

# System synchronizacji napędów urządzenia do laserowo-mechanicznego gięcia rur

## The drives synchronization system for laser-mechanical pipe bending equipment

LESZEK PŁONECKI  
GRZEGORZ WITKOWSKI  
PIOTR KURP\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.2.31>

Opisano system sterowania napędami w przyrządzie do gięcia rur cienkościennych, wykonanym na potrzeby badań prowadzonych w ramach projektu NCBR PBS/A5/47/2015. Przedstawiono projekt układu mechanicznego oraz krótko scharakteryzowano system sterowania. Zwrócono uwagę na wady i zalety rozwiązania. Zaproponowano możliwe modyfikacje układu w celu poprawy jego funkcjonalności.

**SŁOWA KLUCZOWE:** formowanie laserowe, techniki laserowe, układy sterowania

*The drives control system of bending equipment for thin-walled pipes has been presented. The design of the mechanical system was presented and the control system was briefly characterized. The advantages and disadvantages of the presented solution are discussed. Possible modifications of the system have been proposed in order to improve its functionality.*

**KEYWORDS:** laser forming, laser technologies, control systems

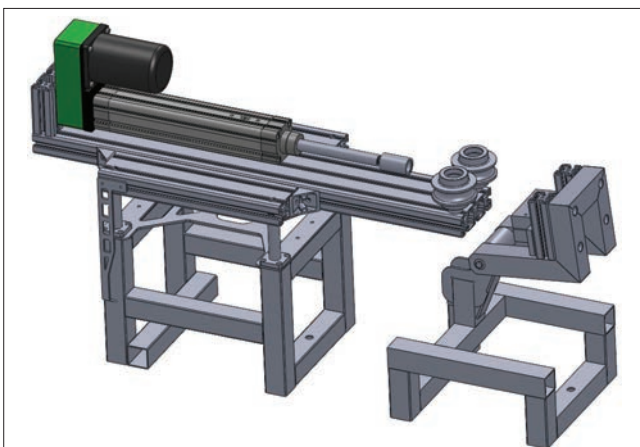
Kształtowanie laserowe klasyfikowane jest jako jedna z metod termicznego formowania elementów konstrukcyjnych. Podczas tego procesu deformacje powstają na skutek zjawiska rozszerzalności cieplnej materiału [1–3].

Odpowiednie i kontrolowane nagrzewanie wybranych stref materiału przez wiązkę laserową powoduje, że przyjmuje on założony kształt. Pomimo licznych zalet formowania laserowego proces ten jest energochłonny i przebiega stosunkowo wolno w porównaniu z metodami klasycznymi (np. kształtowaniem plastycznym). W związku z tymi ograniczeniami podjęto badania w celu opracowania

hybrydowej technologii kształtowania, polegającej na nagrzewaniu giętego elementu wiązką laserową z jednoczesnym wspomaganie mechanicznym [4]. Na potrzeby realizacji tego zadania opracowano i wykonano specjalne urządzenie (rys. 1), które zostało zintegrowane z laserowym centrum obróbkowym TRUMPF TLF 6000.

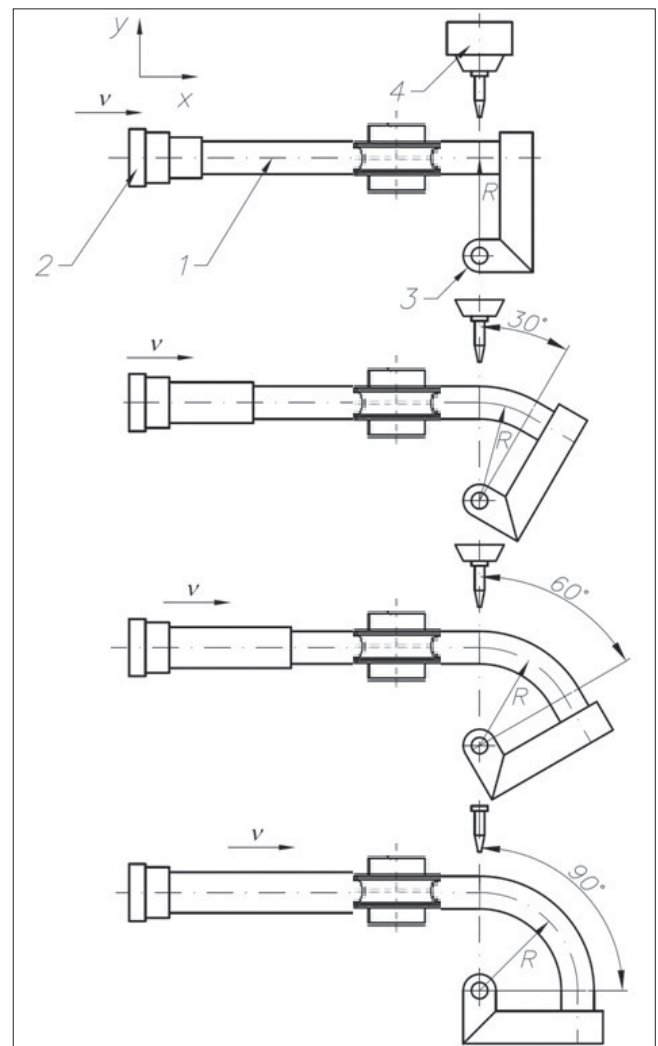
### Zasada działania urządzenia

Urządzenie jest przeznaczone do wspomaganego mechanicznie, jednopłaszczyznowego kształtowania laserowego rur cienkościennych. Kinematykę procesu gięcia przedstawiono na rys. 2. Urządzenie napędzane jest liniowym napędem elektrycznym (składającym się z silnika oraz przekładni), nazywanym dalej siłownikiem.

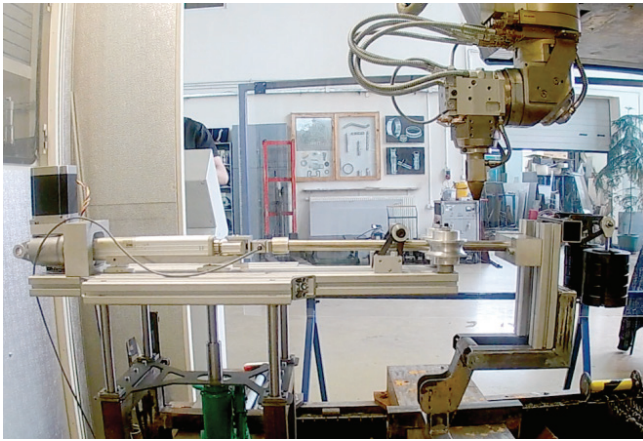


Rys. 1. Projekt urządzenia [4]

\* Dr hab. inż. Leszek Płonecki (plonecki@tu.kielce.pl), mgr inż. Grzegorz Witkowski (gwitkowski@tu.kielce.pl) – Katedra Automatyki i Robotyki, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej; dr inż. Piotr Kurp (pkurp@tu.kielce.pl) – Katedra Inżynierii Eksploatacji i Przemysłowych Systemów Laserowych, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej



Rys. 2. Kinematyka procesu gięcia: 1 – rurowy element podlegający gięciu, 2 – siłownik pchający, 3 – swobodne ramię gnące, 4 – głowica laserowa [4]



Rys. 3. Część robocza stanowiska [4]



Rys. 4. Układy sterujące urządzeniem

Zgodnie z opracowaną koncepcją gięty element (1) zostaje umieszczony pomiędzy siłownikiem (2) a swobodnym ramieniem gnącym (3). Głowica laserowa (4) obwodowo nagrzewa element w płaszczyźnie gięcia. Równocześnie następuje wysunięcie tłoczyska siłownika wzdłuż osi X i wprawienie giętego elementu w ruch liniowy. Koniec tego elementu jest zamocowany w uchwycie znajdującym się na ramieniu gnącym. Ramię ma jeden stopień swobody (możliwość obrotu wokół osi Z układu współrzędnych). Promień gięcia  $R$  jest określony przez wymiar ramienia gnącego oraz odległość jego przegubu od osi giętej rury. Tłoczek siłownika jest wyposażony w przetwornik siły, umożliwiający określenie sił osiągniętych podczas procesu gięcia. Na ramieniu gnącym zamontowano inklinometr cyfrowy służący do pomiaru używanego kąta gięcia.

W celu zapewnienia precyzji procesu gięcia opracowano system sterowania pracą urządzenia, który pozwala na kontrolowanie wysunięcia siłownika na zadaną odległość z określoną prędkością ruchu. Napęd siłownika liniowego stanowi silnik indukcyjny sterowany pośrednio przez przełącznik częstotliwości. Układ regulacji oparto na sterowniku MyRio-1900, wykorzystującym system czasu rzeczywistego RT o częstotliwości taktowania 1000 Hz. W układzie tym wykorzystano klasyczny regulator prędkości o algorytmie PI. Sygnał sprzężenia zwrotnego dla układu regulacji pochodzi z naborowanego na wał silnika, inkrementalnego przetwornika obrotowo-impulsowego o rozdzielczości 1024 impulsów/obrót. Opracowany system sterowania umożliwia wymuszanie ruchu tłoczyska siłownika z zadanym posuwem w zakresie  $0\div 400$  mm/min, a ponadto przeprowadzenie procedury bazowania tłoczyska oraz resetowania jego aktualnej pozycji w dowolnym położeniu. Układ został zabezpieczony stykowymi rozłącznikami krańcowymi, które zapobiegają nadmiernemu wysunięciu lub wsunięciu tłoczyska. System pozwala na obserwację przebiegu siły oraz kąta gięcia w czasie rzeczywistym w środowisku LabView. Stanowisko przedstawiono na rys. 3 i 4.

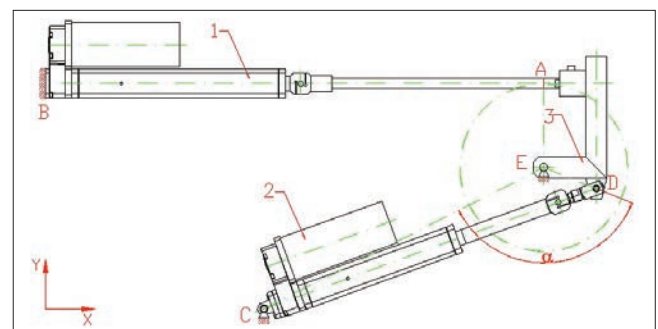
### Napotkane problemy

Podczas eksploatacji urządzenia stwierdzono, że pracuje ono poprawnie, co pozwala na implementację opracowanej technologii hybrydowej. Zaobserwowano, że podczas procesu gięcia rur na kąt nieprzekraczający  $45^\circ$  urządzenie nie wykazuje dysfunkcji bądź niepokojących zachowań, a proces gięcia przebiega prawidłowo. Jednakże podczas gięcia rur na kąt w zakresie  $45\div 90^\circ$  zauważono stopniowe narastanie siły rejestrowanej na tłoczysku siłownika w kierunku wysuwu, a jednocześnie stopniowe sprężyste ugięcie mocowania wzdłuż osi Y. Te zjawiska nasilały się po przekroczeniu kąta gięcia  $45^\circ$  i podczas zmniejszania promienia gięcia. Było to spowodowane zmianą rozkładu składowych siły wywieranej przez tłoczek siłownika. W celu wyeliminowania tych efektów opracowano nową koncepcję urządzenia.

### Układ z synchronizacją napędów

Jako metodę eliminującą zaobserwowane niepożądane zjawiska zaproponowano użycie drugiego napędu wymuszającego ruch obrotowy ramienia gnącego. Jako napęd zastosowano siłownik liniowy z napędem elektrycznym. Koncepcję zmodyfikowanego stanowiska przedstawiono na rys. 5.

Zgodnie z rysunkiem ruch ramienia gnącego będzie wymuszany przez równoczesny ruch obu siłowników. Powstaje jednak problem wzajemnej synchronizacji ruchu



Rys. 5. Zmodyfikowana wersja urządzenia: 1 – pierwszy siłownik, 2 – drugi siłownik, 3 – ramię gnące

tych napędów [5, 6]. Brak synchronizacji mógłby spowodować niewłaściwą pracę urządzenia i w konsekwencji nawet zniszczenie elementów konstrukcji. Według opracowanej koncepcji ruch siłowników ma być realizowany z wykorzystaniem silników krokowych. W celu ich wysterowania należy wygenerować dwa sygnały dla każdego z napędów. Sygnał DIR jest odpowiedzialny za wybór kierunku obrotu, a sygnał STEP – za ustalenie prędkości obrotowej. Liczba wygenerowanych impulsów sygnału STEP determinuje przemieszczenie kątowe wału napędu. Należy zauważyć, że zgodnie z przyjętą koncepcją prędkość wysuwu tłoczyńska pierwszego siłownika jest stała i zdefiniowana przez użytkownika. Prędkość drugiego siłownika będzie natomiast zmienna w czasie trwania procesu. Należy zatem wyznaczyć sygnały STEP dla obu siłowników i dla każdej chwili impulsowania pętli głównej programu przed rozpoczęciem pracy systemu lub w czasie rzeczywistym.

Procedurę wyznaczania sygnałów sterujących dla napędów siłowników rozpoczęto od wyznaczenia przebiegu zmian położeń i prędkości tłoczyśk siłowników. Na podstawie żądanych parametrów procesu – takich jak posuw i kąt gięcia – obliczono całkowite przemieszczenie tłoczyśka pierwszego siłownika  $x_1$  oraz całkowity czas ruchu  $t$ :

$$x_1 = \phi \cdot R \quad (1)$$

$$t = \frac{x_1}{V} \quad (2)$$

gdzie:  $\phi$  – kąt gięcia,  $R$  – promień gięcia,  $V$  – posuw.

Wykorzystując metody iteracyjne, wyznaczono wartości przemieszczenia pierwszego siłownika dla całkowitego czasu ruchu z krokiem  $\Delta t$  wynoszącym 0,001 s – otrzymano sygnał przebiegu przemieszczenia w czasie  $x(t)$ . Prędkość ruchu pierwszego siłownika jest zgodna z założonym przez użytkownika posuwem.

Przemieszczenie drugiego siłownika jest powiązane z przemieszczeniem pierwszego siłownika zależnościami trygonometrycznymi, wynikającymi z ruchu obrotowego ramienia gnącego. Zgodnie z rys. 5 można wyznaczyć trójkąt o wierzchołkach  $CDE$ , z kątem  $\alpha$  pomiędzy ramionami  $CE$  i  $ED$ . W pozycji początkowej procesu miara tego kąta wynosi  $131^\circ$ , a następnie kąt ten ulega zmniejszeniu o aktualną wartość kąta gięcia. Wysunięcie drugiego siłownika  $x_2$  można zatem wyznaczyć, korzystając z twierdzenia kosinusów:

$$x_2 = |CD| = \sqrt{|CE|^2 + |ED|^2 - 2|CE| \cdot |ED| \cos \alpha} \quad (3)$$

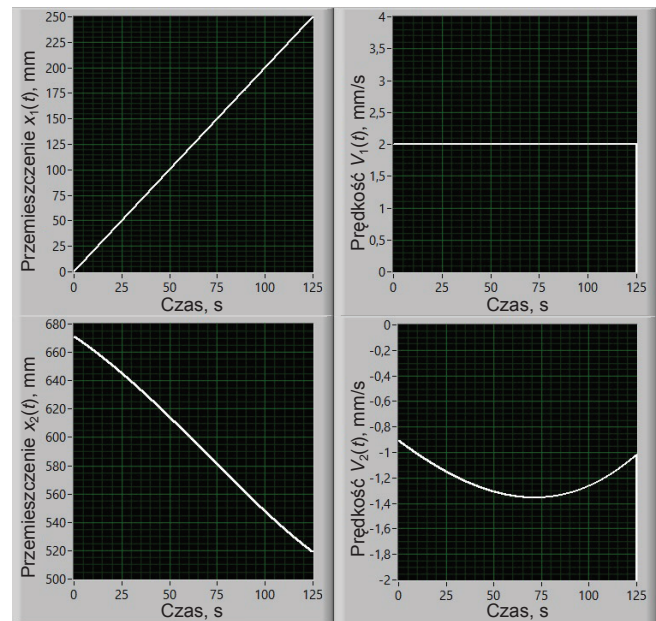
gdzie:  $\alpha = (131^\circ - \phi)$ .

Po podstawieniu  $\phi(t) = x_1(t)/R$  wzór (3) ma postać:

$$x_2(t) = \sqrt{|CE|^2 + |ED|^2 - 2|CE| \cdot |ED| \cos(131 - \frac{x_1(t)}{R})} \quad (4)$$

Wykorzystując zależność (4), wyznaczono przebieg zmian położenia drugiego siłownika dla całkowitego czasu ruchu. Otrzymany przebieg zróżniczkowano kolejno z krokiem czasowym wynoszącym 0,001 s i w ten sposób otrzymano przebieg zmian prędkości drugiego siłownika. System obliczeń sygnałów sterujących, akwizycji danych oraz wizualizacji przebiegów sił i kąta gięcia zbudowano z wykorzystaniem środowiska LabView.

Przykładowe przebiegi zadanych przemieszczeń i prędkości zsynchronizowanych napędów dla kąta gięcia  $90^\circ$  i posuwu 2 mm/s przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Przebiegi przemieszczeń i prędkości napędów

## Podsumowanie

Zaproponowana metoda synchronizacji polega na sterowaniu dwoma napędami z wykorzystaniem sygnałów sterujących, wyznaczonych na podstawie analizy kinematycznej stanowiska. Badania innych urządzeń wykazały, że z uwagi na brak sumowania się błędów regulacji ta metoda jest skuteczniejsza w porównaniu ze sterowaniem typu Master-Slave, w którym drugi napęd jest sterowany na podstawie przemieszczeń pierwszego napędu. Zaletą proponowanej metody są proste zależności opisujące sygnały sterujące, przez co jest ona łatwa do wdrożenia i umożliwia uzyskanie krótkiego czasu obliczeń.

**Przedstawione w niniejszym artykule badania są finansowane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu badawczego nr PBS3/A5/47/2015.**

## LITERATURA

1. Dahotre N.B., Harimkar S. "Laser Fabrication and Machining of Materials". Boston: Springer US, 2010.
2. Joshi S., Dixit U. "Laser Based Manufacturing". New Delhi: Springer India, 2015.
3. Steen W., Mazumder J. "Laser Material Processing". London: Springer Verlag, 2010.
4. Mucha Z., Widłaszewski J., Kurp P., Mulczyk K. "Mechanically assisted laser forming of thin beams". Proc. of SPIE 10159, Laser Technology 2016: Progress and Applications of Lasers. (2016): s. 101590U-1-101590U-10.
5. Chen C., Liu L., Cheng C., Chiu G. "Fuzzy controller design for synchronous motion in a dual-cylinder electro-hydraulic system". Control Engineering Practice. 16, 6 (2008): s. 658-673.
6. Liu X., Li Ch., Zhou X., Meng Y. "Synchronization control study for two cylinders electro-hydraulic Grasping System". IEEE Proc. of ICMA International Conference on Mechatronics and Automation 2007: Mechatronics and Automation (2007).