

Marcin BAJKOWSKI
Remigiusz OLESIŃSKI
Marek RADOMSKI

MODELOWANIE UKŁADU STEROWANIA NAWIJARKI TAŚMY STALOWEJ

STRESZCZENIE *Jednym ze sposobów wzmacniania komór ciśnieniowych jest owijanie rury rdzeniowej cylindra nawojem taśmy. Aby uzyskać wymaganą jakość takiej komory, należy w procesie nawijania taśmy zapewnić w pełni kontrolowaną i stabilną siłę jej naciągu. Realizowany projekt maszyny do nawijania obejmuje również układ sterowania zespołu napędu i hamowania. Przedstawiona zostanie metoda symulacji Hardware in the Loop, wykorzystująca sterownik przemysłowy i program LabView.*

Słowa kluczowe: *maszyna do nawijania, symulacja, HIL, sterowanie, PLC*

1. WSTĘP

Niektóre procesy technologiczne wymagają bardzo wysokich ciśnień, a do tego potrzebne są komory o dużej wytrzymałości. Jednym ze sposobów wzmacniania ścian komory ciśnieniowej jest owinięcie jej taśmą stalową [1, 2]. Aby uzyskać właściwą jakość konstrukcji, należy zapewnić odpowiednie warunki podczas operacji nawijania [3]. Oprócz dokładności układania wielu warstw należy także zachować stosowny naciąg, przy czym wskazana jest jego wysoka i stabilna wartość. Projektowana jest maszyna do nawijania taśmy stalowej na rurę, a jej system sterowania ma utrzymywać naciąg taśmy na zadanym poziomie. Badania modelowe mają pomóc w realizacji zadania. Przedstawiona zostanie metoda symulacji Hardware in the loop (HIL) ułatwiająca analizę działania układu sterowania ze sterownikiem przemysłowym PLC.

dr inż. Marcin BAJKOWSKI, dr hab. inż. Marek RADOMSKI

e-mail: granada@pompy.pl, mr@wip.pw.edu.pl

Institut Mechaniki i Poligrafii PW, ul. Narbutta 85, 02-524 Warszawa

dr inż. Remigiusz OLESIŃSKI

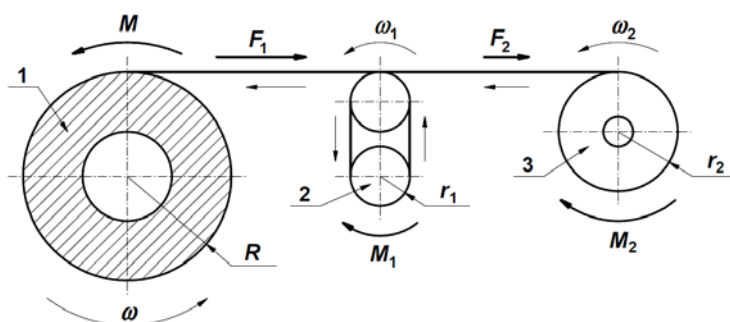
e-mail: roles@isep.pw.edu.pl

Institut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej PW, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 270, 2015

2. MODEL UKŁADU MECHANICZNEGO

Na rysunku 1 zamieszczono schemat stanowiska do nawijania taśmy. Taśma jest nawijana na rurę obracającą się z prędkością kątową ω . Naciąg taśmy F_1 ma być kontrolowany i jego wielkość jest sterowana za pomocą hamulca głównego, wytwarzającego moment hamujący M_1 i hamulca pomocniczego, którego moment hamujący wynosi M_2 . Hamulce te są połączone sprzęgłami z osiami wałów mechanizmu hamulca głównego i mechanizmu odwijania taśmy ze szpuli. Mechanizm hamulca głównego składa się z rolek osadzonych na dwóch równoległych wałach. Rolki z wałami połączone są wpustami uniemożliwiającymi ich ruch względny. Ponadto ruch obydwu wałów związany jest za pomocą przekładni zębatej, która zapewnia takie same ich prędkości kątowe. Taśma jest prowadzona kolejno przez kilka par rolek. Każda para rolek składa się z rolki umieszczonej na wale górnym i rolki połączonej wpustem z wałem dolnym.



Rys. 1. Schemat stanowiska do nawijania taśmy

1 – owijana rura, 2 – mechanizm hamulca głównego, 3 – mechanizm odwijania taśmy ze szpuli

Do analizy procesu nawijania taśmy przyjęto następujące założenia:

- taśma jest nierozciągliwa,
- promienie rolek w mechanizmie hamulca głównego są stałe $r_1 = \text{const}$,
- współczynnik tarcia taśmy o rolki mechanizmu hamulca głównego jest stały,
- liczba par rolek zapewnia brak poślizgu taśmy na rolkach.

Z faktu, że prędkość postępową taśmy v_T jest jednakowa w każdym punkcie wynika, że pomiędzy prędkościami kątowymi są następujące relacje:

$$v_T = \omega R = \omega_1 r_1 = \omega_2 r_2 \quad (1)$$

Stosując zasadę d'Alemberta dla układu mechanicznego wg rysunku 1 otrzymuje się równania ruchu sformułowane poniżej.

I tak dla rury, na którą nawijana jest taśma mamy:

$$I_R \frac{d\omega}{dt} = M - R \cdot F_1 = R \cdot F_N - R \cdot F_1 \quad (2)$$

dla zespołu rolek (mechanizm hamulca głównego):

$$I_1 \frac{d\omega_1}{dt} = r_1 \cdot (F_1 - F_2) - M_1 \quad (3)$$

dla mechanizmu odwijania taśmy ze szpuli:

$$I_2 \frac{d\omega_2}{dt} = r_2 \cdot F_2 - M_2 \quad (4)$$

gdzie:

F_N – siła napędzająca rurę i działająca na jej promieniu R ,

F_1 – siła naciągu taśmy nawijanej na rurę, działająca na promieniu rolki r_1 ,

F_2 – siła naciągu taśmy podawanej do mechanizmu hamulca głównego, działająca na promieniu szpuli r_2 ,

I_R – moment bezwładności rury z nawiniętymi dotychczas warstwami taśmy

I_1 – moment bezwładności mechanizmu hamulca głównego,

I_2 – moment bezwładności mechanizmu odwijania taśmy ze szpuli.

W przypadku braku poślizgu na rolkach zespołu hamulca głównego słuszne są równania więzów (1). Zatem:

$$R \frac{d\omega}{dt} = r_1 \frac{d\omega_1}{dt} = r_2 \frac{d\omega_2}{dt} \quad (5)$$

Po podstawieniu do (3) sił F_1 i F_2 , wyznaczonych z równań (2) i (4), z uwzględnieniem związków (5), otrzymuje się:

$$\left(I_1 + I_R \frac{r_1^2}{R^2} + I_2 \frac{r_1^2}{r_2^2} \right) \frac{d\omega_1}{dt} = M \frac{r_1}{R} - M_1 - M_2 \frac{r_1}{r_2} \quad (6)$$

Siłę F_1 można wówczas wyznaczyć z równania (2). Mając na uwadze (5) i podstawiając przyspieszenie kątowe $d\omega_1/dt$ z (6) otrzymuje się:

$$F_1 = \frac{1}{R} \left[M - I_R \frac{r_1}{R} \frac{M \frac{r_1}{R} - M_1 - M_2 \frac{r_1}{r_2}}{I_1 + I_R \frac{r_1^2}{R^2} + I_2 \frac{r_1^2}{r_2^2}} \right] \quad (7)$$

Równanie (6) i związek (7) pozwalają analizować ruch omawianego układu mechanicznego i siłę naciągu nawijanej taśmy, gdy znane są: moment M , napędzający nawijaną rurę rdzeniową oraz momenty hamujące: M_1 i M_2 .

W przypadku, gdy moment M jest niez znany, a znane jest przyspieszenie kątowe $d\omega/dt$ oraz momenty M_1 i M_2 , siłę F_2 można wyznaczyć z równania (4). Wykorzystując związek (5) otrzymuje się:

$$F_2 = I_2 \frac{R}{r_2^2} \frac{d\omega}{dt} + \frac{M_2}{r_2} \quad (8)$$

Analogicznie można wyznaczyć siłę F_1 z równania (6):

$$F_1 = I_1 \frac{R}{r_1^2} \frac{d\omega}{dt} + F_2 + \frac{M_1}{r_1} \quad (9)$$

Siłę naciągu taśmy nawijanej na rurę /1/ opisuje równanie:

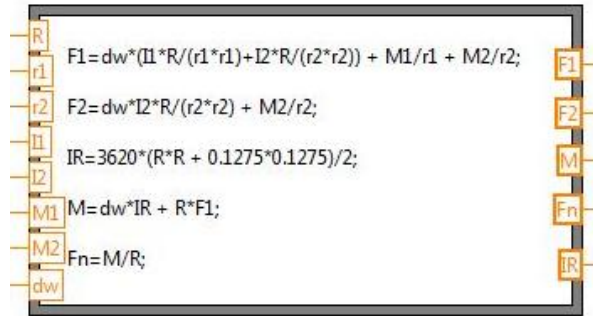
$$F_N = \frac{M}{R} = F_1 + \frac{I_R}{R} \frac{d\omega}{dt} \quad (10)$$

3. SYMULACJA UKŁADU MECHANICZNEGO

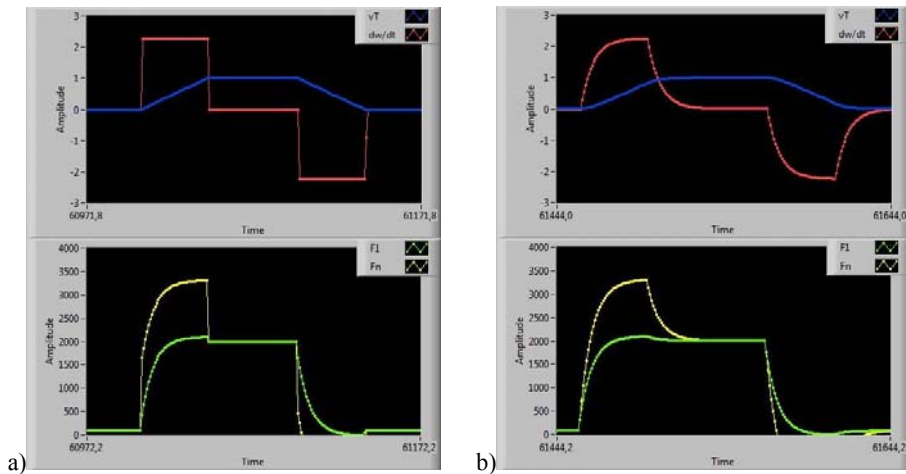
Wstępny projekt nawijarki przewiduje zastosowanie niezależnej, gotowej maszyny do napędu owijanej rury. Kontrola będzie podlegał tylko system podawania i naciągania taśmy. Moc i konstrukcja napędu rury pozwalają przyjąć założenie, że prędkość obrotowa rury będzie niezależna od pozostałych części układu nawijania. Zatem do analizy zjawisk i wyznaczenia sił występujących w układzie przyjęto układ równań 8 – 10, w których za dynamikę zmian wielkości odpowiada zmiana prędkości kątowej rury.

Do symulacji zjawisk w układzie mechanicznym nawijarki zastosowano program LabView. Przygotowana aplikacja składa się z dwóch części: obliczeniowej oraz graficznego panelu kontrolnego. W ramach obliczeń wykonywana jest cykliczna pętla, w której zadawana jest krzywa zmian prędkości rury oraz wyliczana jej pochodna. Zasadniczy element części obliczeniowej przedstawia rysunek 2. Jest to blok formuły wyznaczający wartości sił F_1 , F_2 i F_N , momentu M oraz momentu bezwładności I_R (dla przykładowych wymiarów rury). Wielkościami wejściowymi dla bloku formuły są promienie wałów R , r_1 , r_2 , momenty bezwładności I_1 , I_2 , momenty sił hamujących M_1 , M_2 oraz przyspieszenie kątowe rury (oznaczone jako $d\omega$).

Rysunek 3 przedstawia fragment panela graficznego z wyliczonymi przebiegami prędkości liniowej taśmy v_T wymuszonej przez napęd rury, przyspieszenia kątowego rury $d\omega/dt$, siły hamującej F_1 oraz siły napędzającej owijaną rurę F_N . Wymiary geometryczne oraz momenty hamujące przyjęto jako wartości stałe. Pokazane są dwa przypadki: (a) – liniowej zmiany prędkości oraz (b) – zmiany prędkości wg krzywej „s”.



Rys. 2. Blok formuły programu LabView do wyliczania wartości sił w układzie nawijarki na podstawie układu równań 8–10



Rys. 3. Przebiegi wielkości symulowanych

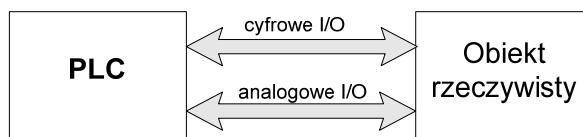
t.j.: prędkości liniowej taśmy v_T [m/s], przyspieszenia kąowego rury $d\omega/dt$ [rad/s], siły hamującej F_1 [N] i siły napędzającej F_N [N] układu nawijarki dla różnych kształtów krzywej narastania i opadania prędkości oraz stałych wartości momentów hamujących M_1 i M_2

4. UKŁAD STEROWANIA NAWIJARKI

Projektowana nawijarka będzie wyposażona w sterownik przemysłowy, który oprócz różnych funkcji kontrolnych ma regulować siłę naciągu nawijanej taśmy. Przewidywany jest pomiar siły naciągu taśmy na owijaną rurę i sterowanie momentami hamującymi szpuli podającej oraz zespołu rolek hamulca głównego.

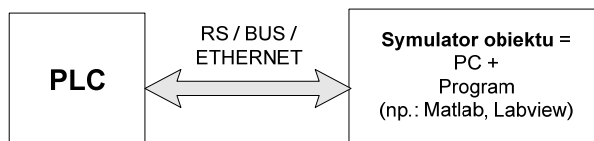
W normalnych warunkach sterownik PLC „współpracuje” z automatyzowanym obiektem najczęściej za pośrednictwem elektrycznych sygnałów wejściowych i wyjściowych, cyfrowych i analogowych. Sytuację taką przedstawia schematycznie rysunek 4 [4]. Sterownik odczytuje stany i wartości sygnałów na swoich wejściach

i zgodnie z zapisanym programem wymusza sygnały wyjściowe wpływając w ten sposób na obiekt. A to, zgodnie z zasadami funkcjonowania obiektu, skutkuje odpowiednimi zmianami sygnałów docierających do sterownika.



Rys. 4. Schemat połączenia sterownika przemysłowego z obiektem rzeczywistym

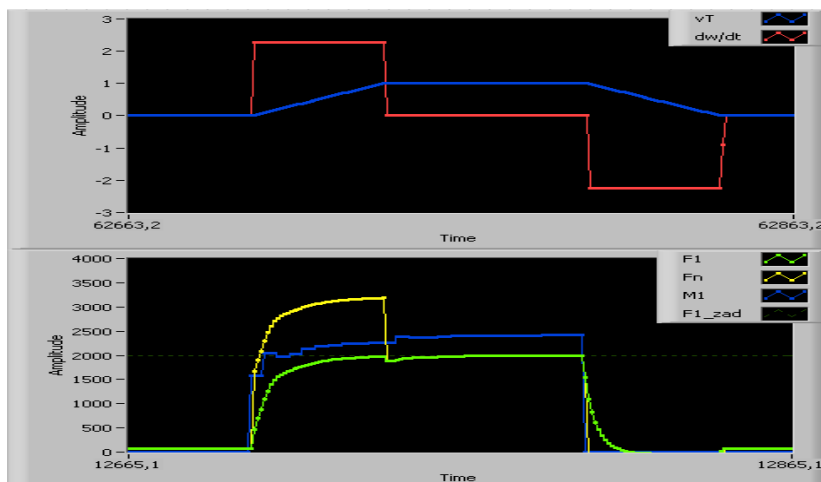
Na etapie projektowania można posłużyć się modelem wirtualnym zbudowanym w oparciu o znany model matematyczny. Jest to metoda określana jako Hardware in the loop (HIL). Przekazywanie informacji między sterownikiem a obiektem może odbywać się za pośrednictwem systemu komunikacyjnego. Sytuację taką przedstawia rysunek 5. Sterownik wykonuje rzeczywisty program, jedynie zmienione ma źródła informacji wejściowych i ew. miejsca do zapisu informacji wyjściowych. W zależności od sposobu komunikacji i stałych czasowych występujących w symulowanym obiekcie należy uwzględnić częstotliwość przekazywania danych.



Rys. 5. Schemat połączenia sterownika przemysłowego z wirtualnym obiektem

W rozpatrywanym przypadku symulacji układu nawijarki w programie LabView, do komunikacji ze sterownikiem wykorzystano system wymiany danych OPC. Z symulatora do sterownika przekazywana jest przede wszystkim wyliczona wartość siły naciągu nawijanej taśmy F_1 , a ze sterownika do symulatora wartość sygnału sterującego momentem hamującym M_1 . Symulator uwzględnia dodatkowo stałą czasową przy zmianach wartości M_1 w odpowiedzi na sygnał zadany.

Rysunek 6 przedstawia przebiegi wartości symulowanych wielkości mechanicznych w przypadku zastosowania do regulacji siły naciągu F_1 (na zadanym poziomie 2000N) regulatora typu PID, realizowanego przez program sterownika przemysłowego połączonego z symulatorem za pomocą sieci Ethernet. Przyjęto stałe parametry układu wynikające z planowanych wymiarów maszyny, stały moment hamujący M_2 oraz czas rozruchu i hamowania napędu rury równy 2 sekundy. Dodatkowo na dolnym wykresie znajduje się przebieg wartości sygnału sterującego, generowanego przez regulator sterownika (niebieska krzywa). Można na nim zaobserwować odcinkami stałe wartości, wynikające z ograniczonej częstotliwości wymiany danych między programem sterownika a aplikacją symulacyjną na komputerze.



Rys. 6. Przebiegi wielkości symulowanych

t.j.: prędkości liniowej taśmy v_T [m/s], przyspieszenia kąowego rury $d\omega/dt$ [rad/s], siły hamującej F_1 [N] i siły napędzającej F_N [N] układu nawijarki przy sterowaniu momentem hamującym M_1 za pomocą rzeczywistego sterownika ($M_2 = \text{const}$)

5. WNIOSKI

Zaprezentowany sposób analizy działania układu sterowania nawijarką pozwoli dobrać i wstępnie przebadать różne algorytmy kontroli siły naciągu taśmy podczas owijania nią rury komory ciśnieniowej, realizowane przez rzeczywisty program sterownika PLC. Umożliwi dobór parametrów regulatorów w różnych warunkach pracy. Trudność w tym przypadku wynika z gwałtownych zmian sił powodowanych niezależnym napędem rury, a także zmieniającymi się podczas całego procesu wymiarami i momentami bezwładności owijanej rury oraz szpuli podającej taśmę. Należy zwrócić uwagę na zjawisko opóźnień przekazywania sygnałów, wynikające ze sposobu realizacji transmisji.

LITERATURA

1. Buchter H.H.: Apparate und Armaturen der chemischen Hochdrucktechnik, Springer, Berlin 1967.
2. Harvey J. F., Fryer D. M.: High Pressure Vessels, Chapman & Hall, 1998.
3. Bajkowski M., Radomski M.: The Cylinder of the Autoclave Charged with the Internal Pressure, Strengthen with a Strip Wound onto It, with Programmable Tension Realized by a Magnethoreological Structure, Design and Modeling of Mechanical Systems, M. Haddar et all (Eds.), LNME, s. 605-611, Springer, Berlin, 2013.

4. Hańczur P., Olesiński R. Symulacja obiektu nadzorowanego przez sterownik PLC, Konferencja Modelowanie i symulacja MiS-5, Kościelisko 2008.

Przyjęto do druku dnia 18.09.2015 r.

MODELING OF STRIP WINDER CONTROL

Marcin BAJKOWSKI, Remigiusz OLESIŃSKI, Marek RADOMSKI

ABSTRACT *One of the ways to enhance the working pressure of vessels is to reinforce the cylinder by means of a multiple-layered strip wound. In order to obtain the required quality of such a vessel, a fully controlled and stable strength of the strip tension must be ensured in the course of the winding process. The design of the winding machine also includes control systems of propulsion and braking. The Hardware-in-the-Loop simulation method has been presented using an industrial driver and the LabView software.*

Keywords: *winder, simulation, HIL, control, PLC*

Dr inż. Marcin BAJKOWSKI ukończył studia na Wydziale Mechanicznym Technologii i Automatykacji Politechniki Warszawskiej w 2001 roku. Stopień naukowy doktora nauk technicznych uzyskał w 2007 roku. Od 2009 roku jest pracownikiem naukowo-dydaktycznym Instytutu Mechaniki i Poligrafii PW. Zainteresowania zawodowe to: magnetoreologia i smart materiale.

Dr hab. inż. Marek RADOMSKI ukończył studia na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Warszawskiej w 1978 roku. W 1997 r. uzyskał stopień naukowy doktora nauk technicznych, zaś w 2014 r. doktora habilitowanego nauk technicznych w dyscyplinie naukowej mechanika. Od 1980 roku jest pracownikiem Politechniki Warszawskiej, obecnie na stanowisku profesora nadzwyczajnego w Instytucie Mechaniki i Poligrafii, w Zakładzie Mechaniki i Techniki Uzbrojenia. Zainteresowania zawodowe to: mechanika, mechatronika, techniki uzbrojenia oraz urządzenia wysokociśnieniowe.

Dr inż. Remigiusz OLESIŃSKI ukończył studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej w 1982 roku a w 1991 roku uzyskał stopień doktora nauk technicznych. Od 1982 roku jest pracownikiem naukowo-dydaktycznym i dydaktycznym Instytutu Sterowania i Elektroniki Przemysłowej PW. Zainteresowania zawodowe to: napędy elektryczne i automatyka przemysłowa.