



Robot klasy SCARA

Artykuł rzuca nieco światła na tematykę robotów SCARA, przybliża ich historię, sposób sterowania oraz specyficzne właściwości na przykładzie porównania z klasycznymi maszynami karczejąnskimi (CNC).

Jak zapewne wielu Czytelników zauważyło, od jakiegoś czasu w EdW prezentowane są różnej maści roboty lub układy bezpośrednio związane z dziedziną nauki o nazwie robotyka. W ramach tego artykułu kontynuujemy ten „cykl”. Tym razem chcielibyśmy przybliżyć tematykę robotów przemysłowych, ze szczególnym naciskiem na klasę SCARA. Zaprezentujemy najpopularniejsze konfiguracje robotów, zwrócimy uwagę na ich specyficzne właściwości oraz wskażemy przykładowe zastosowania. SCARA to skrót, więc zawsze należy pisać go wielkimi literami. Tłumaczymy go dwojako: *Selective Compliance Articulated Robot Arm* lub *Selective Compliance Assembly Robot Arm*. Roboty te z bardzo dużym powodzeniem wykorzystywane są w przemyśle – zresztą to tego celu zostały wymyślone, zaprojektowane i wykonane. Prezentowany model powstał pierwotnie na potrzeby jednego z głównych zadań Szkoły Konstruktorów jako próba zmierzenia się z tematem budowy i sterowania tego typu robotów. No ale zacznijmy od początku...

Trochę historii

Słowo „robot” po raz pierwszy pojawiło się w roku 1920 w sztuce czeskiego pisarza Karelá Ćapka, zaś terminu „robotyka”

użył Isaac Asimov w swoim opowiadaniu „Runaround” w roku 1938. Ten sam pisarz w opowiadaniu „Ja, robot” zdefiniował prawa robotyki:

Prawo zerowe: Robot nie może szkodzić ludzkości ani nie może, przez zaniedbanie, narazić ludzkości na szkodę.
Prawo pierwsze: Robot nie może zranić istoty ludzkiej ani nie może przez zaniedbanie narazić człowieka na zranienie, chyba że narusza to prawo o wyższym priorytecie.

Prawo drugie: Robot musi spełniać polecenia wydawane przez człowieka, poza poleceniami sprzecznymi z prawami o wyższym priorytecie.

Prawo trzecie: Robot musi chronić samego siebie dopóty, dopóki nie jest to sprzeczne z prawem o wyższym priorytecie.

W tym miejscu wypada nadmienić, że urządzenia i maszyny mające znamiona robotów powstawały już dużo wcześniej, długo przed rokiem 1920. My ze względu na skrótowy charakter tego opisu nie będziemy omawiać historycznych wynalazków – nie mają one zresztą zbyt wiele wspólnego z robotyką, jaką znamy dzisiaj. Zainteresowani znajdą bez problemu informacje w Internecie. Ja tylko dla zachęty wspomnę o takich wynalazkach jak:

- pierwszy robot humanoid – zaprojektowany przez Leonarda da Vinci w roku 1495; nie ma potwierdzenia, że konstrukcja powstała – znaleziono jedynie szkice i rysunki;

- „The Duck” (mechaniczna kaczka) – jej twórcą jest Jacques de Vaucanson

(1709 r.); kaczka potrafiła machać skrzydłami, jeść oraz wydalac;

- „Steam Men” (człowiek na parę) – zbudowany w 1865 r. przez Johna Brainerda; potrafił ciągnac woz drabiniasty, dorozki itp;

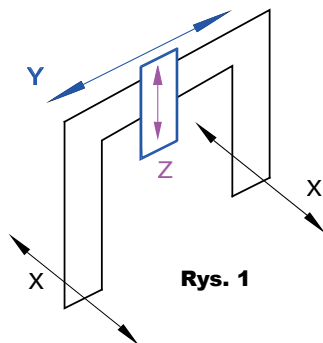
- „ELEKTRO” – humanoid stworzony przez Westinghouse w latach 1937–1938; potrafił chodzic i palic papierosy.

Zatrzymajmy się przez chwile na roku 1954, kiedy to George Devol zaprojektował i wykonał pierwszego w pełni programowalnego robota o nazwie „UNIMATE”. UNIMATE to akronim wyrażenia „Universal Automation”. Dwa lata później George Devol i Joseph Engelberger zalozyli pierwszą na świecie firmę produkującą roboty – „UNIMATION”. Skutkiem tego Engelberger został nazwany ojcem robotyki. W roku 1961 robot Devola został zainstalowany w General Motors w Trenton w stanie New Jersey. Służył do przenoszenia gorących elementów stalowych i układania ich na stole (palecie). Firma UNIMATION do dnia dzisiejszego produkuje przemysłowe roboty (dane z 2009 r.). W roku 1972 firma KUKA stworzyła pierwszego na świecie sześciopalcowego robota FAMULUS o elektromechanicznym napędzie osi. Sam robot, patrząc z perspektywy czasu, nie zrobił furory, natomiast nazwa firmy powinna zostać zapamiętana przez każdego, kto chce się na poważnie zająć robotyką.

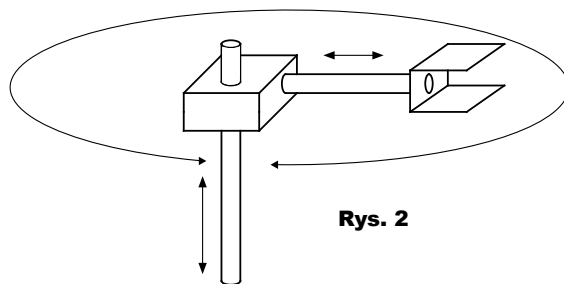
Koleją ważną datą jest rok 1978. Wtedy to niejaki Hiroshi Makino rozpoczął pracę nad robotem w konfiguracji znanej jako SCARA. W wywiadzie Makino oświadczył,

że kluczem do zaprojektowania takiego robota były obserwacje procesu produkcyjnego. Okazało się bowiem, że bardzo duża ilość operacji polega na podniesieniu danego przedmiotu pionowo w górę, przeniesieniu go na inną pozycję oraz odłożeniu (ang. „pick and place”). Właśnie do tego typu czynności roboty SCARA są optymalizowane. Już trzy lata po rozpoczęciu prac, w kwietniu 1981, zainstalowano pierwszego robota w zakładzie produkcyjnym. W zasadzie to jednocześnie zainstalowano

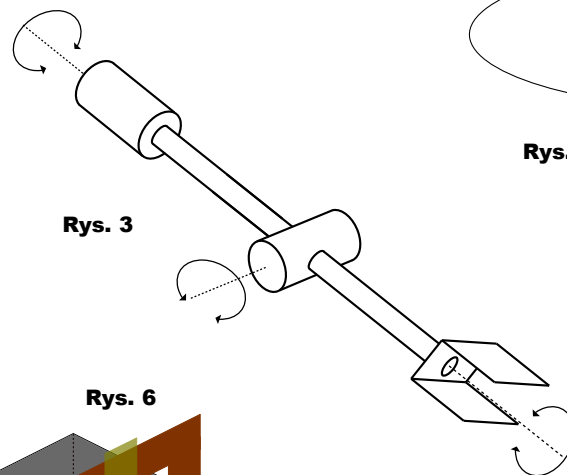
dwie sztuki takich robotów, niezależnie w dwóch korporacjach: Sankyo Seiki i Nitto Seiko. Pierwsza linia produkcyjna, na której 90% operacji wykonywanych było przez roboty SCARA, powstała w Pioneer Corp. Testy w tej firmie przeprowadzono na stanowisku przykręcania głośników do obudowy. Finalnie roboty, oprócz ww. czynności, umieszczały w płytkach PCB rezystory i kondensatory. Kolejne lata to okres masowej implementacji elektroniki w robotach. W zależności od zastosowania, montowane były systemy wizyjne, czujniki ruchu, ciśnienia (wykorzystywane wtedy jako czujniki nacisku), czujniki wstrząsów, podczerwieni. Powstaje robot RB5X (1985 r.) wyposażony w syntezer mowy, zdolny do nauki otoczenia, w którym się porusza. Rok 1989 przynosi dwa roboty, na które moim skromnym zdaniem warto zwrócić uwagę. Pierwszy z nich, Aquarobot, powstaje w Japonii. Jego zadaniem była eksploracja dna morza. Wyglądem przypominał maszynę kroczącą, a każda z nóg posiadała 3 stopnie swobody. Drugi „wynalazek” powstaje na MIT i otrzymuje nazwę „Genghis”. Był to tzw. hexapod, czyli sześcionożna maszyna krocząca (układ nóg i ruchy wzorowane na anatomii pajaków). Stał się słynny z powodu zastosowanych metod konstrukcyjnych, które pozwoliły na bardzo tanie i szybko wykonanie tego robota. Jego pracą sterowały 4 mikroprocesory, 22 czujniki i 12 serwowatorów. Na koniec kilka słów o robotach w służbie medycyny. W 1985 r. użyto robota przemysłowego PUMA 560 do pozycjonowania i orientacji rurki – przewodnicy do igły biopsyjnej. Eksperymenty zostały przerwane ze względów bezpieczeństwa. Na początku 1998 r. w Paryżu oraz Lipsku przepro-



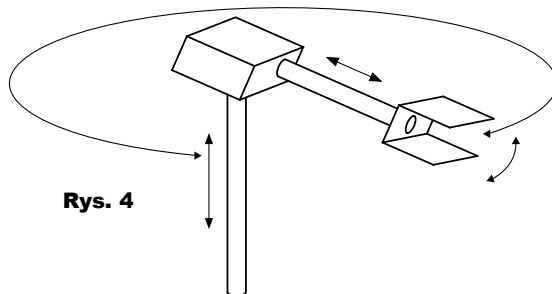
Rys. 1



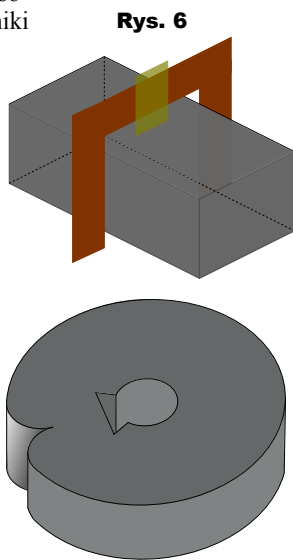
Rys. 2



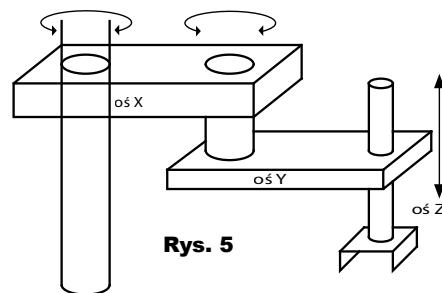
Rys. 3



Rys. 4



Rys. 6



Rys. 5

wadzano pierwsze operacje zastawki mitralnej i pomostowania aortalno-wieńcowego za pomocą amerykańskiego robota kardiochirurgicznego da Vinci. Powstał on na bazie zarzuconych programów naukowo-militarnych prowadzonych przez NASA oraz Pentagon. We wrześniu 2001 roku z wykorzystaniem systemu Zeus Robotic Surgical System, znajdujący się w Nowym Jorku Jacques Marascaux usunął pęcherzyk żółciowy u 68-letniej pacjentki będącej w klinice w Strasburgu. System Zeus ma trzy interaktywne ramiona zamontowane do stołu operacyjnego. Jedno z ramion zawiera kamerę endoskopową i jest sterowane głosem, natomiast pozostałe dwa kontrolowane przez lekarza specjalnymi joystickami naśladującymi dłonie i nadgarstki.

SCARA – co ma, czego nie mają inni?

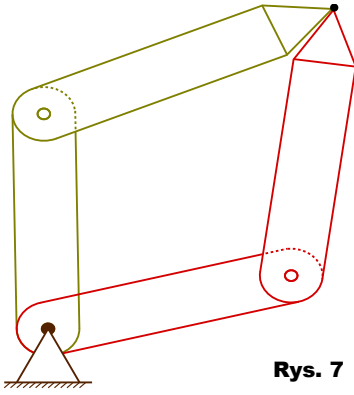
Zanim przejdziemy do szczegółowego opisu robotów SCARA, warto poznać inne konfiguracje kinematyczne, z którymi możemy się spotkać. Współczesne manipulatory zbudowane są w postaci szeregowo lub szeregowo-równoległego układu połączonych ruchowo członów

kinematycznych, czyli tzw. łańcucha kinematycznego. Wyróżniamy dwa rodzaje połączeń pomiędzy członami: obrotowe („O”) oraz pryzmatyczne („P”). Drugi rodzaj połączenia umożliwia liniowy przesuw pomiędzy członami. Ze względu na wspomniane łańcuch kinematyczny roboty (i manipulatory) dzielimy na:

- kartezyjańskie (PPP) – **rysunek 1**
- cylindryczne (OPP) – **rysunek 2**
- antropomorficzne (przegubowe) (OOO) – **rysunek 3**
- sferyczne (OOP) – **rysunek 4**
- SCARA (OOP) – **rysunek 5**

Żeby lepiej zobrazować, co oferują nam roboty SCARA, porównamy je z najpopularniejszymi (wśród hobbystów) maszynami CNC o trzech osiach X, Y i Z. Na **rysunku 6** pokazano pierwszą z różnic: pole robocze, czyli taki obszar w przestrzeni, w którym może znaleźć się efektor (końcówka robocza). Jak widać, dla maszyny CNC jest to prostopadłościan, natomiast dla robota SCARA jest to pierścień (toroid). Warto w tym miejscu nadmienić, że w przypadku maszyny kartezyjańskiej (PPP) dla danej pozycji, znajdującej się w przestrzeni roboczej, istnieje zawsze tylko jedno rozwiązanie. Oznacza to, że istnieje tylko jedno ułożenie poszczególnych członów (osi X, Y,

Z) pozwalające osiągnąć daną pozycję. W przypadku SCARA rozwiązanie może być jedno lub dwa, co pokazuje rysunek 7. Przypominam, że rozpatrujemy pozycje, które znajdują się w polu roboczym maszyny. Zerknijmy teraz na rysunek 8. Przedstawiłem tam przykładową aplikację do zrealizowania za pomocą robota. Celowo wybrałem taki, a nie inny przykład, gdyż pokazuje kolejne różnice pomiędzy opisywanymi konfiguracjami robotów. Zadanie polega na pobraniu elementu z jednej taśmy i odłożeniu na drugą taśmę (ang. „pick and place”). Jak myślicie, która konfiguracja robota nadaje się bardziej do tej czynności? Oczywiście SCARA!

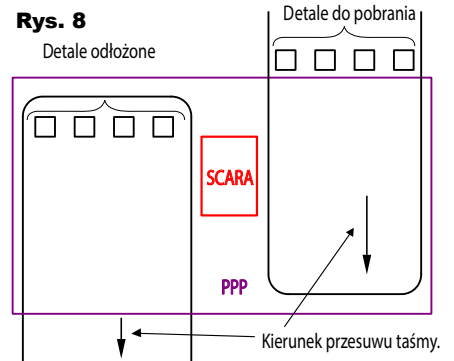


Rys. 7

ku by były to wrzeciono, które może sporo ważyć. Im większa waga na końcu robota SCARA, tym większe momenty gnące, działające pionowo w dół. Skoro tak, to cała konstrukcja kinematyczna (człony, przeguby, przekładnie) musi być masywniejsza, a to powoduje wzrost jej wagi. Z kolei większa waga ramion robota

wymaga zastosowania silników o większych momentach, a takie silniki też są przecież cięższe. Jak mówi szkolny wzór: $F=m*a$, jeśli przyspieszenie ma mieć tę samą wartość, a masa układu wzrosła, musi też wzrosnąć siła powodująca to przyspieszenie. Do tego dochodzi kolejna kwestia związana ze znacznym wzrostem obciążeń w funkcji długości ramienia (lub kąta jego wyprostowania). Związane to jest z tzw. masowym momentem bezwładności. W uproszczeniu chodzi o to, że im dalej końcówka robocza od podstawy robota, tym większej siły trzeba użyć, aby wykonać ruch. Opisane problemy nie występują w „klasycznej – kartezjańskiej” maszynie CNC i to właśnie dlatego taka konfiguracja maszyny jest najbardziej optymalna do wszelkich prac związanych ze skrawaniem lub wierceniem (frezarki, maszyny grawerujące, wiertarki itp.).

Dość istotne są też różnice w sterowaniu obu typów maszyn. Nie będziemy się zbytnio rozwódzić: bezdyskusyjnie najłatwiejszą w sterowaniu maszyną jest ta w układzie kartezjańskim (PPP). Związane jest to z faktem, że każda oś jest niezależna od dwóch pozostałych. Oznacza to, że jeśli poruszymy np. osią X, to współrzędne osi Y i Z pozostaną niezmiennic. Inaczej jest w przypadku robota SCARA. Popatrzmy jeszcze raz na rysunek 7. Powodując ruch osi X, zmieniamy także położenie osi Y. W przypadku tej konfiguracji (OOP) oś Y jest całkowicie zależna od poprzedzającej ją osi X, co znacznie utrudnia sterowanie, gdyż chcąc zmienić tylko jedną współrzędną danego punktu, musimy interpolować w dwóch osiach. Wyobraźmy sobie na przykład, że chcemy narysować (robotem) poziomą linię prostą. W robocie SCARA musimy na bieżąco zmieniać położenie obu osi,

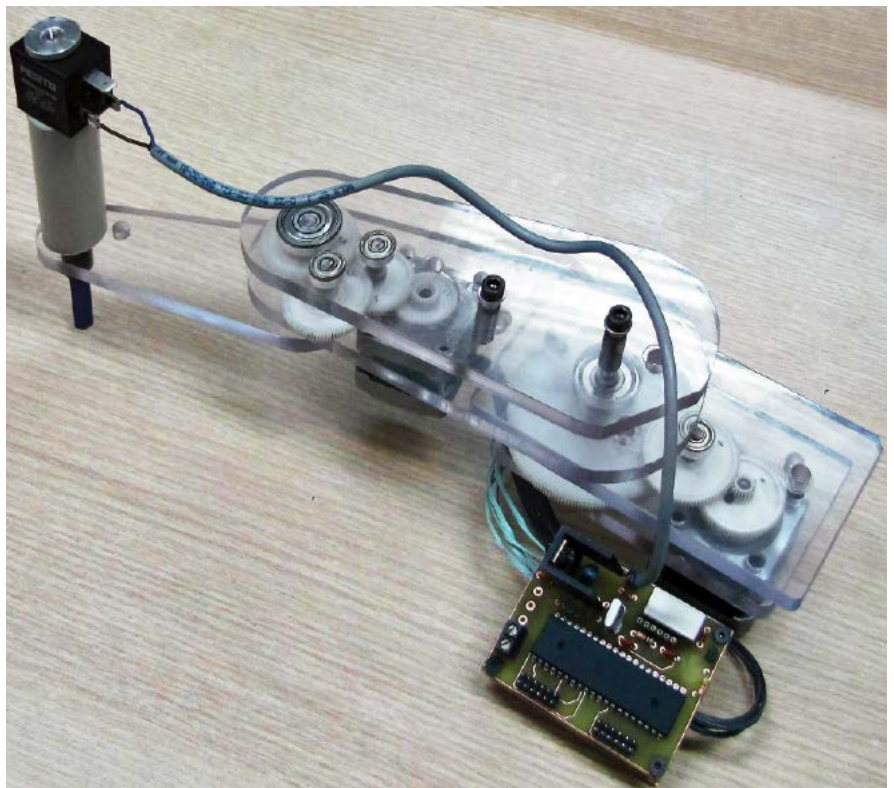


Rys. 8

Pierwsza rzecz, na którą chciałbym zwrócić uwagę, to miejsce potrzebne do zainstalowania robota. SCARA jest w tej kwestii niedościgniona. Potrzebuje jedynie małego poletka zaznaczonego na rysunku 8 czerwonym prostokątem. Robotem w układzie kartezjańskim („PPP”) musielibyśmy objąć oba podajniki (fioletowy prostokąt), co znacznie zwiększyłoby gabaryty zewnętrzne całej maszyny i oczywiście jest niekorzystne. Druga sprawa to czas pojedynczej operacji przeładunku. Również na tym polu SCARA nie ma sobie równych – są to jedne z najszybszych robotów, jakie skonstruowano. Czas nie ma znaczenia przy pojedynczych sztukach, jednak w zakładzie produkcyjnym, gdzie liczby detali dochodzą do kilkunastu tysięcy (na zmianę) i wszystkie je trzeba przeładować, czas wykonania pojedynczej operacji decyduje o sensowności stosowania danego rozwiązania.

Idźmy dalej. Spróbujmy teraz odpowiedzieć na następujące pytanie: „Skoro roboty SCARA są takie szybkie i zajmują mało miejsca, to dlaczego nie zrobić z nich np. frezarki CNC?”

Odpowiedź jest dość prosta: bo się do tego celu kompletnie nie nadają. Powodów jest kilka. Po pierwsze, przy frezowaniu duże prędkości nie są potrzebne. Ograniczeniem jest materiał, w jakim frezujemy, rozmiar frezu, moc wrzeciona itp. Prędkości, których potrzebujemy, możemy spokojnie osiągnąć na maszynie kartezjańskiej i to z dużym zapasem. Jedyny moment, w którym prędkość ma znaczenie, to ruchy jałowe, czyli takie, w których nie frezujemy, a tylko przejeżdżamy na inną pozycję nad materiałem. Jednak tutaj pojawia się drugi problem, mianowicie masa końcówki roboczej. W tym przypad-



a w maszynie CNC w takim przypadku wystarczy przesunąć się tylko w jednej osi. Oprócz tego należy wziąć pod uwagę, że sterowanie w przypadku SCARA jest zorganizowane w biegunowym układzie współrzędnych. Oznacza to, że daną pozycję w przestrzeni określa się długością ramienia oraz kątem zawartym pomiędzy tym ramieniem i początkiem układu współrzędnych. Chcąc znać położenie chwytaka robota w postaci współrzędnych (x,y) trzeba stosować funkcje trygonometryczne: $\arcsin(x)$, $\arcsin(y)$, $\arctg(x)$. Wszystkie takie „niedogodności” powodują, że amatorzy hobbysci dość rzadko stosują konfigurację SCARA. Nie oznacza to oczywiście, że się nie da...

Jak wspominałem, pierwsza wersja modelu powstała na potrzeby Szkoły Konstruktorów. W stosunku do prototypu, ostateczny model ma kilka ulepszeń. Jeśli chodzi o mechanikę, to zmieniłem konstrukcję obu ramion oraz podstawy. Głównym problemem, jaki powstał przy pierwszej konstrukcji, były duże luzy na przekładniach, które powodowane były niedoskonałym zamocowaniem osi kół zębatych, dlatego konieczne stało się dodanie górnego płatu pleksi, dzięki niemu osie podparte są z obu stron, z góry i z dołu, a luzy zostały wyeliminowane. Zmiany części elektronicznej projektu polegają na dodaniu specjalizowanych układów do sterowania silnikami krokowymi oraz zmiany oprogramowania. Nie zmieniło się natomiast przeznaczenie robota i cel jego budowy – stworzenie edukacyjnego modelu, który na podstawie G-kodu będzie kreślił różne kształty i rysunki.

Algorytm. Zanim przejdziemy do bardziej szczegółowego opisu, chciałbym omówić sposób wyliczania współrzędnych konfiguracyjnych poszczególnych członów robota. Pomocą będzie **rysunek 9**. Ponieważ znamy pozycję, którą chcemy osiągnąć, a nie znamy kątów F_1 i F_2 , mamy do czynienia z tzw. odwrotnym zadaniem kinematyki. Istnieje kilka metod rozwiązania takiego zadania. Ja wybrałem geometryczną z racji tego, że „przemówi” do najszerszego grona Czytelników. Możemy zapisać, że:

$$\Phi = \alpha + \beta$$

Zgodnie z prawem sinusów:

$$\sin(\beta)/a_2 = \sin(180 - \Phi_2)/\sqrt{(x^2+y^2)}$$

$$\sin(180 - \Phi_2) = \sin(\Phi_2)$$

$$\sin(\beta)/a_2 = \sin(\Phi_2)/\sqrt{(x^2+y^2)}$$

$$\sin(\beta) = (a_2 * \sin(\Phi_2)) / \sqrt{(x^2+y^2)}$$

$$\beta = \arcsin [(a_2 * \sin(\Phi_2)) / \sqrt{(x^2+y^2)}]$$

Dla kąta α prawdziwa jest zależność:

$$\operatorname{tg}(\alpha) = y/x$$

$$\alpha = \operatorname{arctg}(y/x)$$

Ostatecznie możemy zatem zapisać:

$$\Phi_1 = \arcsin [(a_2 * \sin(\Phi_2)) / \sqrt{(x^2+y^2)}] + \operatorname{arctg}(y/x)$$

Drugi z potrzebnych kątów obliczamy, wykorzystując prawo kosinusów:

$$(x^2+y^2) = a_1^2 + a_2^2 - 2 * a_1 * a_2 * \cos(180 - \Phi_2)$$

$$\cos(180 - \Phi_2) = -\cos(\Phi_2)$$

$$\cos(\Phi_2) = (x^2+y^2 - a_1^2 - a_2^2) / (2 * a_1 * a_2)$$

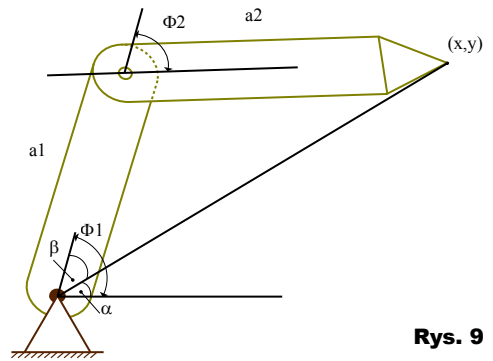
$$\Phi_2 = \arccos((x^2+y^2 - a_1^2 - a_2^2) / (2 * a_1 * a_2))$$

Na pierwszy rzut oka powyższe zależności wyglądają strasznie, ale tak naprawdę nie jest to nic trudnego. Trudność zaczyna się w momencie, gdy powyższe wzory chcemy wrzucić do procesora. Jak łatwo zauważyć, potrzebujemy aż trzech funkcji cyfrowych ($\operatorname{arctg}(x)$; $\arcsin(x)$; $\arccos(x)$) oraz jednej trygonometrycznej ($\sin(x)$), a obliczenie każdej z nich pochłania relatywnie dużo czasu procesora. Już to podpowiada, że w procesorze AVR nie uzyskamy dużych prędkości obrotowych ramion robota. Istnieją oczywiście metody obejścia tego problemu, np. zamiast obliczać funkcje trygonometryczne, można je trzymać w tabeli. W przypadku funkcji cyfrowych nie jest to jednak już takie proste. Ja użyteczne prędkości obrotowe uzyskałem, wykorzystując „standardowe” metody obliczania ww. funkcji. Przy zastosowanych rozwiązaniach mechanicznych i dużej bezwładności ramion w stosunku do mocy silników dalsze zwiększanie prędkości ruchów

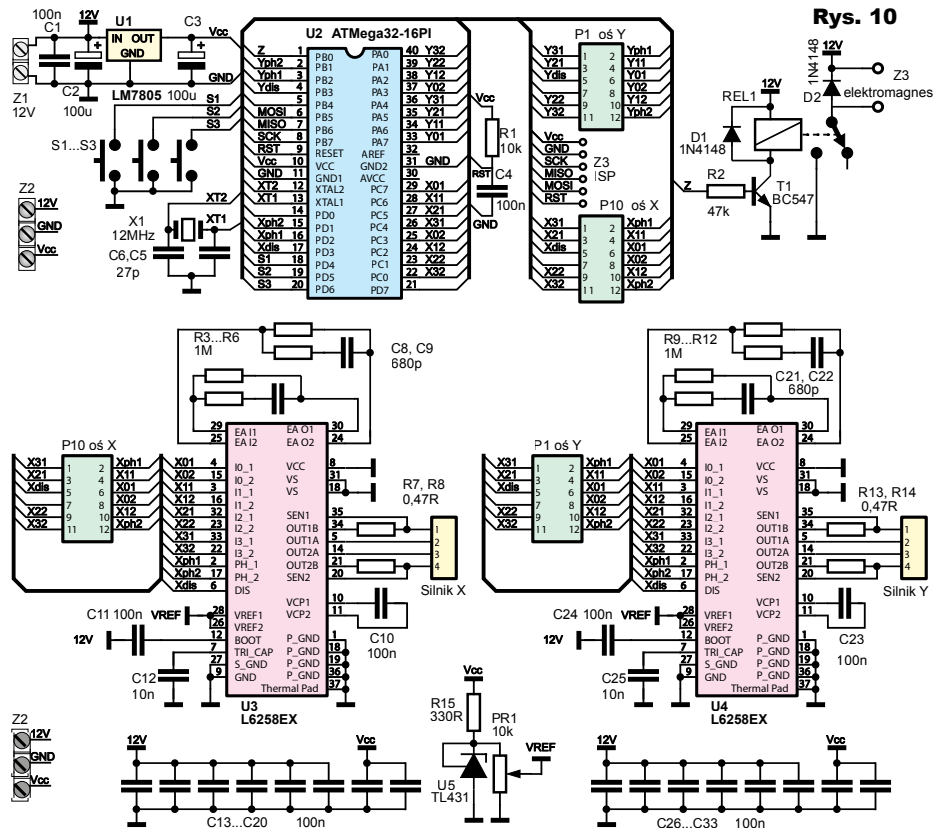
wiązało się z przeciążeniami i błędami w pozycjonowaniu.

Opis układu

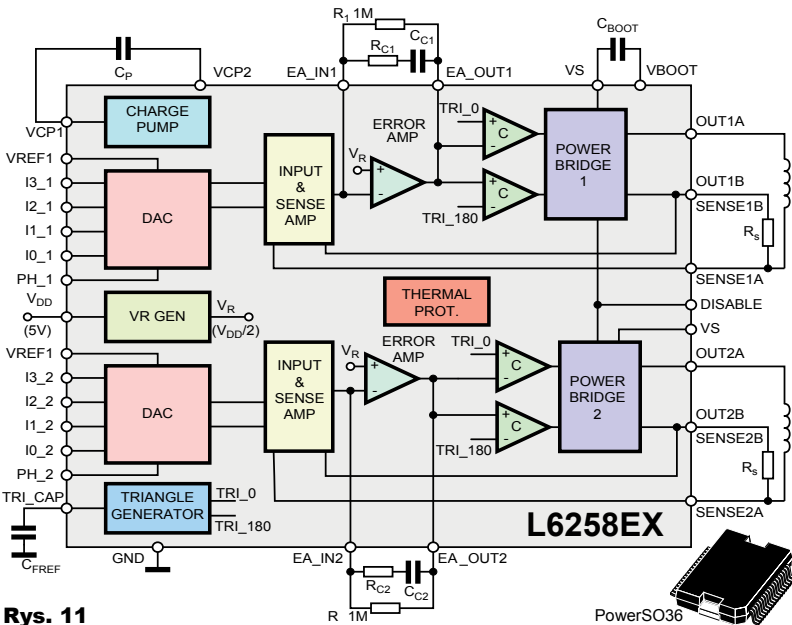
Rysunek 10 przedstawia schemat elektryczny całości. Jeśli chodzi o część sterującą, to w zasadzie nie ma tutaj nic, oprócz procesora ATmega32. Nowością są układy mocy L6258EX (polecam lekturę noty katalogowej tych układów). Są to kompletne sterowniki silnika krokowego (lub dwóch silników DC). Schemat wewnętrzny układu prezentuje **rysunek 11**. Układ do poprawnej pracy potrzebuje jedynie kilku elementów zewnętrznych. Regulację prądu płynącego przez cewkę silnika zrealizowano poprzez modulację PWM. Ideę działania pętli regulacji prezentuje **rysunek 12**. Jak widać, obecne są tu dwa wzmacniacze transkonduktancyjne (*Input transconductance ampl.* i *Sense*



Rys. 9



Rys. 10



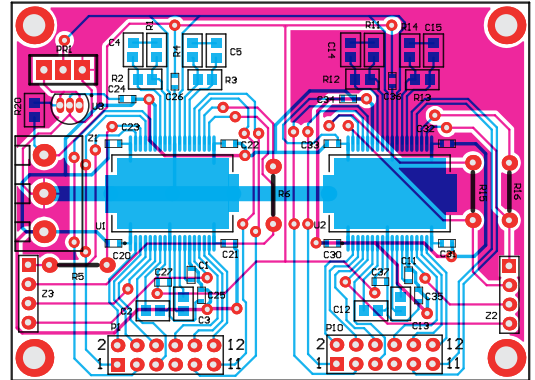
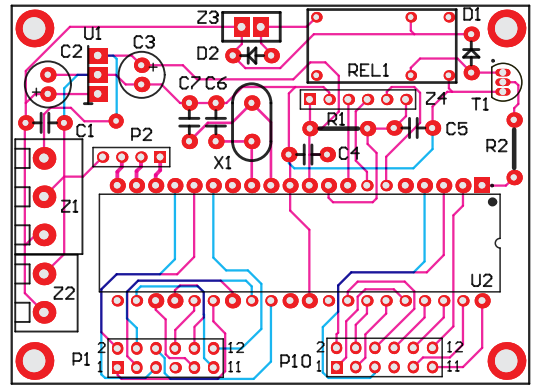
Rys. 11

transkonduktancyjny to taki, który zmienia napięcie wejściowego przekształca na zmiany prądu na wyjściu. Można w uproszczeniu powiedzieć, że takie wzmacniacze to źródła prądowe sterowane napięciowo. Pierwszy wzmacniacz pracuje z przetwornikiem DAC, służącym do zadawania prądu w cewce. Kombinacja binarna na wejściach I0...I3 decyduje, jaki procent napięcia Vref trafia na wyjście z DAC. Końcówka PH decyduje o kierunku przepływu prądu w cewce silnika. Drugi wzmacniacz pracuje z napięciem pomiarowym pochodzącym z rezystora R_s włączonego szeregowo z uzwojeniem silnika. Wyjścia obu tych stopni trafiają do wzmacniacza błęd (*Error ampl.*). Jego napięcie wyjściowe jest porównywane w dwóch komparatorach z przebiegiem trójkątnym. W tym miejscu zwracam szczególną uwagę na sposób podania obu napięć na

wejścia komparatorów. Napięcie trójkątne jest generowane, oczywiście, wewnątrz układu, a jego amplituda wynosi V_{ref} .

Z konieczności powyższy opis jest bardzo mocno uproszczony. Zainteresowanych odsyłam do noty katalogowej układów L6258EX, ponieważ świetnie pokazuje, jak wykorzystać wiedzę nabytą na studiach w praktyce, a chodzi o wykresy tzw. funkcji przejścia, zwane wykresami Bodego. Elementy oznaczone na rysunku 12 jako R_c i C_c są podłączane z zewnątrz do pinów EA_IN oraz EA_OUT, co zwiększa elastyczność układu i pozwala łatwo dostosować warunki pracy do konkretnego modelu silnika. Dobór ich wartości oparty jest między innymi na ww. wykresach.

Powróćmy do rysunku 10. Do części wykonawczej, oprócz dwóch układów L6258EX, należy cewka elektromag-

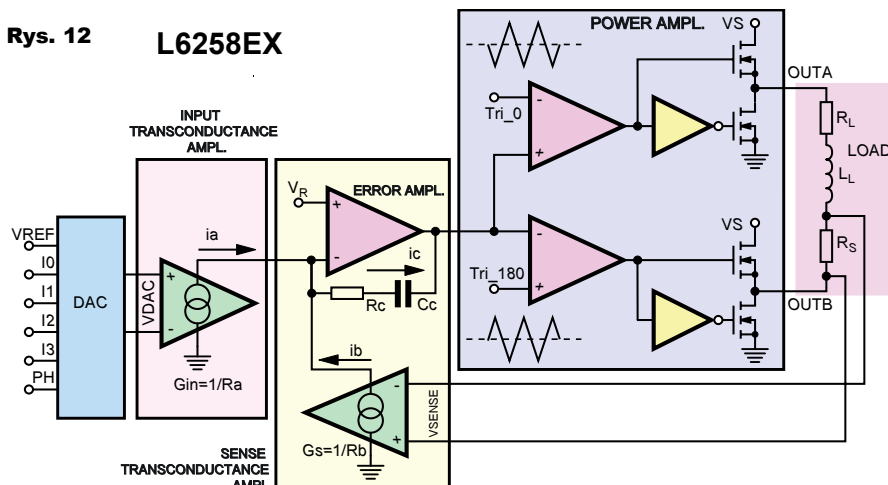


Rys. 13

netyczna oraz sterujący nią przekaźnik REL1. Oryginalnie, roboty SCARA w osi pionowej mają raczej silnik sterujący śrubą kulową. Ale ja trochę uprościłem sprawę i zamiast tego zastosowałem cewkę unoszącą cienkopis na wysokość 5mm nad podstawę robota. Układ U5 wraz z R15 i PR1 generuje napięcie Vref, które nie może przekroczyć 2,5V. Cała ścieżka narzędzia (cienkopisu) jest zaszyta wewnątrz procesora. Zmiana wzoru wymaga przeprogramowania AVR. Oczywiście dla zwiększenia funkcjonalności można dodać np. układ MAX232 i dane odbierać z komputera PC, ale tak jak wspominałem – całość ma charakter edukacyjny, więc skupiłem się tylko na sterowaniu robotem.

Rys. 12

L6258EX



Montaż i uruchomienie

Elementy nośne robota, a więc: ramiona X i Y oraz podstawa, zostały wykonane na frezarce CNC. Materiałem bazowym jest pleksiglas o grubości 8mm. Jest to dość wdzięczny materiał, a to z racji jego niewielkiej masy i dużej sztywności. Dodatkowo jest łatwy w obróbce. Silniki krokowe oraz zębatki pochodzą z demontażu starej drukarki atramentowej. Błąd, jaki popełniłem przy demontażu zębatek, był taki, że nie zmierzyłem odległości pomiędzy poszczególnymi osiami obrotu. Aby precyzyjnie wywiercić otwory pod ośki, koniecznie trzeba wykonać dodatkowy przyrząd, co zajęło mi trochę czasu. Wszystkie elementy

przekładni są łożyskowane (za wyjątkiem zębatek umieszczonych na silnikach krokowych), co częściowo widać na fotografii wstępnej. Wszystkie osie i tuleje zostały wytoczone na wymiar. Elektromagnes zdemontowałem z uszkodzonego zaworu pneumatycznego. To czego nie widać na zdjęciu, to tzw. markery pozycji zerowej – drobne podfrezowania, które pokrywają się ze sobą w momencie, gdy obie współrzędne złączowe mają wartość równą 0.

Jak częściowo widać na fotografiach, całą elektronikę podzieliłem na dwie osobne płytki i zmontowałem w „kanapkę”. Na rysunku 13 pokazane są projekty dwóch płytek drukowanych. Montaż płytek nie nastręczy trudności nawet początkującym elektronikom. Wyjątkiem mogą być układy U3, U4 zamknięte w mało popularnej obudowie PowerSO36. Trudność przy lutowaniu nie będzie jednak wynikała z rastru wyprowadzeń (0,65mm), a z problemu dobrego odprowadzania ciepła przez obudowę. Chodzi o to, że praktycznie cała powierzchnia dolna układu stanowi tzw. thermalpad, czyli pad, który należy

Wykaz elementów

R1	10kΩ
R2	47kΩ
R3..R6,R9..R12	1MΩ
R7,R8,R13,R14	0,47Ω
R15	330Ω
C1,C4	100nF
C2	100uF
C3	100uF
C5,C6	27pF
C8,C9,C21,C22	680pF
C10,C11	100nF
C12	10nF
C13..C20	100nF
C23,C24	100nF
C25	10nF

C26..C33	100nF
PR1	10kΩ
D1,D2	1N4148
T1	BC547
U1	LM7805
U2	ATmega32 - 16PI
U3,U4	L6258EX
U5	TL431
REL1	dowolny (cewka 12V)
P1,P10	złącze goldpin 2x6
Z1	ARK2
Z2	ARK3
S1..S3	microswitch
X1	12MHz

Płytki drukowane jest dostępna w sieci handlowej AVT jako kit szkolny AVT-3108.

przylutować do płytki drukowanej pełniącej funkcję radiatora. Bez hot air lub wstępnego podgrzewania płytki lutowanie będzie kłopotliwe. Złe przylutowanie układu będzie owocowało nadmiernym nagrzewaniem się układu.

Przed załączeniem zasilania upewniamy się, że montaż został przeprowadzony prawidłowo, wartości napięcia mieszczą się w odpowiednim zakresie i że nie

pomyliliśmy polaryzacji. Jeśli wszystko jest jak należy, załączamy układ i dokonujemy regulacji napięcia referencyjnego Vref dla układów L6258EX. To wszystko, co musimy zrobić w trakcie pierwszego uruchomienia. Do tej pory przemilczałem kwestię generowania G-kodu. Osobiście dokonuję tego przy użyciu darmowego programu na licencji GNU GPL o nazwie *ACE Converter*. Cały proces trwa dosłownie kilka sekund. Trzeba jedynie wybrać plik do konwersji, podać nazwę pliku docelowego i przycisnąć *Convert*. Ustawień domyślnych programu nie zmieniałem. Niestety jest tylko jeden format, z którego możemy

dokonać konwersji: format **.dxf**. W sieci jest jednak mnóstwo darmowych wzorów i rysunków w tym formacie, więc na czas testów można z nich skorzystać.

Aby w pełni cieszyć się ze zbudowanego robota i w końcu zobaczyć efekty naszej pracy, musimy uświadomić sobie jeszcze jedną rzecz. Zwróćmy uwagę, że po załączeniu zasilania sterownik robota nie wie, w jakiej pozycji znajduje się jego ramiona. Nie mamy przecież do dyspozycji enkoderów. Dlatego też, przed uruchomieniem programu robota, należy ręcznie ustawić jego ramiona w pozycji zerowej. Pomogą nam w tym podfrezowania, o których wspominałem wcześniej. Po załączeniu zasilania w procesorze pozycja jest automatycznie zerowana i żeby było to zgodne z prawdą, musimy ręcznie przesunąć ramiona w tę właśnie pozycję. Wcisnąwszy przycisk **START** i wtedy my odpoczywamy, a robot wykonuje pracę, do której został zaprojektowany.

Podsumowanie

Dla mnie osobiście zbudowanie tego projektu było bardzo ważne. Bardzo się też cieszę, że mogłem się nim podzielić z Czytelnikami EdW. Niewątpliwie robotyka nie jest dziedziną łatwą, jednak wiem na pewno, że skonstruowanie własnego, nawet prostego robota, daje ogromnie dużo satysfakcji.

Mam nadzieję, że nieco przybliżyłem tematykę robotyki przemysłowej, najpierw przedstawiając jej historię, żeby potem wykonać model. Nie wszystkie zagadnienia udało się poruszyć (np. w ogóle nie poruszyłem zagadnienia dynamiki robotów), ale mam nadzieję, że przedstawiony materiał będzie dobrą bazą do dalszych eksperymentów.

Janusz Gwóźdź
elektron44@o2.pl