrów śruby obliczyć moment lub naprężenie w śrubie. Do pomiaru wydłużenia śruby wykorzystuje się mikrometry mechaniczne lub specjalistyczne urządzenia ultradźwiękowe. Tego typu metody oceny jakości sprężania połączeń śrubowych są dokładne i niezawodne, lecz wymagają wykorzystania dodatkowych, specjalistycznych i kosztownych urządzeń. Na rysunku 3 przedstawiono mechaniczny mikrometr wraz z wzorcowym wałkiem, a na rysunku 4 przedstawiono ultradźwiękowe urządzenie do pomiaru wydłużenia.



Rys.3. Mechaniczne urządzenie do pomiaru wydłużenia śruby



Rys.4. Ultradźwiękowe urządzenie do pomiaru wydłużenia śruby

W trzecim przypadku do kontroli momentu z jakim połączenie gwintowe jest sprężane wykorzystuje się wskazanie urządzenia roboczego. Wskazanie takie jest najczęściej estymatą momentu dokręcenia. Estymata taka jest miarodajna przy spełnieniu odpowiednich założeń dotyczących przebiegu procesu dokręcania oraz samego urządzenia dokręcającego. W przypadku zakrętarek elektromechanicznych napędzanych silnikiem uniwersalnym (zdecydowana większość stosowanych zakrętarek) zwykle zakłada się, że prędkość obrotowa silnika w trakcie zakręcania jest stała oraz rdzeń silnika nie nasycy się magnetycznie. Wykorzystanie takiego wskazania jest dyskusyjne również ze względu na fakt, że do sprawdzenia poprawności dokręcenia służy urządzenie wykorzystywane do samego skręcania.

Postępując zgodnie z czwartym sposobem należy odkręcić zakręconą już śrubę. Wykonuje się to najczęściej

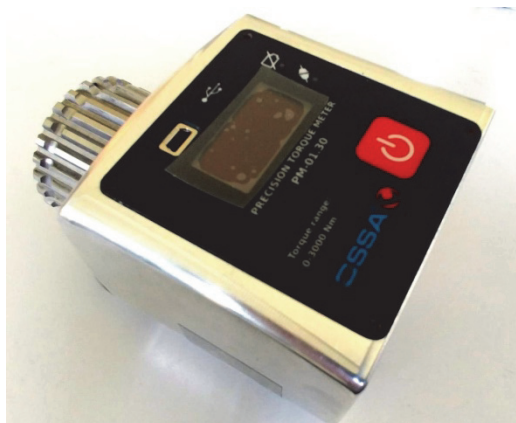
wykorzystując klucz hydrauliczny. Operator powoli zwiększa ciśnienie robocze, aż do rozpoczęcia procesu odkręcania równocześnie obserwując pomiar ciśnienia na manometrze. Następnie porównuje wartość zmierzoną z tabelą nastaw klucza i określa moment, przy którym nastąpiło odkręcenie śruby. Przy wykorzystaniu tej metody zachodzi niestety konieczność odkręcenia śruby. W wielu przypadkach operacja taka jest niemożliwa ze względu na charakter skręcanej konstrukcji. Dodatkowo połączenie należy ponownie dokręcić z odpowiednim momentem. Stosowanie takiej metody w praktyce jest zatem kłopotliwe oraz mocno ograniczone. Najczęściej metodę tą wykorzystuje się do odkręcenia wybranych śrub i określenia poprawności pracy urządzenia zakręcającego oraz pracy operatora.

Pięty z wymienionych sposobów kontroli polega na dokręceniu śruby z wymaganym momentem i następnie próbie ponownego dokręcenia z taką samą wartością zadaną momentu. Metodę tę stosuje również w przypadku, gdy w połączeniu śrubowym zastosowano elastyczną podkładkę, która może po pewnym czasie ulec deformacji. Ponowne dokręcenie wykonuje się tym samym lub innym urządzeniem. Zastosowanie tego sposobu pozwala na sprawdzenie czy śruba nie była dokręcona ze zbyt małym momentem. Nie pozwala natomiast na sprawdzenie czy śruba była zakręcona ze zbyt dużym momentem. Z uwagi na prostotę oraz wygodę, sposób piąty jest najchętniej stosowany przez operatorów pomimo jego ograniczonej przydatności i wiarygodności.

#### Nasadka pomiarowa

Przedstawiona na rysunku 5 nasadka pomiarowa została zaprojektowana i zbudowana w celu kontroli jakości sprężania połączeń śrubowych w trakcie dokręcania oraz w trakcie odkręcania. Urządzenie może być zastosowane do kontroli metodami 1, 4 oraz 5 opisanymi w poprzednim punkcie. W urządzeniu wykorzystano specjalnie zaprojektowaną tuleję pomiarową z naklejonymi tensometrami w układzie pełnego mostka. Do odczytu sygnału z mostka tensometrycznego wykorzystywany jest mikroprocesorowy układ elektroniczny z precyzyjnym przetwornikiem analogowo-cyfrowym dedykowanym do pracy z mostkowymi układami pomiarowymi. Mikrokontroler steruje również pozostałymi funkcjami urządzenia, takimi jak: zapis pomiarów, interfejs użytkownika, komunikacja z komputerem.

Nasadka jest niezależnym urządzeniem i może być montowana pomiędzy urządzeniem odkręcającym oraz nakrętką, a właściwie końcówką roboczą (popularnym bitem). Może być wykorzystana wraz z zakrętarekami elektromechanicznymi różnych firm, zakrętarekami pneumatycznymi, ręcznymi kluczami dynamometrycznymi z przekładkami zwielokrotniającymi moment, a także po zastosowaniu adapterów, z kluczami hydraulicznymi.



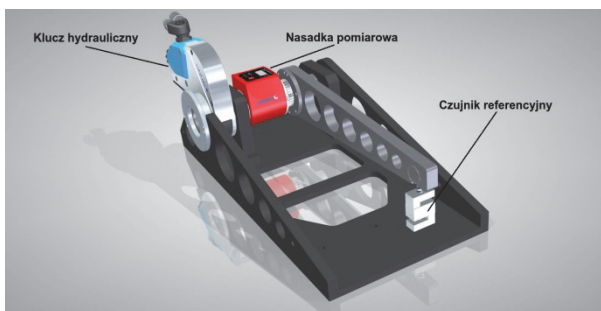
Rys.5. Nasadka pomiarowa

Najważniejsze cechy nasadki pomiarowej:

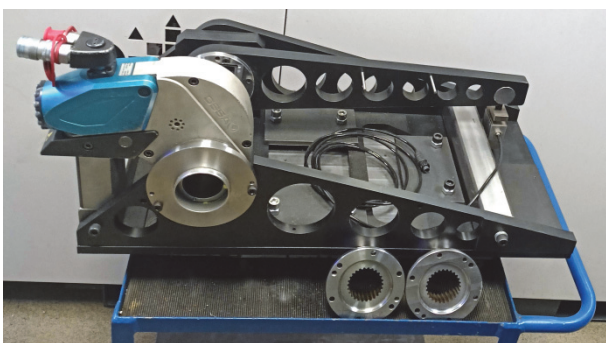
- montaż pomiędzy urządzeniem dokręcającym i połączeniem śrubowym,
- możliwość zamontowania na zakrętkach elektromechanicznych, kluczach dynamometrycznych oraz kluczach dynamometrycznych z dodatkowymi przekładniami planetarnymi,
- możliwość zamontowania na kluczach hydraulicznych i kasetowych kluczach hydraulicznych po zastosowaniu adaptera,
- pomiar momentu dokręcania z częstotliwością 250Hz,
- zakres pomiarowy do 6500Nm,
- kompensacja naprężeń pochodzących od ugięć elementu pomiarowego,
- możliwość przesyłania danych pomiarowych do komputera oraz zapamiętywania danych w wewnętrznej pamięci,
- wbudowany akumulator.

### Stanowisko laboratoryjne

Ze względu na zasadę pracy oraz budowę, nasadka pomiarowa wymaga strojenia. Jest to konieczne w przypadku każdej wykonanej nasadki ze względu na: niepowtarzalność wykonania mechanicznego elementu pomiarowego, niepowtarzalność naklejania tensometrów, błędy w elektronicznym układzie pomiarowym. Do wykonania tego zadania zostało specjalnie skonstruowane i zbudowane stanowisko laboratoryjne. Na rysunku 6 przedstawiono model 3D stanowiska wraz podpisanymi najważniejszymi elementami składowymi. Z kolei rysunek 7 przedstawia wykonane, gotowe stanowisko.



Rys.6. Model stanowiska laboratoryjnego



Rys.7. Wykonane stanowisko laboratoryjne

Stanowisko laboratoryjne umożliwia jednoczesny pomiar z wykorzystaniem strojonej nasadki oraz urządzenia referencyjnego. Jako urządzenie referencyjne został wykorzystany zestaw złożony z czujnika siły ZEMIC H3 o zakresie pomiarowym 1500kg oraz miernika siły AXIS FC00. Do zadawania momentu obrotowego został wykorzystany klucz hydrauliczny o zakresie pracy pokrywającym cały zakres pomiarowy nasadki, czyli 6500Nm.

Po zastosowaniu specjalnych adapterów moment wymuszający można również zadawać przy pomocy ręcznych kluczy dynamometrycznych wraz z przekładniami do zwielokrotniania momentu.

### Wstępne strojenie nasadki

Mostkowy układ tensometryczny jest układem liniowym. Zakładając poprawnie wykonany mechaniczny element pomiarowy, prawidłowo naklejone tensometry oraz prawidłowo wykonany układ elektroniczny można przyjąć, że charakterystyka, czyli zależność:

(4)

$$OdczytAD = f(T)$$

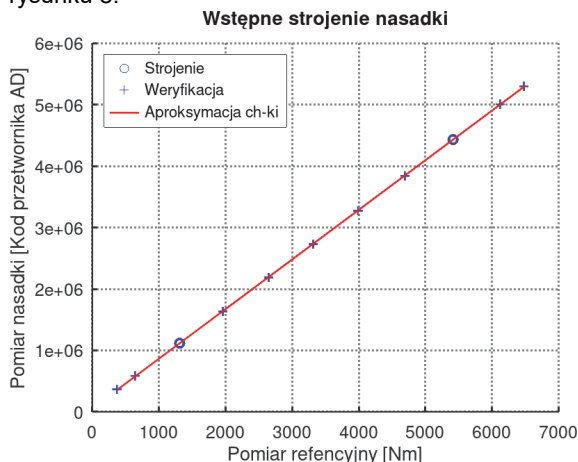
gdzie:  $OdczytAD$  – wartość odczytana z przetwornika analogowo-cyfrowego urządzenia,  $T$  – moment wymuszony, będzie liniowa. Zatem w celu obliczenia momentu wskazanego przez nasadkę pomiarową przyjęto:

(5)

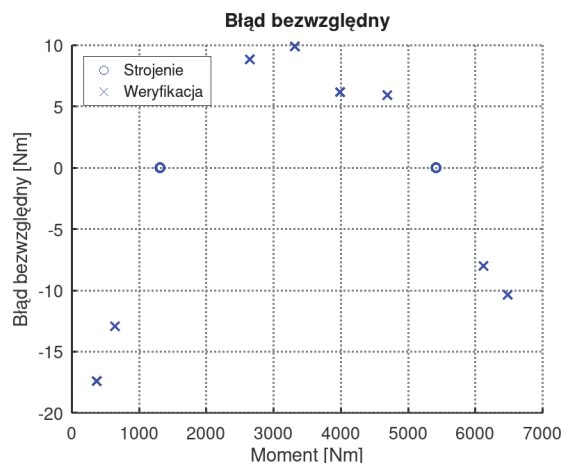
$$T_m = (OdczytAD + b) \cdot a$$

gdzie:  $b$ ,  $a$  – parametry strojenia,  $T_m$  – moment zmierzony nasadką.

W celu obliczenia parametrów liniowej funkcji aproksymującej charakterystykę urządzenia wykonano pomiary dla dwóch wartości momentu wymuszenia. Na ich podstawie zostały obliczone współczynniki funkcji liniowej. Następnie wykonano dodatkowe pomiary, dla innych wartości momentu wymuszającego, w celu sprawdzenia poprawności działania urządzenia. Wyniki eksperymentów zostały przedstawione na wykresie umieszczonym na rysunku 8.



Rys.8. Wyniki eksperymentów



Rys.9. Błąd bezwzględny

Rysunek 9 przedstawia błąd bezwzględny, który obliczono w następujący sposób:

(6)

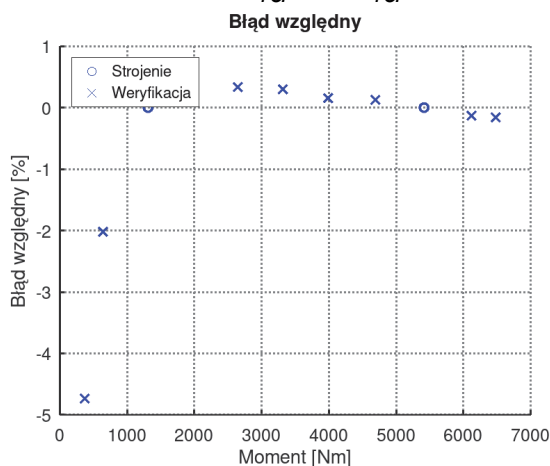
$$\Delta_T = |T_{ref} - T_m|$$

gdzie:  $\Delta_T$  – błąd bezwzględny pomiaru nasadką,  $T_{ref}$  – moment zmierzony urządzeniem referencyjnym.

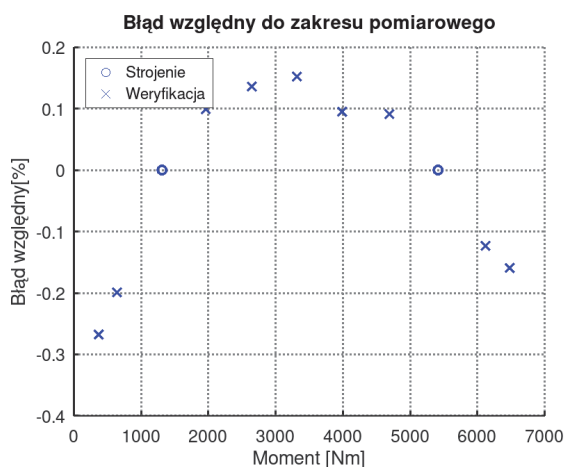
Błąd względny w stosunku do wartości mierzonej obliczono zgodnie z wzorem (7).

(7)

$$\delta_T = \frac{\Delta_T}{T_{ref}} = \frac{|T_{ref} - T_m|}{T_{ref}}$$



Rys.10. Błąd względny



Rys.10. Błąd względny w odniesieniu do zakresu pomiarowego

## Wnioski

Na podstawie wstępnego skalowania można stwierdzić, że ograniczając zakres pomiarowy nasadki do przedziału 1500Nm÷6500Nm błąd względny liczony w stosunku do wartości mierzonej nie przekraczał  $\pm 0.5\%$ . W zakresie od około 350Nm do 6500Nm błąd względny liczony w stosunku do wartości mierzonej mieści się w zakresie  $\pm 5\%$ . Częściową przyczyną tego jest niska dokładność urządzenia referencyjnego w zakresie do około 1000Nm. W celu wyeliminowania tej przyczyny w dalszych pracach planuje się wykonywać strojenie dwuetapowo. W zakresie od 1000Nm do 6500Nm z wykorzystaniem referencyjnego miernika siły oraz klucza hydraulicznego jako zadajnika momentu, a w zakresie do 1500Nm z wykorzystaniem

specjalnie wykonanej dźwigni oraz odważników. Inną możliwością jest zastosowanie czujnika siły o mniejszym zakresie pomiarowym dla małych wartości momentów oraz miernika z lepszą dokładnością. W tym celu należy wykonać specjalny adapter umożliwiający montaż mniejszego czujnika siły.

W celu poprawienia dokładności nasadki pomiarowej planowana jest w przyszłości zmiana konstrukcji elektronicznego układu pomiarowego w taki sposób, aby możliwe było zastosowanie dwóch zakresów pomiarowych. Przykładowo dolny zakres do 2000Nm i górny zakres od około 2000Nm do 6500Nm.

## Informacje

Praca była finansowana częściowo ze środków projektu "Inteligentna Zakrętarka Elektromechaniczna – Smart Electric Torque Tool", INNOTECH-K3/48/225932/NCBR/14, NCBiR Program INNOTECH 3, częściowo z subwencji badawczej Akademii Górniczo-Hutniczej nr 16.16.120.773 oraz częściowo ze środków własnych firmy Zakład Budowy Maszyn OSSA.

## Autorzy:

dr hab. inż. Paweł Piątek prof. uczelni, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Katedra Automatyki i Robotyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: ppi@agh.edu.pl;

mgr inż. Paweł Kocwa, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Katedra Automatyki i Robotyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: kocwa@student.agh.edu.pl;

mgr inż. Łukasz Zawada, Zakład Budowy Maszyn OSSA, ul. Objazdowa 72, 43-100 Tychy, E-mail: zawada@ossa.pl

## LITERATURA

- [1] Cyganik Ł., Król E., Baranowski J., Drabek T., Dziwiński T., Piątek P., *Konstrukcja bezszczotkowego silnika do zakrętarki elektromechanicznej*, Maszyny Elektryczne : zeszyty problemowe (2017) nr 2, 141-145
- [2] Gawron S., Baranowski J., Piątek P., Ossa J., *Bezszytkowa wysokomomentowa zakrętarka elektromechaniczna*, Maszyny Elektryczne : zeszyty problemowe (2015) nr 2, 113-116
- [3] Ossa J., Zawada Ł., Ossa B., Piątek P., Piłat A., Pauluk M., Marchewka D., Baranowski J., Dziwiński T., *Układ sterowania zakrętarki (Torque tool control arrangement)*, numer patentu: EP 3 450 107 B1 (Udziel. 18-08-2021; Opubl. 17-01-2022; Zgłosz. nr EP17188780.5 z dn. 31-08-2017)
- [4] Piątek P., Pauluk M., Dziwiński T., *Układ detekcji przejścia napięcia przemiennego przez zero (AC voltage zero crossing detector circuit)*, numer patentu: PL429725 (Opubl. 02-11-2020; Zgłosz. nr P.429725 z dn. 24-04-2019)
- [5] Bickford, J.H., *Introduction to the Design and Behavior of Bolted Joints: Non-Gasketed Joints*, CRC Press (2007)
- [6] Tabela z siłą rozciągania oraz momentem dokręcenia wyliczona dla parametrów <https://ossa.cn-panel.pl/resources/downloads/Tabela%20momentow%20obrotowych.jpg> [Dostęp online 11-07-2022]
- [7] PN-EN 1090-2: *Wykonanie konstrukcji stalowych i aluminiowych część 2: Wymagania techniczne dotyczące konstrukcji stalowych.*
- [8] ISO 6789:2003: *Assembly tools for screws and nuts hand torque tools. Requirements and test methods for design conformance testing, quality conformance testing and recalibration procedure*