

Zenon OCIEPA

POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, INSTYTUT MECHATRONIKI, NANOTECHNOLOGII I TECHNIKI PRÓŻNIOWEJ

Pomiary położenia kąтового z zastosowaniem enkodera i wejść binarnych sterowników PLC

Dr inż. Zenon OCIEPA

Zajmuje się programowalnymi układami sterowania, zwłaszcza przemysłowymi sterownikami PLC, napędami oraz systemami nadrzędnego monitorowania SCADA. W pracy naukowej prowadzi badania dyskretnych algorytmów sterowania, cyfrowych algorytmów sterowania serwonapędami oraz rozwija metody komputerowego wspomaganie projektowania regulatorów cyfrowych. Jest Bieglym Sądowym w zakresie komputerowych systemów monitorowania i sterowania w przemyśle i gospodarce.



e-mail: zenon.ociepa@tu.koszalin.pl

Streszczenie

Praca dotyczy sposobu organizacji cyfrowych pomiarów położenia kąowego za pomocą enkoderów i sterowników PLC. Analizuje się stosowane w praktyce zastosowania enkoderów i sposoby przetwarzania ich sygnałów wyjściowych w sterownikach programowalnych. Szczególną uwagę poświęcono tanim rozwiązaniom pomiaru położenia kąowego z wykorzystaniem enkoderów inkrementalnych i binarnych wejść PLC. Opracowano modele symulacyjne cyfrowych torów pomiarowych i przeprowadzono ich badania w środowisku Matlab. W badaniach zwrócono uwagę na potrzebę wzajemnego doboru enkodera i sterownika PLC w procesie projektowania toru pomiarowego.

Słowa kluczowe: enkodery inkrementalne, sterowniki programowalne PLC, symulacje komputerowe.

Measurements of angular position by an encoder with binary PLC inputs**Abstract**

The paper deals with the way of taking digital measurements of angular position by means of encoders and PLC controllers. The measurement systems used in practice and the ways of transforming their output signals in programmable PLC controllers are analysed. A special attention is paid to cheap design solutions, adequate for low angular velocity. There is proposed application of incremental encoders, which are cheaper than absolute ones, and typical and non-expensive digital input PLCs. Mathematical models of such digital measurement channels including encoders and PLCs software were worked out and simulation experiments in MATLAB were performed. Reading encoders The output frequency bands, adequate for computing capacity, of reading encoders are defined. The resolution of encoders should be chosen in relation to the capacity of PLC inputs.

Keywords: incremental encoders, Programmable Logic Controllers PLC, computer simulations.

1. Wprowadzenie

Z pomiarami położenia kąowego mamy najczęściej do czynienia w obrabiarkach, pojazdach mechanicznych, maszynach elektrycznych i robotach. Przez długie lata stosowano analogowe pomiary kąta obrotu z zastosowaniem rezolwera (ang. resolver), czy jeszcze starsze sposoby z zastosowaniem selsynów.

Pomiar położenia kąowego za pomocą rezolwera odbywał się na podstawie pomiaru zmian napięcia wyjściowego indukowanego w wirniku rezolwera, który sprzężony z obracającym się wałem maszyny zmieniał swoje położenie w stosunku do nieruchomych uzwojeń stojana. Takie rozwiązania techniczne stosowane były jeszcze kilka, kilkanaście lat temu w napędach elektrycznych maszyn i robotów.

Pomiar położenia kąowego za pomocą selsynów był najczęściej stosowany w statkach morskich do zdalnego pokazywania położenia płetwy steru oraz w radarach do wskazywania aktualne-

go położenia anteny. Selsyny są przetwornikami elektromaszynowymi z nadajnikiem i odbiornikiem odwzorowującym aktualne położenie kąowe nadajnika. Można jeszcze dzisiaj spotkać selsyny w przełączanych transformatorach stacji elektroenergetycznych, ale w innych zastosowaniach takie rozwiązania techniczne są już historią.

Rozwój współczesnej techniki cyfrowej całkowicie wyparł wcześniej stosowane analogowe pomiary położenia kąowego i zastąpił je pomiarami cyfrowymi. Jednym z podstawowych urządzeń pomiarowych stał się enkoder.

2. Enkodery

Enkodery są przetwornikami przeznaczonymi nie tylko do pomiaru kąta obrotu, ale także do pomiaru przemieszczenia liniowego. Stosuje się je powszechnie w napędach elektrycznych obrabiarek sterowanych numerycznie CNC (ang. Computerized Numerical Control), w układach sterowania zapłonem silników spalinowych, układach bezpiecznego hamowania pojazdów mechanicznych oraz różnych urządzeniach pomiarowych wielkości geometrycznych. Enkodery zamontowane na ruchomych częściach maszyn (często w napędach) pozwalają mierzyć ich aktualne położenie kąowe lub liniowe. Takie enkodery nazywane są absolutnymi. Enkodery przeznaczone do pomiaru zmian położenia kąowego lub liniowego nazywane są inkrementalnymi.



Rys. 1. Współczesne enkodery
Fig. 1. Modern encoders

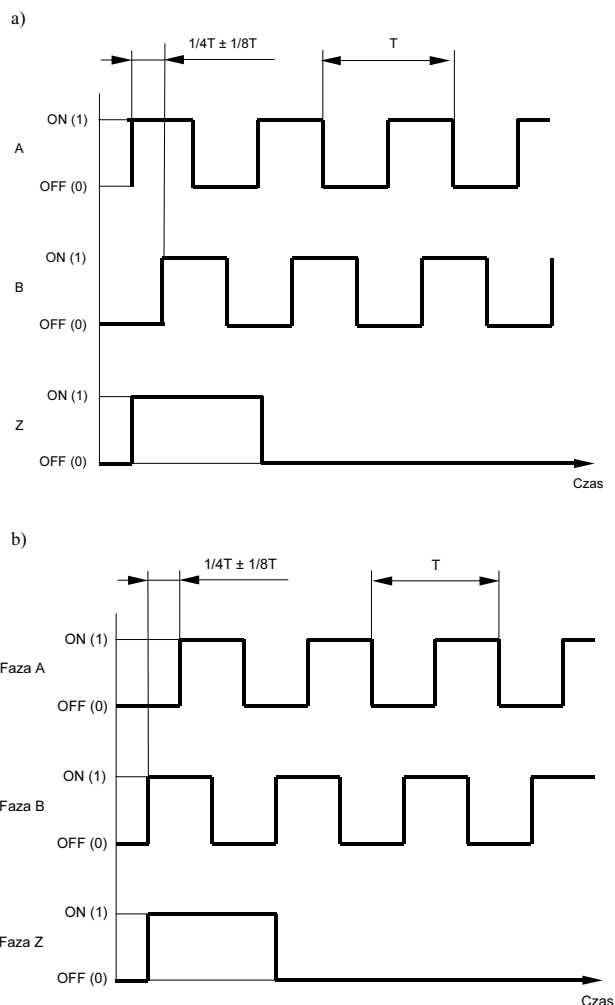
Współczesne enkodery, w zależności od zastosowań, mogą generować nawet kilkaset tysięcy impulsów na jeden obrót, jak np. 18-bitowy enkoder Mitsubishi w precyzyjnym serwonapędzie MR-J3 [1]. Ten impulsowy przetwornik generuje ponad 260000 impulsów na jeden obrót, jego rozdzielczość jest bardzo wysoka i przez to umożliwia dokładne sterowanie położeniem i prędkością napędów elektrycznych, stosowanych w precyzyjnych urządzeniach mechatronicznych. W maszynach, urządzeniach i pojazdach mechanicznych najczęściej stosowane są enkodery o rozdzielczości kilkaset imp/obrot, ale nie więcej jak 4000 imp/obrot (jak np. oferta katalogowa niektórych enkoderów [2] firmy Omron (tab. 1)).

Tanie enkodery inkrementalne działają jak impulsatory, generując określoną liczbę impulsów na obrót. W takich urządzeniach częstotliwość impulsów wyjściowych jest zależna od prędkości obrotowej osi enkodera, a także od jego rozdzielczości [3]. Pomiar przemieszczenia kąowego wymaga dodatkowego urządzenia zliczającego impulsy.

Tab. 1. Enkodery inkrementalne
Tab. 1. Incremental encoders

Zasilanie	Rodzaj wyjścia	Rozróżnialność impulsy/obrót	Model	Sposób połączenia, przewody
12÷24 VDC	Komplementarne (bez polaryzacji)	100, 200, 360, 500, 600, 720, 800, 1000, 1024, 1200, 1500, 2000, 2048, 2500, 3600	E6C3-CWZ5 GH	Skrętka 1 m
5÷12 VDC	Napięciowe NPN/PNP	100, 200, 360, 2500, 3600	E6C3-CWZ5E H	Skrętka 1 m
5÷12 VDC	Typu „Line driver” umożliwiające połączenia długimi przewodami	100, 200, 360, 2500, 3600	E6C3-CWZ5 XH	Skrętka, nawet 100 m

Najprostsze enkodery posiadają jedno wyjście (często nazywane fazą), ale najczęściej enkodery inkrementalne posiadają co najmniej dwa wyjścia (rys. 2) nazywane fazami „A” i „B”.



Rys. 2. Przebiegi sygnałów wyjściowych z enkodera inkrementalnego, a) obrót w prawo, b) obrót w lewo

Fig. 2. Output signals of the incremental encoder, a) right rotation, b) left rotation

Sygnał z fazy „A” w postaci fali prostokątnej wykorzystuje się do zliczania impulsów i oceny przrządów kątowych. Sygnał z fazy „B” jest potrzebny do określenia kierunku obrotu enkodera. Może on być także wykorzystany w niektórych przypadkach

(małe prędkości obrotowe i szybkie liczniki cyfrowego urządzenia pomiarowego) do dwukrotnego zwiększenia rozróżnialności enkodera. Sygnał fazy „B” jest także ciągiem prostokątnych impulsów, ale przesuniętych w fazie w stosunku do sygnału „A”. Przesunięcie to może być dodatnie lub ujemne i zależy ono od kierunku obrotu osi enkodera (rys. 2). Sygnał „A” wyprzedza w fazie sygnał „B”, ale gdy obrót osi enkodera będzie przeciwny, to sygnał „B” będzie wyprzedzał sygnał „A”. W obu przypadkach różnica fazy między sygnałem „A” i „B” wynosi około $\pm 90^\circ$. Producenci enkoderów dopuszczają pewien margines błędu wynikającego z dokładności wykonania i zmian tego kąta na skutek starzenia się układu pomiarowego, np. optoelektronicznego zastosowanego w badanym enkoderze E6A2 (błąd ten może wynosić nawet $\pm 45^\circ$). Na rysunku 2 przedstawiono także sygnał z fazy „Z”, który pojawia się jeden raz na obrót enkodera i można wykorzystać go przy pomiarach kąta obrotu maszyn (elementów) wieloobrotowych. Ponadto „Z” może być sygnałem korygującym liczniki rewersyjne w programowalnych sterownikach PLC.

W odróżnieniu od enkoderów inkrementalnych, droższe enkodery absolutne umożliwiają bezpośredni pomiar położenia kąowego. Generują sygnał cyfrowy, który jest najczęściej zakodowany, np. według kodów dwójkowych (ang. binary), dziesiętnych zakodowanych dwójkowo BCD (ang. Binary-Coded Decimal) przy użyciu czterech bitów lub też kodów Greya. To ostatnie kodowanie jest bardzo korzystne ze względu na to, że jest cykliczne i kolejne dwa słowa kodu różnią się stanem tylko jednego bitu. Umożliwia to programowe wykrywanie błędów odczytu (ew. transmisji) sygnału w aparaturze wykorzystującej ten sygnał.

3. Moduły wejść binarnych sterowników PLC

Bardzo często cyfrowe tory pomiaru przemieszczeń kątowych budowane są z zastosowaniem programowalnych sterowników PLC. Tu mogą być dwa podstawowe sposoby realizacji takich pomiarów:

- Zastosowanie enkodera absolutnego z wyjściem cyfrowym BCD, Greya lub binarnym. To rozwiązanie wymaga dekodera w programowalnym urządzeniu pomiarowym, np. w postaci wyspecjalizowanego modułu sterownika PLC lub typowych wejść cyfrowych DI sterownika PLC i oprogramowania dekodującego;
- Zastosowanie enkodera inkrementalnego, impulsowego. To rozwiązanie jest tańsze od poprzedniego, nie wymaga specjalnych modułów wejściowych sterownika PLC, wystarczą typowe wejścia DI, najlepiej wejścia tzw. szybkich liczników.

Firmy takie jak: Omron, GE Fanuc, Mitsubishi, Vision, Siemens, produkujące tanie sterowniki programowalne PLC w wykonaniu kompaktowym nano i micro, wyposażają standardowo PLC w wejścia binarne DI, w tym najczęściej w jedno lub dwa szybkie wejścia licznikowe. Te właśnie wejścia DI dedykowane są dla aplikacji pomiarowych z zastosowaniem czujników impulsowych, takich jak enkodery inkrementalne. Częstotliwość odczytu (odświeżania) wejścia DI w takich sterownikach może być nawet 5kHz, jak w sterowniku kompaktowym VersaMax Micro. To oznacza, że stosując enkoder o rozróżnialności 100 imp/obrót możliwe byłyby odczyty położenia kąowego napędu obracającego się z prędkością nawet 1200 obr/min. Przy tym należy pamiętać o spełnieniu warunku Shannona, dotyczącego doboru częstotliwości próbkowania. W związku z tym, pomocnym w doborze sterownika PLC, a właściwie doborze modułu szybkiego licznika PLC, może być wzór (1)

$$f_{\text{PLC}} \geq 2 \cdot \frac{\omega}{60} \cdot R_{\text{Enc}}, \quad (1)$$

gdzie: f_{PLC} – [Hz] minimalna, dopuszczalna częstotliwość odczytu sygnału przez wejście licznikowe DI PLC, ω – [obr/min] maksymalnie dopuszczalne obroty części ruchomej, R_{Enc} – [imp/obr] rozróżnialność enkodera.

Jeśli ten warunek (1) nie będzie spełniony, to wystąpi niebezpieczeństwo „gubienia” przychodzących impulsów do sterownika PLC i w efekcie pomiary wielkości kątowych będą z niedomiarem.

W nieco „silniejszych” sterownikach PLC, czyli z szybszymi jednostkami CPU, częstotliwość odczytu wejścia licznikowego może być nawet 70kHz (jak np. w VersaMax GE Fanuc) i więcej.

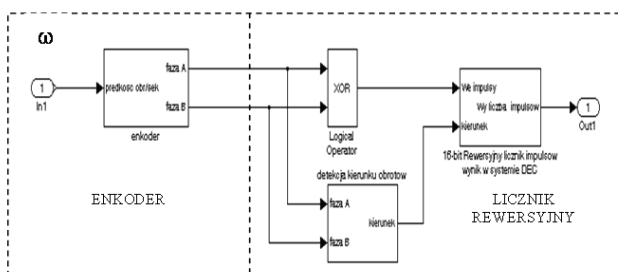
4. Badanie symulacyjne cyfrowych torów pomiarowych z zastosowaniem wejść DI PLC

Można spotkać wiele zastosowań enkoderów gdzie nie jest wymagana duża szybkość pomiaru, a ważne są koszty zakupu aparatury pomiarowej. Przykładem mogą być napędy elektryczne wykonujące zadania przestawiania (np. w windach przemysłowych), z pomiarem położenia i przełączanymi motoreduktorami. Mogą to być także niektóre serwomechanizmy, jak np. zastosowane do wielokrotnego przestawiania położenia zespołu grzałek elektrycznych w piecu do formowania szyb samochodowych [3, 4].

Podczas projektowania takich systemów napędowych występuje potrzeba sprawdzenia poprawności funkcjonowania cyfrowego toru pomiarowego z zastosowaniem enkodera impulsowego i szybkiego licznika wejść DI sterownika PLC. Najlepszym sposobem jest opracowanie modeli symulacyjnych torów pomiarowych i przeprowadzenie badań komputerowych.

Enkodery generują prostokątne fale (rys. 2) o zmiennej częstotliwości impulsów wyjściowych zależnej od prędkości obrotowej ω osi oraz od rozdzielności enkodera. Zwiększenie częstotliwości sygnałów impulsowych z enkodera powoduje zmniejszenie szerokości jego impulsów wyjściowych, odbieranych przez wejścia DI PLC. Te krótkie (wąskie) sygnały powinny być odbierane (czytane) przez szybkie wejścia licznikowe PLC bez straty (pominięcia) nawet jednego impulsu. To wymagane dla toru pomiarowego kąta obrotu jest krytyczne, np. przy projektowaniu serwonapędów i powinno być sprawdzone symulacyjnie. W porównaniu z odczytem sygnałów z wejść DI sterownika dalsze przetwarzanie (zliczanie) odebranych impulsów odbywa się bardzo szybko w pamięci programowalnego sterownika PLC. Zmiany szerokości impulsów z enkodera wraz ze zmianą prędkości obrotowej ω dotyczą w równym stopniu fazy „A”, „B” i „Z”.

Poniżej przedstawiono modele komputerowe cyfrowego toru pomiarowego kąta z zastosowaniem enkodera dwufazowego i dwóch wejść binarnych DI sterownika PLC.

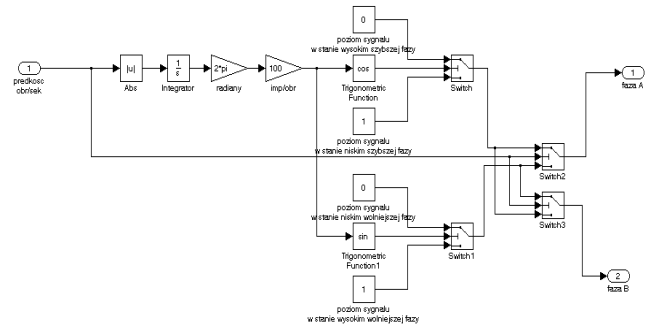


Rys. 3. Model komputerowy układu pomiarowego z dwufazowym enkoderem
Fig. 3. Computer model of the measuring system with a diphas encoder

Moduł ENKODER na rysunku 3 jest modelem samego przetwornika (hardware), natomiast LICZNIK REWERSYJNY jest modelem oprogramowania (software) w sterowniku PLC. Występujący w modelu układ logiczny XOR umożliwia podwojenie liczby zliczanych impulsów z enkodera w porównaniu do rozwiązania jednofazowego, i tym samym powoduje zwiększenie dokładności pomiarów. Dzięki zabiegom softwarowym w sterowniku PLC można zwiększyć rozdzielność enkodera.

Na rysunku 4 przedstawiono, opracowany w środowisku Matlab, szczegółowy model symulacyjny enkodera jako urządzenia.

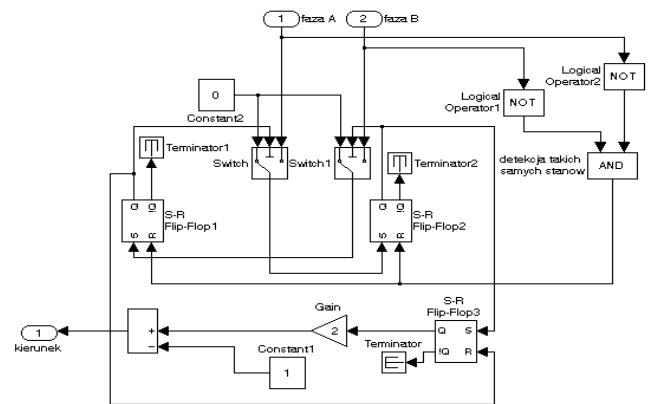
Sygnałem wejściowym dla tego modelu (rys. 4) jest prędkość obrotowa ω osi enkodera, która może się zmieniać gwałtownie, np. w serwomechanizmach elektrycznych. Sygnałami wyjściowymi są przebiegi prostokątne dwóch przesuniętych w stosunku do siebie faz „A” i „B”.



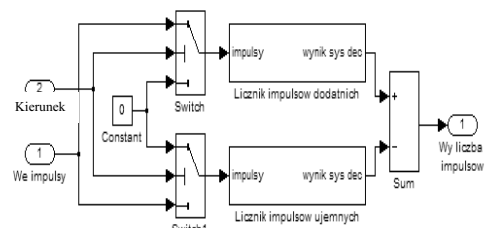
Rys. 4. Model komputerowy enkodera dwufazowego
Fig. 4. Computer model of the diphas encoder

Komputerowy model dwufazowego enkodera (rys. 4) pozwala wprowadzać parametrycznie różne wartości rozdzielności enkodera (parametr katalogowy enkoderów) w procesie symulacji i umożliwia dobór enkodera w układzie sterowania konkretnym napędem.

Rysunki 5 i 6 prezentują modele symulacyjne oprogramowania (software) sterownika PLC.



Rys. 5. Model komputerowy detektora kierunku obrotu
Fig. 5. Computer model of the detector of sense of rotation



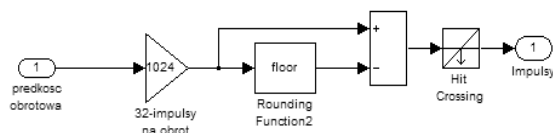
Rys. 6. Model komputerowy licznika impulsów
Fig. 6. The computer model of the impulse counter

Na rysunku 5 przedstawiono model symulacyjny oprogramowania realizującego detekcję kierunku obrotu enkodera na podstawie jego sygnałów z fazy „A” i „B”. Zastosowane elementy funkcjonalne tego modelu (bramki logiczne, przerzutniki) są reprezentowane w języku programowania sterowników PLC.

Rysunek 6 przedstawia model oprogramowania rewersyjnego licznika impulsów. Sumowanie impulsów odbywa się dwutorowo,

w wielobitowych licznikach, osobno dla przeciwnych kierunków obrotu. Liczniki są także standardowymi elementami oprogramowania narzędziowego, przeznaczonego do programowania sterowników PLC, np. języka drabinkowego.

Jeśli enkoder zamocowany jest na wale napędu, przemieszczającego się tylko w jedną stronę, to nie jest konieczne oprogramowanie sterownika PLC wykrywające kierunek obrotów. Odpowiada to sytuacji sterowania napędem bez przeregulowań. Model takiego oprogramowania przedstawia rysunek 7. W takim przypadku wystarczy skorzystać z jednego sygnału wyjściowego enkodera. Ten model można też wykorzystać w przypadkach przemieszczeń bipolarnych, kiedy sygnał kierunku obrotu napędu możemy uzyskać z pomiaru prędkości obrotu, np. na podstawie znaku sygnału z prądnicy tachometrycznej.



Rys. 7. Model komputerowy enkodera jednofazowego
Fig. 7. Computer model of the single-phase encoder

Przedstawione powyżej modele enkodera i oprogramowania sterownika PLC pozwalają na prowadzenie badań symulacyjnych, których celem jest wzajemny dobór enkodera i sterownika PLC. Zmiennymi decyzyjnymi w tym doborze są: rozróżnialność enkodera (liczba impulsów na obrót) i czas próbkowania sterownika PLC, który zależy od szybkości działania jednostki centralnej (CPU) sterownika PLC.

5. Zakończenie i wnioski

Występujące na rynku sterowniki programowalne PLC wyposażone są standardowo w moduł wejść cyfrowych DI z wyróżnionymi tzw. wejściami szybkich liczników. Są to najczęściej pierwsze i drugie wejścia binarne modułów DI, o częstotliwościach odczytu stanów wejścia sterownika PLC od kilku do kilkudziesięciu kHz. Dzięki temu możliwe jest w PLC szybkie zliczanie przychodzących z czujników impulsów, np. z enkodera impulsowego.

Proponowany pomiar położenia kąowego z zastosowaniem inkrementalnego enkodera i jednego lub dwóch standardowych

wejść binarnych DI sterownika PLC jest tańszym rozwiązaniem niż zastosowanie do tego celu droższego enkodera z przetwornikiem cyfrowym. Ponadto zastosowanie standardowych wejść binarnych sterownika PLC wyklucza potrzebę zakupu specjalistycznych modułów peryferyjnych sterownika PLC do czytania (obsługi) sygnałów cyfrowych z enkoderów, np. z kodem Graya.

Proponowane sposoby pomiaru położenia kąowego mogą być wykorzystane zwłaszcza w układach regulacji, gdzie odbywa się ciągły pomiar położenia kąowego i nie ma tam jeszcze wygórowanych wymagań dotyczących dokładności [3, 4].

Przy projektowaniu takiego oszczędnego toru pomiarowego ważnym staje się wzajemny dobór enkodera (jego rozróżnialności imp/obrót) i sterownika PLC (dobór jednostki centralnej CPU decydującej o czasie próbkowania). Wygodnie jest przeprowadzać dobór tych urządzeń z wykorzystaniem badań symulacyjnych na etapie projektowania całego systemu pomiarowego. W związku z powyższym opracowano: modele symulacyjne enkodera impulsowego, jako urządzenia pomiarowego oraz model licznika rewersyjnego, jako oprogramowania (software) sterownika PLC (rozdział 4). Zaprezentowane modele przygotowano i sprawdzono na potrzeby symulacji napędu elektrycznego.

Występujące w modelach symulacyjnych detektora kierunku (rys. 5) i licznika rewersyjnego (rys. 6) elementy funkcjonalne (bramki logiczne, przerzutniki, układy porównania) mają odpowiedniki w językach programowania sterowników PLC.

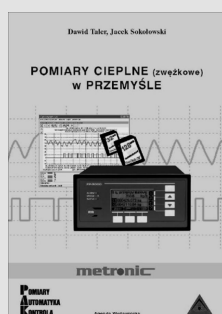
6. Literatura

- [1] Servo Amplifiers&Motors. Mitsubishi Electric Corporation, Tokio 2008.
- [2] Dokumentacja techniczna aparatury zamieszczona na stronie domowej firmy Omron, http://industrial.omron.pl/pl/services_and_support.
- [3] Z. Ociepa: Interaktywne programowanie systemu sterowania procesem formowania szyb samochodowych. XV Krajowa Konferencja Automatyki KKA'05, Warszawa, czerwiec 2005, str. 295÷298.
- [4] Z. Ociepa, W. Tarnowski: Design of Economic Control System on Servomechanism Example. 5TH International Carpathian Control Conference, Zakopane, Poland. Publisher Faculty of Mechanical Engineering and Robotics AGH Krakow, May 2004, p. 763÷766.

Artykuł recenzowany

INFORMACJE

Książka Wydawnictwa PAK



Książka „Pomiary cieplne (zwęzkowe) w przemyśle” przedstawia problematykę pomiarów strumienia masy i ciepła płynów przepływających w przewodach przy użyciu węzłek pomiarowych. Książka przeznaczona jest dla inżynierów i techników zajmujących się zagadnieniami cieplno-przepływowymi w przemyśle, energetyce i ogrzewnictwie. W książce omówiono przyrządy i układy do pomiarów węzłkowych strumienia ciepła, produkowane przez firmę Metronic.

Zamówienia prosimy składać na adresy PAK:

Wydawnictwo PAK
00-050 Warszawa, ul. Świętokrzyska 14A,
tel./fax: 022 827 25 40

Redakcja PAK
44-100 Gliwice, ul. Akademicka 10, p. 30b,
tel./fax: 032 237 19 45
e-mail: wydawnictwo@pak.info.pl