

POLITECHNIKA OPOLSKA
WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI I INFORMATYKI

MGR INŻ. TOMASZ PYKA

**ANALIZA WPŁYWU KOŁA SWOBODNEGO
W ROBOCIE MOBILNYM TRÓJKOŁOWYM
NA JAKOŚĆ STEROWANIA RUCHU ROBOTA
PO TRAJEKTORII**



**POLITECHNIKA
OPOLSKA**

PRACA DOKTORSKA

PROMOTOR

DR HAB. INŻ. RYSZARD BENIAK, PROF. PO

Autor jest stypendystą projektu *Stypendia doktoranckie - inwestycja w kadrę naukową województwa opolskiego* współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego



KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



Opole 2015

**Autor składa serdeczne podziękowania
Pani Profesor Krystynie Macek-Kamińskiej
i Panu Profesorowi Ryszardowi Beniakowi
za cenne wskazówki udzielone w trakcie
powstawania niniejszej pracy.**

Spis treści

Rozdział 1. Wprowadzenie	4
1.1. Stan zagadnienia	4
1.2. Przegląd literatury	7
1.3. Cel i teza pracy	10
1.4. Układ i zakres pracy	11
Rozdział 2. Wprowadzenie rozszerzonego modelu robota mobilnego trójkołowego z kołem samonastawnym	12
2.1. Równania kinematyki i dynamiki robota	12
2.2. Równania na zmienne siły nacisku kół o podłoże	21
2.3. Modelowanie matematyczne ruchu robota	24
Rozdział 3. Badanie prototypu trójkołowego robota mobilnego	45
3.1. Budowa robota	46
3.2. Badanie własności koła samonastawnego	55
3.3. Zastosowanie filtrów sygnałów pomiarowych	85
Rozdział 4. Analiza energetyczna robota mobilnego	87
4.1. Implementacja uproszczonego modelu przekształtnika	88
4.2. Analiza energii zużytej przez robota mobilnego	94
Rozdział 5. Przykładowe zastosowanie robota mobilnego do transportu w warunkach przemysłowych	112
5.1. Robot mobilny jako środek transportujący w zagadnieniu logistycznym	113
Rozdział 6. Podsumowanie	118
Bibliografia	120
Pozostałe publikacje własne autora	125

Rozdział 1

Wprowadzenie

Rozwój robotyki przyczynił się do projektowania różnorodnych konstrukcji robotów mobilnych. Różnorodność konstrukcji spowodowała uwzględnienie pomijanych pierwotnie aspektów. Jednak nawet dla prostych konstrukcji, istnieje możliwość uwzględnienia właściwości, które do tej pory mogły być pomijane lub potraktowane w sposób marginalny. Dotyczy to także robotów trójkołowych. Autor podjął więc próbę zbadania wpływu koła swobodnego, na właściwości ruchowe robota. W celu weryfikacji tych właściwości, wykonano i zamodelowano model robota, w którym uwzględniono, oprócz części mechanicznej, także część energoelektroniczną i napędową. Praca zawiera zarówno elementy klasycznej automatyki (identyfikacja parametrów robota mobilnego oraz oszacowanie czasów inercji koła swobodnego samonastawnego jako obiektu inercyjnego II-go rzędu) oraz robotyki (szczegółowa analiza robota mobilnego trójkołowego z kołem swobodnym).

1.1. Stan zagadnienia

Do popularnych konstrukcji robotów mobilnych zalicza się rozwiązania trójkołowe. Konstrukcje tego typu mają zastosowanie nie tylko w robotyce ale i w motoryzacji. Znane są i wciąż rozwijane pojazdy trójkołowe takich koncernów jak Toyota, Piaggio, Daimler-Chrysler, Polaris [1, 2, 3, 4]. Prace nad tego typu konstrukcjami wynikają ze specyficznych własności tych konstrukcji. Taka konstrukcja ma tylko trzy punkty styku z podłożem, co zmniejsza, wynikające z tarcia straty energii podczas ruchu pojazdu w porównaniu do pojazdów czterokołowych. Dodatkowym atutem pojazdów trójkołowych jest ich zwrotność, gdyż takie konstrukcje mogą się obracać w miejscu, co zostało udowodnione w artykule [5]. Rozwój motoryzacji, w którym coraz większą rolę odgrywają pojazdy elektryczne, powoduje również powrót do konstrukcji trójkołowych. Stanowią one alternatywę, dla stosunkowo wielkich pojazdów czterokołowych, konkurując z nimi ceną i zwrotnością.

W niniejszej pracy zostanie omówiona konstrukcja robota trójkołowego z kołem swobodnym. W opisie konstrukcji uwzględniono wszystkie elementy, które mogą mieć wpływ na kinematykę i dynamikę ruchu robota. Roboty trójkołowe, oprócz kół napędowych mogą posiadać różne rodzaje kół swobodnych. Koła te mogą być wykorzystywane jedynie jako punkt podparcia [6, 7, 8, 9, 10] lub być zamocowane jako samonastawne [11, 12]. W części publikacji dotyczących robotów trójkołowych, stosowane były daleko idące uproszczenia, które pomijały koło swobodne w równaniach kinematyki. Tłumaczono to znikomym wpływem tego koła na ruch robota [13, 14]. Przeprowadzone przez autora

badania, wyraźnie wskazują na wpływ koła swobodnego a także miejsca i sposobu mocowania koła na trajektorię ruchu robota.

W pracy wyprowadzono oraz szczegółowo omówiono rozszerzony model robota mobilnego trójkołowego z kołem swobodnym, który precyzyjnie uwzględnia, zarówno w równaniach kinematyki jak i dynamiki, wpływ tego koła. Koło swobodne nazywane jest tak ze względu na brak części napędzającej (poruszanie się koła wywołane jest poprzez generację ruchu robota za pomocą kół napędowych lub poprzez bezwładność konstrukcji koła). Ze względu na budowę oraz realizowany typ ruchu w dalszej części pracy koło to będzie nazywane kołem samonastawnym (off-centered orientable wheel). W pracy [15] kołem samonastawnym nazwano również koło zorientowane osiowo (centered orientable wheel), jednakże zmiana kąta skręcenia tego koła praktycznie nie skutkuje zmianą sił nacisku kół na podłoże. Istotna zmiana sił nacisku kół możliwa jest wyłącznie w robocie mobilnym trójkołowym, w którym koło swobodne nie jest zorientowane osiowo i taki przypadek jest analizowany w niniejszej rozprawie.

Bazując na wyprowadzonych równaniach dynamiki rozszerzonego modelu robota trójkołowego z kołem samonastawnym, wykonano szereg symulacji ruchu robota [16, 17, 18]. Następnie w celu weryfikacji poprawności modelu, wykonano dwa prototypy robotów o różnej nośności. Robota zdolnego przewieźć masę do 2 kg, nazwano robotem eksperymentalnym a robota zdolnego przewieźć masę do 80 kg - robotem przemysłowym. Większość badań wykonano przy wykorzystaniu robota eksperymentalnego

W celu uwzględnienia wszystkich aspektów dotyczących ruchu robota i generacji tego ruchu, dokonano szczegółowego modelowania robota, uwzględniając w procesie symulacji także przekształtnik i napęd. Dokonano także identyfikacji parametrów energoelektronicznych i mechanicznych robota. Uzyskano dużą zbieżność rezultatów symulacji z wynikami pomiarowymi, co pozwoliło między innymi na dyskusję dotyczącą zużycia energii w robocie mobilnym trójkołowym. Problem zużycia energii był już kilkakrotnie poruszany w opracowaniach dotyczących robotów mobilnych, jednak część prac wykorzystywała w tych badaniach jedynie symulacje [19, 20, 21]. Przykładowo w pracy [19], dokonano obszernej analizy zużycia energii, jednakże przedstawiono tylko wyniki symulacji. W artykule [20] przedstawiono rodzaj ruchu robota składający się z trzech faz: przyspieszanie, jazda ze stałą prędkością oraz hamowanie. Przyspieszanie i hamowanie mogło mieć charakter potęgowy lub liniowo-trapezoidalny. W artykule tym stwierdzono, że najmniejsze zużycie energii dla przyspieszenia, otrzymano dla potęgowego kształtowania zmian prędkości. Natomiast proces hamowania zużywa najmniej energii, kiedy jest ono liniowe. W prezentowanym przykładzie nie uwzględniono indukcyjności obwodu wirnika silnika prądu stałego. Natomiast w pracach [22, 23], dokonano symulacji modelu silnika, przy czym zależność mocy wyjściowej serwonapędu przekazywanej na koło napędowe od

prędkości kątowej silnika przybliżano wielomianami drugiego i szóstego stopnia. Bazując na tym przybliżeniu, uwzględniono straty całego układu napędowego, układu sterującego i czujników a następnie dokonano pomiaru zużycia energii na rzeczywistym robocie. W artykule [21] zaprezentowano algorytm sterowania pozwalający ograniczyć zużycie energii. Pomiaru i symulacji dokonano z wykorzystaniem danych robota Pioneer 3DX. W prezentowanym artykule, tak jak w [20], pominięto indukcyjność wirnika. Uzysk energetyczny wynosił ~8%.

W zaproponowanej przez autora metodzie analizy strat energii [17], wykorzystany został uproszczony, w małym stopniu, model przekształtnika uwzględniający komutację elementów półprzewodnikowych. Przewagą zaproponowanej przez autora metody, jest możliwość analizy zużycia energii w robocie trójkołowym z kołem samonastawnym dowolnej wielkości, bez potrzeby identyfikacji parametrów robota, gdyż wystarczy podać jedynie parametry energoelektroniczne i mechaniczne badanego robota. Możliwość tę zweryfikowano, poprzez zamodelowanie działania dwóch różnych silników, zamocowanych w dwóch różniących się nośnościami konstrukcjach robotów mobilnych (eksperymentalnym i przemysłowym).

W ramach przeprowadzonych prac badawczych, dokonano modyfikacji budowy koła samonastawnego oraz określono quasi optymalne miejsce mocowania koła samonastawnego w robocie trójkołowym. Dotyczy tego zgłoszenie patentowe nr P.407263 pt. „Podwozie pojazdu trójkołowego z kołem samonastawnym” [24].

Po zbudowaniu dwóch prototypowych robotów, dokonano weryfikacji wyników pomiarowych z wynikami symulacji i uzyskano dużą zbieżność. Podczas badań nad robotem eksperymentalnym sformułowano i przetestowano również zależność między kątem skręcenia koła samonastawnego, a siłami nacisku kół robota na podłoże. Tę informację wykorzystano w prostym algorytmie sterującym [18]. Niniejsza część pracy była finansowana z Europejskiego Funduszu Socjalnego, którego autor był beneficjentem.

Po przeprowadzeniu większości badań, przygotowano oprogramowanie do realizacji zagadnienia logistycznego i dokonano wdrożenia robota eksperymentalnego, jako obiektu realizującego to zagadnienie. W tym celu wykorzystano moduły komunikacyjne Bluetooth do przesyłania i odbierania informacji, po czym dokonano praktycznej realizacji zagadnienia logistycznego. Zastosowany do realizacji zagadnienia logistycznego układ sterujący, uwzględniał wpływ kąta skręcenia koła samonastawnego.

Po przeprowadzeniu badań nad robotem eksperymentalnym, wykonano konstrukcję robota mobilnego z kołem samonastawnym, zdolną przewieźć do 80 kg. Konstrukcję tę wykonano w celu niezależnego sprawdzenia i dodatkowej weryfikacji uzyskanych wcześniej wyników. Taka konstrukcja została nazwana przemysłową, ze względu na potencjalne wykorzystanie w zakładzie przemysłowym, jako środek transportu.

1.2. Przegląd literatury

Pierwsze wzmianki o robocie mobilnym trójkołowym pojawiły się na przełomie lat czterdziestych i pięćdziesiątych, kiedy neurolog W. Grey Walter skonstruował robota trójkołowego w kształcie żółwia (tortoise-shaped). W roku 1951 zaprezentował on roboty trójkołowe Elmer i Elsie [25], które wykonał do eksploracji terenu oraz analizy reakcji na sygnały z czujników optycznych i dotykowych.

Rozwój badań nad robotami przebiegał wielotorowo, dlatego też opis historyczny rozwoju konstrukcji robotów oraz rozwoju algorytmów służących do opisu tych robotów i ich sterowania, jest utrudniony. Ostatnie dostępne publikacje powiązane z tematyką niniejszej pracy doktorskiej zostały opublikowane w 2012 roku. Ze względu na specyfikę badań nad robotami i wynikające stąd trudności, poniżej zostanie przedstawiona analiza tematyczna publikacji.

Pierwsza część przeglądu literatury dotyczy opisu równań robotów mobilnych, dla różnych rodzajów zastosowanych kół podparcia. W roku 1991, w artykule [26] zaprezentowano równania kinematyki i dynamiki oraz przeanalizowano różne rodzaje kół podporowych. Zostały przytoczone rozwiązania z kołem podporowym zamocowanym jako stałe (fixed wheel), zorientowanym osiowo (centered orientable wheel), samonastawnym (off-centered orientable wheel). Ponadto został zaprezentowany model robota uwzględniający koła szwedzkie (Swedish wheel). Szczegółową analizę wyżej wymienionych konstrukcji robotów, przeprowadzono w artykule [27] z 1996 roku, gdzie badano między innymi takie własności jak mobilność i sterowalność, natomiast w artykule [28] z 1996, przeprowadzono badania nad konstrukcjami wyposażonymi w koło samonastawne. W 1997 roku w artykule [29], wyprowadzono równania robota mobilnego trójkołowego z kołem samonastawnym, jednak koło samonastawne pominięto i analizowano model z dwoma stopniami swobody, który jest holonomiczny. W artykule [30] z 2005 roku, przedstawiono wyprowadzenie równań kinematyki i dynamiki wraz z symulacją robota mobilnego trójkołowego z kołem podporowym zamocowanym jako stałe i zorientowane osiowo. W 2008 roku, w artykule [31] ponownie podjęto analizę robota trójkołowego z różnymi kołami podporowymi, tak jak w [26, 27], jednak ograniczono się do wyprowadzenia równań kinematyki oraz przeprowadzono weryfikację tych równań, dla wózka widłowego, jako przykładowej konstrukcji trójkołowej. W artykule [32] z 2011 roku, przeanalizowano różne rodzaje kół podporowych w robocie mobilnym trójkołowym, z uwzględnieniem poślizgu bocznego (lateral slip) oraz tocznego (rolling slip).

Druga część przeglądu literatury dotyczy robotów mających praktyczne zastosowanie przemysłowe, zwanych również AGV (Automatic Guided Vehicle). Takie rozwiązanie przedstawiono w artykule z 1989 roku [33], w którym zaprezentowano równania kinematyki i dynamiki modelu pojazdu trójkołowego. Koło samonastawne było pomijane i stanowiło

tylko punkt podparcia, a cały układ uproszczono do dwóch stopni swobody. Kolejne rozwiązanie zostało przedstawione w pracy [19] z 2000 roku, gdzie oprócz wyprowadzenia równań kinematyki i dynamiki pojazdu, podjęto dyskusję na temat zużycia energii przez pojazd trójkołowy, przy czym przedstawione zostały jedynie wyniki symulacji. W prezentowanych równaniach pominięto koło samonastawne. Rozwój robotyki wpłynął również na rozwiązania przemysłowe, w których z powodzeniem wprowadzono ulepszone konstrukcje trójkołowe do transportu materiałów powyżej 100 kg, tak jak w artykule [34] z 2004 roku, jednak koło samonastawne również potraktowano jako punkt podparcia i pominięto w prezentowanych równaniach.

Trzecia część przeglądu dotyczy symulacji i różnych praktycznych rozwiązań konstrukcji robotów trójkołowych i czterokołowych. Jednym z artykułów, który przedstawia wyniki symulacji robota trójkołowego napędzanego silnikami krokowymi, przedstawiono w artykule [35] z 2000 roku. W analizowanej konstrukcji robota były tylko 2 koła napędowe i punkt podparcia. W artykule [36] z 2001 roku, przedstawiono wyniki modelowania i pomiarów dla trójkołowego robota Nomad 200, który podążał za zadaną trajektorią (trajectory tracking), wraz z omówieniem błędów, jakie powstały przy poruszaniu się po zadanej trajektorii. W pracach [7, 37] z 2001 i 2002 roku, przedstawiono wyprowadzenie równań pojazdu trójkołowego i czterokołowego (z dwoma kołami napędowymi oraz dwoma kołami samonastawnymi), przy czym w równaniach dynamiki pominięto analizę wpływu koła samonastawnego. W artykule [38] z 2003 roku przedstawiono wyniki symulacji robota dwukołowego, dla przypadku ruchu, w którym robot porusza się z prędkością teoretycznie idealną oraz nieidealną, w danym zakresie ruchu. Uproszczenie polegające na redukcji modelu nieholonomicznego do holonomicznego, pozwala przyspieszyć obliczenia, gdyż taki model można zlinearyzować, co udowodniono w artykułach [39, 40, 41] z 2004 roku. W artykule [42] z 2005 roku, udowodniono, że zastosowanie modelu nieliniowego do analizy cechuje się mniejszymi błędami, jednak wymaga zwiększonej mocy obliczeniowej. W artykule [9] z 2005 roku, wyprowadzono równania dla robota mobilnego Pioneer 2DX, podobnie jak w [7, 37] z użyciem równań Maggiiego, aby uniknąć mnożników Lagrange'a i uzyskać niewikłaną formę równań. Badania nad robotem trójkołowym Pioneer 2DX przeprowadzono również w pracy [43] z 2006 roku, w której koło samonastawne stanowiło punkt podparcia. Przeanalizowano przypadki, w których to koło może być włączane (trailing wheel) lub pchane (propelling wheel). Podobny model robota, który nie uwzględnia koła samonastawnego. Opis wymagań oraz konstrukcji modeli holonomicznych i nieholonomicznych przedstawiono w artykule [8] z 2006 roku, przy czym nie uwzględniono koła samonastawnego w wyprowadzonych równaniach. Nieco inne podejście przyjęto w pracy [15] z 2007 roku, gdzie uwzględniono wpływ koła samonastawnego jako członu tłumiącego ruch, jednak nie analizowano wpływu skręcenia tego koła na ruch robota. W pracy [13] z 2009 roku, ponownie podjęto próbę wyprowadzenia równań dla robota mobilnego trójkołowego, przy czym zastosowano inne podejście niż w pracach [7, 15, 37]. Koło

samonastawne potraktowano jako punkt podparcia i przyjęto, że nie ma funkcji kinematycznej. Podobnie postąpiono w artykule [44] z 2009 roku, gdzie dokonano analizy modeli nieholonomicznych i holonomicznych, przy czym stwierdzono, że modelem holonomicznym można precyzyjnie sterować. W pracy [45] z 2010 roku, przedstawiono równania robota mobilnego trójkołowego Amigobot, w których nie uwzględniono koła samonastawnego. Ponadto przeprowadzono identyfikację, do której wykorzystano pomiar obrotu kół napędowych, natomiast w artykule [46] przedstawiono wyniki symulacji i porównano je z rzeczywistym ruchem robota mobilnego. W artykule [47] z 2011 roku, przedstawiono sterowanie robotem mobilnym Pioneer 2DX, przy czym koło samonastawne uwzględniono jako czynnik tłumiący ruch. Analizowany model robota uwzględnia parametry silników z przekładniami i enkoderami. Inne podejście przyjęto w artykule [48] z 2011 roku, w którym bazowano na modelu robota trójkołowego Pioneer 2DX z uwzględnieniem koła samonastawnego, jako członu tłumiącego ruch. Ponadto przedstawiono równania uwzględniające poślizgi wzdłużne i boczne oraz przeprowadzono modelowanie dla różnego rodzaju podłoża. Identyfikację parametrów robota mobilnego Amigobot, przedstawiono w artykule [49] z 2011 roku, w którym uwzględniono koło samonastawne, jako człon tłumiący ruch. Analizowane koło jest centralnie zorientowane, natomiast analizowany model robota, zostaje sprowadzony do dwóch stopni swobody. Z kolei w artykule [50] z 2011 roku, przedstawiono metodę obliczania współrzędnych środka chwilowego obrotu ICR (Instantaneous Center of Rotation), dla dwukołowego robota mobilnego. W artykule [11] z 2012 roku, zaprezentowano wyniki symulacji modelu robota Pioneer 2DX, z uwzględnieniem koła samonastawnego, jako członu tłumiącego ruch. Dokonano próby oszacowania wartości współczynnika przyczepności przyłgowej dla pary opona – podłoże. Uwzględnienie możliwości ślizgania się kół, ograniczyło zakres zastosowania robota oraz stwierdzono, że uproszczony model może być stosowany tylko dla niewielkich prędkości i w małym zakresie przyspieszeń. W artykule [51] z 2012 roku, przedstawiono koncepcję sterowania robotem mobilnym trójkołowym z napędem różnicowym, z wykorzystaniem szumu a następnie udowodniono, że takie podejście powoduje mniejsze zużycie energii i mniejsze błędy niż sterowanie, które szumu nie uwzględnia.

Czwarta część przeglądu dotyczy pojazdów czterokołowych o konstrukcji zbliżonej do pojazdów samochodowych. Tematykę związaną z pojazdami zbliżonymi do konstrukcji samochodu, przeanalizowano w artykule [52] z 2004 roku, gdzie zaprezentowano przejazd takiego pojazdu w otoczeniu, w którym przeszkody się przemieszczają. W artykule [53] z 2005 roku, omówiono sterowanie taką konstrukcją dla kilku wybranych trajektorii i przedstawiono wyniki symulacji. W artykule [54] z 2009 roku, zaprezentowano wyniki symulacji dla robota czterokołowego, z dwoma kołami napędowymi i dwoma kołami samonastawnymi. W symulacji uwzględniono niepewność momentów bezwładności. W artykule [55] z 2011 roku, przedstawiono wyniki symulacji i pomiaru dla wózka inwalidzkiego, sterowanego regulatorem adaptacyjnym.

1.3. Cel i teza pracy

Celem pracy było zbadanie wpływu koła samonastawnego, na ruch robota po zadanej trajektorii oraz omówienie potencjalnych możliwości zastosowania informacji, o kącie skręcenia koła samonastawnego, do poprawy jakości sterowania robotem mobilnym trójkołowym. Do tej pory, zgodnie z przeglądem literatury, wpływ koła samonastawnego na ruch robota i własności tego koła były pomijane, natomiast w niniejszej rozprawie, postarano się uwzględnić w maksymalnym stopniu, pominięte własności koła samonastawnego. Podjęto próbę przebadania i opisanie własności tego koła oraz wykorzystania tej informacji w regulatorze sterującym ruchem robota.

W ramach pracy, została przeprowadzona analiza energetyczna robota mobilnego trójkołowego z kołem samonastawnym, która uwzględnia wpływ tego koła na właściwości energetyczne robota dla ruchu po zadanej trajektorii. Analizę zachowania koła samonastawnego, zamontowanego w robocie mobilnym trójkołowym, rozpoczęto poprzez wykonanie szeregu symulacji. Następnie wykonano dwa prototypowe roboty: eksperymentalny i przemysłowy. Roboty te, umożliwiły pomiarową weryfikację zachowania koła samonastawnego i określenie jego właściwości w trakcie ruchu. Wykorzystując posiadane informacje, zaadaptowano robota mobilnego w taki sposób, aby w pełni umożliwić działanie robota, jako środka transportu w zakładzie przemysłowym.

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury oraz wstępnych badań sformułowano następującą tezę pracy:

Uwzględniając wpływ koła samonastawnego można poprawić jakość sterowania robota mobilnego trójkołowego w ruchu po zadanej trajektorii.

Jakość sterowania, w rozumieniu autora określa wartość pierwiastka z błędu średniokwadratowego (RMSE - Root Mean Squared Error) położenia punktu charakterystycznego A, w ruchu po trajektorii. Wartość pierwiastka błędu średniokwadratowego została wybrana, gdyż stanowi sprawdzony środek kontroli jakości, co zostało udowodnione w artykułach [56, 57]. Aby udowodnić postawioną tezę pracy, sformułowano następujące cele:

- a) sprawdzenie, czy wyniki symulacji modelu robota i pomiaru są zgodne,
- b) doświadczalne potwierdzenie, że zmiana kąta skręcenia koła samonastawnego powoduje zmianę sił nacisku kół na podłoże,
- c) zbadanie zachowania koła samonastawnego oraz opis jego zachowania za pomocą równań,
- d) weryfikacja modeli matematycznych dla prototypowych robotów przy uwzględnieniu części energoelektronicznej i napędowej robota,
- e) sprawdzenie, czy uwzględnienie skrętu koła samonastawnego pozwala na ograniczenie błędów wynikających z odometrii.

Wobec powyższego należało zrealizować następujące czynności:

- wyciągnąć wnioski z przeprowadzonego przeglądu literatury dotyczącej robotów mobilnych, ze szczególnym uwzględnieniem robotów trójkołowych,
- przeprowadzić symulację dynamiki rozszerzonego modelu robota mobilnego trójkołowego z kołem samonastawnym,
- zbudować prototypowe roboty o różnej nośności i przeprowadzić ich badania,
- opracować metody pomiarowe i dokonać identyfikacji parametrów uproszczonego modelu przekształtnika i części napędowej robota, aby była możliwa precyzyjna analiza zużycia energii przez robota mobilnego,
- zweryfikować i porównać wyniki otrzymane z symulacji i z pomiarów.

1.4. Układ i zakres pracy

Praca składa się z pięciu rozdziałów. Rozdział 1. zawiera wstęp z opisem stanu zagadnienia oraz przegląd literatury. Rozdział 2. pracy zawiera pełne wyprowadzenie matematycznego modelu dynamiki robota. Ponadto rozdział zawiera wyniki symulacji modelu robota, przy wykorzystaniu danych rzeczywistego silnika napędowego ale bez uwzględnienia przekształtnika oraz ograniczeń momentów napędowych, wynikających z fizycznych własności silnika. Do symulacji dynamiki użyto autorskiego programu napisanego w ANSI C, z wykorzystaniem zmodyfikowanej biblioteki numerycznej, do rozwiązywania układów równań różniczkowych metodą Rungego-Kutty IV-go rzędu, ze zmiennym krokiem całkowania. Rozdział 3. zawiera opis budowy robota eksperymentalnego i przemysłowego. W tym rozdziale omówiono także szczegółowo budowę koła samonastawnego oraz zachowanie koła samonastawnego podczas poruszania się robota po zadanej trajektorii. Rezultatem przeprowadzonych badań był uproszczony opis ruchu obrotowego koła samonastawnego równaniem II-go rzędu z opóźnieniem. Opis ten został wykorzystany w sterowaniu. W rozdziale 4. podjęto dyskusję na temat zużycia energii w robocie mobilnym. Dokonano identyfikacji parametrów energoelektronicznych i mechanicznych robota oraz przedstawiono porównanie wyników z rezultatami pomiarowymi. Ponadto zaprezentowano uproszczony model przekształtnika wykorzystanego do zasilania silników robota. Została przedstawiona analiza zużycia energii przez robota eksperymentalnego i przemysłowego. Zaprezentowano również przeprowadzony bilans energetyczny. Potwierdził on pełną poprawność równań robota, gdyż energia dostarczona z części napędowej i energia wykorzystana do realizacji ruchu robota, w pełni się bilansowała. W tym rozdziale porównano także wyniki symulacji i wyniki pomiarów wielkości określających położenie robota realizującego zadaną trajektorię oraz przedstawiono weryfikację wyników pomiarowych, za pomocą zdjęć porównujących trajektorię ruchu

robotu. Rozdział 5. zawiera przykład wdrożenia robota mobilnego, jako układu transportującego w zadaniu logistycznym. W rozdziale przedstawiono wyniki symulacji ruchu robota w zadaniu logistycznym a następnie weryfikację implementacji ruchu robota w środowisku przemysłowym.

Rozdział 2

Wyprowadzenie rozszerzonego modelu robota mobilnego trójkołowego z kołem samonastawnym

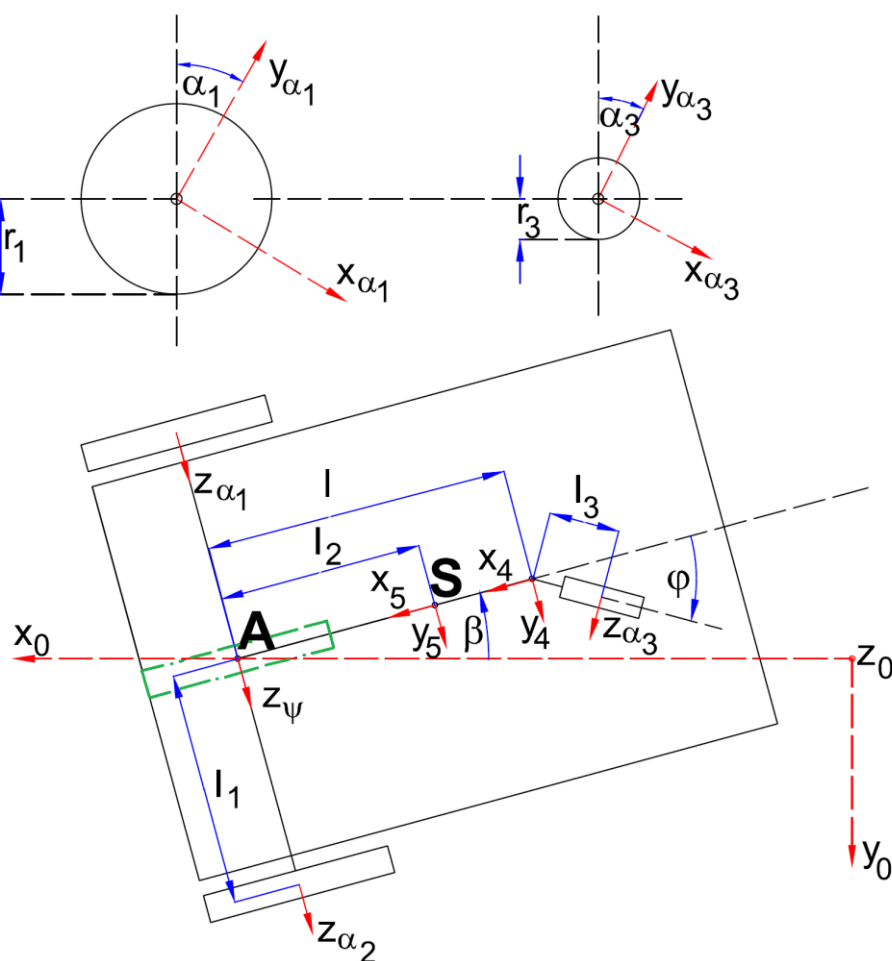
Celem rozdziału było sprawdzenie równań w procesie symulacji rozszerzonego modelu robota mobilnego, który uwzględnia koło samonastawne. Z punktu widzenia pracy, bardzo istotna była również odpowiedź na pytanie, czy zmiana kąta skręcenia koła samonastawnego, powoduje zmianę sił nacisku kół na podłoże. Bazując na koncepcji zmiany sił nacisku kół na podłoże, wykonano symulację dla kilku rodzajów trajektorii.

2.1. Równania kinematyki i dynamiki robota

Przy wyprowadzeniu modelu robota mobilnego, przyjęto, że porusza on się na płaszczyźnie (x, y) oraz założono, że każde koło napędowe ma jeden punkt styczności z podłożem, tak jak to opisano w pracach [15, 26, 27].

Na rysunku 1 został przedstawiony schemat robota trójkołowego z kołem samonastawnym, wraz z zaznaczonymi lokalnymi układami współrzędnych. Układ współrzędnych globalnych oznaczono indeksem 0. Lokalny układ współrzędnych skojarzonych z kołem napędowym pierwszym, oznaczono indeksem 1 (x_1, y_1, z_1) , natomiast lokalny układ współrzędnych skojarzonych z drugim kołem napędowym, oznaczono indeksem 2 (x_2, y_2, z_2) . W punkcie mocowania ramienia, na którym osadzone jest koło samonastawne, umieszczono lokalny układ współrzędnych oznaczony indeksem 4 (x_4, y_4, z_4) , natomiast układ współrzędnych związany z kołem samonastawnym, oznaczono indeksem 3 (x_3, y_3, z_3) . Początek lokalnego układu współrzędnych związanych z środkiem masy ramy

robotu, umieszczono w punkcie S i układ współrzędnych oznaczono indeksem 5 (x_5, y_5, z_5). Ponadto przyjęto następujące oznaczenia: A – punkt charakterystyczny, l – odcinek pomiędzy punktem charakterystycznym A oraz punktem mocowania koła samonastawnego, l_1 – odległość poszczególnych kół napędowych od punktu charakterystycznego A, l_2 – odległość punktu charakterystycznego A od środka masy ramy S, l_3 – długość ramienia koła samonastawnego, β – kąt obrotu ramy robota, α_1, α_2 – kąt obrotu kół napędowych, α_3 – kąt obrotu koła samonastawnego, φ – kąt skręcenia koła samonastawnego, r_1, r_2 – promienie kół napędowych, r_3 – promień koła samonastawnego.



Rys. 1. Schemat robota mobilnego z kołem samonastawnym.

Zagadnienie ruchu robota mobilnego będzie rozpatrywane w płaskim układzie współrzędnych (x, y), przy czym układami odniesienia będą punkty mocowania kół napędowych, środek konstrukcji robota oraz punkt mocowania koła samonastawnego. Przy takim założeniu, liczba stopni swobody układu nieskrępowanego ulega znacznemu ograniczeniu i wynosi [58, 59]:

$$s = n - h - a, \quad (1)$$

gdzie: n – liczba stopni swobody układu nieskrępowanego, h – liczba więzów holonomicznych, a – liczba więzów nieholonomicznych.

Liczba stopni swobody punktu materialnego na płaszczyźnie wynosi 3 (2 przesunięcia i rotacja). Dla bryły sztywnej umieszczonej w przestrzeni, liczba stopni swobody jest już znacznie większa i wynosi 6, co oznacza 3 przesunięcia i 3 rotacje.

Przystępując do analizy stopni swobody układu robota mobilnego, przyjęto następujące założenie:

- układ będzie rozpatrywany na płaszczyźnie (x, y) , tym samym przyjęto, że robot się „nie unosi”, dlatego $z = \text{const.}$,

- na każdy układ odniesienia są nałożone więzy, co również ogranicza liczbę stopni swobody.

Zatem dla lokalnego układu współrzędnych (x_1, y_1, z_1) , który opisuje pierwsze koło napędowe, liczba stopni swobody układu nieskrępowanego wynosi:

$$n_1 = 6 - 2 = 4, \quad (2)$$

dla lokalnego układu współrzędnych (x_2, y_2, z_2) , który opisuje drugie koło napędowe, liczba stopni swobody układu nieskrępowanego wynosi:

$$n_2 = 6 - 2 = 4, \quad (3)$$

analogicznie jest dla lokalnego układu współrzędnych (x_5, y_5, z_5) – czyli konstrukcji całego robota, przy czym konstrukcja całego robota ma dwa przesunięcia i jedną rotację:

$$n_5 = 6 - 3 = 3 \quad (4)$$

oraz dla lokalnego układu współrzędnych (x_3, y_3, z_3) , umieszczonego w miejscu zamocowania koła samonastawnego:

$$n_3 = 6 - 2 = 4. \quad (5)$$

W konsekwencji liczba stopni swobody układu nieskrępowanego całego robota wynosi:

$$n = n_1 + n_2 + n_3 + n_5 = 15. \quad (6)$$

Dodatkowo na każdy z układów nałożone są więzy, które wynikają z konstrukcji robota. Przyjmując założenie, że koła napędowe są takiej samej wielkości i równo oddalone od punktu charakterystycznego A, zastąpiono te koła wypadkowym kołem zastępczym umieszczonym w punkcie A, podobnie jak w [15, 37]. Kąt obrotu koła zastępczego oznaczono przez ψ . Wobec czego, prawdziwa jest zależność wynikająca z więzów nieholonomicznych dla punktu charakterystycznego A¹, w którym x_{A0} i y_{A0} stanowią początkowe wartości współrzędnych x_A i y_A (dla kąta $\psi=0$):

$$x_A = r_1 \psi \cos(\beta) + x_{A0}, \quad (7)$$

$$y_A = r_1 \psi \sin(\beta) + y_{A0}. \quad (8)$$

Następnie określono pochodne po czasie:

$$\dot{x}_A = r_1 \dot{\psi} \cos(\beta), \quad (9)$$

¹ Przy transformacji prędkości na układ współrzędnych x-y, kąt β się nie zmienia.

$$\dot{y}_A = r_1 \dot{\psi} \sin(\beta). \quad (10)$$

Tym samym można zapisać więzy holonomiczne występujące w konstrukcji robota dla współrzędnych w układzie zerowym:

$$x_1 = x_A + l_1 \sin(\beta), \quad (11)$$

$$y_1 = y_A - l_1 \cos(\beta), \quad (12)$$

$$x_2 = x_A - l_1 \sin(\beta), \quad (13)$$

$$y_2 = y_A + l_1 \cos(\beta), \quad (14)$$

przy czym pochodne po czasie wynoszą odpowiednio:

$$\dot{x}_1 = \dot{x}_A + l_1 \dot{\beta} \cos(\beta), \quad (15)$$

$$\dot{y}_1 = \dot{y}_A + l_1 \dot{\beta} \sin(\beta), \quad (16)$$

$$\dot{x}_2 = \dot{x}_A - l_1 \dot{\beta} \cos(\beta), \quad (17)$$

$$\dot{y}_2 = \dot{y}_A - l_1 \dot{\beta} \sin(\beta). \quad (18)$$

Bazując na wyprowadzeniach (9 i 10), można opisać prędkość obrotową koła zastępczego, które znajduje się w punkcie charakterystycznym A:

$$\dot{x}_A^2 + \dot{y}_A^2 = r_1^2 \dot{\psi}^2, \text{ gdyż: } \dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2 = r_1^2 \dot{\alpha}_1^2 \text{ oraz } \dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2 = r_2^2 \dot{\alpha}_2^2. \quad (19)$$

Kolejne więzy dotyczą punktu S, w którym zdefiniowano środek masy ramy robota:

$$x_5 = x_A - l_2 \cos(\beta), \quad (20)$$

$$y_5 = y_A - l_2 \sin(\beta). \quad (21)$$

Z kolei pochodne po czasie wynoszą odpowiednio:

$$\dot{x}_5 = \dot{x}_A + l_2 \dot{\beta} \sin(\beta), \quad (22)$$

$$\dot{y}_5 = \dot{y}_A - l_2 \dot{\beta} \cos(\beta). \quad (23)$$

Poniżej opisano współrzędne miejsca mocowania koła samonastawnego:

$$x_3 = x_A - l \cos(\beta) - l_3 \cos(\varphi - \beta), \quad (24)$$

$$y_3 = y_A - l \sin(\beta) + l_3 \sin(\varphi - \beta). \quad (25)$$

Różniczkując po czasie (24) i (25), otrzymujemy następujące zależności:

$$\dot{x}_3 = \dot{x}_A + l \dot{\beta} \sin(\beta) + (\dot{\varphi} - \dot{\beta}) l_3 \sin(\varphi - \beta), \quad (26)$$

$$\dot{y}_3 = \dot{y}_A - l \dot{\beta} \cos(\beta) + (\dot{\varphi} - \dot{\beta}) l_3 \cos(\varphi - \beta). \quad (27)$$

Wobec powyższego liczba więzów holonomicznych opisanych równaniami (11-14, 20-21, 24-25) wynosi $h=8$. Do uwzględnienia pozostały więzy nieholonomiczne, które zdefiniowano poniżej.

W tym celu przygotowano rysunek 2, z którego wynika, że prędkość każdego z kół napędowych jest składową dwóch prędkości:

- postępowej $\dot{\psi}$,

- obrotowej $\frac{l_1}{r_1} \dot{\beta}$, przy czym należy dodać, że koła znajdują się w odległości l_1 od punktu

charakterystycznego A, natomiast r_1 określa stosunek prędkości postępowej środka koła do prędkości obrotowej koła.

W celu uproszczenia wzorów przyjęto, że:

$$h_1 = \frac{l_1}{r_1}. \quad (28)$$

W wyniku superpozycji tych dwóch prędkości oraz skorzystania z faktu, iż prędkości są wektorami, otrzymano zależności:

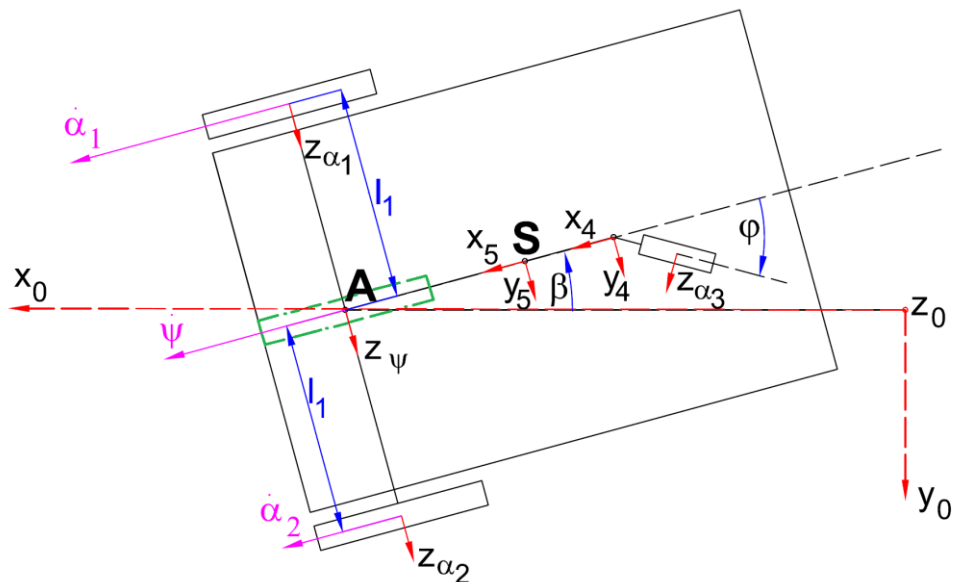
$$\dot{\alpha}_1 = \dot{\psi} + h_1 \dot{\beta}, \quad (29)$$

$$\dot{\alpha}_2 = \dot{\psi} - h_1 \dot{\beta}, \quad (30)$$

gdzie $\dot{\psi} = \frac{\dot{\alpha}_1 + \dot{\alpha}_2}{2}$, przy czym $\dot{\psi}$ oznacza prędkość kątową koła zastępczego umieszczonego

w punkcie A, zaś prędkość kątową $\dot{\beta}$ całej konstrukcji wynosi:

$$\dot{\beta} = \frac{\dot{\alpha}_1 - \dot{\alpha}_2}{2h_1}. \quad (31)$$



Rys. 2. Schemat robota mobilnego z kołem samonastawnym – wektory prędkości.

Korzystając z faktu, iż środki układów odniesienia znajdują się w środkach ciężkości elementów robota, można określić energię kinetyczną robota, korzystając z twierdzenia Koeniga, które brzmi następująco [60]:

„Energia kinetyczna układu punktów materialnych równa jest sumie energii kinetycznej, jaką miałby punkt materialny o masie całego układu, poruszający się z prędkością środka jego masy, oraz energii kinetycznej tegoż układu w jego ruchu względem środka masy.”²”

Wobec powyższego można określić energię kinetyczną dla każdego z kół napędowych.

Dla koła 1 energia kinetyczna będzie równa:

$$T_{\alpha 1} = \frac{1}{2} m_1 (\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2) + \frac{1}{2} (I_{z1} \dot{\alpha}_1^2) + \frac{1}{2} (I_{y1} \dot{\beta}_1^2), \quad (32)$$

w którym pierwszy człon jest energią ruchu postępowego koła, natomiast pozostałe dwa człony dotyczą energii ruchu obrotowego w osi obrotu koła oraz skręcenia koła, na skutek zmiany położenia (skręcenia) całego robota.

$$\begin{aligned} T_{\alpha 1} &= \frac{1}{2} m_1 (\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2) + \frac{1}{2} I_{z1} \dot{\alpha}_1^2 + \frac{1}{2} I_{y1} \dot{\beta}_1^2 = \frac{1}{2} m_1 (r_1^2 \dot{\psi}^2 + 2r_1 \dot{\psi} \dot{\beta}_1 + \dot{\beta}_1^2 l_1^2) + \frac{1}{2} (I_{z1} \dot{\alpha}_1^2 + I_{y1} \dot{\beta}_1^2) = \\ &= \frac{1}{2} m_1 (r_1^2 \dot{\psi}^2 + 2r_1 \dot{\psi} \dot{\beta}_1 + \dot{\beta}_1^2 l_1^2) + \frac{1}{2} (I_{z1} (\dot{\psi} + h_1 \dot{\beta}_1)^2 + I_{y1} \dot{\beta}_1^2) = \frac{1}{2} \{ (m_1 r_1^2 + I_{z1}) (\dot{\psi} + h_1 \dot{\beta}_1)^2 + I_{y1} \dot{\beta}_1^2 \}. \end{aligned} \quad (33)$$

Dla koła 2 energia kinetyczna wynosi:

$$\begin{aligned} T_{\alpha 2} &= \frac{1}{2} m_2 (\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2) + \frac{1}{2} I_{z2} \dot{\alpha}_2^2 + \frac{1}{2} I_{y2} \dot{\beta}_2^2 = \frac{1}{2} m_2 (r_2^2 \dot{\psi}^2 - 2r_2 \dot{\psi} \dot{\beta}_1 + \dot{\beta}_1^2 l_1^2) + \\ &= \frac{1}{2} (I_{z2} \dot{\alpha}_2^2 + I_{y2} \dot{\beta}_2^2) = \frac{1}{2} m_2 (r_2^2 \dot{\psi}^2 - 2r_2 \dot{\psi} \dot{\beta}_1 + \dot{\beta}_1^2 l_1^2) + \frac{1}{2} (I_{z2} (\dot{\psi} - h_1 \dot{\beta}_1)^2 + I_{y2} \dot{\beta}_2^2) = \\ &= \frac{1}{2} \{ (m_2 r_2^2 + I_{z2}) (\dot{\psi} - h_1 \dot{\beta}_1)^2 + I_{y2} \dot{\beta}_2^2 \}. \end{aligned} \quad (34)$$

Korzystając z tego, iż koło 1 ma taką samą masę i wymiar jak koło 2, przyjęto założenie, że: $r_1=r_2$, $m_1=m_2$, wtedy momenty bezwładności kół napędowych względem osi $z_{\alpha 1}$, $y_{\alpha 1}$ (I_{z1} , I_{y1}) oraz $z_{\alpha 2}$, $y_{\alpha 2}$ (I_{z2} , I_{y2}) są sobie równe:

$$I_{y1} = I_{y2}, \quad I_{z1} = I_{z2}. \quad (35)$$

Energię kinetyczną ramy wyrażono jako:

$$\begin{aligned} T_5 &= \frac{1}{2} m_5 (\dot{x}_5^2 + \dot{y}_5^2) + \frac{1}{2} I_{z5} \dot{\beta}^2 = \frac{1}{2} m_5 (r_1^2 \dot{\psi}^2 \cos^2(\beta) + l_2^2 \dot{\beta}^2 \sin^2(\beta) + 2r_1 \dot{\psi} l_2 \cos(\beta) \sin(\beta) + \\ &= \frac{1}{2} m_5 (r_1^2 \dot{\psi}^2 \sin^2(\beta) + l_2^2 \dot{\beta}^2 \cos^2(\beta) - 2r_1 \dot{\psi} l_2 \sin(\beta) \cos(\beta)) + \frac{1}{2} I_{z5} \dot{\beta}^2 = \frac{1}{2} m_5 (r_1^2 \dot{\psi}^2 + l_2^2 \dot{\beta}^2) + \frac{1}{2} I_{z5} \dot{\beta}^2, \end{aligned} \quad (36)$$

gdzie I_{z5} oznacza moment bezwładności konstrukcji robota (względem osi z).

Korzystając z równań (26÷27) obliczona została energia kinetyczna dla koła samonastawnego, w którym uwzględniono również możliwość ślizgania się tego koła:

² J. Leyko, Mechanika ogólna tom 2, PWN, Warszawa 1969, str. 224.

$$T_{\alpha_3} = \frac{1}{2} m_3 (\dot{x}_3^2 + \dot{y}_3^2) + \frac{1}{2} I_{y_3} (\dot{\varphi} - \dot{\beta})^2 + \frac{1}{2} I_{z_3} \dot{\alpha}_3^2 = \frac{1}{2} m_3 (r_1^2 \dot{\psi}^2 + l^2 \dot{\beta}^2 + (\dot{\varphi} - \dot{\beta})^2 l_3^2 + 2l_3 (\dot{\varphi} - \dot{\beta}) (r_1 \dot{\psi} \sin(\varphi) - l \dot{\beta} \cos(\varphi))) + \frac{1}{2} I_{y_3} (\dot{\varphi} - \dot{\beta})^2 + \frac{1}{2} I_{z_3} \dot{\alpha}_3^2, \quad (37)$$

gdzie I_{z_3} oraz I_{y_3} oznaczają momenty bezwładności koła samonastawnego względem osi z_{α_3} i y_{α_3} .

Szczególnym przypadkiem w analizie dynamiki robota mobilnego trójkołowego, jest konstrukcja z kołem samonastawnym, które się nie ślizga. Jest to przypadek czysto teoretyczny i dlatego ta forma określenia energii, nie będzie wykorzystywana w końcowym wyprowadzeniu równań dynamiki.

Przejście na model uproszczony z kołem samonastawnym nieślizgającym się wymaga założenia, że prędkość punktu styczności tego koła z podłożem jest równa zero, czyli:

$$\dot{\alpha}_3^2 = \frac{\dot{x}_3^2 + \dot{y}_3^2}{r_3^2}. \quad (38)$$

Dla tego przypadku liczba stopni swobody redukuje się do trzech, a wektor współrzędnych uogólnionych ma postać:

$$q^T = [\beta \quad \psi \quad \varphi] \text{ oraz } i \in \{1, 2, 3\}. \quad (39)$$

Z kolei energia kinetyczna związana z kołem samonastawnym, które się nie ślizga wynosi:

$$T_3 = \frac{1}{2} \left(m_3 + \frac{I_{z_3}}{r_3^2} \right) (r_1^2 \dot{\psi}^2 + l^2 \dot{\beta}^2 + l_3^2 (\dot{\varphi} - \dot{\beta})^2 + 2l_3 (\dot{\varphi} - \dot{\beta}) (r_1 \dot{\psi} \sin(\varphi) - l \dot{\beta} \cos(\varphi))) + \frac{1}{2} I_{y_3} (\dot{\varphi} - \dot{\beta})^2. \quad (40)$$

Do dalszych obliczeń przyjęto energię kinetyczną koła samonastawnego, które się ślizga zgodnie z zależnością (37).

Poniżej zapisano równanie Lagrange'a o postaci [58, 59]:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tilde{P}_{q_i} - D_q \dot{q}_i, \quad i \in \{1, 2, 3, 4\}, \quad (41)$$

gdzie

$$L = T - U, \quad (42)$$

przy czym wektor współrzędnych uogólnionych ma następującą postać:

$$q^T = [\beta \quad \psi \quad \varphi \quad \alpha_3] \quad (43)$$

oraz

$$L = T_{\alpha_1} + T_{\alpha_2} + T_{\alpha_3} + T_5, \quad U = 0, \quad (44)$$

bowiem zmiana energii potencjalnej U względem zerowego układu współrzędnych wynosi zero, gdyż robot porusza się po płaszczyźnie.

Pracę wirtualną, (prawa strona równania 41), wraz z tłumieniami wynikającymi z tarcia suchego, oznaczono jako \tilde{P}_{qi} , natomiast siły wynikające z tarcia wiskotycznego oznaczono przez $D_q \dot{q}_i$.

Przesunięcia wirtualne oraz siły uogólnione zostały wyprowadzone przy wykorzystaniu twierdzenia d’Alamberta, które brzmi następująco [60]:

„W czasie ruchu dowolnego układu punktów materialnych siły rzeczywiste działające na punkty tego układu równoważą się w każdej chwili z odpowiednimi siłami bezwładności.³”

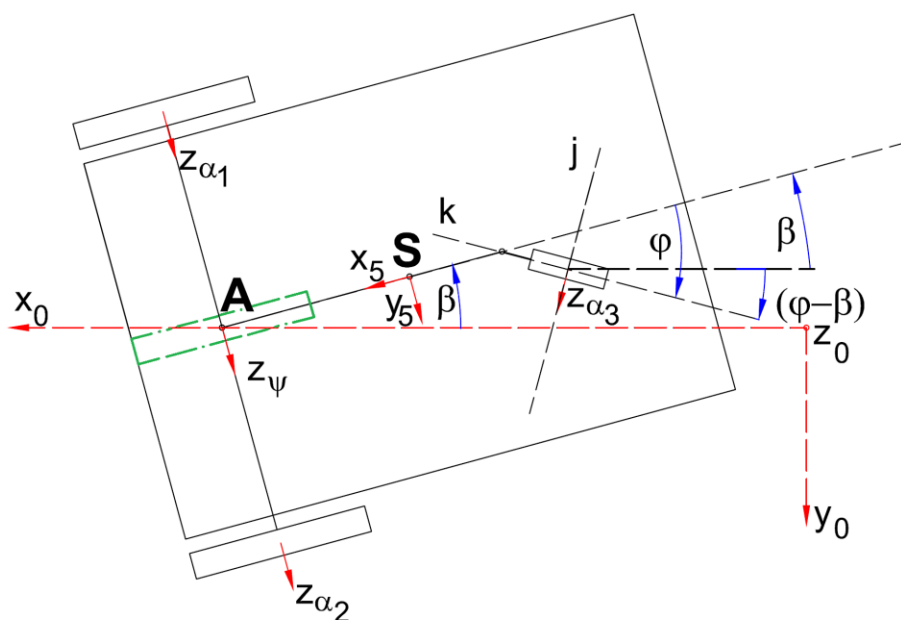
Siły bezwładności zostały już opisane w trakcie wyprowadzania energii kinetycznej, wobec czego pozostał wyłącznie opis sił zewnętrznych oraz tłumień, które zawierają między innymi tarcie wiskotyczne.

Korzystając z faktu, iż każdorazowe działanie siły jest związane z rozpraszaniem energii w układzie, można zapisać składową siły zewnętrznej jako [58]:

$$\hat{F}_i = F_i - D_i \dot{q}_i, \quad i \in \{1, 2, 3, 4\}, \quad (45)$$

przy czym siły tarcia suchego zaliczane są również do sił zewnętrznych.

W trakcie ruchu, na koło samonastawne wpływają siły wynikające ze sposobu jego mocowania. Siły te powodują, że koło samonastawne dąży do położenia, w którym wektor prędkości w osi zamocowania koła (oś x), pokrywa chwilowo swój kierunek i zwrot z wektorem, w miejscu mocowania ramienia tego koła.



Rys. 3. Schemat robota mobilnego z kołem samonastawnym – siły oddziałujące na koło samonastawne.

³ J. Leyko, Mechanika ogólna tom 2, PWN, Warszawa 1969, str. 196.

Na rysunku 3 naniesiono dodatkowe osie (j, k), na które zrzutowano siły, wynikające ze sposobu mocowania koła samonastawnego i dokonano rzutowania na osie ruchu (x, y). Korzystając z równań (26÷27) opisano siły zrzutowane na oś j :

$$\tilde{F}_j = D_{F\varphi}(\dot{x}_3 \sin(\varphi - \beta) + \dot{y}_3 \cos(\varphi - \beta)) = D_{F\varphi}(r_1\dot{\psi} \sin(\varphi) - l\dot{\beta} \cos(\varphi) + (\dot{\varphi} - \dot{\beta})l_3) \quad (46)$$

oraz na oś k :

$$\tilde{F}_k = D_{F\alpha_3}(\dot{x}_3 \cos(\varphi - \beta) - \dot{y}_3 \sin(\varphi - \beta) - r_3\dot{\alpha}_3) = D_{F\alpha_3}(r_1\dot{\psi} \cos(\varphi) + l\dot{\beta} \sin(\varphi) - r_3\dot{\alpha}_3). \quad (47)$$

Wobec czego praca wirtualna δA wynosi [58]:

$$\delta A = \tilde{P}_\psi \delta\psi + \tilde{P}_\beta \delta\beta + \tilde{P}_\varphi \delta\varphi + \tilde{P}_{\alpha_3} \delta\alpha_3 = \tilde{M}_1 \delta\alpha_1 + \tilde{M}_2 \delta\alpha_2 + \tilde{N}_\varphi \delta\varphi + \tilde{D}_{\alpha_3} \delta\alpha_3, \quad (48)$$

gdzie:

$$\tilde{M}_1 = M_1 - D_{\alpha_1} r_1 \dot{\alpha}_1 - N_1 f_1 r_1 \operatorname{sgn}(\dot{\alpha}_1), \quad (49)$$

$$\tilde{M}_2 = M_2 - D_{\alpha_2} r_2 \dot{\alpha}_2 - N_2 f_2 r_2 \operatorname{sgn}(\dot{\alpha}_2), \quad (50)$$

$$\begin{aligned} \tilde{N}_\varphi = & \tilde{F}_j l_3 - N_3 l_3 \mu_3 \sin(\varphi) \operatorname{sgn}(\dot{\varphi}) - D_\varphi \dot{\varphi} = D_{F\varphi} l_3 (r_1 \dot{\psi} \sin(\varphi) - l \dot{\beta} \cos(\varphi) + \\ & (\dot{\varphi} - \dot{\beta}) l_3) - N_3 l_3 \mu_3 \sin(\varphi) \operatorname{sgn}(\dot{\varphi}) - D_\varphi \dot{\varphi}, \end{aligned} \quad (51)$$

$$\tilde{D}_{\alpha_3} = (\tilde{F}_k r_3 - D_{\alpha_3} \dot{\alpha}_3) = (D_{F\alpha_3} r_3 (r_1 \dot{\psi} \cos(\varphi) + l \dot{\beta} \sin(\varphi) - r_3 \dot{\alpha}_3) - D_{\alpha_3} \dot{\alpha}_3). \quad (52)$$

Poniżej określono pracę wirtualną, bazując na zależności (48):

$$\begin{aligned} \delta A = & (M_1 - D_{\alpha_1} r_1 \dot{\alpha}_1 - N_1 f_1 r_1 \operatorname{sgn}(\dot{\alpha}_1)) \delta\alpha_1 + (M_2 - D_{\alpha_2} r_2 \dot{\alpha}_2 - N_2 f_2 r_2 \operatorname{sgn}(\dot{\alpha}_2)) \delta\alpha_2 + \\ & (D_{F\varphi} l_3 (r_1 \dot{\psi} \sin(\varphi) - l \dot{\beta} \cos(\varphi) + (\dot{\varphi} - \dot{\beta}) l_3) - N_3 \mu_3 l_3 \sin(\varphi) \operatorname{sgn}(\dot{\varphi}) - D_\varphi \dot{\varphi}) \delta\varphi + \\ & (D_{F\alpha_3} r_3 (r_1 \dot{\psi} \cos(\varphi) + l \dot{\beta} \sin(\varphi) - r_3 \dot{\alpha}_3) - D_{\alpha_3} \dot{\alpha}_3) \delta\alpha_3 = \\ & (M_1 - D_{\alpha_1} r_1 (\dot{\psi} + h_1 \dot{\beta}) - N_1 f_1 r_1 \operatorname{sgn}(\dot{\psi}) - N_1 f_1 r_1 h_1 \operatorname{sgn}(\dot{\beta})) \delta(\psi + h_1 \beta) + \\ & (M_2 - D_{\alpha_2} r_2 (\dot{\psi} - h_1 \dot{\beta}) - N_2 f_2 r_2 \operatorname{sgn}(\dot{\psi}) + N_2 f_2 r_2 h_1 \operatorname{sgn}(\dot{\beta})) \delta(\psi - h_1 \beta) + \\ & (D_{F\varphi} l_3 (r_1 \dot{\psi} \sin(\varphi) - l \dot{\beta} \cos(\varphi) + (\dot{\varphi} - \dot{\beta}) l_3) - N_3 \mu_3 l_3 \sin(\varphi) \operatorname{sgn}(\dot{\varphi}) - D_\varphi \dot{\varphi}) \delta\varphi + \\ & (D_{F\alpha_3} r_3 (r_1 \dot{\psi} \cos(\varphi) + l \dot{\beta} \sin(\varphi) - r_3 \dot{\alpha}_3) - D_{\alpha_3} \dot{\alpha}_3) \delta\alpha_3. \end{aligned} \quad (53)$$

Po przekształceniach otrzymano:

$$\begin{aligned} \tilde{P}_\beta = & h_1 (M_1 - M_2) - h_1 (\dot{\psi} (D_{\alpha_1} r_1 - D_{\alpha_2} r_2) + h_1 \dot{\beta} (D_{\alpha_1} r_1 + D_{\alpha_2} r_2)) + \\ & - h_1 (\operatorname{sgn}(\dot{\psi}) (N_1 f_1 r_1 - N_2 f_2 r_2) + h_1 \operatorname{sgn}(\dot{\beta}) (N_1 f_1 r_1 + N_2 f_2 r_2)), \end{aligned} \quad (54)$$

$$\begin{aligned} \tilde{P}_\psi = & (M_1 + M_2) - \dot{\psi} (D_{\alpha_1} r_1 + D_{\alpha_2} r_2) - h_1 \dot{\beta} (D_{\alpha_1} r_1 - D_{\alpha_2} r_2) + \\ & - \operatorname{sgn}(\dot{\psi}) (N_1 f_1 r_1 + N_2 f_2 r_2) - h_1 \operatorname{sgn}(\dot{\beta}) (N_1 f_1 r_1 - N_2 f_2 r_2), \end{aligned} \quad (55)$$

$$\begin{aligned} \tilde{P}_\varphi = & \tilde{F}_j l_3 - N_3 l_3 \mu_3 \sin(\varphi) \operatorname{sgn}(\dot{\varphi}) - D_\varphi \dot{\varphi} = \\ & l_3 D_{F\varphi} (r_1 \dot{\psi} \sin(\varphi) - l \dot{\beta} \cos(\varphi) + (\dot{\varphi} - \dot{\beta}) l_3) - N_3 l_3 \mu_3 \sin(\varphi) \operatorname{sgn}(\dot{\varphi}) - D_\varphi \dot{\varphi}, \end{aligned} \quad (56)$$

$$\tilde{P}_{\alpha_3} = \tilde{F}_k r_3 - D_{\alpha_3} \dot{\alpha}_3 = D_{F\alpha_3} r_3 (r_1 \dot{\psi} \cos(\varphi) + l \dot{\beta} \sin(\varphi) - r_3 \dot{\alpha}_3) - D_{\alpha_3} \dot{\alpha}_3, \quad (57)$$

gdzie: \tilde{P}_β – oznacza siłę uogólnioną działającą w kierunku współrzędnej uogólnionej β , \tilde{P}_ψ – oznacza siłę uogólnioną działającą w kierunku współrzędnej uogólnionej ψ , \tilde{P}_φ – oznacza siłę uogólnioną działającą w kierunku współrzędnej uogólnionej φ , \tilde{P}_{α_3} – oznacza siłę uogólnioną działającą w kierunku współrzędnej uogólnionej α_3 , M_1, M_2 oznaczają momenty napędowe pomniejszone o straty w przekładni, N_1, N_2, N_3 – oznaczają siły nacisku kół na podłoże, $D_{\alpha_1}, D_{\alpha_2}, D_\varphi, D_{\alpha_3}, D_{F\varphi}, D_{F\alpha_3}$ – oznaczają współczynniki tłumienia, f_1, f_2, μ_3 – oznaczają współczynniki tarcia toczonego⁴ i statycznego (μ_3). Ze względów formalnych, wyprowadzenie (57) zawiera promień r_1 i r_2 , jednak w dalszej części przyjęto, że te promienie są sobie równe, stąd też w dalszych oznaczeniach będzie występować tylko r_1 . Podczas ruchu robota mobilnego przyjęto, że podłoże może ulegać plastycznemu odkształceniu, co zostało opisane w artykule [61]. Wpływ podłoża został opisany podobnie jak w artykułach [62, 63], jednakże przyjęto, że współczynniki tarcia kół napędowych f_1 i f_2 , będą mogły zmieniać się w sposób losowy według przyjęto rozkładu normalnego, opisanego jako $N(\{f_{1E}, f_{2E}\}, 0,0058)$, gdzie f_{1E} i f_{2E} są wartościami oczekiwanymi współczynników tarcia f_1 i f_2 .

2.2. Równania na zmienne siły nacisku kół o podłoże

W niniejszej pracy, analizowany jest również wpływ koła samonastawnego na zmianę sił nacisku kół o podłoże. Wpływa to w sposób pośredni na pracę wirtualną, wykonywaną przez siły zewnętrzne nad układem robota, czyli na siły uogólnione. W poprzednich publikacjach [7, 8, 9, 11, 13, 14, 15, 26, 27, 32], w których wpływ koła samonastawnego jest pomijany, bądź też jest opisany tylko za pomocą więzów kinematycznych, przyjęto, że siły nacisku są stałe, co nie jest w pełni prawdą. W niniejszej pracy, zmienność sił nacisku została uwzględniona oraz zostały wyprowadzone wzory na siły nacisku. Wzory te, pozwalają na stwierdzenie, że siły nacisku zmieniają się w zależności od kąta skręcenia koła samonastawnego φ .

Na rysunku 4 został przedstawiony schemat robota trójkołowego w widoku bocznym, przy czym parametr B oznacza odległość pomiędzy osią kół napędowych a środkiem robota, zaś Q_1, Q_2, Q_3 i Q_5 oznaczają siły ciężkości.

⁴ Siły tarcia, które są uzależnione od prędkości noszą nazwę sił tarcia wiskotycznego.

$$N_3 = \frac{1}{(l + l_3 \cos(\varphi))} (m_5 l_2 (g + \dot{\beta}^2 B) - m_3 \dot{\beta}^2 l (r_1 - r_3) + m_3 \dot{\beta}^2 l_3 \cos(\varphi) (r_1 - r_3) + g m_3 (l + l_3 \cos(\varphi))) \quad (63)$$

Znając zmiany sił nacisków kół na podłoże, przystąpiono do dalszych obliczeń energii kinetycznej, robota mobilnego trójkołowego z kołem ślizgającym się. Energia kinetyczna całego układu robota jest równa:

$$T = \frac{1}{2} I_{z5} \dot{\beta}^2 + \frac{1}{2} m_5 (r_1^2 \dot{\psi}^2 + l_2^2 \dot{\beta}^2) + (m_1 r_1^2 + I_{z1}) (\dot{\psi}^2 + h_1^2 \dot{\beta}^2) + I_{y1} \dot{\beta}^2 + \frac{1}{2} I_{y3} (\dot{\varphi} - \dot{\beta})^2 + \frac{1}{2} I_{z3} \dot{\alpha}_3^2 + \frac{1}{2} m_3 (r_1^2 \dot{\psi}^2 + l^2 \dot{\beta}^2 + l_3^2 (\dot{\varphi} - \dot{\beta})^2 + 2l_3 (\dot{\varphi} - \dot{\beta}) (r_1 \dot{\psi} \sin(\varphi) - l \dot{\beta} \cos(\varphi))). \quad (64)$$

Następnie zostały obliczone pochodne po czasie ze zmiennych uogólnionych:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\beta}} = I_{z5} \ddot{\beta} + m_5 l_2^2 \ddot{\beta} + 2h_1^2 \ddot{\beta} (m_1 r_1^2 + I_{z1}) + 2I_{y1} \ddot{\beta} - I_{y3} (\ddot{\varphi} - \ddot{\beta}) + m_3 l^2 \ddot{\beta} + (\ddot{\varphi} - \ddot{\beta}) m_3 l_3^2 - m_3 l_3 (r_1 \ddot{\psi} \sin(\varphi) - l \ddot{\beta} \cos(\varphi)) - m_3 l l_3 (\ddot{\varphi} - \ddot{\beta}) \cos(\varphi), \quad (65)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\psi}} = 2\dot{\psi} (m_1 r_1^2 + I_{z1}) + m_5 r_1^2 \ddot{\psi} + m_3 r_1^2 \ddot{\psi} + m_3 l_3 (\dot{\varphi} - \dot{\beta}) r_1 \sin(\varphi), \quad (66)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} = m_3 l_3^2 (\ddot{\varphi} - \ddot{\beta}) + m_3 l_3 (r_1 \dot{\psi} \sin(\varphi) - l \dot{\beta} \cos(\varphi)) + I_{y3} (\ddot{\varphi} - \ddot{\beta}), \quad (67)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}_3} = I_{z3} \ddot{\alpha}_3, \quad (68)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \varphi} = m_3 l_3 (\dot{\varphi} - \dot{\beta}) (r_1 \dot{\psi} \cos(\varphi) + l \dot{\beta} \sin(\varphi)). \quad (69)$$

Kompletne zestawy równań dynamiki robota trójkołowego z kołem samonastawnym, które może się ślizgać, mają postać:

$$\ddot{\beta} (I_{z5} + m_5 l_2^2 + 2h_1^2 (m_1 r_1^2 + I_{z1}) + 2I_{y1} + m_3 l^2 + m_3 l_3^2 + 2m_3 l \cos(\varphi) + I_{y3}) - \ddot{\psi} (m_3 l_3 r_1 \sin(\varphi)) + \ddot{\varphi} (m_3 l_3^2 + m_3 l_3 l \cos(\varphi) + I_{y3}) = (M_1 - M_2) h_1 - h_1 r_1 \dot{\psi} (D_{\alpha 1} - D_{\alpha 2}) - h_1^2 r_1 \dot{\beta} (D_{\alpha 1} + D_{\alpha 2}) + h_1 r_1 \operatorname{sgn}(\dot{\psi}) (N_1 f_1 - N_2 f_2) - h_1^2 r_1 \operatorname{sgn}(\dot{\beta}) (N_1 f_1 + N_2 f_2), \quad (70)$$

$$\ddot{\psi} (r_1^2 (m_5 + 2m_1 + m_3) + 2I_{z1}) + \ddot{\varphi} (m_3 l_3 r_1 \sin(\varphi)) - \ddot{\beta} (m_3 l_3 r_1 \sin(\varphi)) = M_1 + M_2 - \dot{\psi} r_1 (D_{\alpha 1} + D_{\alpha 2}) - h_1 \dot{\beta} r_1 (D_{\alpha 1} - D_{\alpha 2}) - r_1 \operatorname{sgn}(\dot{\psi}) (N_1 f_1 + N_2 f_2) + r_1 h_1 \operatorname{sgn}(\dot{\beta}) (N_1 f_1 - N_2 f_2), \quad (71)$$

$$\ddot{\varphi}(m_3 l_3^2 + I_{y_3}) + \dot{\psi}(m_3 l_3 r_1 \sin(\varphi)) - \ddot{\beta}(m_3 l_3^2 + m_3 l \cos(\varphi) + I_{y_3}) = -N_3 l_3 \mu_3 \sin(\varphi) \operatorname{sgn}(\dot{\varphi}) + m_3 l_3 (\dot{\varphi} - \dot{\beta})(r_1 \dot{\psi} \cos(\varphi) + l \dot{\beta} \sin(\varphi)) + D_{F\varphi} l_3 (r_1 \dot{\psi} \sin(\varphi) - l \dot{\beta} \cos(\varphi) + (\dot{\varphi} - \dot{\beta}) l_3) - D_\varphi \dot{\varphi}, \quad (72)$$

$$\ddot{\alpha}_3 = \frac{1}{I_{z_3}} (-D_{\alpha_3} \dot{\alpha}_3 + D_{F\alpha_3} r_3 (r_1 \dot{\psi} \cos(\varphi) + l \dot{\beta} \sin(\varphi) - r_3 \dot{\alpha}_3)). \quad (73)$$

Poniżej zapisano równania (70÷73) w formie macierzowej:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{55} & a_{56} & a_{57} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{65} & a_{66} & a_{67} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{75} & a_{76} & a_{77} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{88} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{\psi} \\ \dot{\varphi} \\ \dot{\alpha}_3 \\ P\dot{\beta} \\ P\dot{\psi} \\ P\dot{\varphi} \\ P\dot{\alpha}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b_{55} & b_{56} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b_{65} & b_{66} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b_{75} & b_{76} & b_{77} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b_{85} & b_{86} & 0 & b_{88} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ \psi \\ \varphi \\ \alpha_3 \\ P\beta \\ P\psi \\ P\varphi \\ P\alpha_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ c_5 \\ c_6 \\ c_7 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (74)$$

gdzie:

$$P\beta = \dot{\beta}, \quad P\psi = \dot{\psi}, \quad P\varphi = \dot{\varphi}, \quad P\alpha_3 = \dot{\alpha}_3, \quad P\dot{\beta} = \ddot{\beta}, \quad P\dot{\psi} = \ddot{\psi}, \quad P\dot{\varphi} = \ddot{\varphi}, \quad P\dot{\alpha}_3 = \ddot{\alpha}_3,$$

$$a_{55} = I_{z_5} + m_5 l_2^2 + 2h_1^2 (m_1 r_1^2 + I_{z_1}) + 2I_{y_1} + I_{y_3} + m_3 l^2 + m_3 l_3^2 + 2m_3 l_3 l \cos(\varphi),$$

$$a_{56} = a_{65} = -m_3 l_3 r_1 \sin(\varphi), \quad a_{57} = a_{75} = -m_3 l_3 l \cos(\varphi) - I_{y_3} - m_3 l_3^2, \quad a_{77} = m_3 l_3^2 + I_{y_3},$$

$$b_{55} = -h_1^2 r_1 (D_{\alpha_1} + D_{\alpha_2}), \quad a_{66} = r_1^2 (2m_1 + m_5 + m_3) + 2I_{z_1}, \quad a_{67} = a_{76} = m_3 l_3 r_1 \sin(\varphi),$$

$$b_{65} = -h_1 r_1 (D_{\alpha_1} - D_{\alpha_2}), \quad b_{56} = -h_1 r_1 (D_{\alpha_1} - D_{\alpha_2}), \quad b_{66} = -r_1 (D_{\alpha_1} + D_{\alpha_2}),$$

$$b_{77} = m_3 l_3 (r_1 P\psi \cos(\varphi) + l P\beta \sin(\varphi)) - l^2 D_{F\varphi} - D_\varphi, \quad a_{88} = I_{z_3},$$

$$b_{76} = l_3 D_{F\varphi} r_1 \sin(\varphi), \quad b_{86} = D_{F\alpha_3} r_1 r_3 \cos(\varphi), \quad b_{85} = D_{F\alpha_3} r_3 l \sin(\varphi), \quad b_{88} = (-D_{\alpha_3} - D_{F\alpha_3} r_3^2),$$

$$b_{75} = -m_3 l_3 (r_1 P\psi \cos(\varphi) + l P\beta \sin(\varphi)) - D_{F\varphi} l_3 (l \cos(\varphi) + l_3),$$

$$c_5 = (M_1 - M_2) h_1 - h_1 r_1 \operatorname{sgn}(\dot{\psi}) (N_1 f_1 - N_2 f_2) - h_1^2 r_1 \operatorname{sgn}(\dot{\beta}) (N_1 f_1 + N_2 f_2),$$

$$c_6 = M_1 + M_2 - r_1 \operatorname{sgn}(\dot{\psi}) (N_1 f_1 + N_2 f_2) - h_1 r_1 \operatorname{sgn}(\dot{\beta}) (N_1 f_1 - N_2 f_2), \quad c_7 = -N_3 l_3 \mu_3 \sin(\varphi) \operatorname{sgn}(\dot{\varphi}).$$

2.3. Modelowanie matematyczne ruchu robota

Bazując na równaniach wyprowadzonych w podrozdziale 2.1 i 2.2, przeprowadzono modelowanie matematyczne ruchu robota dla następujących trajektorii:

- jazda po prostej i po łuku,
- obrót robota w miejscu,

c) jazda po trajektorii zbliżonej do cyfry osiem.

W postaci końcowej równań (74) występują zależności, związane z funkcją signum. W przypadku teoretycznym, w którym nie występują błędy zaokrągleń, taki zapis jest poprawny. Natomiast, gdy wykonywana jest symulacja numeryczna, należy wziąć pod uwagę błędy wynikające z zaokrągleń, co może prowadzić do tego, że w funkcji $\text{sgn}(\dot{\alpha}_1)$ i $\text{sgn}(\dot{\alpha}_2)$ znajdują się nieprawidłowe wartości. Aby ten problem rozwiązać, autor proponuje następujące rozwiązanie:

$$\begin{aligned} I_{z5}\ddot{\beta} + m_5l_2^2\ddot{\beta} + 2h_1^2\ddot{\beta}(m_1r_1^2 + I_{z1}) + 2I_{y1}\ddot{\beta} - I_{y3}(\ddot{\varphi} - \ddot{\beta}) + m_3l^2\ddot{\beta} - (\ddot{\varphi} - \ddot{\beta})m_3l_3^2 + \\ - m_3l_3(r_1\ddot{\psi} \sin(\varphi) - l\ddot{\beta} \cos(\varphi)) - m_3ll_3(\ddot{\varphi} - \ddot{\beta})\cos(\varphi) = h_1(M_1 - M_2) - h_1r_1(N_1f_1 \text{sgn}(s\alpha_1) + \\ - N_2f_2 \text{sgn}(s\alpha_2)) - (h_1r_1\dot{\psi}(D_{\alpha1} - D_{\alpha2}) + h_1^2r_1\dot{\beta}(D_{\alpha1} + D_{\alpha2})), \end{aligned} \quad (75)$$

$$\begin{aligned} 2\ddot{\psi}(m_1r_1^2 + I_{z1}) + m_5r_1^2\ddot{\psi} + m_3r_1^2\ddot{\psi} + m_3l_3(\ddot{\varphi} - \ddot{\beta})r_1 \sin(\varphi) = (M_1 + M_2) + \\ - (\dot{\psi}r_1(D_{\alpha1} - D_{\alpha2}) + h_1r_1\dot{\beta}(D_{\alpha1} + D_{\alpha2})) - (N_1f_1 \text{sgn}(s\alpha_1) + N_2f_2 \text{sgn}(s\alpha_2))r_1, \end{aligned} \quad (76)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\varphi}(m_3l_3^2 + I_{y3}) + \ddot{\psi}(m_3l_3r_1 \sin(\varphi)) - \ddot{\beta}(m_3l_3^2 + m_3l \cos(\varphi) + I_{y3}) = -N_3l_3\mu_3 \sin(\varphi) \text{sgn}(\dot{\varphi}) + \\ m_3l_3(\dot{\varphi} - \dot{\beta})(r_1\dot{\psi} \cos(\varphi) + l\dot{\beta} \sin(\varphi)) + D_{F\varphi}l_3(r_1\dot{\psi} \sin(\varphi) - l\dot{\beta} \cos(\varphi) + (\dot{\varphi} - \dot{\beta})l_3) - D_{\varphi}\dot{\varphi}, \end{aligned} \quad (77)$$

$$\ddot{\alpha}_3 = \frac{1}{I_{z3}}(-D_{\alpha3}\dot{\alpha}_3 + D_{F\alpha3}r_3(r_1\dot{\psi} \cos(\varphi) + l\dot{\beta} \sin(\varphi) - r_3\dot{\alpha}_3)), \quad (78)$$

gdzie: $s\alpha_1 = \text{sgn}(\dot{\alpha}_1)$, $s\alpha_2 = \text{sgn}(\dot{\alpha}_2)$.

Wyniki symulacji uzyskano z wykorzystaniem równań (75÷78). W symulacji do sterowania został wykorzystany regulator PD. Wzmocnienia K_P i K_D uzyskano na podstawie optymalizacji metodą bezgradientową Jeevesa-Hooke'a [65]. Metodę tę użyto, ze względu na jej prostotę i fakt, że metoda ta, nie wpada w tak zwane minima lokalne, co udowodniono w pracy [66]. Zastosowany regulator PD dla ruchu nadążnego opisano następująco:

$$\begin{bmatrix} u_{\beta} \\ u_{\psi} \end{bmatrix} = K_P \begin{bmatrix} (\beta_d - \beta) \\ (\psi_d - \psi) \end{bmatrix} + K_D \begin{bmatrix} (\dot{\beta}_d - \dot{\beta}) \\ (\dot{\psi}_d - \dot{\psi}) \end{bmatrix}, \quad (79)$$

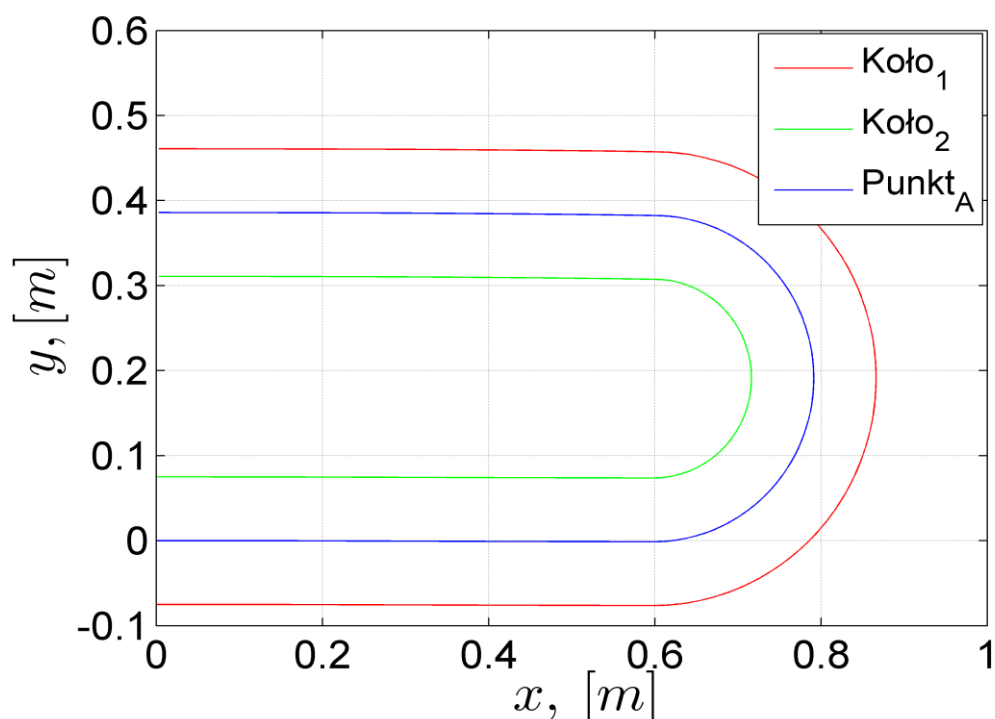
gdzie: u_{β} - sygnał sterujący dla zmiennej β , u_{ψ} - sygnał sterujący dla zmiennej ψ .

Uzyskane wartości wzmocnień wyniosły: $K_P=474$, $K_D=342$.

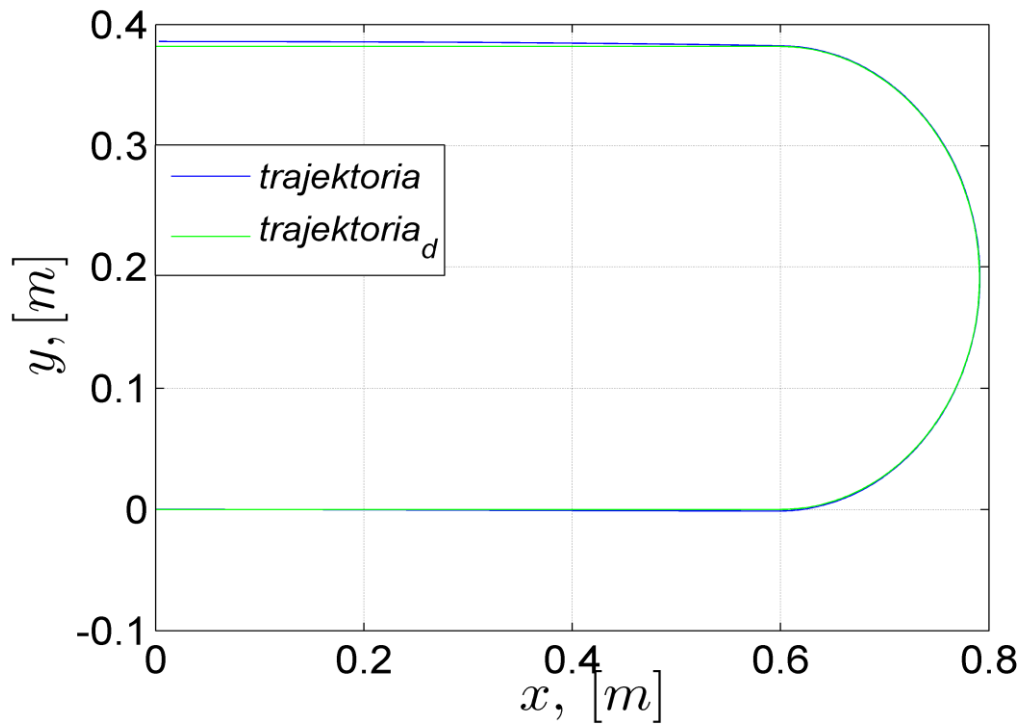
Modelowanie matematyczne przeprowadzono dla wartości parametrów rzeczywistego silnika napędowego firmy Portescap, użytego w robocie eksperymentalnym. Parametry silnika napędowego przedstawiono w rozdziale 3. Podczas modelowania założono niepewność 5% dla wszystkich momentów bezwładności. Indeks d oznaczono wartości zadane.

Współczynniki tarcia tocznego wyznaczono w sposób empiryczny, podobnie jak w pracy [19]. W tym celu wykonano pomiar ruchu robota po prostej, z kołami umieszczonymi w taki sposób, żeby nie dotykały podłoża. Następnie powtórzono eksperyment, umieszczając robota na podłożu. Zarówno dla robota eksperymentalnego jak i przemysłowego, uzyskano zbliżoną wartość współczynnika tarcia, równego w przybliżeniu 0,10. Stąd też do symulacji przyjęto, że współczynniki tarcia kół o podłoże będą wynosić $f_{1E}=f_{2E}=0,10$. Aby zbliżyć symulowany ruch do rzeczywistości, założono, że współczynniki tarcia kół o podłoże mogą się zmieniać, stąd też przyjęto, że będą zmieniały się niezależnie i będą losowane z rozkładu normalnego $f_1=N(0,10;0,0058)$ oraz $f_2=N(0,10;0,0058)$, gdyż pojęcie idealnego podłoża, jest czysto teoretyczne.

Poniżej przedstawiono wyniki symulacji dla trajektorii obejmującej ruch po prostej i po łuku. Robot przez 1 sekundę poruszał się ruchem przyspieszonym, następnie przez 2,5 sekundy poruszał się po prostej ze stałą prędkością. W kolejnej fazie poruszał się po łuku ze stałą prędkością, następnie jechał ze stałą prędkością po prostej przez 2,5 sekundy i w ostatniej sekundzie poruszał się ruchem opóźnionym (hamowanie). Na rysunku 5 została przedstawiona trajektoria obu kół napędowych oraz punktu charakterystycznego A. Jest to trajektoria, która została otrzymana w wyniku modelowania. Przedstawiona na rysunku 6 trajektoria punktu charakterystycznego A, uzyskana w wyniku modelowania, praktycznie pokrywa się z trajektorią zadaną.

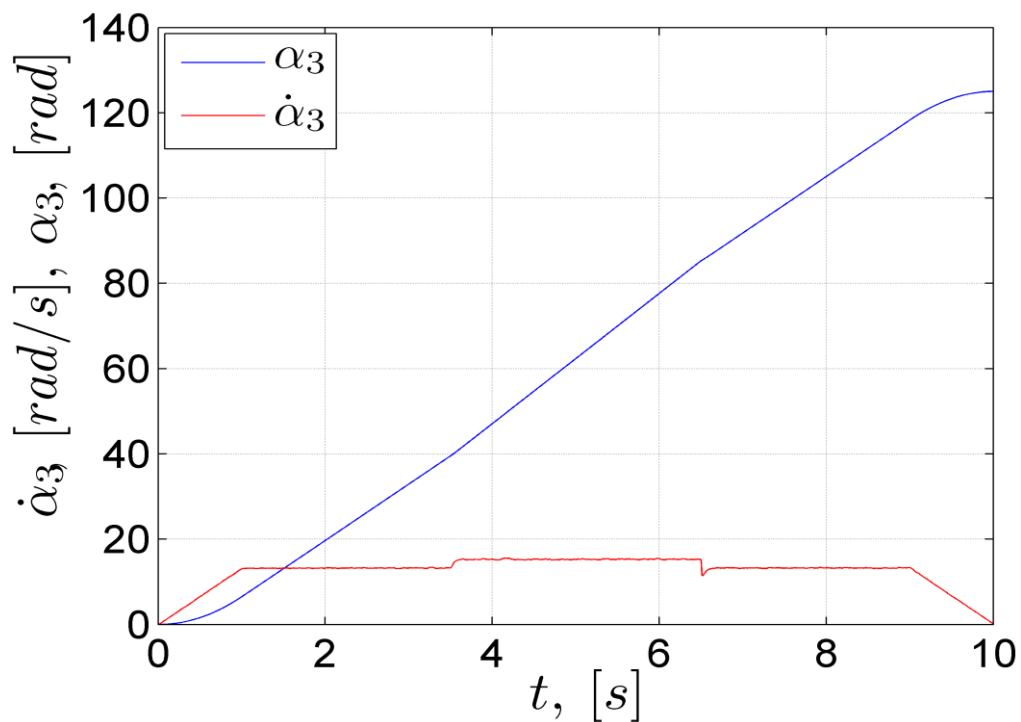


Rys. 5. Trajektoria kół i punktu charakterystycznego A dla ruchu robota po łuku.



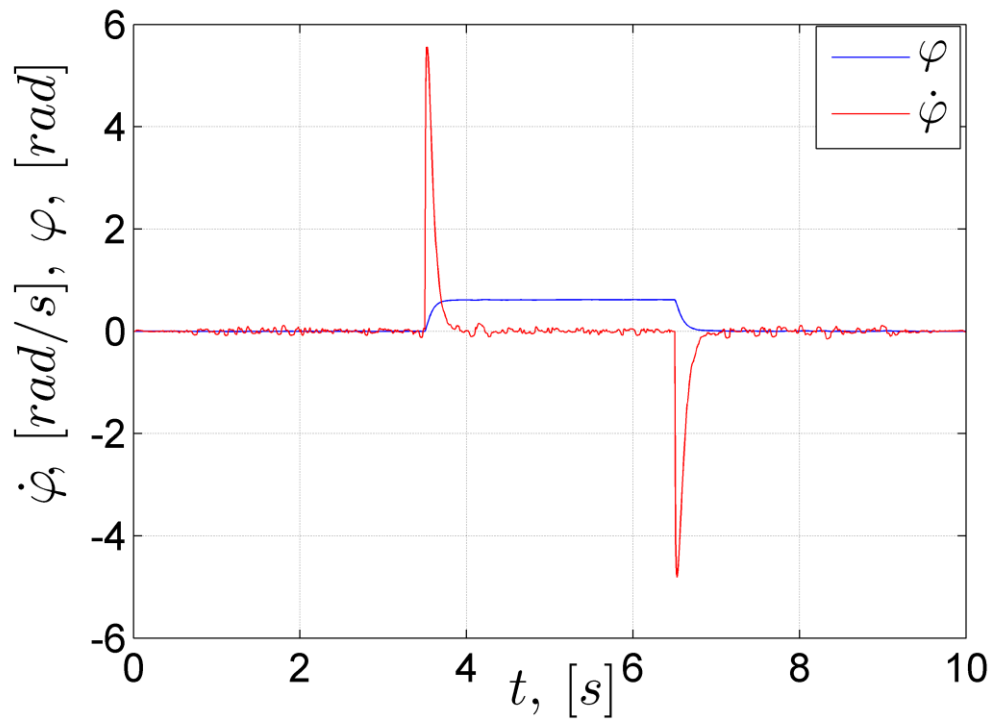
Rys. 6. Porównanie trajektorii punktu charakterystycznego A zadanego (*trajektoria_d*) i otrzymanego w procesie modelowania (*trajektoria*).

Na rysunku 7 przedstawiono kąt obrotu oraz prędkość obrotową koła samonastawnego. W badanym modelu robota założono, że koło samonastawne może się ślizgać.

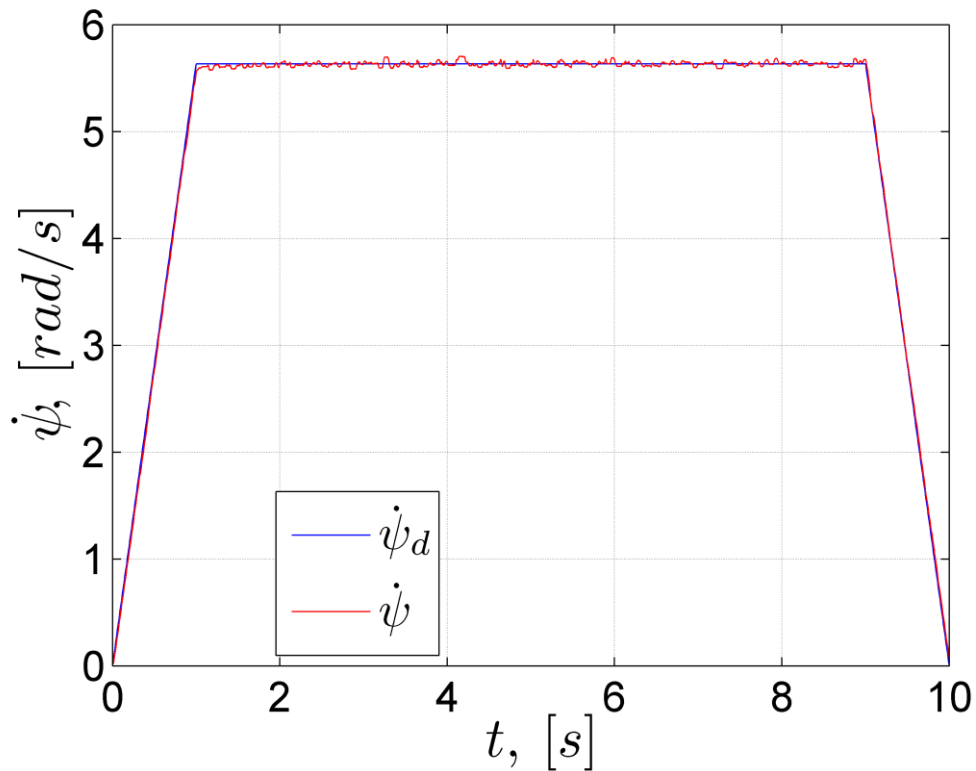


Rys. 7. Kąt obrotu i prędkość obrotowa koła samonastawnego.

Kąt skrętu oraz prędkość skrętu koła samonastawnego przedstawiono na rysunku 8. Wpływ zmiennych współczynników tarcia kół napędowych o podłoże jest bardzo widoczny.

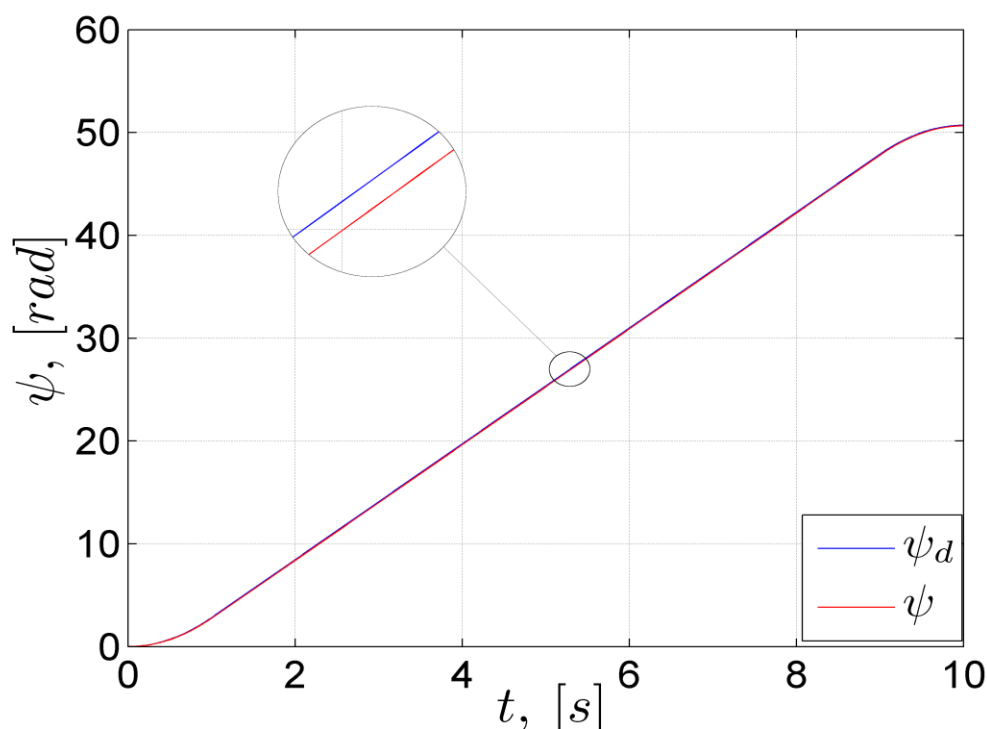


Rys. 8. Kąt i prędkość skrętu koła samonastawnego.



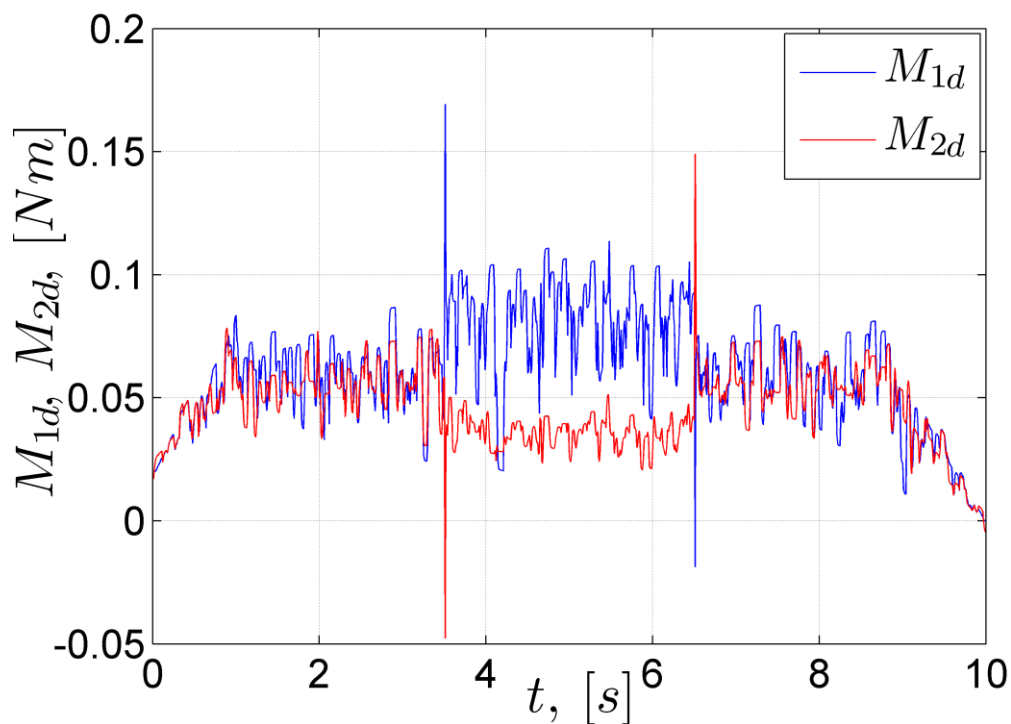
Rys. 9. Prędkość obrotowa zastępczego koła napędowego umieszczonego w punkcie charakterystycznym A w trakcie pokonywania trajektorii.

Współczynnik tarcia koła samonastawnego o podłoże, założono jako stały, gdyż zdaniem autora wpływ tego zmiennego współczynnika tarcia, dla tego koła jest pomijalnie mały (koło ulega poślizgowi podczas ruchu). Na rysunkach 9 i 10 przedstawiono kąt obrotu oraz prędkość obrotową zastępczego koła napędowego umieszczonego w punkcie charakterystycznym A. Zarówno zadany kąt obrotu jak i prędkość obrotowa, praktycznie się pokrywają.



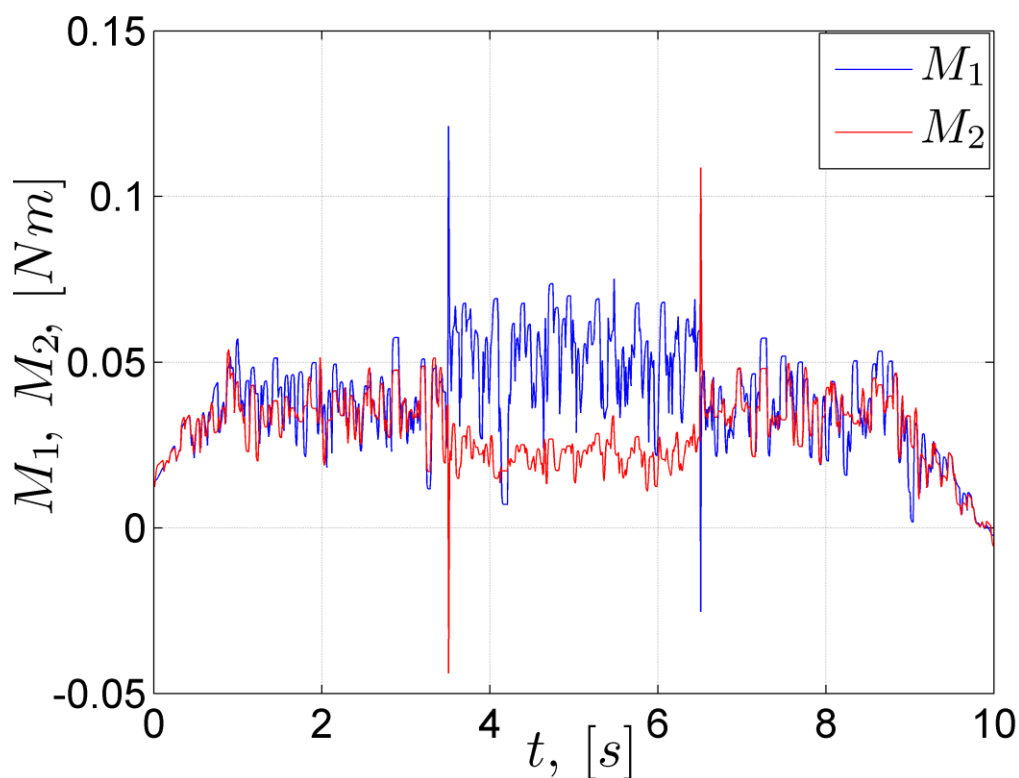
Rys. 10. Kąt obrotu zastępczego koła napędowego umieszczonego w punkcie charakterystycznym A.

Na rysunku 11 zostały przedstawione zmiany momentów napędowych zadanych przez układ sterowania. Przebieg wskazuje, na wpływ zmiennych współczynników tarcia kół napędowych o podłoże na sterowanie, z uwzględnieniem dynamiki odwrotnej. Podczas wjazdu i wyjazdu z łuku, można zauważyć charakterystyczne skoki momentów napędowych, zarówno zadanych z układu sterowania jak i modelowanych. Należy zwrócić uwagę na to, że zmiana momentów napędowych po wyjechaniu z łuku jest mniejsza, aniżeli przed wjazdem w łuk. Tę różnicę można wytłumaczyć faktem, iż robot podczas pokonywania łuku oprócz składowej prędkości do jazdy wprost, posiada składową obrotową, stąd też sumaryczna energia kinetyczna jest większa, niż podczas jazdy po prostej. Dlatego też patrząc pod względem energetycznym, na wyjazd z łuku, potrzeba mniej energii niż na wjazd w łuk. Na rysunku 12, na którym przedstawiono momenty napędowe modelowane, uzyskane do sterowania całym procesem, można zauważyć, że podczas zatrzymywania, wartości momentów napędowych modelowanych maleją do zera. Przebiegi momentów napędowych w trakcie pokonywania łuku nie są symetryczne względem siebie, wynika to z faktu, iż działają różne siły nacisku kół na podłoże. Jest to o tyle istotne, gdyż uwzględnienie tej informacji zdaniem autora, może poprawić sterowanie.

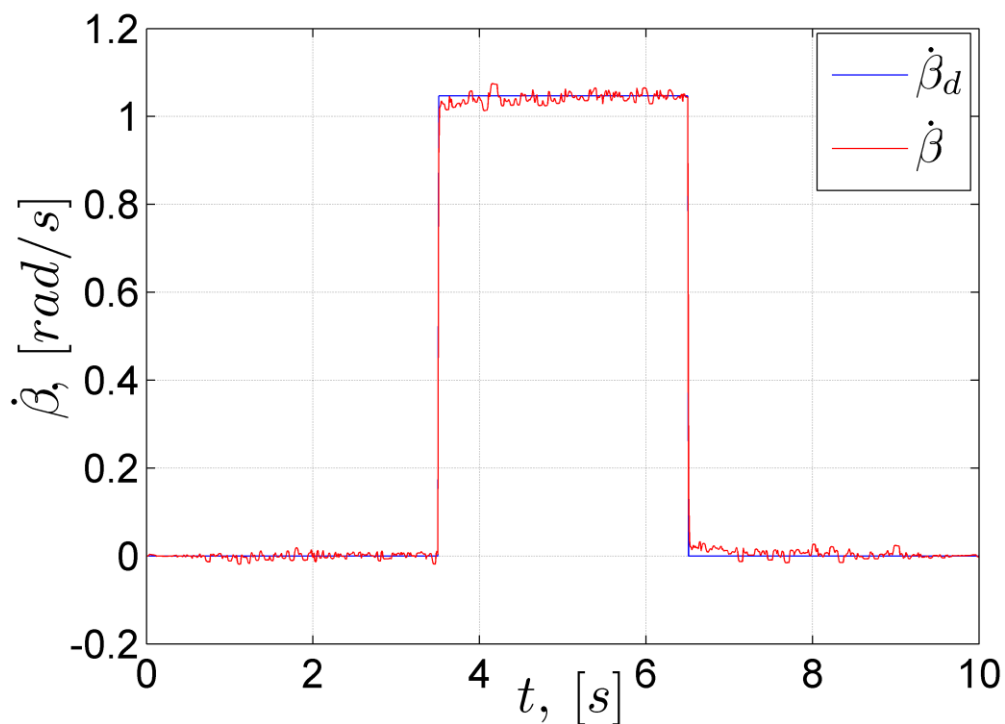


Rys. 11. Przebieg zmian momentów napędowych zadanych przez układ sterowania.

Na rysunku 13 i 14 można zaobserwować zmiany prędkości kątowej $\dot{\beta}$ oraz kąta obrotu ramy robota β . Charakter tych zmian wynika z wykonywanego ruchu. Prędkość obrotu ramy zależy również od zmiennych współczynników tarcia kół o podłoże.

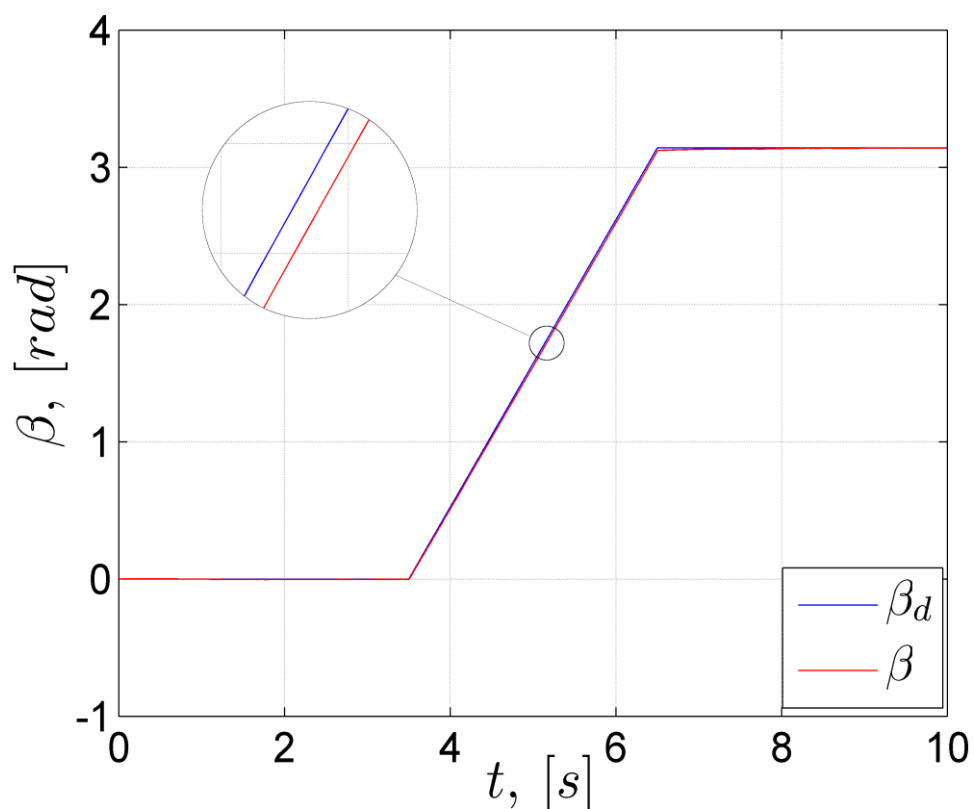


Rys. 12. Modelowane momenty napędowe dostarczone do kół napędowych.

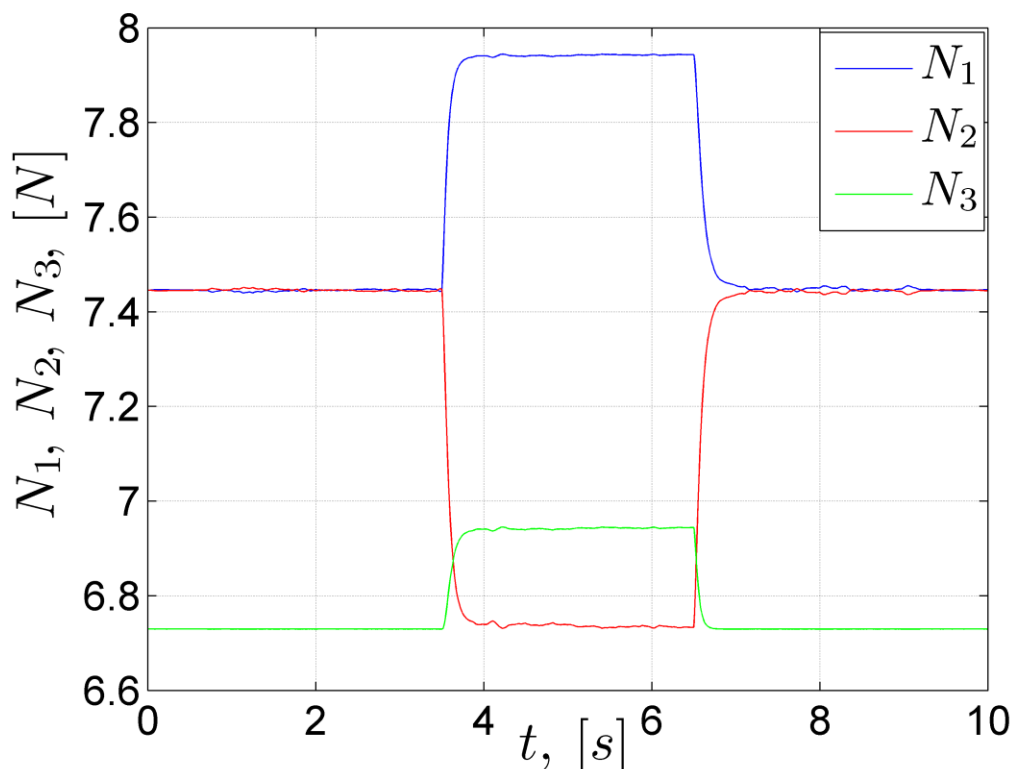


Rys. 13. Prędkość obrotu ramy robota.

Dużą zbieżność otrzymano dla kąta obrotu ramy robota, w trakcie ruchu po trajektorii, a niewielka różnica pomiędzy kątem zadaniem i modelowanym, wystąpiła w trakcie pokonywania łuku.



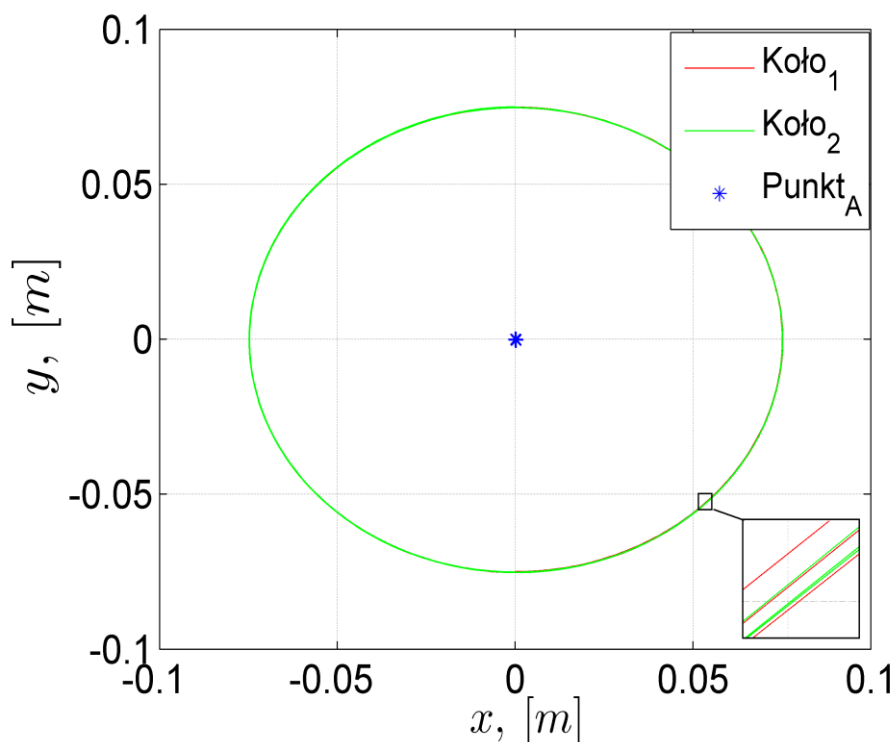
Rys. 14. Kąt obrotu ramy robota w trakcie pokonywania trajektorii.



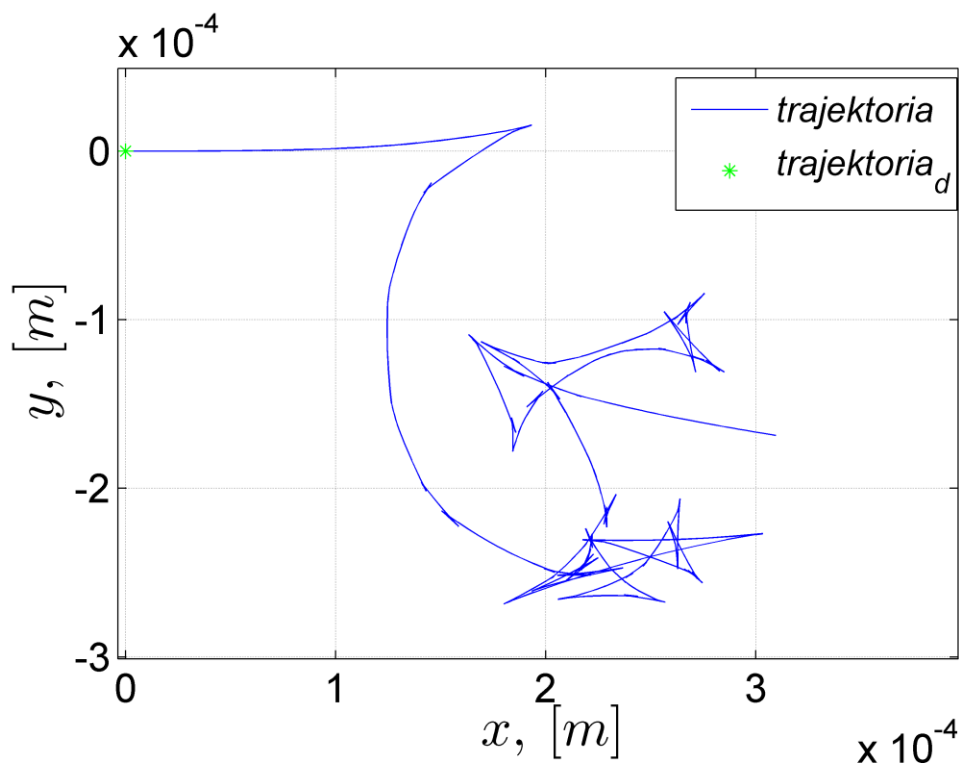
Rys. 15. Zmiana wartości sił nacisku w trakcie ruchu robota po trajektorii w kształcie łuku.

Na rysunku 15 zostały przedstawione siły nacisku kół na podłoże. Przy poruszaniu się po łuku zmiana sił nacisku wszystkich kół jest zauważalna. Koło samonastawne przemieszcza się w kierunku koła napędowego 2 i przejmuje większą część ciężaru robota. W wyniku tego, siła nacisku koła samonastawnego zwiększa się o ok. 5%. Jeśli skreńcenie koła samonastawnego byłoby większe, siła nacisku na koło samonastawne zwiększyłaby się jeszcze bardziej. Zmiana siły nacisku na kole samonastawnym wpływa na zwiększenie, bądź też zmniejszenie sił nacisku na kołach napędowych. Wprowadzie modelowany prototyp robota eksperymentalnego był względnie lekki (całkowita waga robota około 2 kg), jednakże w przypadku cięższego robota, taka informacja może mieć bardzo istotny wpływ, na proces sterowania.

Kolejno przedstawiono wyniki dla ruchu robota poruszającego się wokół własnej osi. Robot przez 1 sekundę przyśpiesza, następnie porusza się przez 6 sekund ruchem jednostajnym wokół własnej osi, po czym przez 1 sekundę hamuje. Na rysunku 16 znajduje się trajektoria, po której poruszały się koła napędowe. Z rysunku można wywnioskować, że ruch odbywał się w sposób poprawny, a punkt charakterystyczny A właściwie się nie przemieszcza.



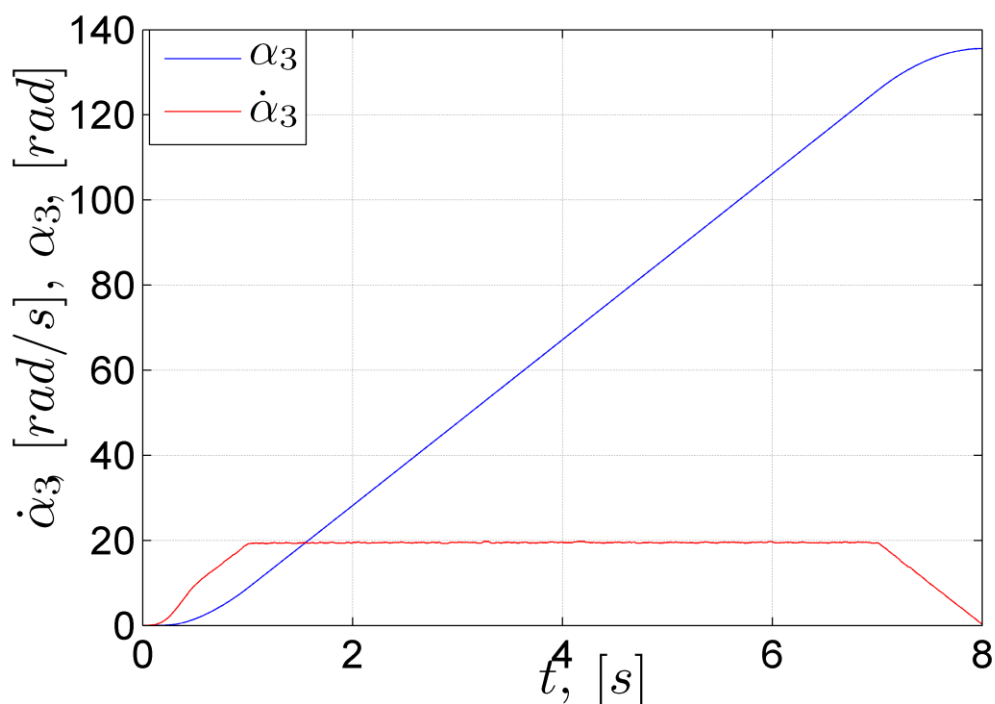
Rys. 16. Trajektorie kół i punktu charakterystycznego A dla robota obracającego się wokół własnej osi.



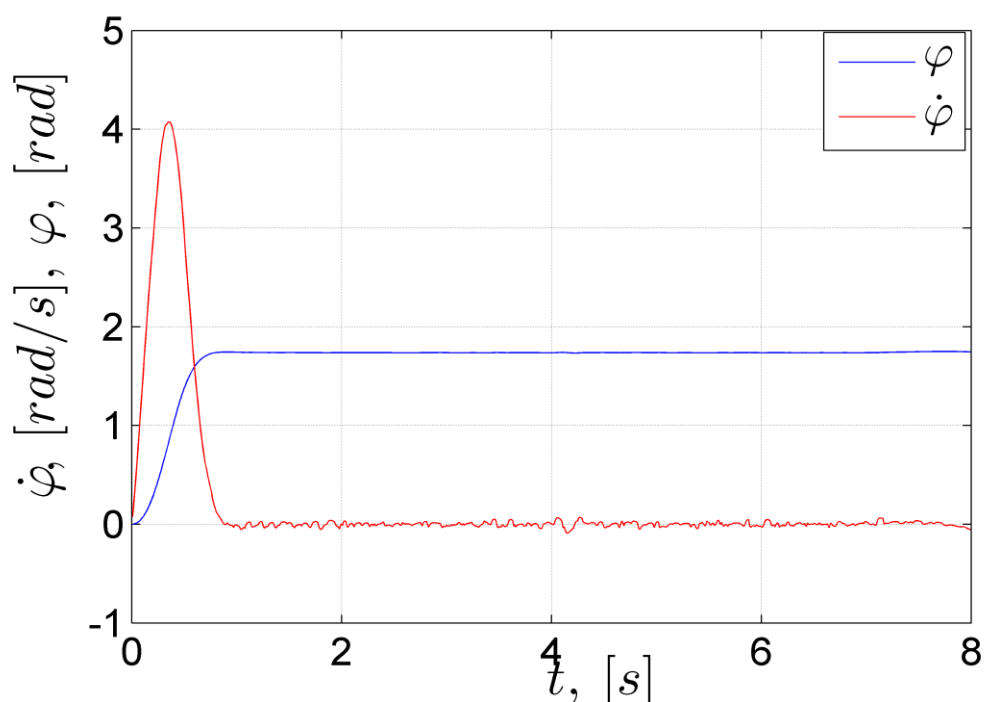
Rys. 17. Porównanie trajektorii punktu charakterystycznego A zadanego ($trajektoria_d$) i otrzymanego w procesie modelowania ($trajektoria$).

Jak wynika z rysunku 17, punkt charakterystyczny A wykonuje największe przemieszczenie na początku ruchu, gdy robot jest rozpędzany oraz pod koniec ruchu, gdy robot zwalnia. Jest

to spowodowane wpływem koła samonastawnego, które w początkowej fazie ruchu, może mieć losowy kąt skręcenia, natomiast w czasie hamowania, koła napędowe mogą nierównomiernie zwalniać, co może powodować skręcenie koła samonastawnego. W trakcie poruszania się robota ze stałą prędkością, przemieszczenia są niewielkie. Na przemieszczenie punktu charakterystycznego A, wpływają także zmienne współczynniki tarcia kół o podłoże, które nie są sobie równe.

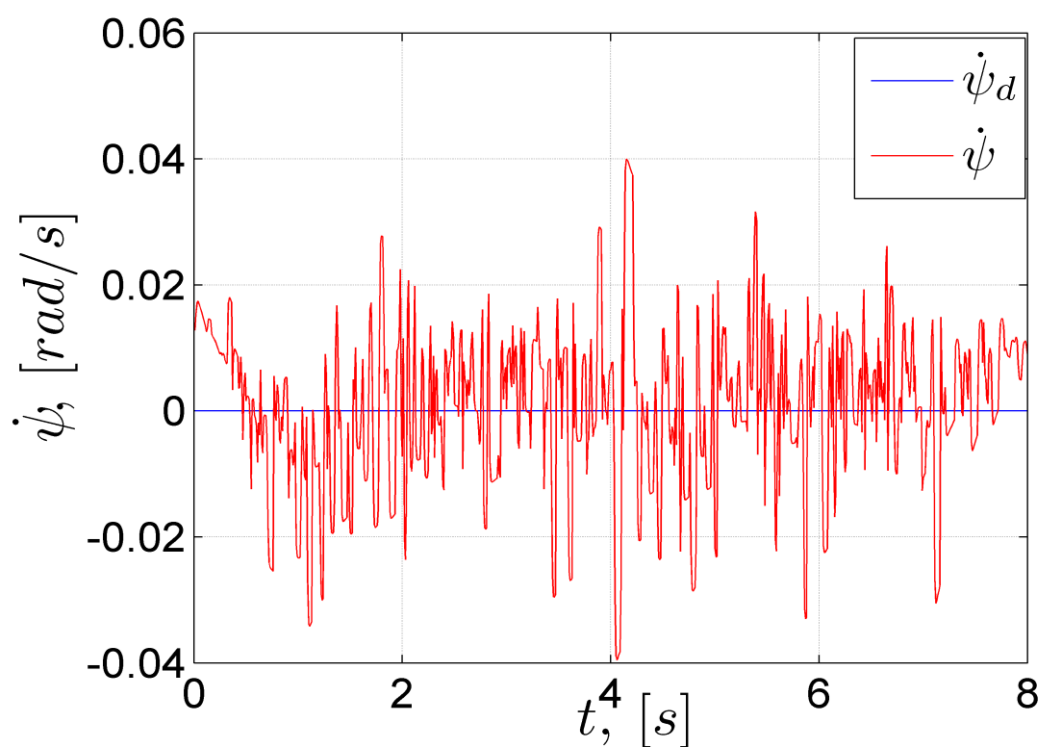


Rys. 18. Kąt obrotu i prędkość obrotowa koła samonastawnego.

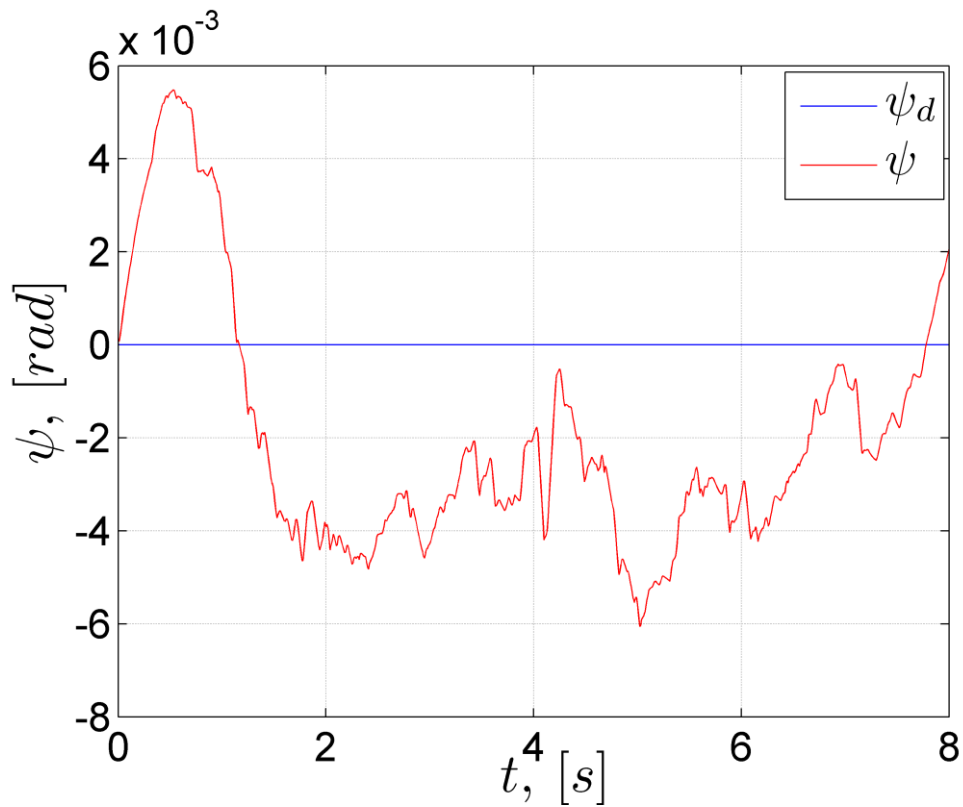


Rys. 19. Kąt i prędkość skrętu koła samonastawnego w ruchu obrotowym robota wokół własnej osi.

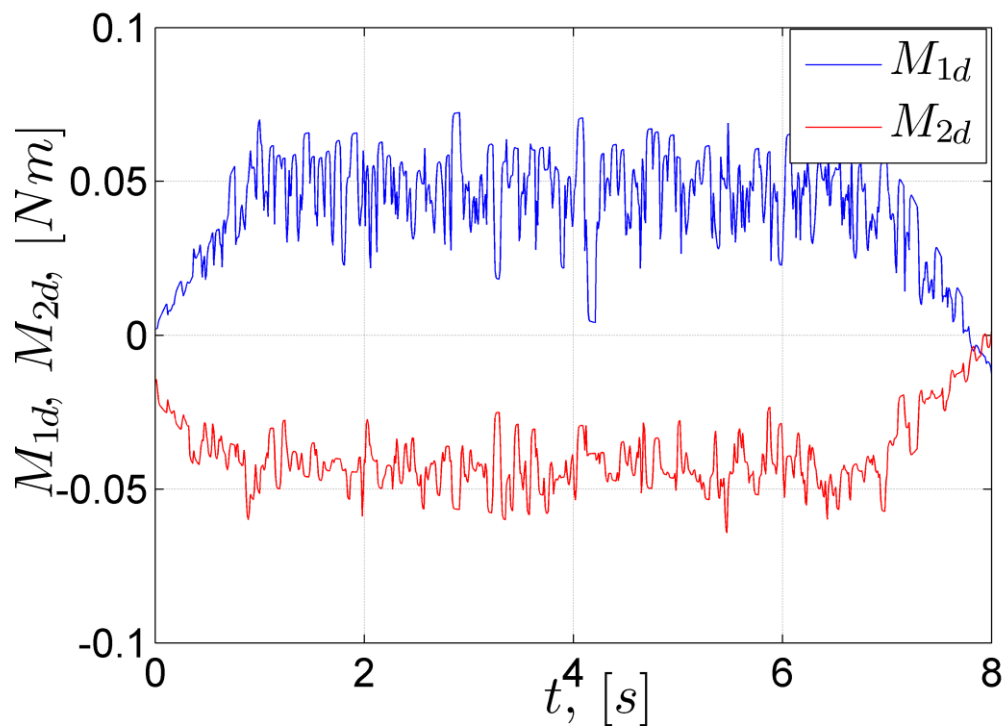
Na rysunku 18 przedstawiono ruch obrotowy koła samonastawnego, natomiast na rysunku 19 przedstawiono ruch skrętny koła samonastawnego, przy czym warto zwrócić uwagę, że kąt zmienia się tylko na początku ruchu, po czym się ustala, natomiast niewielkie zmiany prędkości skrętu w trakcie ruchu, są spowodowane zmieniającymi się współczynnikami tarcia kół napędowych. Na rysunku 20 została przedstawiona prędkość w punkcie charakterystycznym A. Jak wynika z tego rysunku, ta prędkość oscyluje wokół zera, co jest zjawiskiem poprawnym, a oscylacje wywołane są poprzez zmieniające się współczynniki tarcia kół o podłoże. Na taki ruch mają wpływ zmienne współczynniki tarcia, ale również regulator PD, który z definicji nie jest w stanie zminimalizować błędu do zera. Wynik całkowania prędkości w punkcie charakterystycznym A, przedstawiono na rysunku 21. Wprawdzie wynik ten ma znak ujemny, jednak oscyluje wokół zera, co jest rezultatem poprawnym. Niezerowa prędkość powoduje przemieszczenie się robota względem punktu początkowego ruchu. W idealnym przypadku, robot obracający się wokół własnej osi, nie powinien się przemieszczać względem punktu początkowego. W praktycznych zastosowaniach jest to bardzo trudne do zrealizowania, gdyż należy uwzględnić takie czynniki jak opory wewnętrzne w silnikach napędowych, poślizg kół napędowych, różne promienie kół, czy też luzy w przekładniach. Momenty napędowe, które przedstawiono na rysunkach 22 i 23 posiadają składowe szybkozmienne, które wynikają ze zmiennych współczynników tarcia kół o podłoże. Zmienne te regulator stara się kompensować.



Rys. 20. Prędkość obrotowa zastępczego koła napędowego umieszczonego w punkcie charakterystycznym A w trakcie wykonywania trajektorii.

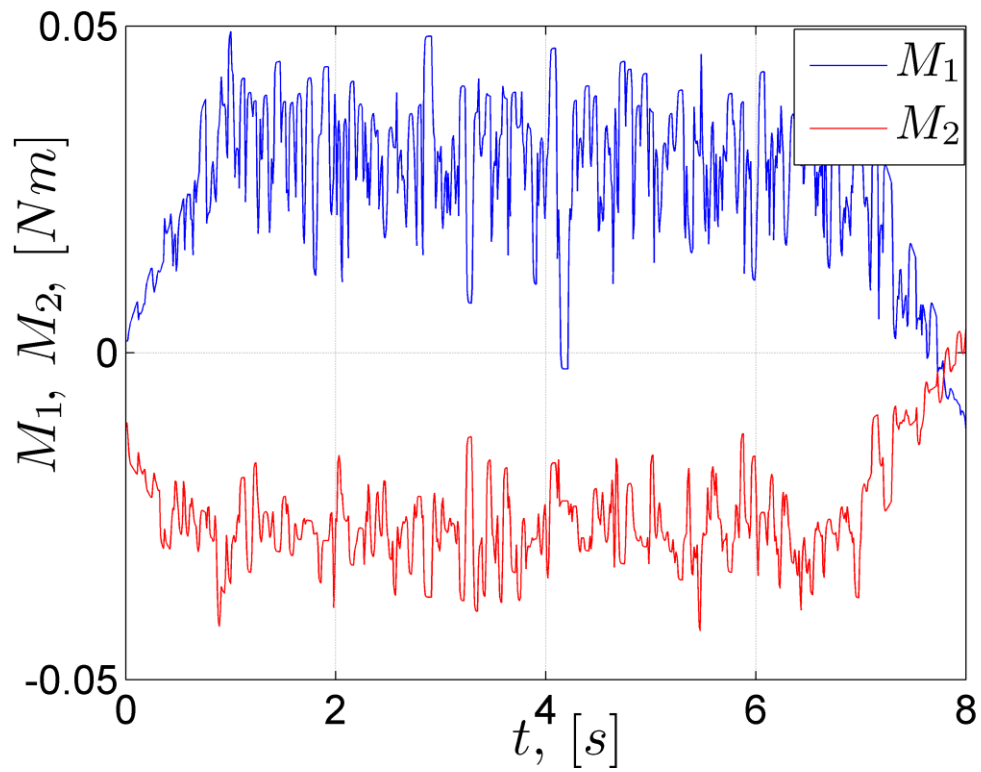


Rys. 21. Kąt obrotu zastępczego koła napędowego umieszczonego w punkcie charakterystycznym A.

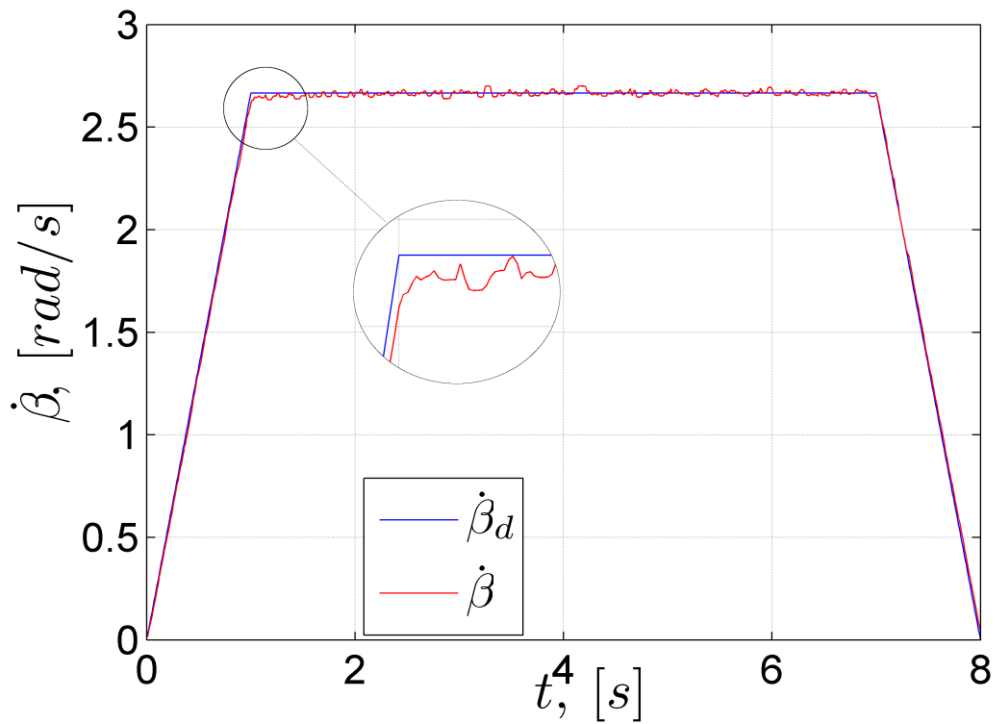


Rys. 22. Przebieg zmian momentów napędowych zadanych przez układ sterowania.

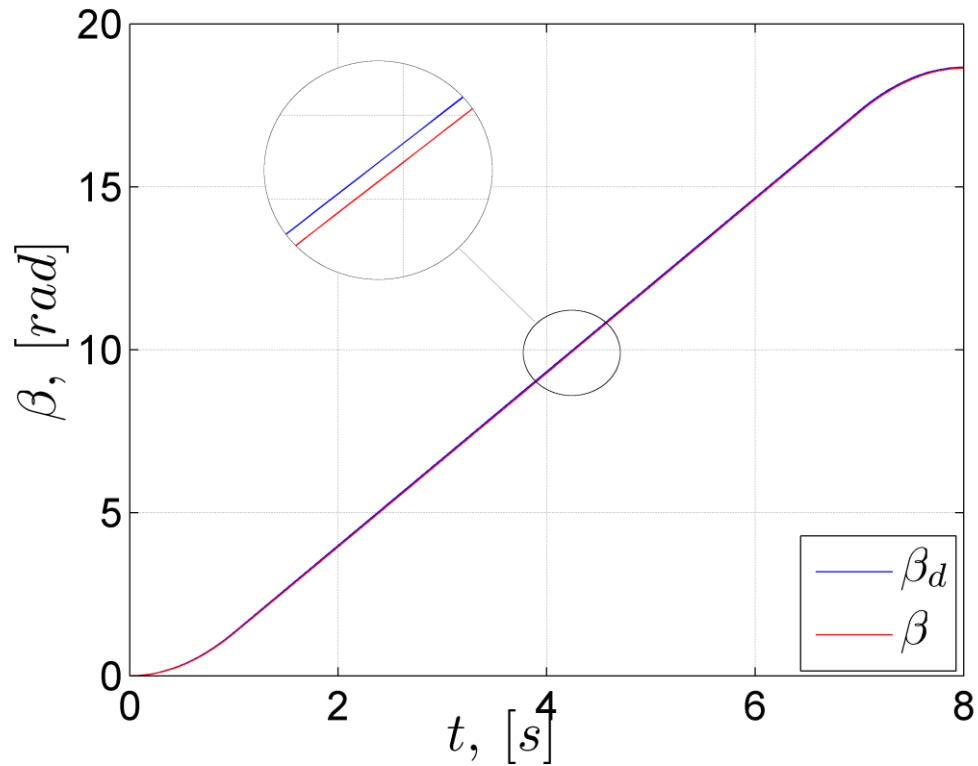
Działanie regulatora ma wpływ na kąt obrotu ramy robota. Wyniki tego działania przedstawiono na rysunkach 23 i 24, gdzie wartości zadane i modelowane praktycznie się pokrywają.



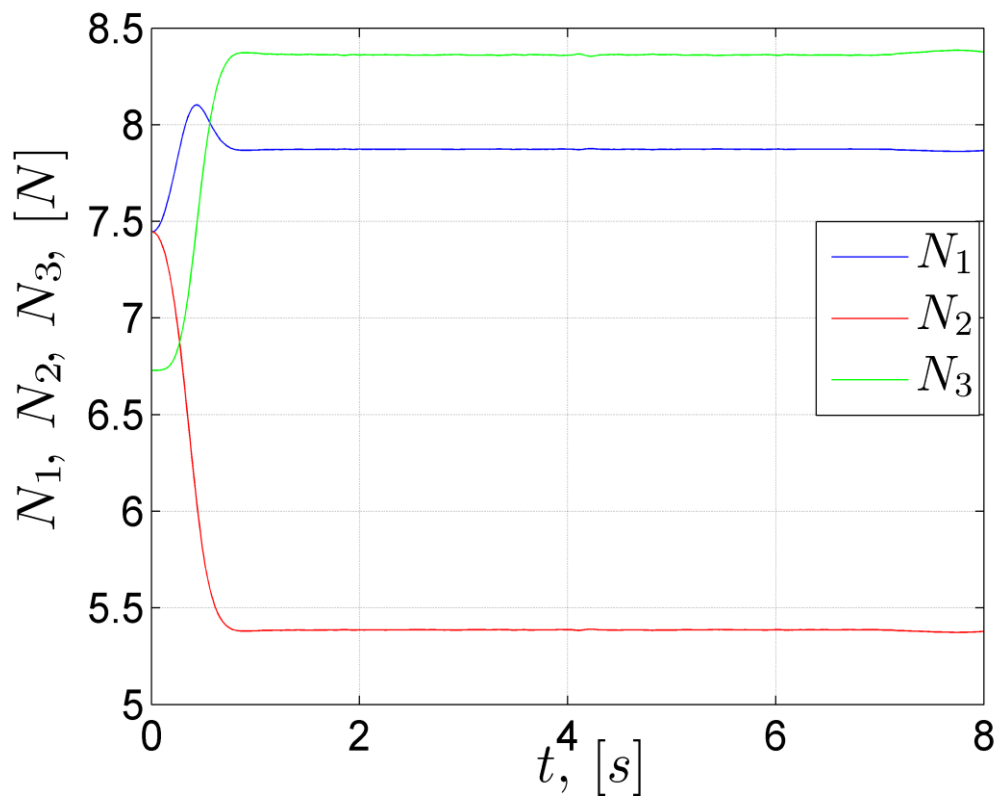
Rys. 23. Modelowane momenty napędowe dostarczone do kół napędowych.



Rys. 24. Prędkość obrotu ramy robota.



Rys. 25. Kąt obrotu ramy robota w trakcie pokonywania trajektorii.

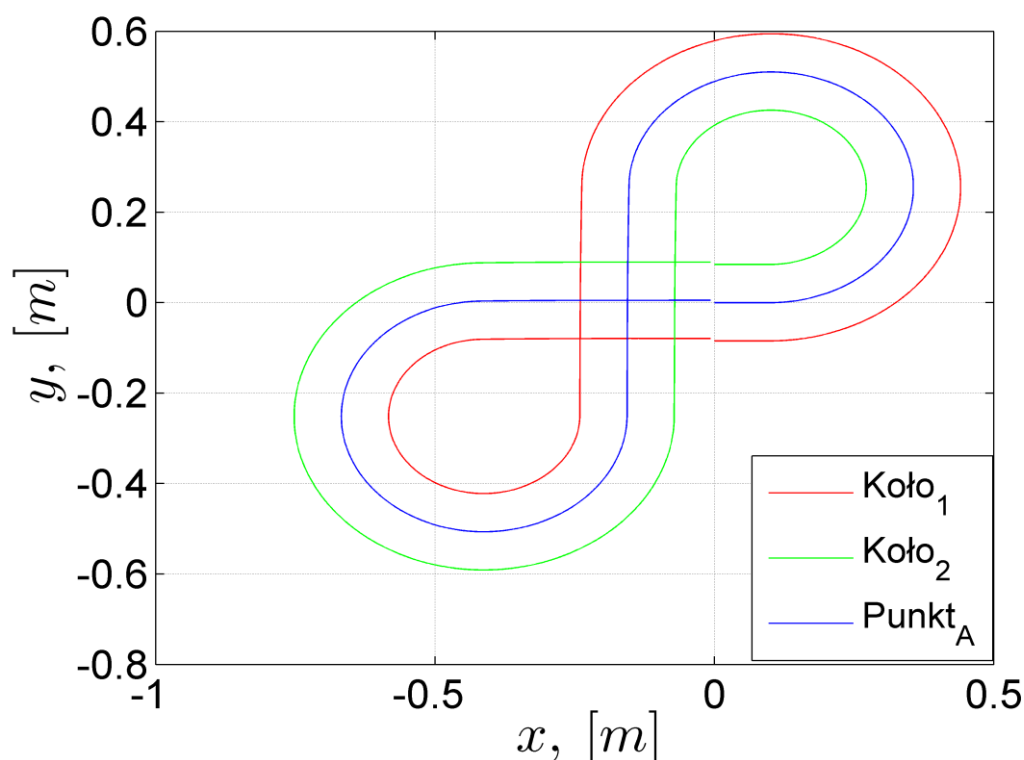


Rys. 26. Zmiana wartości sił nacisku w trakcie obrotu robota wokół własnej osi.

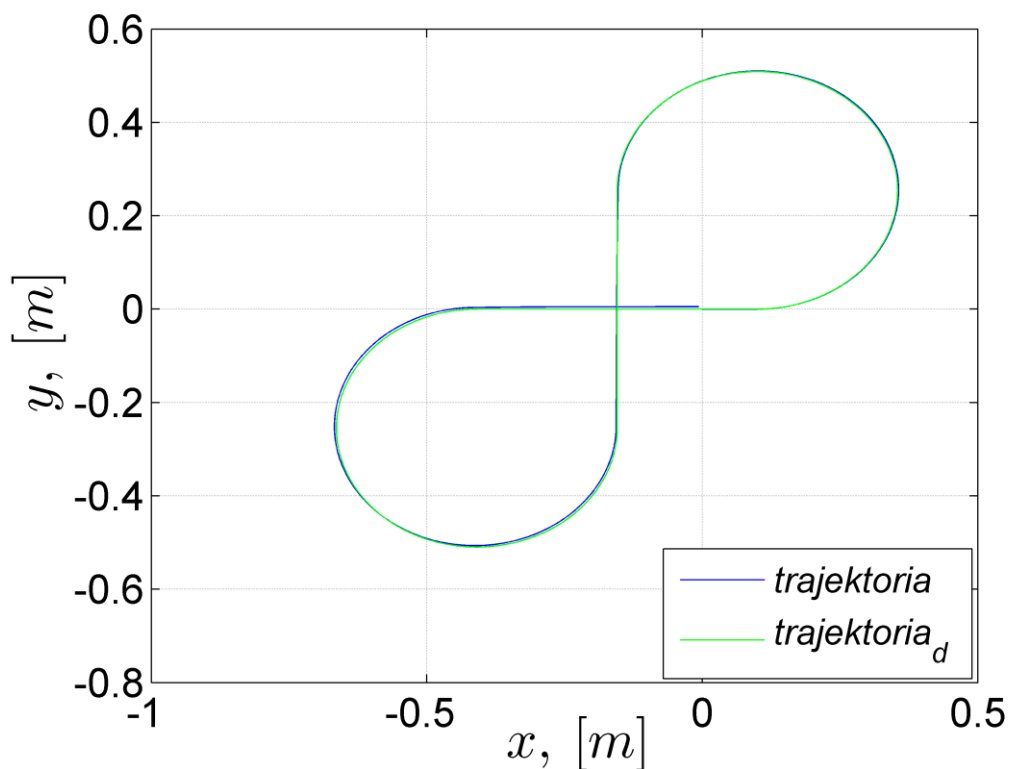
Bardzo interesujący jest rysunek 26 na którym zaprezentowano siły nacisku kół na podłoże. Przy ruchu robota wokół własnej osi z , przechodzącej przez punkt A, koło samonastawne

przejmuje większość nacisku, stąd też zdaniem autora, pominięcie wpływu tego koła upraszcza wprowadzenie modelu, jednak może prowadzić do błędnych wyników. W pracach [13, 15] uwzględniono wpływ koła samonastawnego, jednak przyjęto, że siły nacisku kół na podłoże są stałe, co jest znaczącym uproszczeniem, gdyż siły nacisku zmieniają się w zależności od kąta skręcenia koła samonastawnego. Niewielka zmiana sił nacisku kół na podłoże pod koniec wykonywania ruchu, wynika ze zmiany kąta skręcenia koła samonastawnego, w fazie hamowania robota. W artykule [67] opisano zamontowany na kole samonastawnym enkoder, który mierzy obrót tego koła, pracując jako dodatkowy układ pomiaru drogi (kąta obrotu) przebytej przez robota.

Kolejnym z analizowanych ruchów, jest ruch po trajektorii w kształcie cyfry osiem. Trajektorię przedstawiono na rysunkach 27 i 28, ruch składał się z następujących odcinków: przyśpieszanie po prostej przez 1 sekundę, ruch po okręgu ze stałą prędkością przez 6 sekund, jazda po prostej przez 2,54 sekundy, ruch po okręgu przez kolejne 6 sekund, jazda po prostej przez 1,54 sekundy oraz zwalnianie przez 1 sekundę. Bardzo charakterystyczną cechą dla tej figury jest symetria względem osi x i y . Wybór takiej figury do modelowania autor uzasadnia tym, iż taka trajektoria składa się zarówno z ruchu po prostej jak i ruchu po łuku, a celem modelowania jest odpowiedź jak będzie zachowywać się koło samonastawne, w trakcie ruchu po dowolnej trajektorii.

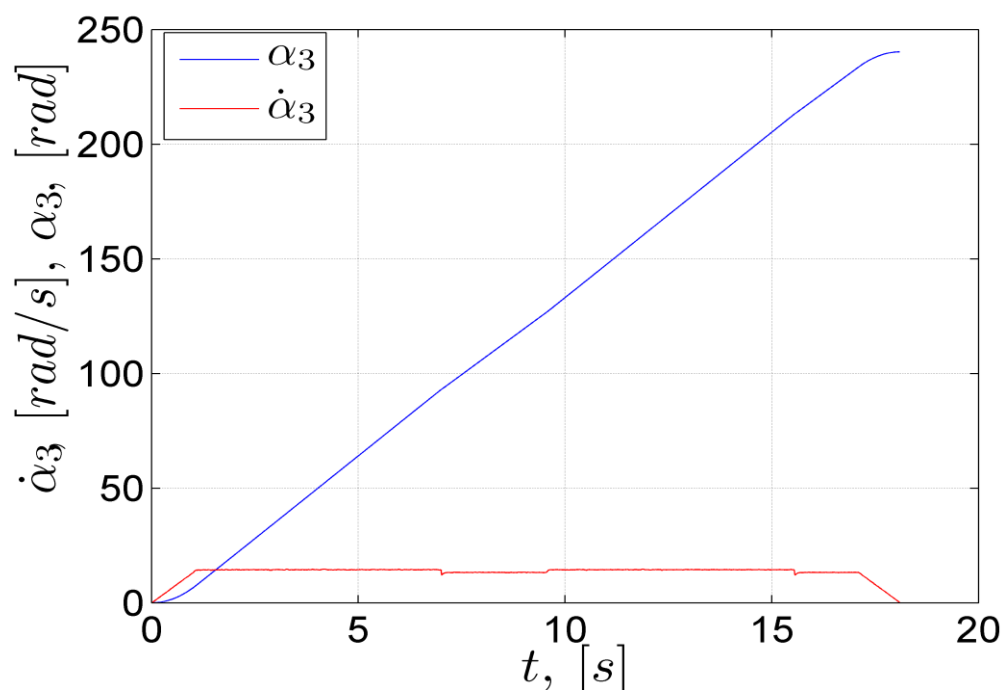


Rys. 27. Przemieszczenie kół i punktu charakterystycznego A dla ruchu robota po trajektorii w kształcie cyfry osiem.

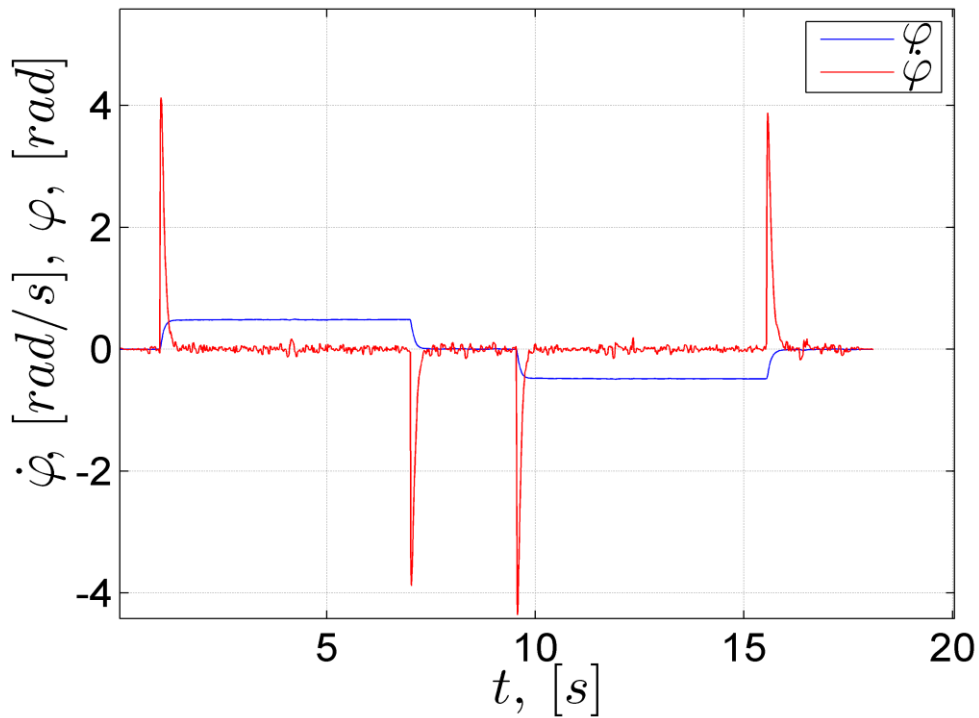


Rys. 28. Porównanie trajektorii punktu charakterystycznego A zadanego i otrzymanego w procesie modelowania.

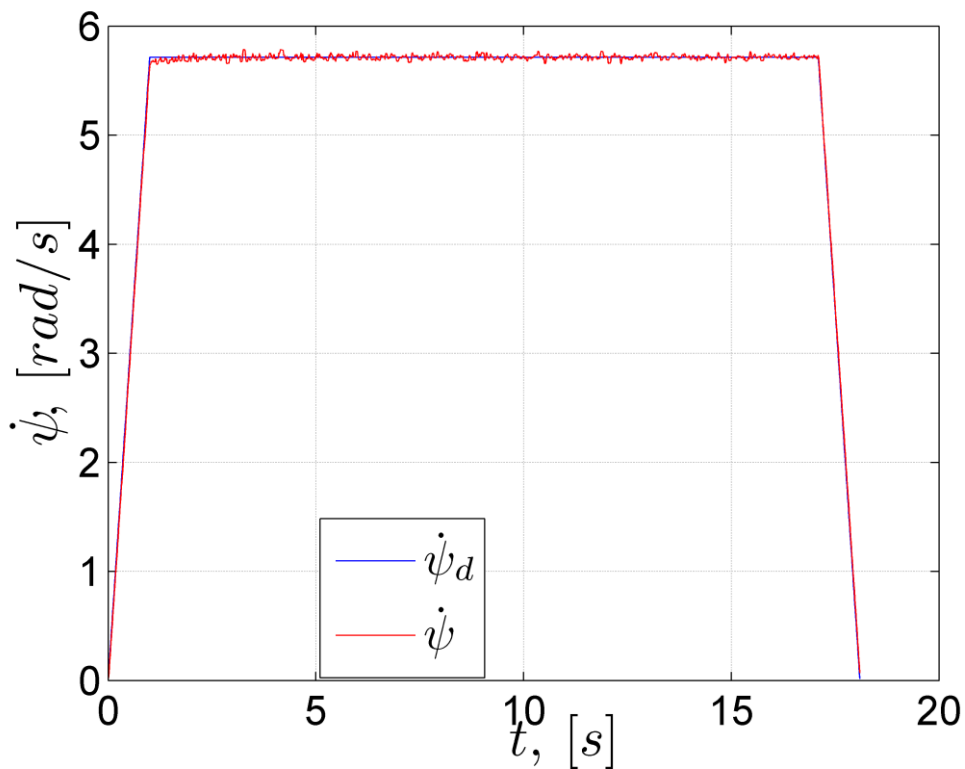
Na rysunkach 29 i 30 przedstawiono zachowanie koła samonastawnego, przy czym należy zwrócić uwagę na to, że prędkość skręcenia koła samonastawnego wzrasta jedynie w chwili zmiany kierunku ruchu (przejście z ruchu po prostej na ruch po okręgu lub wyjazd z okręgu i rozpoczęcie ruchu po prostej).



Rys. 29. Kąt obrotu i prędkość obrotowa koła samonastawnego.



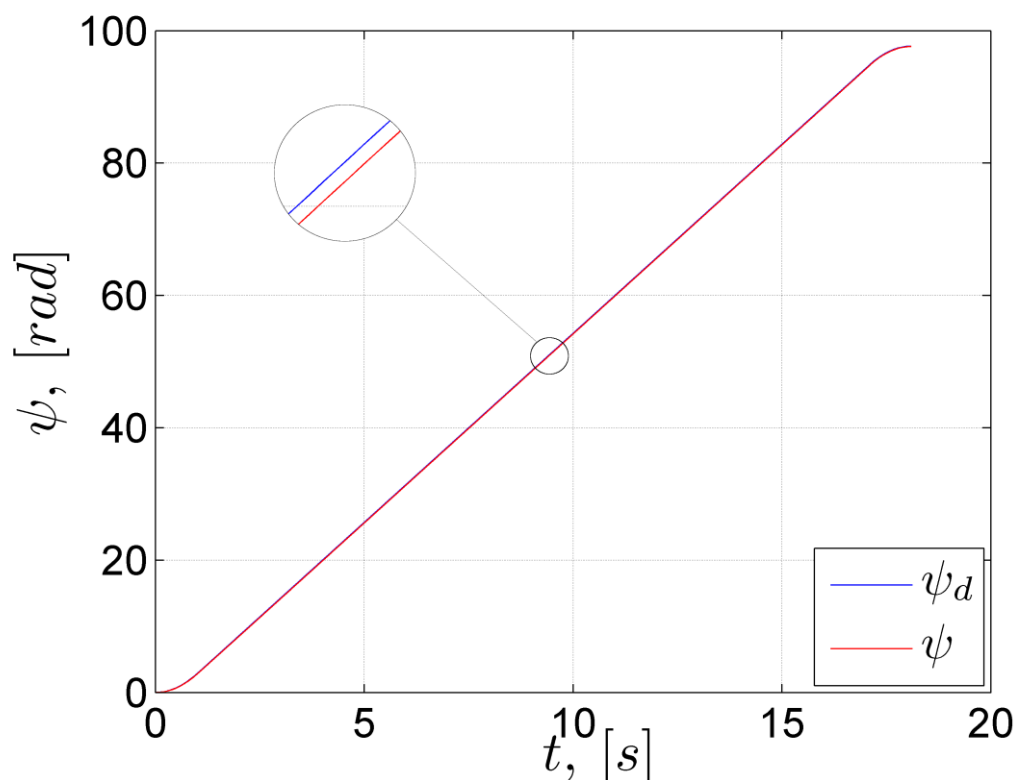
Rys. 30. Kąt i prędkość skrętu koła samonastawnego w ruchu po trajektorii w kształcie cyfry osiem.



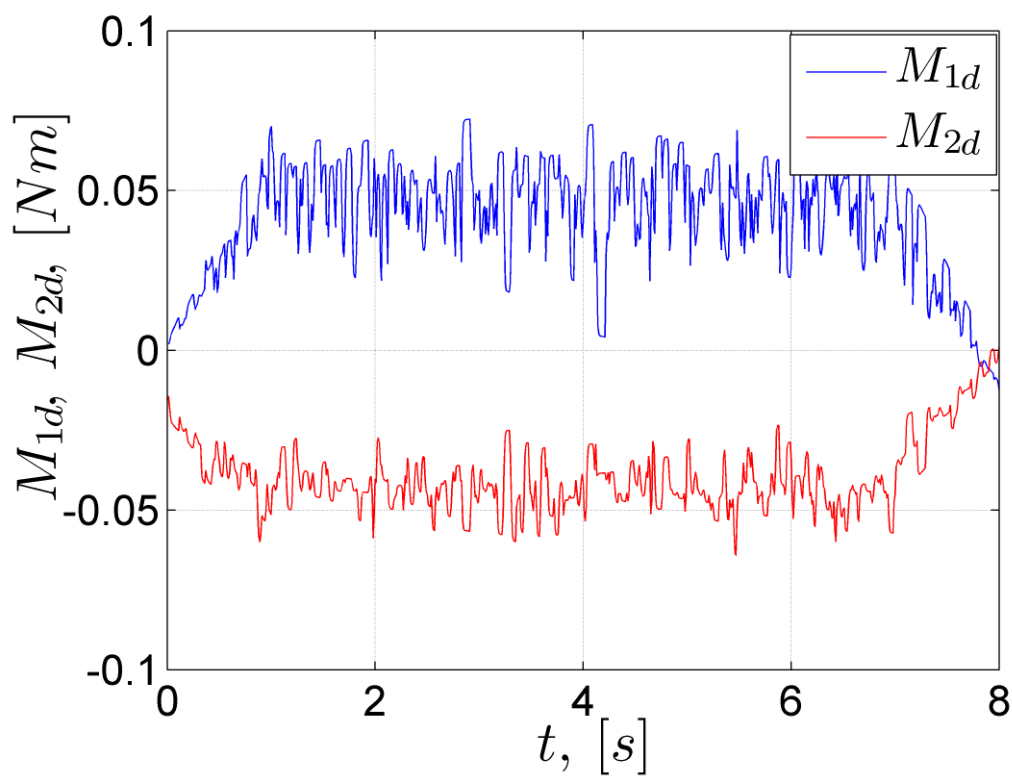
Rys. 31. Prędkość obrotowa zastępczego koła napędowego umieszczonego w punkcie charakterystycznym A w trakcie wykonywania trajektorii.

Prędkość obrotową oraz kąt obrotu zastępczego koła napędowego umieszczonego w punkcie charakterystycznym A, przedstawiono na rysunkach 31 i 32.

Zmiany prędkości wynikają ze zmiennych współczynników tarcia kół napędowych o podłoże.

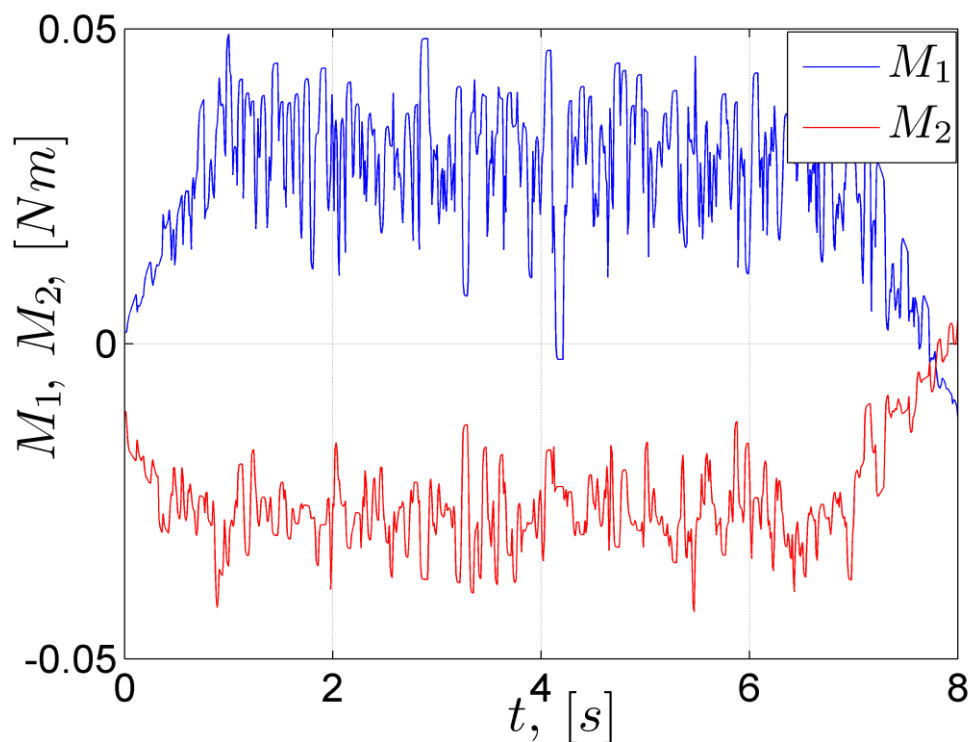


Rys. 32. Kąt obrotu zastępczego koła napędowego umieszczonego w punkcie charakterystycznym A.

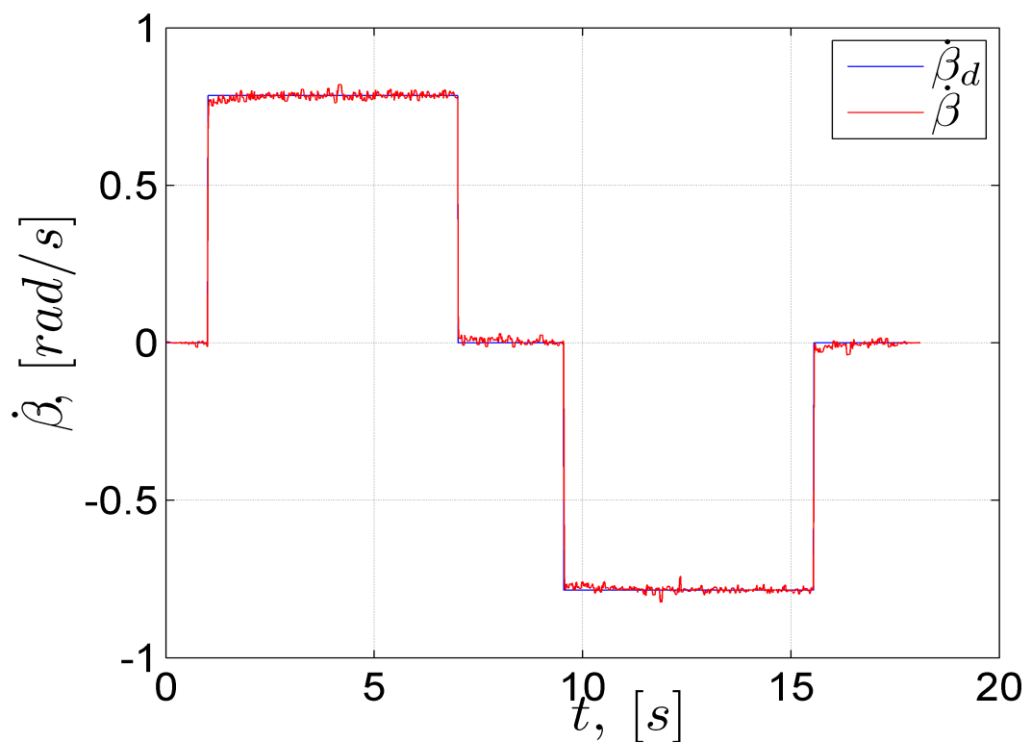


Rys. 33. Przebieg zmian momentów napędowych zadanych przez układ sterowania.

Bardzo interesujący jest wykres momentów napędowych, zarówno zadanych (rysunek 33) jak i modelowanych (rysunek 34).

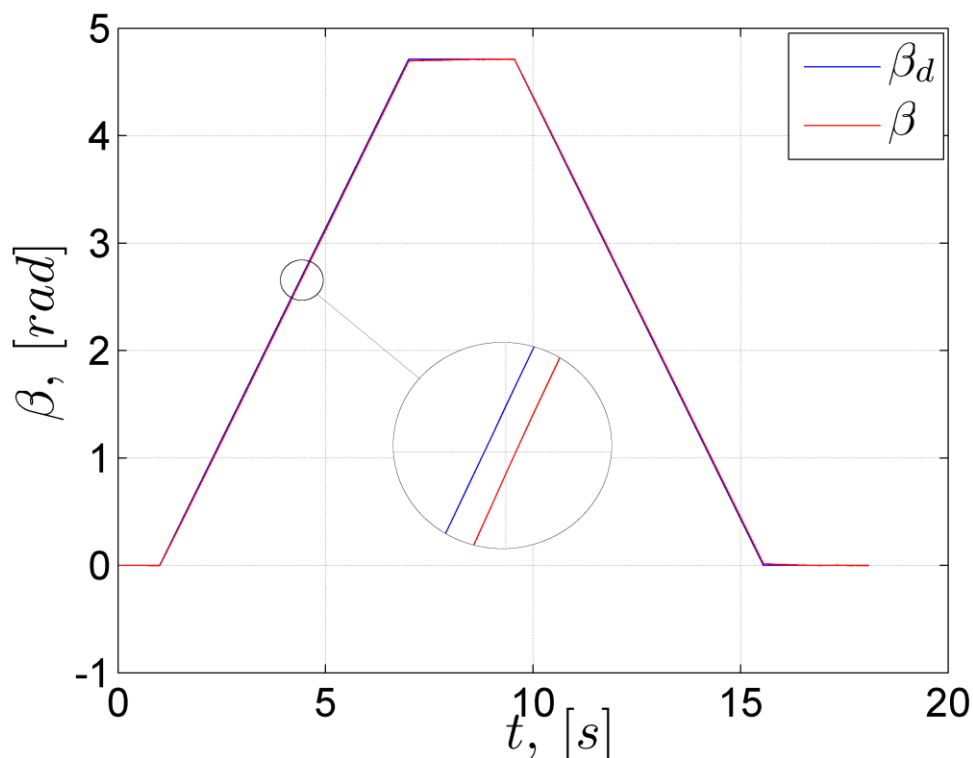


Rys. 34. Modelowane momenty napędowe dostarczone do kół napędowych.



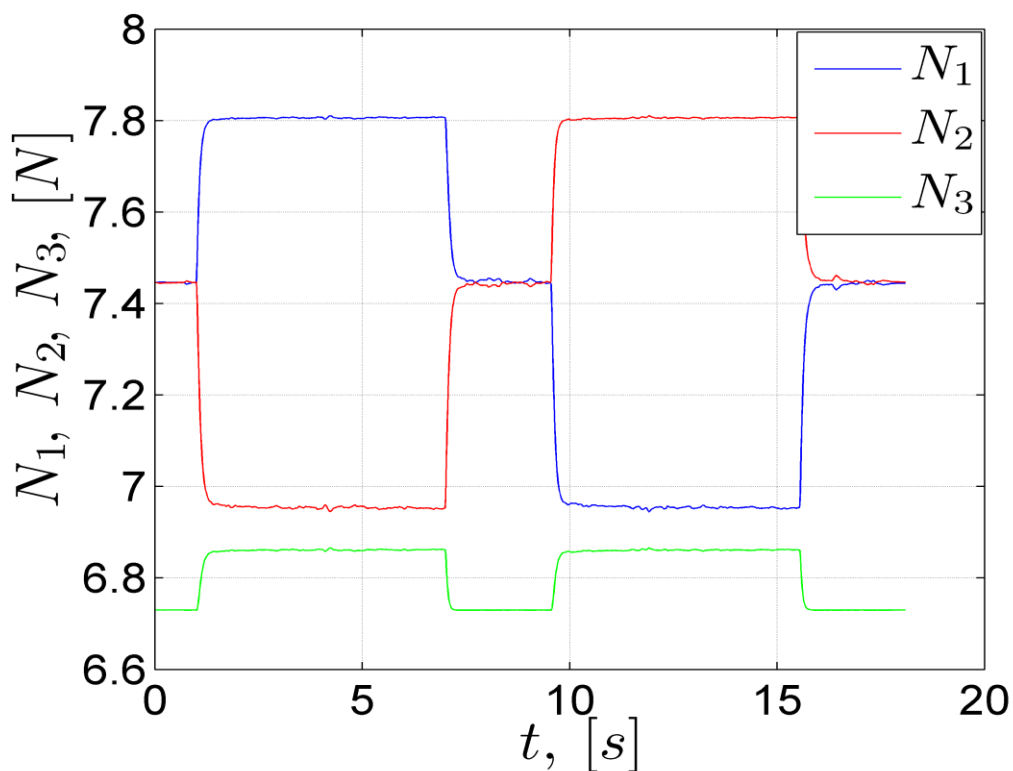
Rys. 35. Prędkość obrotu ramy robota.

Przy zmianie kierunku ruchu występuje znaczący wzrost momentów napędowych. Zmiana skokowa jest wynikiem działania regulatora. Zbyt duże wzmocnienie członu proporcjonalnego K_P regulatora, niesie za sobą zbyt duże wymagania odnośnie momentów napędowych, które są ograniczone [68].



Rys. 36. Kąt obrotu ramy robota w trakcie pokonywania trajektorii.

W przedziale od 1÷6 sekundy i od 9,54÷15,54 sekundy, robot porusza się po okręgu. W chwili zmiany ruchu, na ruch po prostej, czyli w 6 i 15,54 sekundy, prędkość obrotowa ramy robota maleje w sposób skokowy do zera (rysunek 35 i 36).



Rys. 37. Zmiana wartości sił nacisku w trakcie ruchu robota po trajektorii w kształcie cyfry osiem.

Zmiany wartości sił nacisku kół na podłoże przedstawiono na rysunku 37, przy czym należy zwrócić uwagę, że zmiana sił nacisku występuje w sposób cykliczny każdorazowo przy poruszaniu się robota po łuku.

Podsumowanie

Niniejszy rozdział zawiera równania rozszerzonego modelu robota mobilnego, uwzględniające wpływ koła samonastawnego. W równaniach uwzględniono również przypadek szczególny, w którym koło samonastawne się nie ślizga. Jest to jednak przypadek czysto teoretyczny, stąd też nie analizowano go w dalszej części pracy. Podczas wykonywania symulacji uwzględniono również niepewność 5%, dla momentów bezwładności oraz zmienne współczynniki tarcia kół napędowych o podłoże, aby symulowany ruch robota zbliżyć do ruchu rzeczywistego robota.

Rozszerzone równania uwzględniają również zmianę sił nacisku kół na podłoże, które są skutkiem zmiany kąta skręcenia koła samonastawnego. Dokonano symulacji dla trzech różnych trajektorii ruchu robota. Na każdej z symulowanych trajektorii, wyraźny jest wpływ zmieniających się sił nacisku kół na podłoże, w zależności od kąta skręcenia koła samonastawnego. W wyniku przeprowadzonych symulacji, uzyskano potwierdzenie, że koło samonastawne wpływa na trajektorię ruchu robota, Zmiana sił nacisku, skutkuje też zmianą momentów napędowych, jeśli siła nacisku się zwiększa, to również wymagany moment napędowy jest większy. Uwzględnienie zmieniających się współczynników tarcia kół o podłoże, wpływa nie tylko na koła napędowe, ale również na koło samonastawne. W przeprowadzonym modelowaniu nie uwzględniono parametrów silnika, stąd też tak jak przedstawiono na wynikach symulacji, momenty napędowe zmieniają się w sposób skokowy. Wobec powyższego udowodniono w procesie modelowania cel, którym było wykazanie wpływu koła samonastawnego, w trakcie ruchu robota mobilnego po zadanej trajektorii.

Przeprowadzone wyniki symulacji stały się podstawą do zbudowania prototypowych modeli robota, na których będzie możliwa weryfikacja wyników badań symulacyjnych.

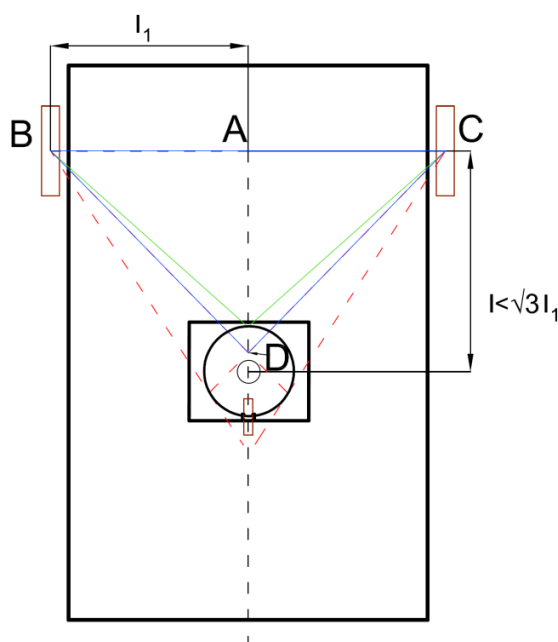
Rozdział 3

Badanie prototypu trójkołowego robota mobilnego

Celem rozdziału jest sprawdzenie, czy możliwe jest zbadanie zachowania koła samonastawnego oraz próba opisu zachowania tego koła. Dodatkowym celem jest także zweryfikowanie wpływu skręcenia koła samonastawnego, na zmianę sił nacisku kół na podłoże oraz sprawdzenie, czy uwzględnienie koła samonastawnego w procesie sterowania, może ograniczyć błędy wynikające z odometrii.

3.1. Budowa robota

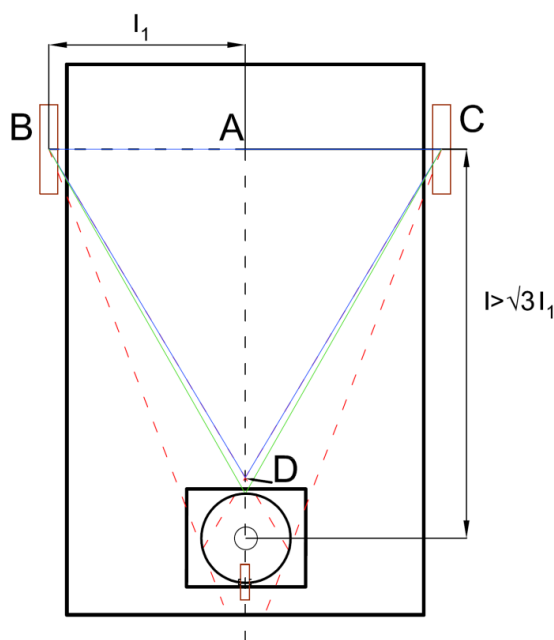
Konstrukcję robota wykonano bazując na modelu matematycznym przedstawionym w rozdziale 2. Projektując konstrukcję robota wykonano szczegółową analizę rozmieszczenia kół napędowych i koła samonastawnego. Poruszone więc jest zagadnienie, które dotychczas było pomijane. W tym celu skonstruowano dwa modele robotów: eksperymentalny i przemysłowy. Do celów badawczych wykonano prototyp robota mobilnego eksperymentalnego z kołem samonastawnym, zdolnym przewieźć ładunek do 2 kg. Konstrukcja podwozia została zgłoszona do urzędu patentowego pod nr P.407263 [24], gdzie zastrzeżono zmodyfikowaną budowę koła samonastawnego, na którym został zamontowany enkoder. Ponadto zastrzeżono najbardziej korzystne zdaniem autora miejsce mocowania koła samonastawnego.



Rys. 38. Rysunek mocowania koła samonastawnego w odległości $l < \sqrt{3} l_1$.

Poprzez określenie najkorzystniejszego miejsca zamocowania koła samonastawnego, rozumiane jest takie zamocowanie koła, które gwarantuje największy uzysk pola stabilności statycznej względem gabarytów robota. W celu zilustrowania tego zagadnienia przygotowano rysunki, na których oznaczono minimalne pole stabilności statycznej, dla różnych kątów skręcenia koła samonastawnego. Dla konstrukcji trójkątowej, pole stabilności statycznej wyznaczone jest jako obszar, znajdujący się pomiędzy kołami napędowymi a kołem samonastawnym, przy traktowaniu obszaru styczności z podłożem, jako obszaru ograniczonego do jednego punktu. Jednym z przypadków wyznaczenia minimalnego obszaru stabilności statycznej, jest przypadek, w którym koło samonastawne obrócone jest o kąt $\varphi = \pi$ rad. W ramach projektowania konstrukcji robota, zauważono zależność pomiędzy odległością kół napędowych, a punktem mocowania koła samonastawnego. Zdaniem autora,

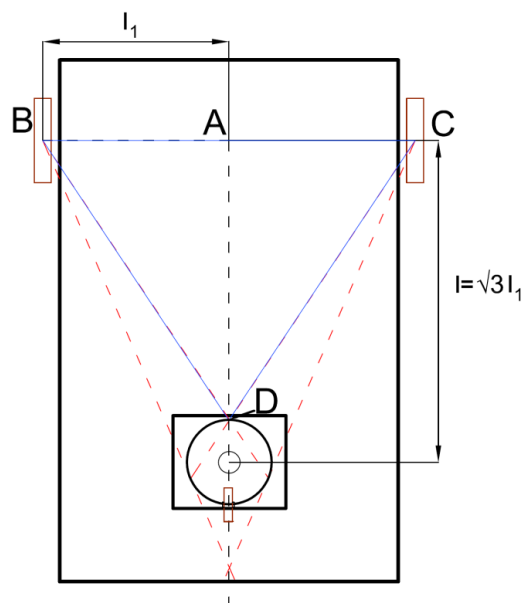
najkorzystniej jest umieścić koło samonastawne w odległości $l = \sqrt{3} l_1$, gdyż wtedy wypadkowe pole stabilności statycznej, dla różnych kątów skręcenia koła samonastawnego nigdy nie jest mniejsze, niż dla przypadku skręcenia tego koła o kąt $\varphi = \pi$ rad. Poprzez wypadkowe pole stabilności statycznej rozumiana jest część wspólna wszystkich pól stabilności statycznej, wyznaczonych pomiędzy punktami styczności kół napędowych (punkty B, C), a punktem styczności z podłożem koła samonastawnego, który znajduje się na okręgu o promieniu l_3 . Środek tego okręgu umieszczony jest w początku układu współrzędnych lokalnych x_4, y_4 – tak jak na rysunku 1. Na rysunku 38 przedstawiono wygląd ramy robota, w której odległość l pomiędzy punktem charakterystycznym A, a punktem mocowania ramienia koła samonastawnego (l_3), jest mniejsza od $\sqrt{3} l_1$. Dla tego przypadku, minimalne pole stabilności statycznej uzyskujemy przy skręceniu koła o kąt $\varphi = \pi$ rad. Ze względu na to, iż odległość pomiędzy punktami A i D jest mniejsza od $\sqrt{3} l_1$, to wypadkowe pole stabilności statycznej jest mniejsze od pola stabilności statycznej, pomiędzy punktami B, C, i D. Punkt D określa wewnętrzny punkt przecięcia dwóch odcinków łączących punkt styczności koła samonastawnego z podłożem, dla punktu styczności po prawej lub po lewej stronie osi symetrii robota. W przypadku skręcenia ramienia (l_3), na którym zamocowane jest koło samonastawne o kąt $\varphi > 0$ rad, jest to odcinek pomiędzy punktem styczności koła samonastawnego z podłożem a punktem B. Pole stabilności pomiędzy kołami napędowymi i kołem samonastawnym skręconym o kąt $\varphi = \pi$ rad oznaczono kolorem zielonym, natomiast pole stabilności pomiędzy punktami B, C i D oznaczono kolorem niebieskim.



Rys. 39. Rysunek mocowania koła samonastawnego w odległości $l > \sqrt{3} l_1$.

W przypadku kąta $\varphi < 0$ rad, jest to odcinek pomiędzy punktem styczności koła samonastawnego z podłożem a punktem C. Wydłużając odległość l , tak że $l > \sqrt{3} l_1$, zwiększa się wprowadzie pole trójkątów wynikających z przemieszczenia punktu podparcia

koła samonastawnego. Jednak odległość pomiędzy punktem podparcia koła samonastawnego, dla kąta skręcenia $\varphi=\pi$ rad jest większa, niż długość odcinka AD. Wobec powyższego wypadkowe pole stabilności statycznej jest ograniczone punktami B, C, D i jest mniejsze niż pole trójkąta wyznaczonego przez punkty styku kół z podłożem (dla kąta skręcenia koła samonastawnego $\varphi=\pi$ rad). Taki przypadek przedstawiono na rysunku 39.



Rys. 40. Rysunek mocowania koła samonastawnego w odległości $l = \sqrt{3} l_1$.

Najkorzystniej, ze względów konstrukcyjnych umieścić koło samonastawne w odległości $l = \sqrt{3} l_1$, gdyż wtedy trójkąt wyznaczony przez punkty pomiędzy kołami robota pokrywa się z wypadkowymi trójkątami, w skrajnych położeniach koła samonastawnego. Wynik takiego rozwiązania przedstawiono na rysunku 40. Pole stabilności statycznej oznaczono kolorem niebieskim i pokrywa się ono z minimalnym obszarem, dla koła samonastawnego skręconego o kąt $\varphi=\pi$ rad.



Rys. 41. Widok robota eksperymentalnego od dołu.

Wykonując prototypowe modele, przebudowano i zamocowano koło samonastawne (rysunek 41) tak jak w zgłoszeniu patentowym nr P.407263 [24].

Układ robota zasilono akumulatorem litowo-polimerowym (Li-Po) o napięciu 11,1V. Zastosowano taki typ akumulatora, ze względu na małą powierzchnię i dużą wydajność prądową. Ramę robota eksperymentalnego wykonano z blachy stalowej, natomiast silniki umieszczono w stalowej tulei o średnicy 22 mm. Na wał silnika założono stalowe felgi, na które nałożono gumowe nakładki. Na początku użyto felg pełnych (bez otworów), jednak ze względu na dużą masę (380 g), w stosunku do masy robota (2200 g), wywiercono otwory, które spowodowały, że masa felg została zmniejszona do 285 g. Koło samonastawne zbudowane jest z felgi aluminiowej, która dodatkowo jest łożyskowana i nałożono na nią warstwę z twardego silikonu, aby ograniczyć poślizg koła. Na koło samonastawne (rysunek 41) nałożono od góry enkoder absolutny MAB22AH o rozdzielczości 12 bitów, który pokazano na rysunku 42. Do sterowania robotem użyto mikrokontrolera Atmega 32, który ma wbudowany przetwornik 10 bitowy, stąd też rozdzielczość pomiarowa sygnałów wykorzystywanych w sterowaniu robota, została ograniczona do 10 bitów.

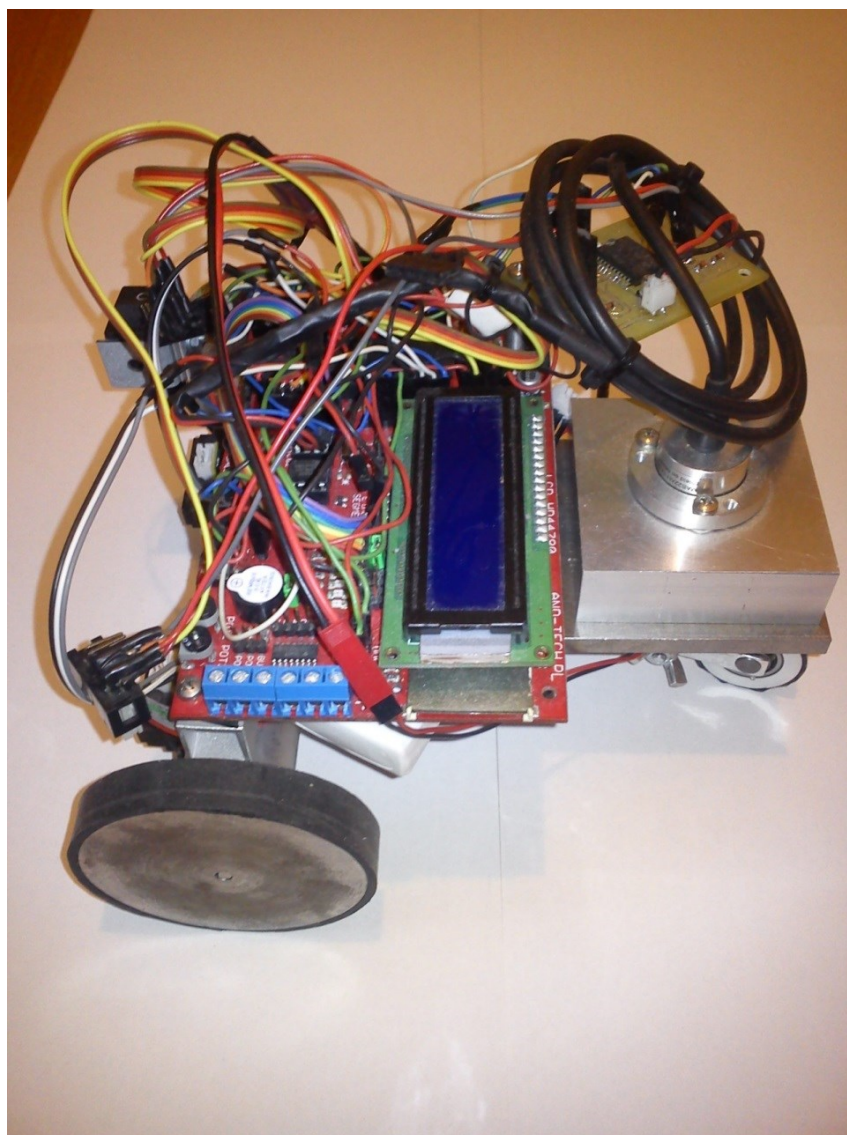


Rys. 42. Zdjęcie enkodera absolutnego MAB22AH.

Czujnik MAB22AH (rysunek 42) jest przeznaczony do zastosowań wymagających podwyższonego stopnia ochrony (IP67), dodatkowo, dzięki dużej precyzji, pozwala na pomiar z dużą dokładnością kąta obrotu koła samonastawnego. Czujnik ten wykorzystuje efekt Halla.

Układ napędowy składał się z silników Porstescap o mocy 4,5W z przekładnią planetarną 1:55,7 i enkoderem o rozdzielczości 16 impulsów/obrót. Aby zwiększyć rozdzielczość dwukrotnie, zliczano przerwania w programie sterującym, wygenerowane zboczem narastającym i opadającym. Poniżej zaprezentowano parametry silnika firmy Portescap: $V_n=12,0V$, $I_n=0,58A$, $R_a=11,9 \Omega$, $L_a=0,55 \cdot 10^{-3} H$, $\phi=14,9 \cdot 10^{-3} Nm/A$, gdzie: V_n – napięcie znamionowe, I_n – prąd znamionowy, L_a – indukcyjność wirnika, ϕ – stała momentu. Sprawność przekładni wynosiła $\eta=65\%$. Sterowanie silnikami umożliwiały mostki H, które wykonano z układów scalonych L298.

Do robota mobilnego zamontowano czujniki zbliżeniowe na podczerwień SHARP 2Y0A02 o zakresie pomiarowym 0,2÷1,5 m (rysunek 44). Na rysunku 43 przedstawiono model robota eksperymentalnego bez obudowy.



Rys. 43. Zdjęcie robota mobilnego eksperymentalnego bez obudowy.



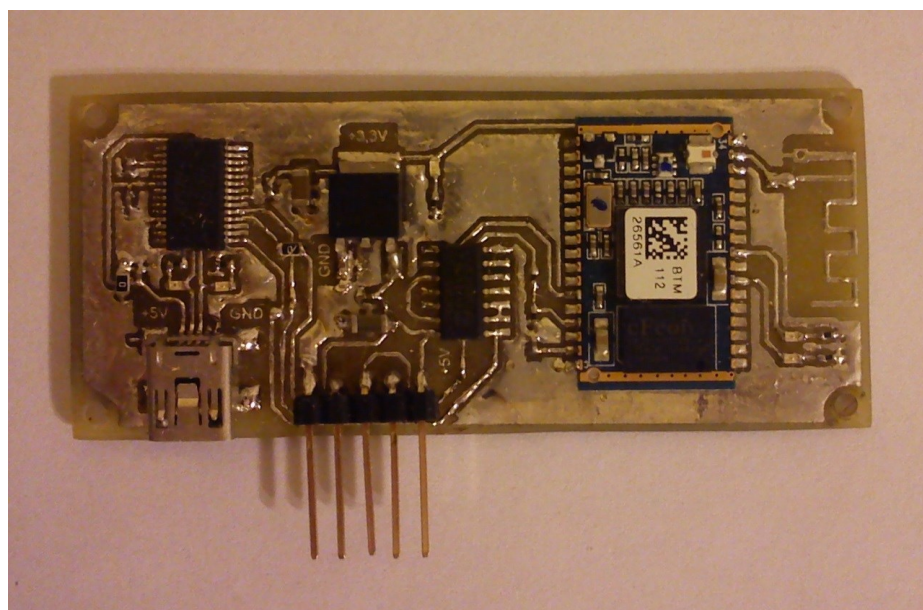
Rys. 44. Zdjęcie czujnika zbliżeniowego SHARP 2Y0A02 użytego obu konstrukcjach.

Układ sterowania został zrealizowany za pomocą zestawu uruchomieniowego [69], zawierającego mikrokontroler Atmega 32, o częstotliwości taktowania wbudowanego rezonatora 16 MHz. Ponadto skorzystano z wbudowanego układu modulacji szerokości impulsu (MSI), nazywanego również z angielskiego (PWM - Pulse Width Modulation) o rozdzielczości 8 bit. Korzystając z dostępnych w układzie Atmega 32 timerów, ustawiono częstotliwość PWM na 500 Hz.

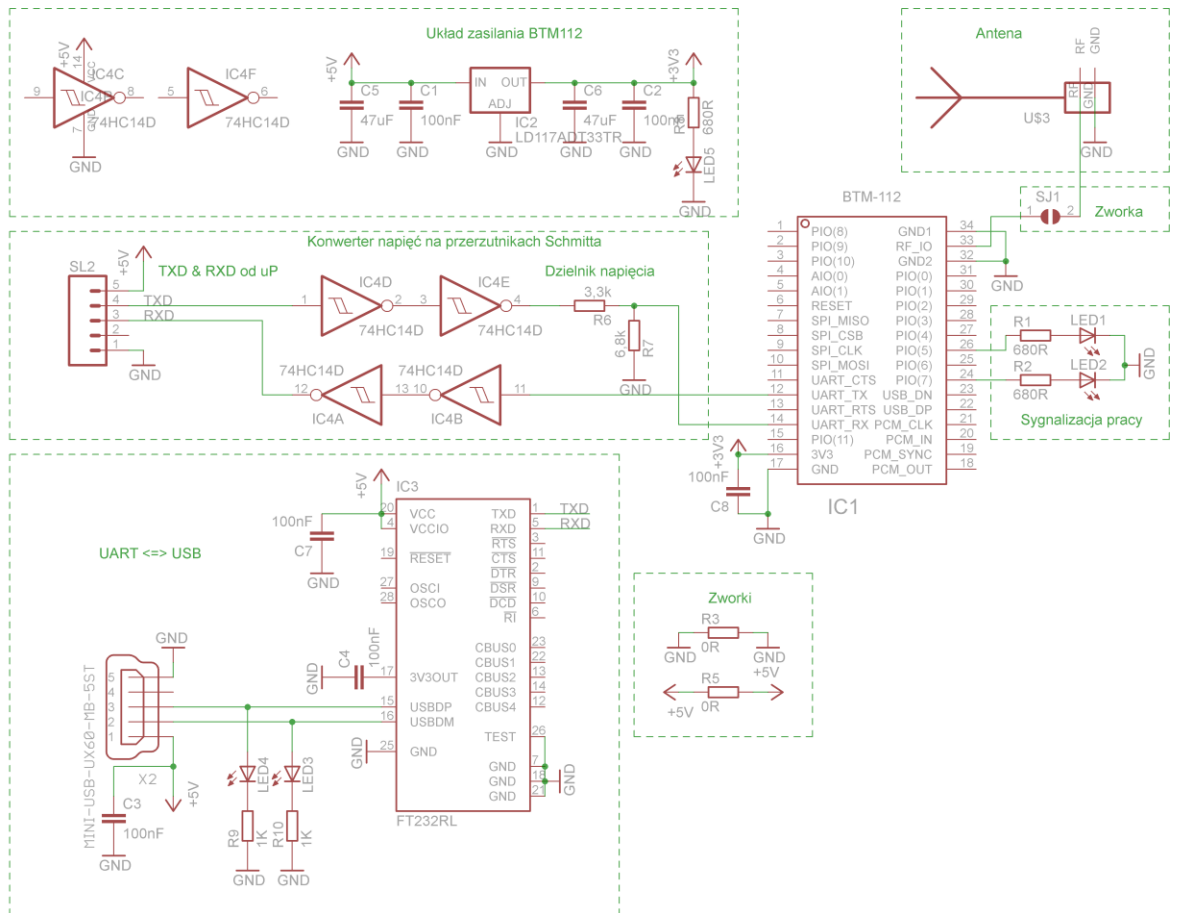
Wykonano również testy dla wyższej częstotliwości sterowania PWM (4 kHz), jednak wyniki okazały się mniej dokładne niż przy częstotliwości PWM równej 500 Hz. Miało to związek z niską rozdzielczością enkodera i zbyt małą liczbą impulsów przypadających na pełny obrót koła. Przy większej rozdzielczości enkodera korzystne jest użycie wyższej częstotliwości PWM, ze względu na lepsze odwzorowanie napięcia zadanego.

Przy prowadzeniu badań, bardzo istotna jest akwizycja danych pomiarowych, stąd też do robota został dodany moduł Bluetooth, wykorzystujący układ BTM112 firmy Rayson, który realizował tę komunikację. Zdjęcie modułu przedstawiono na rysunku 45a, zaś schemat ideowy przedstawiono na rysunku 45b.

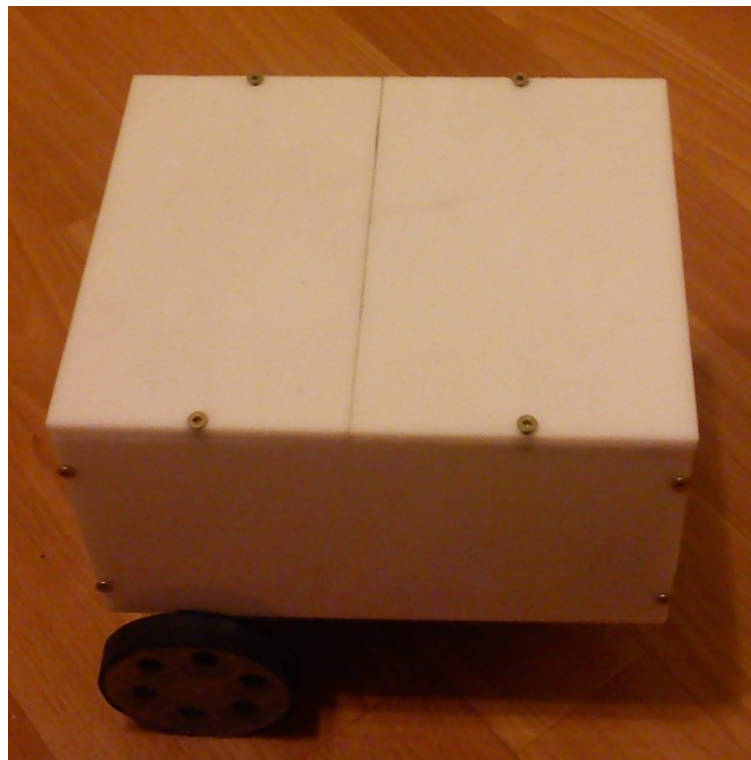
a)



b)



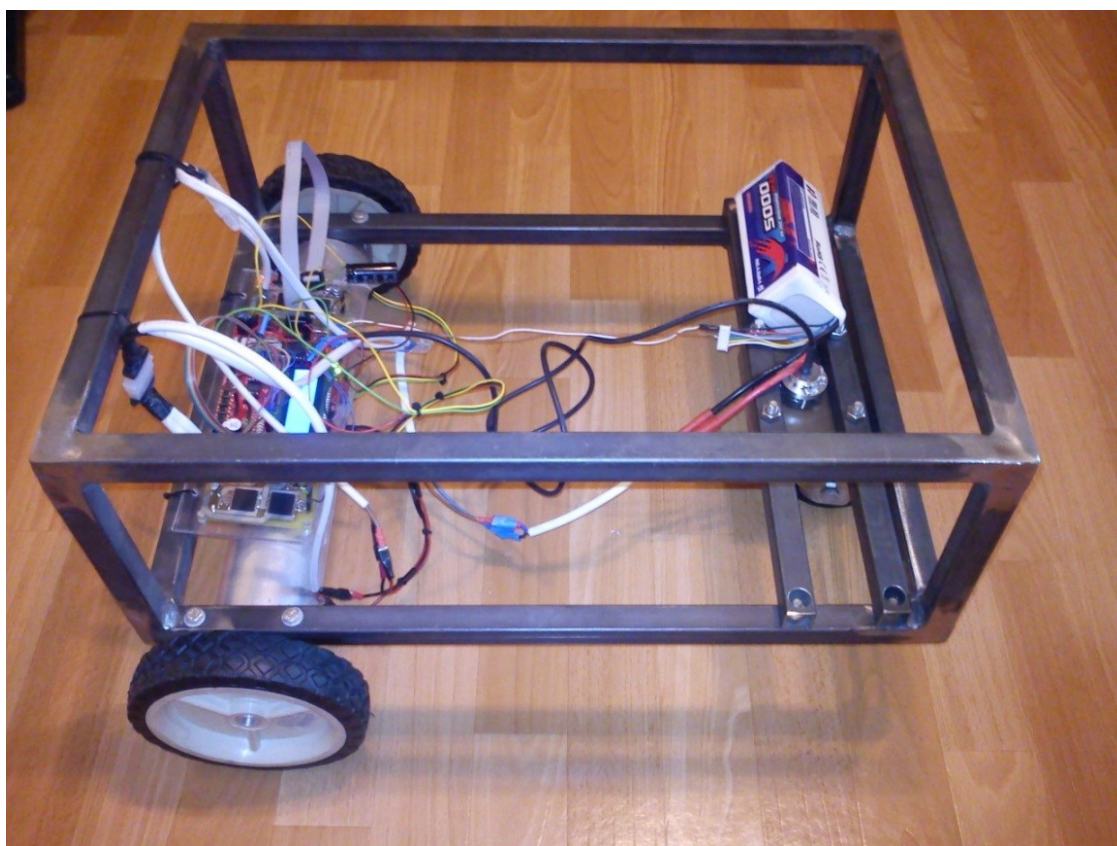
Rys. 45. Modułu Bluetooth z układem Rayson BTM112 a) zdjęcie wykonanego modułu b) schemat ideowy.



Rys. 46. Zdjęcie robota eksperymentalnego z obudową.

Dla robota eksperymentalnego wykonano obudowę z pleksi, która jest lekkim i bardzo wytrzymałym materiałem. Gotowy model robota eksperymentalnego został przedstawiony na rysunku 46. Zastosowanie pleksi miało również swoje uzasadnienie w tym, że nie zakłóca ona komunikacji Bluetooth. Gdyby zastosowano metalową obudowę, mogłyby pojawić się problemy z komunikacją robota. Płaskie wykończenie obudowy pozwala na położenie na robocie ładunków i umożliwia wykorzystanie tego robota, jako środka transportującego.

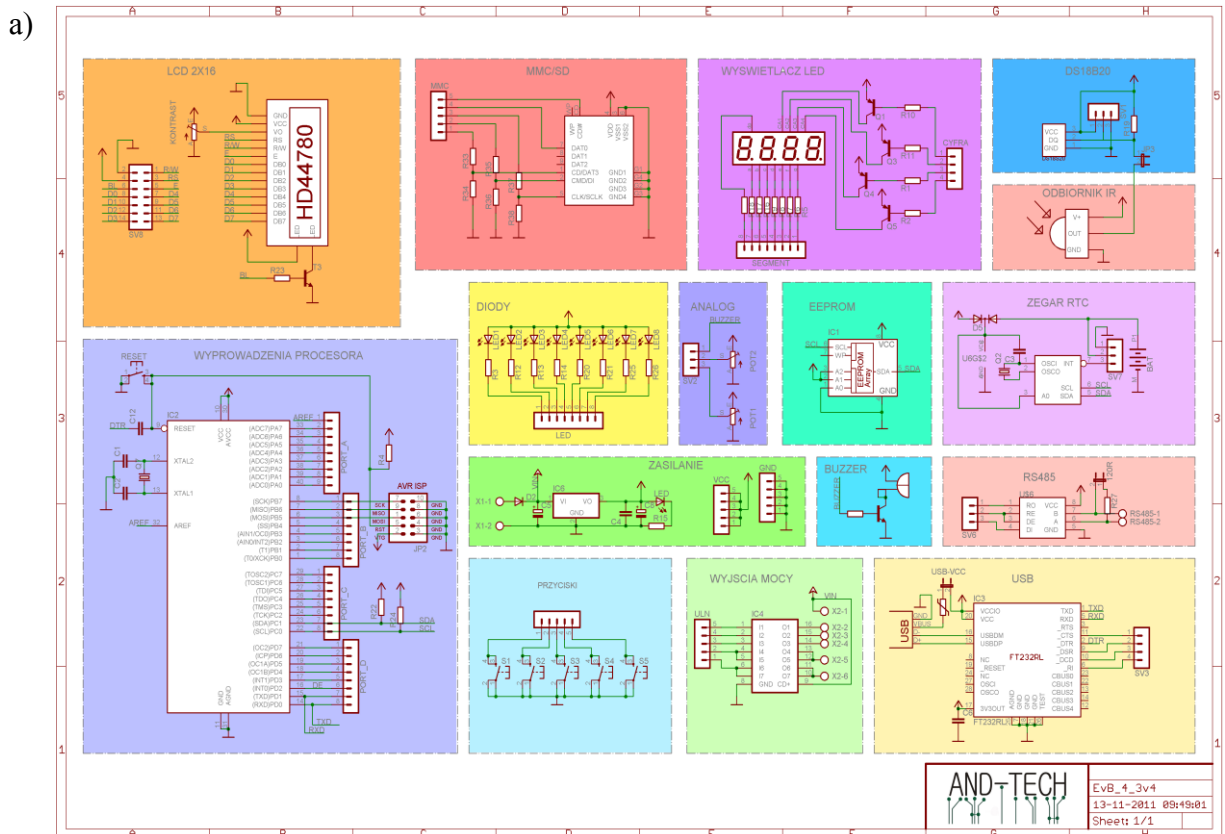
Dane robota eksperymentalnego są następujące: $m_1=m_2=0,285$ kg, $m_3=1,786$ kg, $m_4=0,014$ kg, $r_1=35$ mm, $l=122$ mm, $l_1=75$ mm, $l_2=56$ mm, $l_3=23$ mm, $r_3=15$ mm, gdzie: l – odcinek pomiędzy punktem charakterystycznym A oraz punktem mocowania koła samonastawnego, l_1 – odległość poszczególnych kół napędowych od punktu charakterystycznego A, l_2 – odległość punktu charakterystycznego A od środka masy ramy S, l_3 – długość ramienia koła samonastawnego, r_1, r_2 – promienie kół napędowych, r_3 – promień koła samonastawnego (rysunek 1).



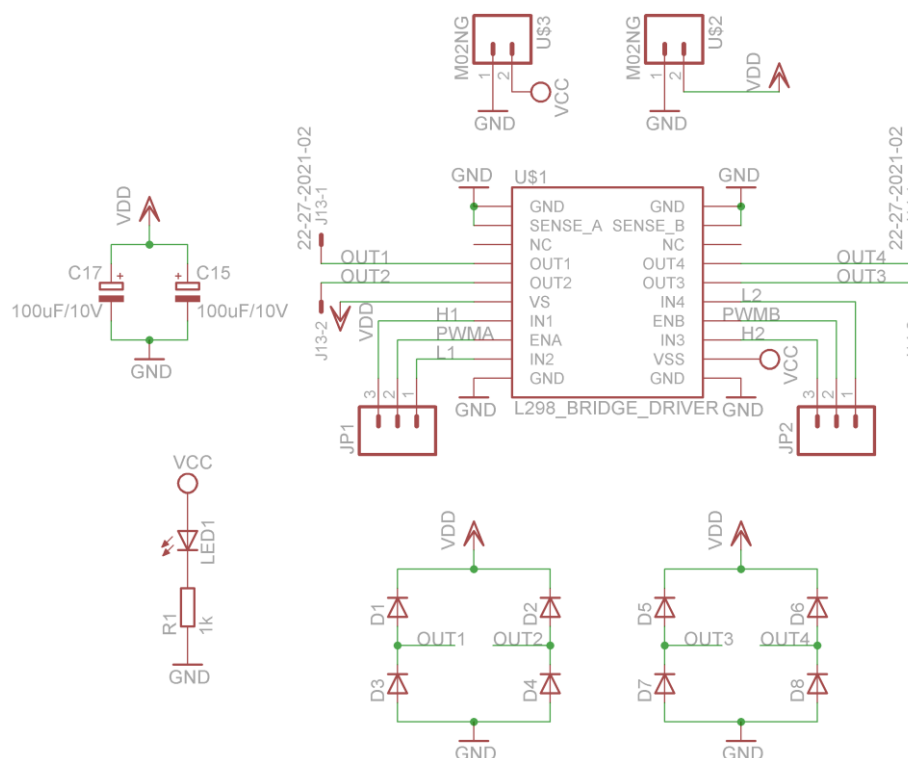
Rys. 47. Zdjęcie robota przemysłowego.

Oprócz omówionego powyżej modelu robota, został skonstruowany do celów badawczych, robot przemysłowy o znacznie większych wymiarach, zdolny przewieźć masę do 80 kg. Większa masa robota powoduje zwiększenie momentów bezwładności, dlatego też celem autora było porównanie i weryfikacja zachowania się większego robota podczas ruchu po zadanej trajektorii. Ramę robota przemysłowego wykonano ze stalowych kształtowników kwadratowych o boku 2 mm. Rama jest w kształcie prostopadłościanu o długości 520 mm,

szerokości 400 mm i wysokości 200 mm. Dane robota przemysłowego są następujące: $m_1=m_2=0,440$ kg, $m_5=12,20$ kg, $m_3=0,211$ kg, $r_1=76$ mm, $l=377$ mm, $l_1=244$ mm, $l_2=144$ mm, $l_3=43$ mm, $r_3=40$ mm. Do ramy przymocowano od dołu tuleję o średnicy 65 mm, w której umieszczono silnik zawierający przekładnię i enkoder inkrementalny. W robocie przemysłowym zamontowano dwa silniki firmy Dunkermotoren 63x25 50 W o następujących parametrach: $V_n=24,0$ V, $I_n=2,7$ A, $R_a=1,33$ Ω , $L_a=2,9 \cdot 10^{-3}$ H, $\phi=6 \cdot 10^{-2}$ Nm/A. Do silnika dołożona jest przekładnia planetarna PLG52 o przełożeniu 1:20,25 i sprawności $\eta=81\%$. Obrót silnika jest zliczany przez enkoder inkrementalny RE 30-3-500 o rozdzielczości 256 impulsów na obrót. Przy zliczaniu zarówno zbrocza narastającego jak i opadającego uzyskano rozdzielczość 512 impulsów, na pełny obrót koła. Jako układ sterujący zastosowano zestaw uruchomieniowy [69], zawierający mikrokontroler Atmega 644P o częstotliwości taktowania wbudowanego rezonatora 16 MHz. W tym układzie istnieje możliwość podłączenia zewnętrznego rezonatora kwarcowego o częstotliwości 20 MHz. Podobnie jak w robocie eksperymentalnym, umieszczono na kole samonastawnym enkoder absolutny MAB22AH o rozdzielczości 12 bitów, jednak ze względu na ograniczenia przetwornika analogowo-cyfrowego (ADC), wbudowanego w mikrokontroler Atmega 644P, wykonywano pomiar z rozdzielczością 10 bitów. Komunikację z robotem wykonano za pomocą modułu Bluetooth, tak jak w przypadku modelu robota eksperymentalnego (rysunek 45a i 45b).



b)



Rys. 48. Schemat ideowy: a) zastosowanego zestawu uruchomieniowego do robota eksperymentalnego, za zgodą firmy AND-TECH [69], b) mostków H do robota eksperymentalnego.

Ze względu na swoje właściwości, robot przemysłowy bardzo dobrze nadaje się jako środek transportujący w zakładzie przemysłowym. Gotową konstrukcję wnętrza robota przedstawiono na rysunku 47. Do zasilania robota wykorzystano akumulator litowo-polimerowy (Li-Po) o pojemności 5 Ah i napięciu 22,2 V. Na rysunku 48a i 48b przedstawiono schematy ideowe, przy czym na rysunku 48 w części a przedstawiono schemat ideowy zastosowanego zestawu uruchomieniowego firmy AND-TECH [69], który umieszczono za jej zgodą. Na rysunku 48 w części b przedstawiony został schemat ideowy wykonanych mostków H wykorzystanych w robocie eksperymentalnym. W robocie przemysłowym wykorzystano również zestaw uruchomieniowy firmy AND-TECH [69], z tą różnicą, że został tam użyty mikrokontroler Atmega 644P. W robocie przemysłowym zmodyfikowano również budowę mostków H, ze względu na wartość skuteczną przepływającego przez nie prądu.

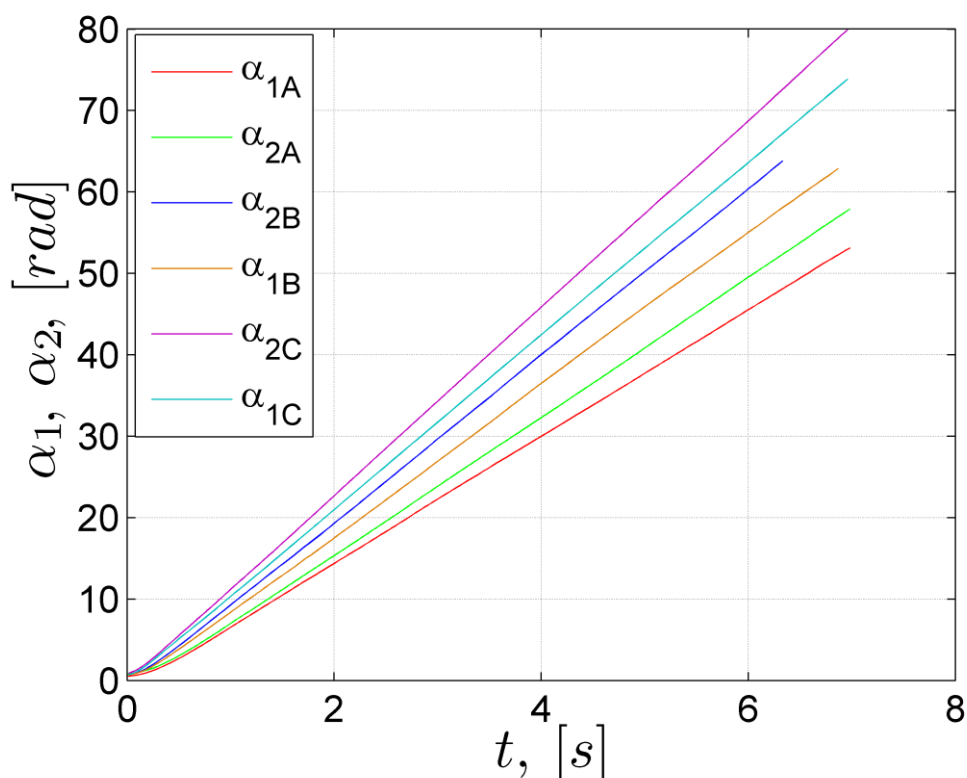
3.2. Badanie własności koła samonastawnego

W podrozdziale dokonano sprawdzenia możliwości wykorzystania informacji o własnościach koła samonastawnego, które mogą być potencjalnie wykorzystane do sterowania, zmieniając właściwości ruchowe robota.

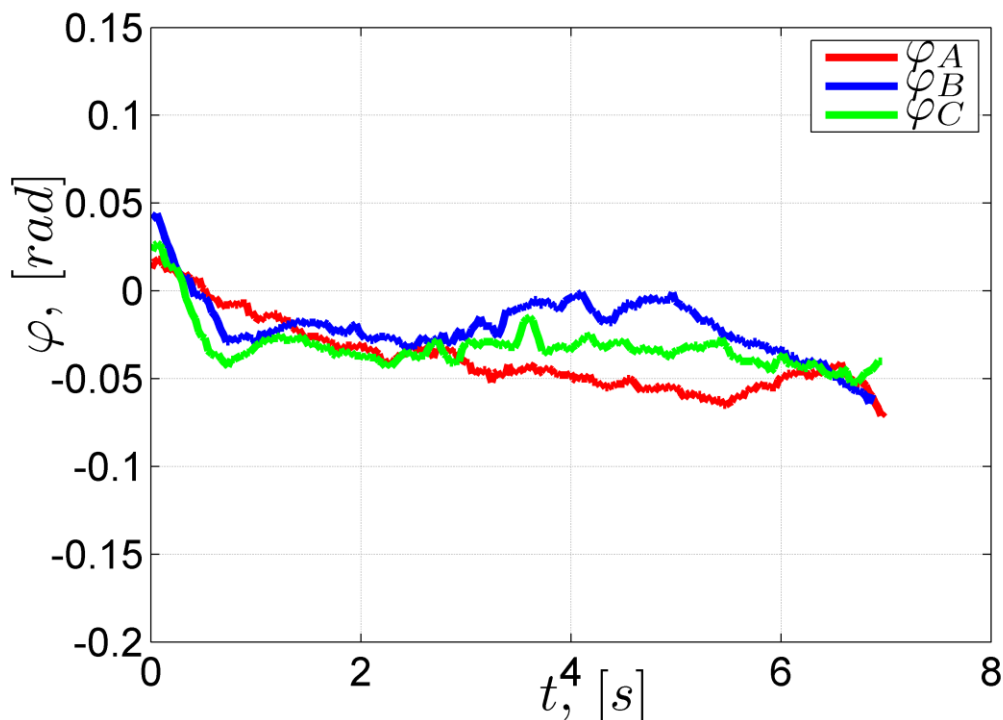
Na początku został przeprowadzony test ruchu robota eksperymentalnego, ze stałym współczynnikiem głębokości modulacji PWM dla obu silników. Teoretycznie, przy tak zadanej prędkości, robot powinien poruszać się po prostej. Jednakże bardzo trudno jest zakupić idealnie sparowane silniki, które mają takie same własności mechaniczne. Dlatego doświadczenie przeprowadzono dla trzech różnych wartości współczynników głębokości modulacji PWM i wykonano po dziesięć pomiarów, przy czym na rysunku 49 przedstawiono średnie arytmetyczne z dziesięciu pomiarów, a próby pomiarowe oznaczono jako:

- indeks A – ruch dla skalowanego (przez 255) współczynnika głębokości modulacji równego 55,
- indeks B – ruch dla skalowanego współczynnika głębokości modulacji równego 105,
- indeks C – ruch dla skalowanego współczynnika głębokości modulacji równego 205.

Kąt obrotu koła 1 za każdym razem jest większy, co może wiązać się z np. mniejszym tarcieniem mechanicznym w silniku i w przekładni, lub większym obwodem niż koło 2. Na rysunku 50 przedstawiono zachowanie koła samonastawnego. Różnica kątów obrotu obu kół przekłada się na kąt skręcenia koła samonastawnego, które podczas wykonywania ruchu jest skręcone w jedną stronę. Kąt skręcenia nie jest wielki ($\sim 2,87^\circ$), jednak stałe skręcenie koła samonastawnego stanowi informację, że robot nie porusza się po prostej i zbacza z zadanej trajektorii, która dla tego przypadku jest zbliżona do jazdy po łuku. Skoro kąt skręcenia koła samonastawnego wynika z jazdy robota po płaskim podłożu, to wydaje się zasadne zmierzenie tego skręcenia i wykorzystanie tej informacji w sterowaniu robotem.



Rys. 49. Porównanie kątów obrotu kół napędowych przy stałym skalowanym współczynnikiem głębokości modulacji PWM.



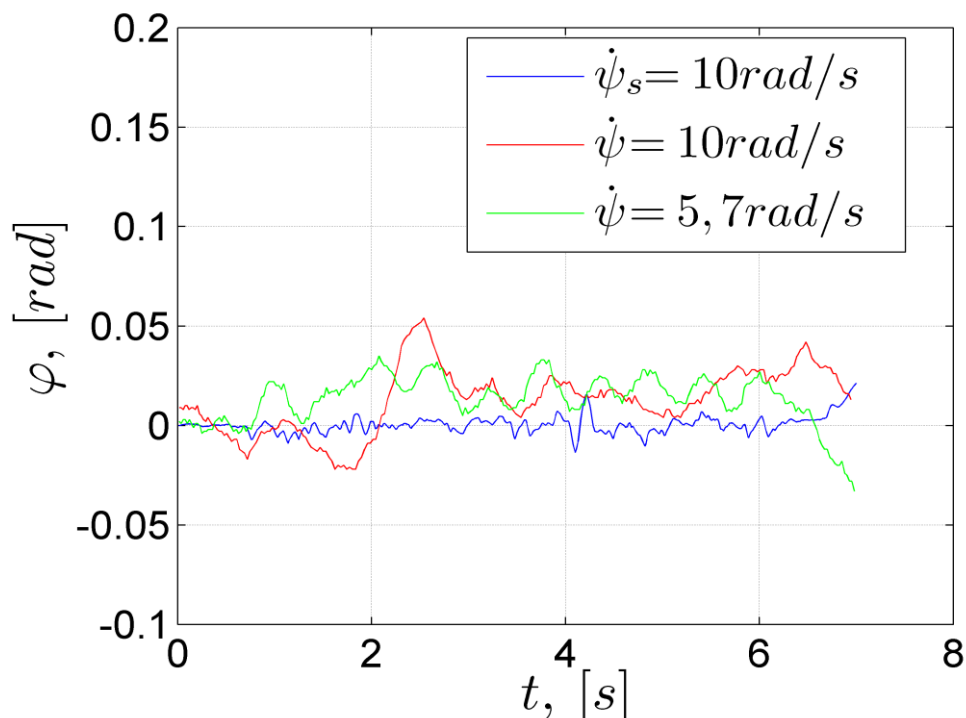
Rys. 50. Zachowanie koła samonastawnego podczas eksperymentu.

W związku z tym, jeśli do robota zostanie zainstalowany enkoder o dużej rozdzielczości (co najmniej 1024 impulsów/obrót), możliwe jest korygowanie ruchu robota, z wykorzystaniem informacji o kącie skręcenia koła samonastawnego. Takie podejście umożliwia dokładniejsze sterowanie robotem mobilnym, który w większości zastosowań bazuje na odometrii, która niestety charakteryzuje się błędami [15, 70]. W celu ograniczenia błędów z odometrii, konieczne jest zastosowanie dodatkowych układów, takich jak systemy wizyjne [71, 72, 73], bądź GPS. Takie podejście wiąże się z dodatkowymi kosztami oraz utrudnioną adaptacją tego typu rozwiązań w każdych warunkach (np. w hali produkcyjnej nie można zastosować GPS, ze względu na zakłócenia, brak zasięgu oraz duży błąd pomiarowy, rzędu pojedynczych metrów [15]).

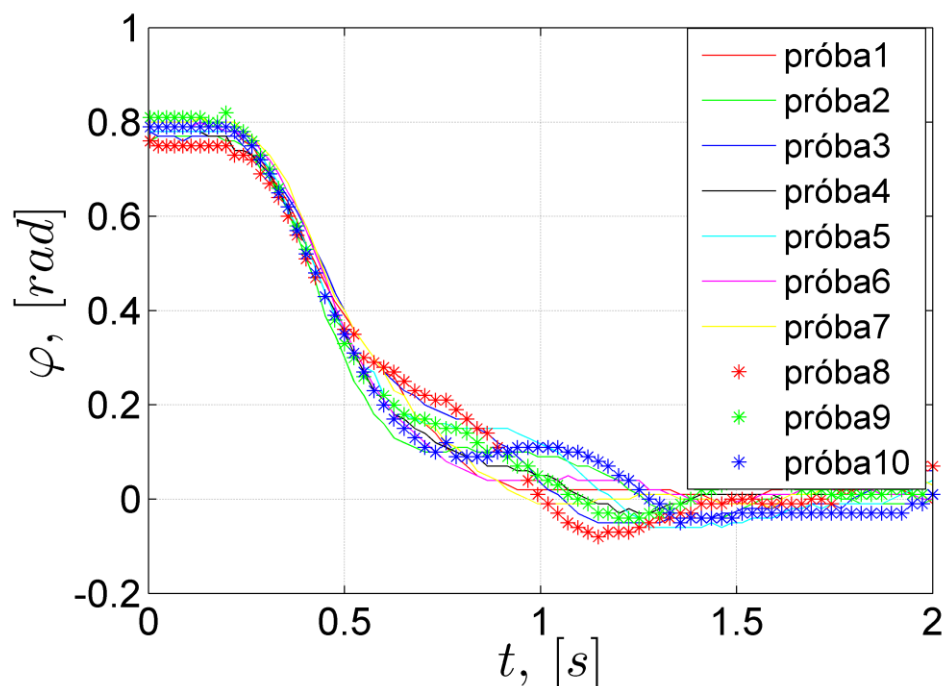
Jako alternatywne rozwiązanie, zostało przedstawione użycie koła samonastawnego, jako układu wspomagającego sterowanie robota, z użyciem odometrii, która jest powszechnie stosowana do określania drogi przebytej przez robota. Wobec czego, został dokonany eksperyment, mający w celu określenie własności koła samonastawnego. W tym celu wybrano następujące początkowe kąty skręcenia koła samonastawnego: $\varphi=0$, $\varphi=\pi/4$, $\varphi=-\pi/4$, $\varphi=\pi/2$, $\varphi=-\pi/2$, $\varphi=3\pi/4$, $\varphi=-3\pi/4$ oraz $\varphi=-\pi$ rad. Testy przeprowadzono dla robota, który rozpoczyna ruch.

Na rysunku 51 przedstawiono wyniki symulacji oraz pomiarów dla kąta skręcenia koła samonastawnego $\varphi=0$ rad, dla ruchu robota po prostej, przy czym przez 1 sekundę robot przyśpieszał, następnie poruszał się ze stałą prędkości i przez 1 sekundę hamował. Przy kącie skręcenia koła samonastawnego $\varphi=0$ rad, wyniki eksperymentu są bardzo zbliżone do symulacji (indeks s). Zmierzone wartości charakteryzują się niewielkimi odchyleniami od kąta równego zero, co ma związek z nierównościami podłoża oraz stosowanym algorytmem sterowania. Tak jak zostało wspomniane wcześniej, jedno z kół robota ma prawdopodobnie

mniejszy opór mechaniczny, w związku z czym robot ma tendencję do lekkiego zbaczania z zadanej trajektorii. W trakcie pokonywania trajektorii, jest to korygowane przez regulator, natomiast przy hamowaniu ten błąd, wynikający z nierównomiernych oporów mechanicznych, jest szczególnie widoczny.

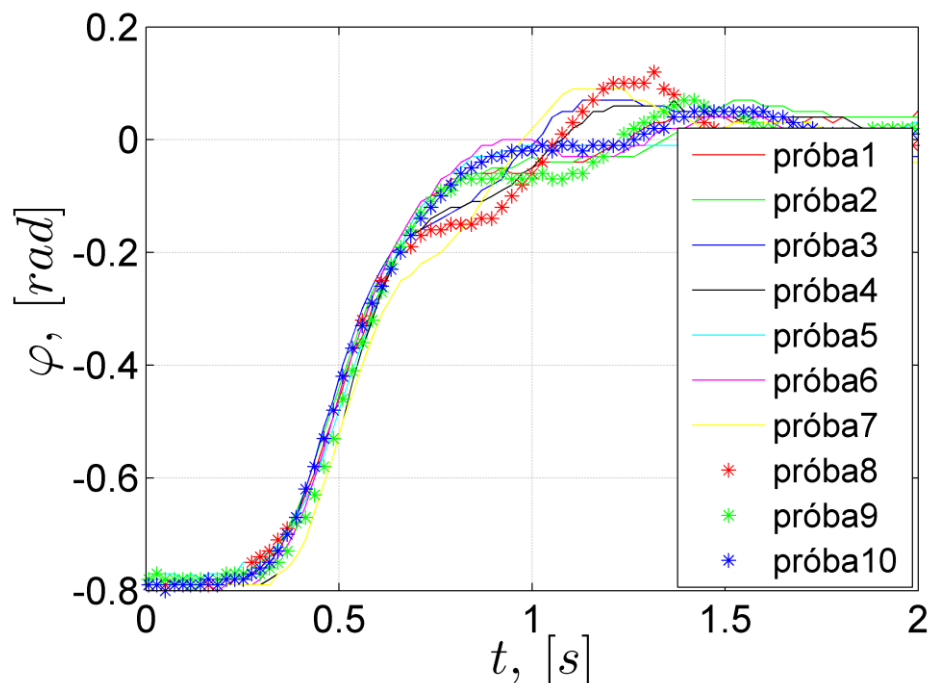


Rys. 51. Zmiana kąta skręcenia koła samonastawnego w ruchu po prostej przy początkowym kącie skręcenia $\varphi=0$ rad.

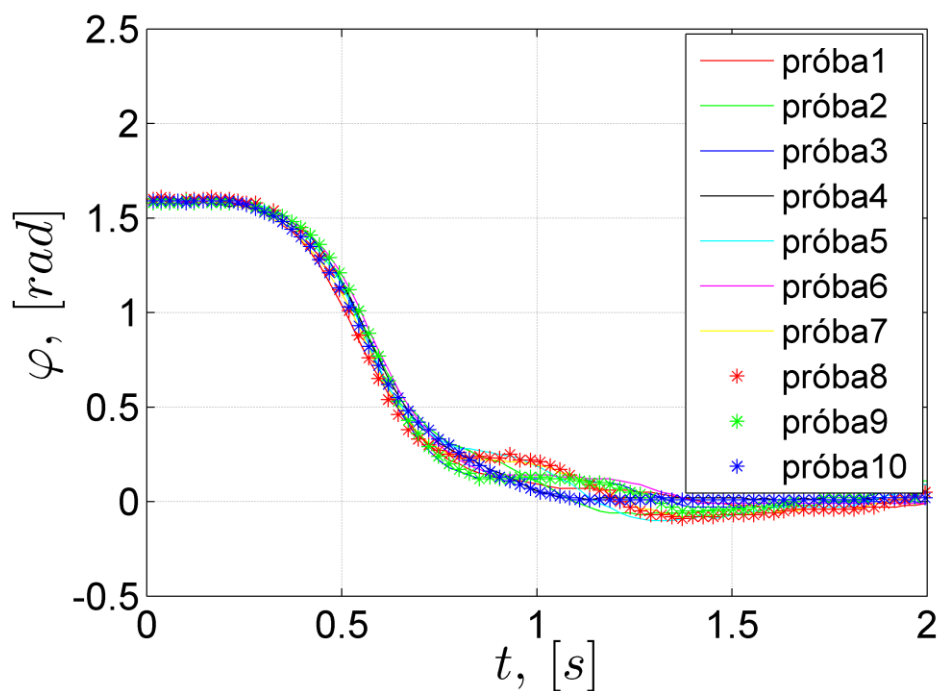


Rys. 52. Fragment przebiegu zmian kąta skręcenia koła samonastawnego dla początkowego kąta skręcenia koła samonastawnego $\varphi = \pi/4$ rad.

Na rysunkach 52 i 53 zademonstrowano podążanie kąta skręcenia koła samonastawnego, w kierunku ustalonego kąta równego zero, dla zadanego ruchu robota po prostej. Rysunki 52 i 53 dotyczą kąta początkowego $\varphi=\pi/4$ oraz $\varphi=-\pi/4$ rad. Dla każdego kąta początkowego przeprowadzono po 10 prób, aby ograniczyć błędy pomiarowe.

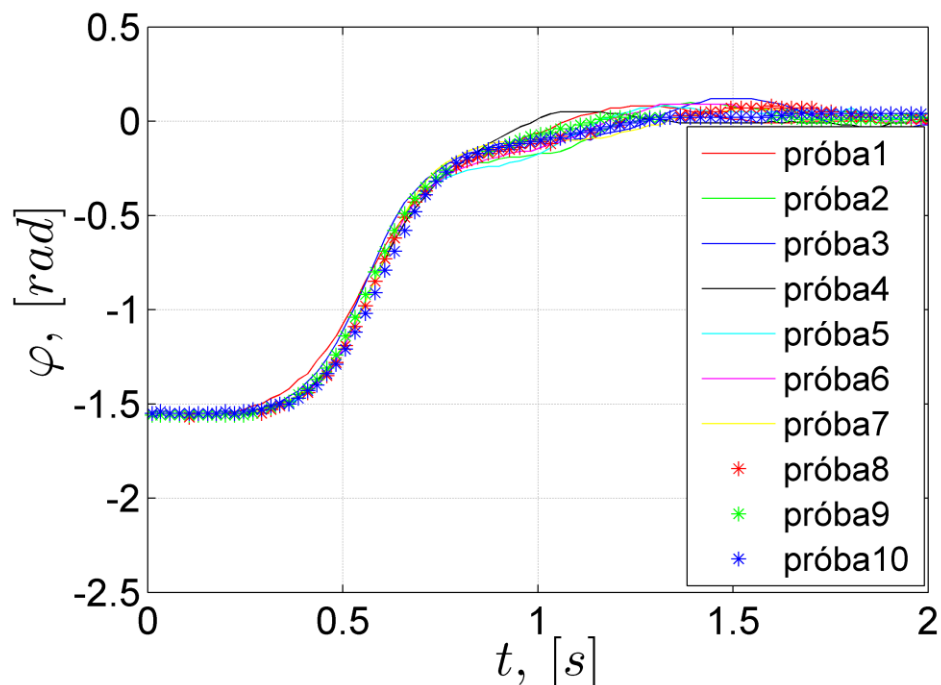


Rys. 53. Fragment przebiegu zmian kąta skręcenia koła samonastawnego dla początkowego kąta skręcenia koła samonastawnego $\varphi = -\pi/4$ rad.

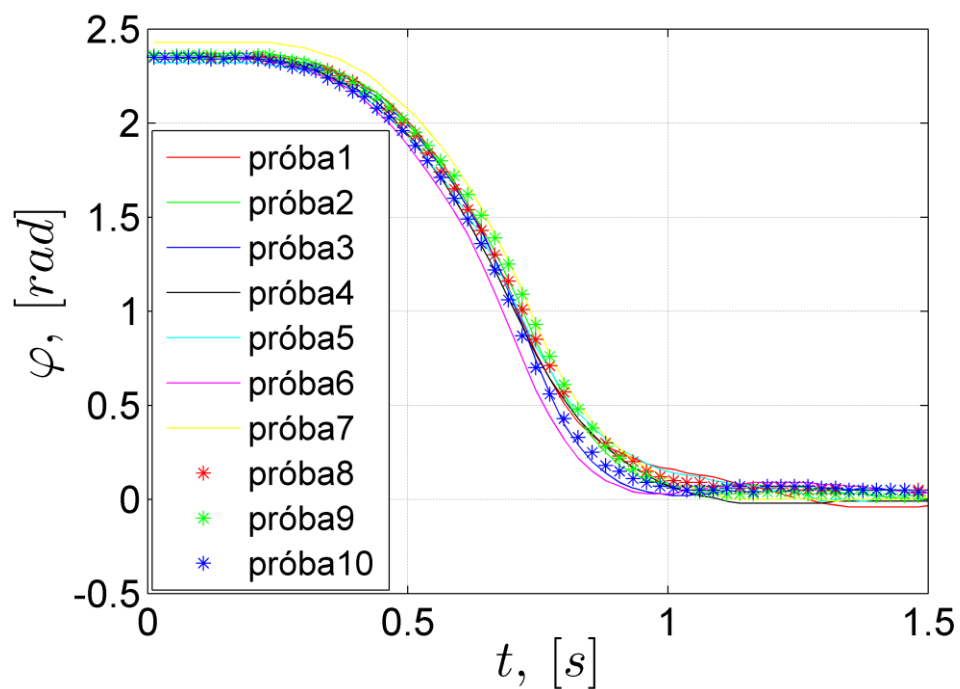


Rys. 54. Fragment przebiegu zmian kąta skręcenia koła samonastawnego dla początkowego kąta skręcenia koła samonastawnego $\varphi = \pi/2$ rad.

Na rysunkach 54 i 55 przedstawiono fragmenty przebiegu zmian kąta skręcenia koła samonastawnego, dla początkowego kąta skręcenia $\varphi=\pi/2$ i $\varphi =-\pi/2$ rad, natomiast na rysunkach 56 i 57, przedstawiono fragmenty przebiegu dla początkowych katów skręcenia $\varphi=3\pi/4$ oraz $\varphi=-3\pi/4$ rad.

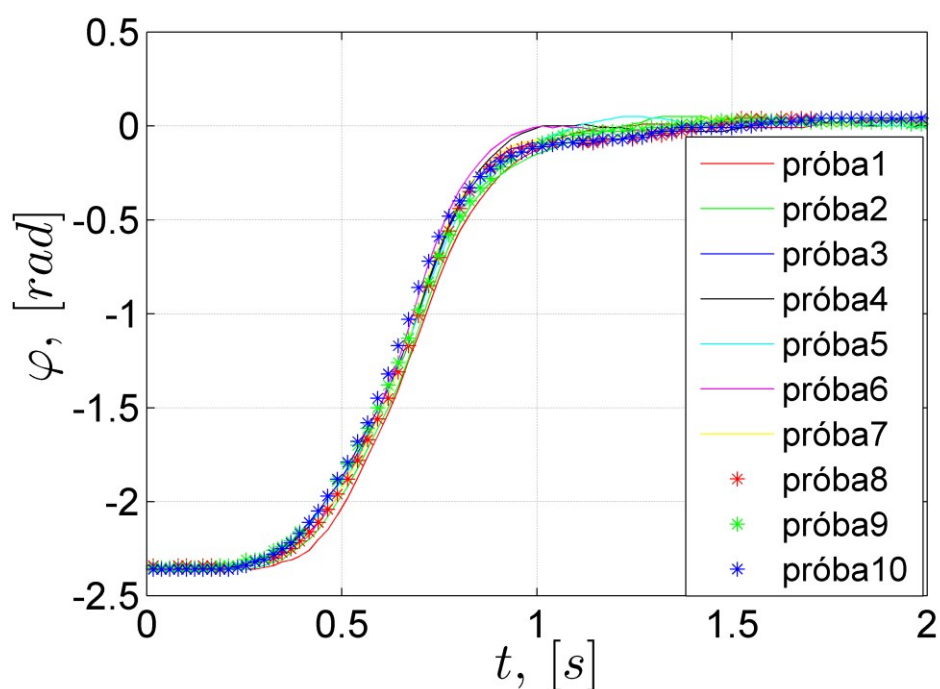


Rys. 55. Fragment przebiegu zmian kąta skręcenia koła samonastawnego dla początkowego kąta skręcenia koła samonastawnego $\varphi=-\pi/2$ rad.



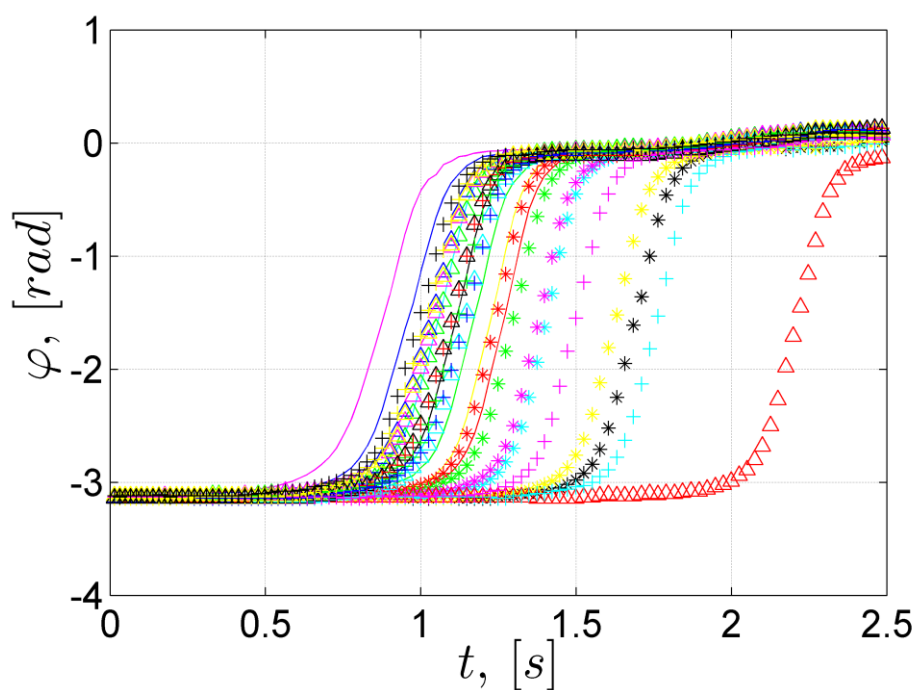
Rys. 56. Fragment przebiegu zmian kąta skręcenia koła samonastawnego dla początkowego kąta skręcenia koła samonastawnego $\varphi=3\pi/4$ rad.

Jak wynika z rysunków 52÷57, kąt skręcenia koła samonastawnego dąży do kąta ustalonego równego zero. Niewielka różnica pomiędzy pomiarami dotyczy stałych czasowych i opóźnień.



Rys. 57. Fragment przebiegu zmian kąta skręcenia koła samonastawnego dla początkowego kąta skręcenia koła samonastawnego $\varphi = -3\pi/4$ rad.

Nieco inna sytuacja ma miejsce przy kącie skręcenia $\varphi = \pi$ rad, dlatego w tym przypadku przeprowadzono 28 pomiarów.



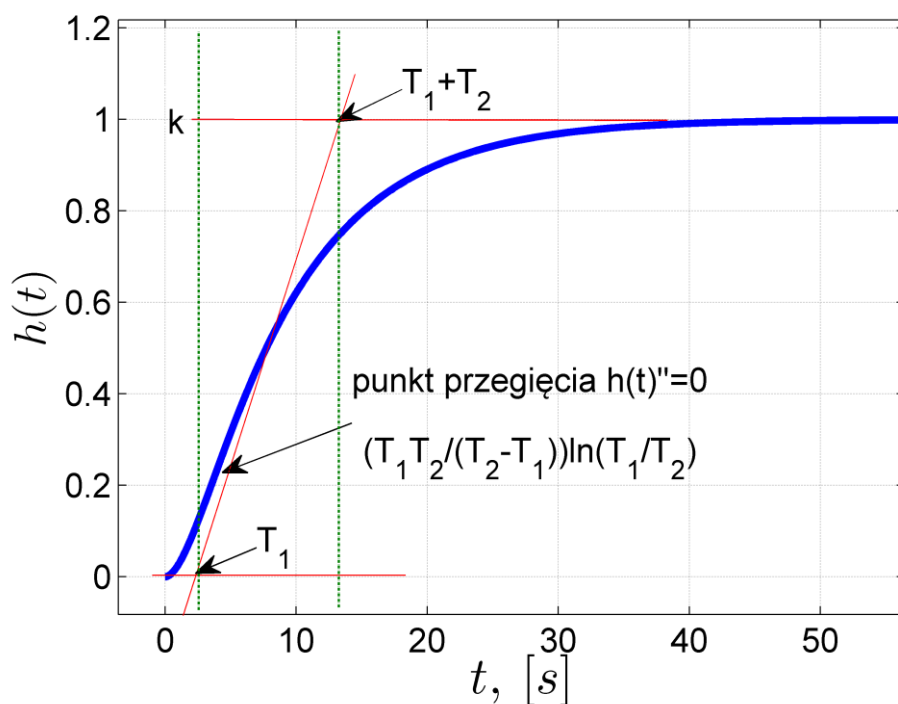
Rys. 58. Fragment przebiegu zmian kąta skręcenia koła samonastawnego dla początkowego kąta początkowego koła samonastawnego $\varphi = -\pi$ rad (28 próbek).

Jak widać na rysunku 58, koło samonastawne przy kącie ustawienia zbliżonym do $\varphi = -\pi$ rad, posiada różne opóźnienie. Ma to ścisły związek z powierzchnią, po której porusza się robot. Powyższe wyniki, zostały uzyskane na podłożu, które stanowiła wykładzina. Taki sam eksperyment przeprowadzono również na szkle. Przy ruchu po takim podłożu, koło samonastawne znacznie dłużej pozostawało przy kącie skręcenia równym π rad. Wynik ten porównano z symulacją komputerową, w której przy kącie początkowym skręcenia $\varphi = -\pi$ rad, koło samonastawne nie zmienia położenia. Praktycznie bardzo trudno taki wynik uzyskać, ze względu na kilka czynników, między innymi nierówne podłoże i różnice wynikające z zastosowanych napędów. Bazując jednak na powyższych rysunkach, można stwierdzić, że wykres koła samonastawnego z dowolnym kątem początkowym, przypomina układ inercyjny drugiego rzędu, który opisany jest następująco [74]:

$$h(t) = k \left[1 - \frac{(T_1 e^{-t/T_1} - T_2 e^{-t/T_2})}{T_1 - T_2} \right], \quad (80)$$

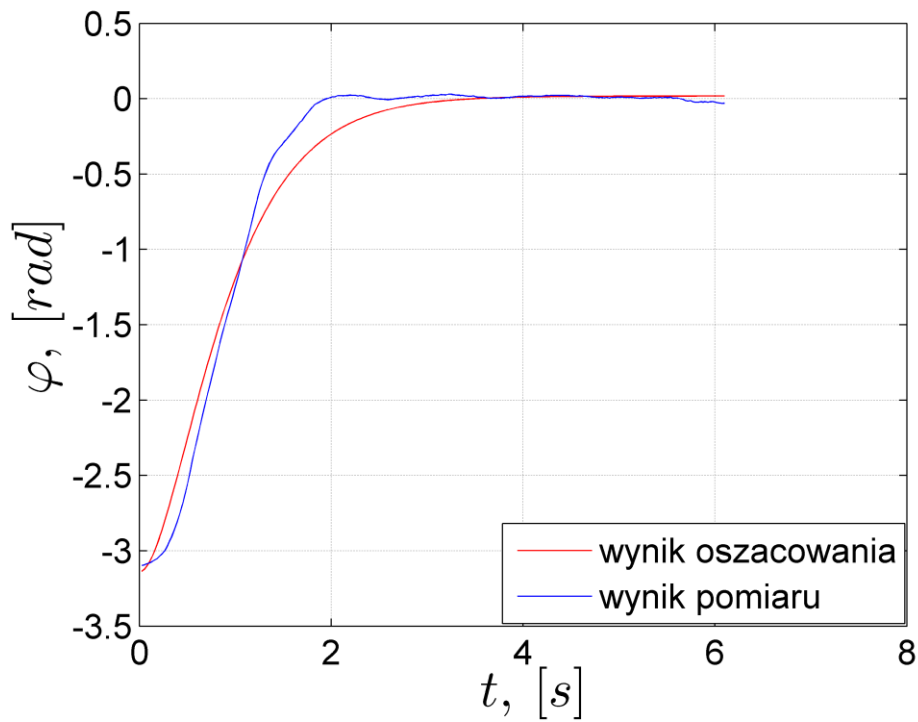
gdzie: T_1, T_2 oznaczają czasy inercji a k oznacza różnicę pomiędzy początkową a końcową wartością sygnału. Wyznaczanie czasów parametrów obiektu inercyjnego drugiego rzędu zostało przedstawione na rysunku 59.

W celu określenia czasów inercji, dla poszczególnych charakterystyk zostało przeprowadzone oszacowanie czasów inercji T_1 i T_2 dla wyników pomiarowych, z użyciem funkcji z pakietu *MATLAB* - *fminsearch()*.

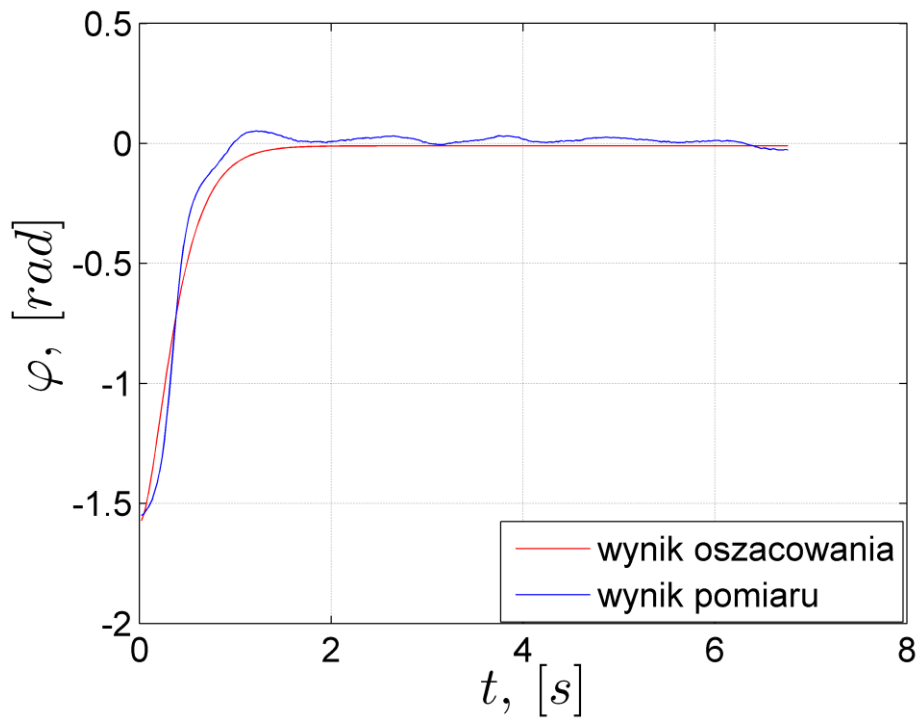


Rys. 59. Wyznaczanie parametrów obiektu inercyjnego II-go rzędu.

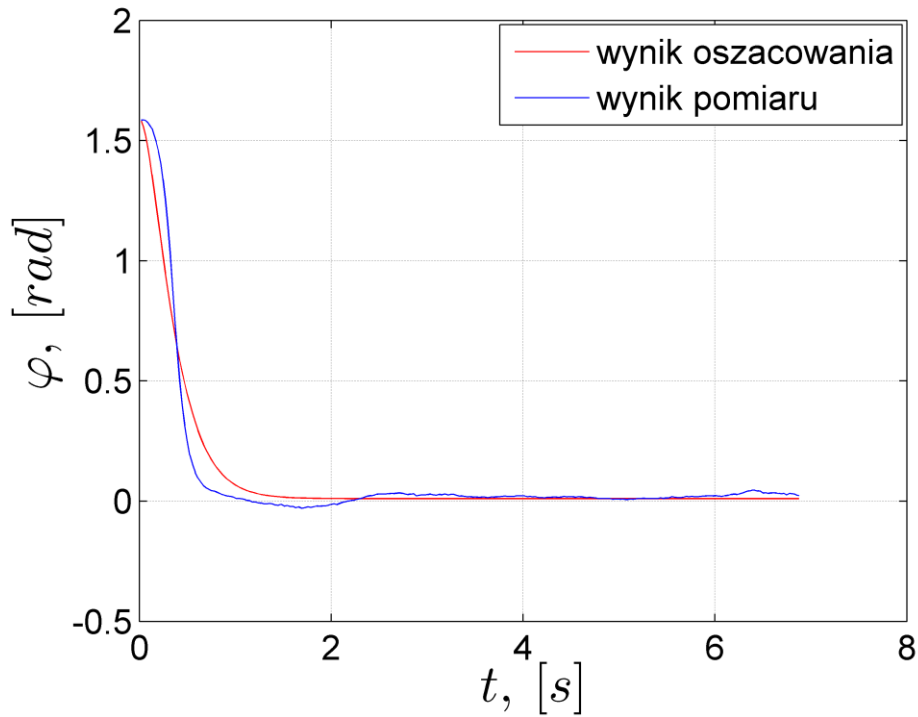
Na rysunkach 60÷66 przedstawiono porównanie wyników pomiarów oraz wyników oszacowania dla początkowego kąta skręcenia koła samonastawnego: $\varphi = \pi, \varphi = \pi/2, \varphi = -\pi/2, \varphi = 3\pi/4, \varphi = -3\pi/4, \varphi = \pi/4$ oraz $\varphi = -\pi/4$ rad. W wyniku porównania uzyskano dużą zbieżność.



Rys. 60. Porównanie wyników pomiaru i oszacowania dla początkowego kąta skręcenia $\varphi = -\pi$ rad.



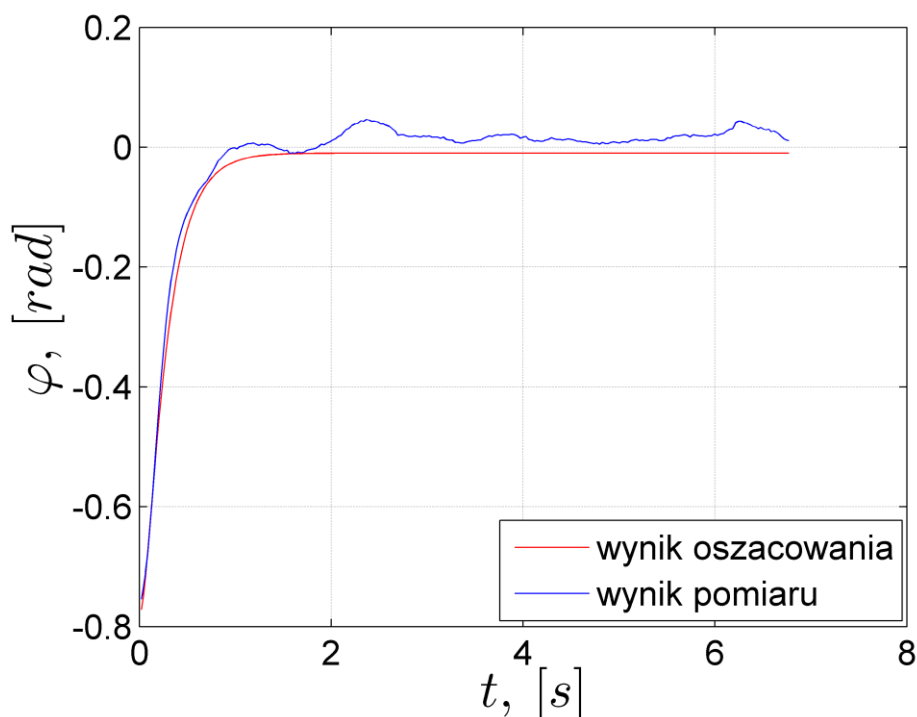
Rys. 61. Porównanie wyników pomiaru i oszacowania dla początkowego kąta skręcenia $\varphi = -\pi/2$ rad.



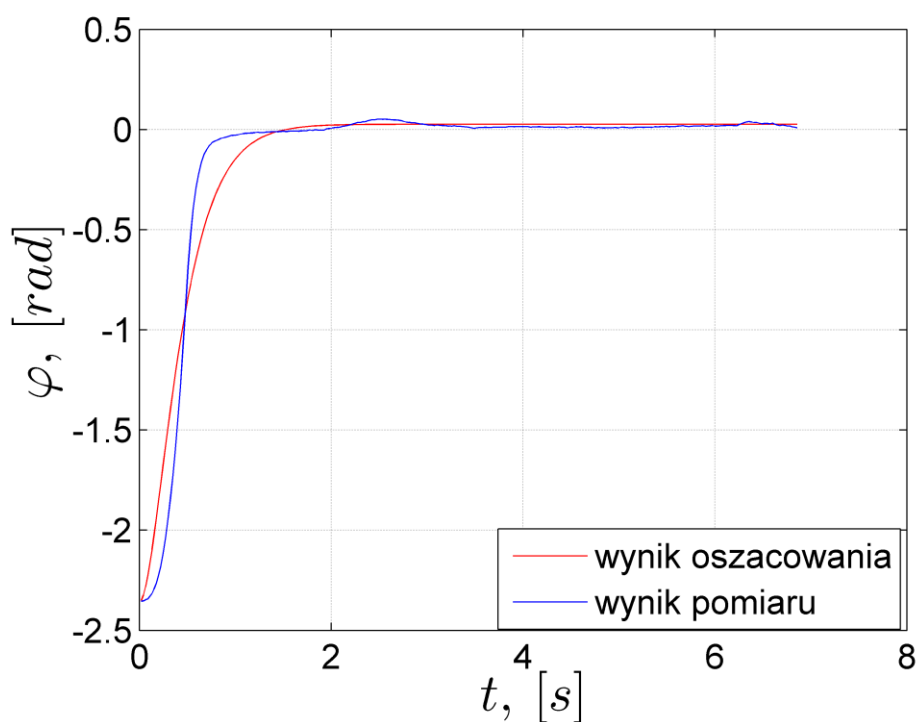
Rys. 62. Porównanie wyników pomiaru i oszacowania dla początkowego kąta skręcenia $\varphi=\pi/2$ rad.



Rys. 63. Porównanie wyników pomiaru i oszacowania dla początkowego kąta skręcenia $\varphi=\pi/4$ rad.

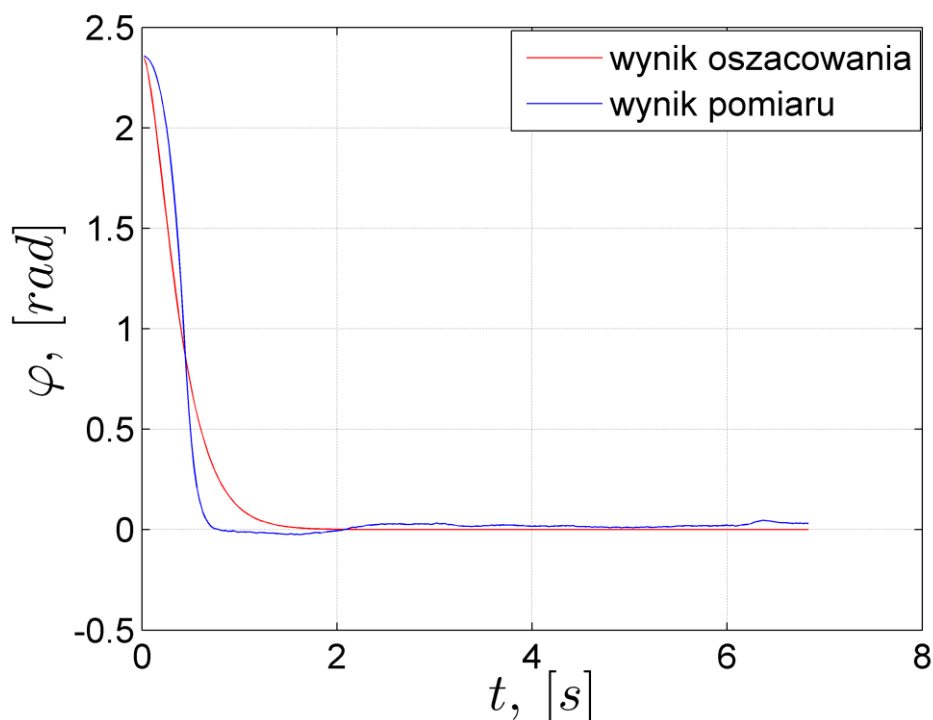


Rys. 64. Porównanie wyników pomiaru i oszacowania dla początkowego kąta skręcenia $\varphi = -\pi/4$ rad.



Rys. 65. Porównanie wyników pomiaru i oszacowania dla początkowego kąta skręcenia $\varphi = -3\pi/4$ rad.

Opóźnienia τ oszacowano jako czas, w którym nie zmienia się wartość początkowa kąta skręcenia koła samonastawnego, przy rozpoczynaniu ruchu przez robota mobilnego. Wartości opóźnień zostały oszacowane z przebiegów przedstawionych na rysunkach 52÷57.



Rys. 66. Porównanie wyników pomiaru i oszacowania dla początkowego kąta skręcenia $\varphi=3\pi/4$ rad.

Sposób oszacowania opóźnienia dla przypadku skręcenia początkowego koła samonastawnego o kąt $\varphi=-\pi$ rad, omówiono w dalszej części podrozdziału.

Tabela 1. Wyznaczanie parametrów opisujących własności koła samonastawnego

Kąt startowy φ [rad]	τ [s]	T_1 [s]	T_2 [s]
$-\pi/2$	0,22	0,20	0,34
$\pi/2$	0,11	0,23	0,28
$-\pi/4$	0,20	0,06	0,36
$\pi/4$	0,20	0,08	0,40
$3\pi/4$	0,15	0,25	0,32
$-3\pi/4$	0,12	0,28	0,34

Czasy opóźnień τ zaprezentowane w tabeli 1 są bardzo podobne, przy czym należy zwrócić τ , która została wyznaczona w czasie ruchu, autor zdecydował o pominięciu tego opóźnienia w (uwagę, że przy większym kącie skręcenia koła samonastawnego, czas opóźnienia powinien być większy. Jednak ruch do przodu wywołany przez koła napędowe, „napędza” również część związaną z kołem samonastawnym, przez co prędkość skrętu koła jest większa i koło szybciej skręca, przyjmując ustaloną wartość kąta skręcenia ($\varphi=0$ rad). Ze względu na to, że otrzymane wartości opóźnienia τ , przedstawione w tabeli 1, zostały wyznaczone dla robota rozpoczynającego ruch, przeprowadzono dodatkowy eksperyment, w którym oszacowano czas opóźnienia τ w czasie ruchu robota, otrzymując wartość około 0,05 s. W związku z niewielką wartością opóźnienia 104 i 105).

Dla początkowego kąta skręcenia koła samonastawnego $\varphi = -\pi$ rad, przyjęto inne podejście, ze względu na szerokie spektrum uzyskanych wyników, które opisano w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki eksperymentu, dla kąta skręcenia koła samonastawnego $\varphi = -\pi$ rad.

Nr próbki	τ [s]	T_1 [s]	T_2 [s]
1	0,40	0,3	0,32
2	0,44	0,36	0,30
3	0,46	0,36	0,30
4	0,46	0,36	0,30
5	0,46	0,36	0,30
6	0,46	0,36	0,30
7	0,46	0,36	0,30
8	0,46	0,36	0,30
9	0,60	0,34	0,28
10	0,60	0,34	0,28
11	0,60	0,34	0,28
12	0,68	0,34	0,28
13	0,68	0,34	0,28
14	0,70	0,34	0,28
15	0,76	0,32	0,30
16	0,78	0,30	0,28
17	0,82	0,32	0,28
18	0,88	0,32	0,28
19	0,88	0,32	0,28
20	0,90	0,28	0,26
21	0,90	0,28	0,26
22	1,00	0,26	0,28
23	1,00	0,26	0,28
24	1,08	0,30	0,30
25	1,2	0,30	0,26
26	1,28	0,32	0,28
27	1,28	0,32	0,28
28	1,28	0,32	0,30
29	1,73	0,32	0,30

Następnie, na podstawie wartości przedstawionych w tabeli 2, wyznaczono wartość średnią arytmetyczną, dla opóźnienia $\bar{\tau}$, czasów inercji \bar{T}_1 oraz \bar{T}_2 :

$$\bar{\tau}=0,801 \text{ s}, \quad (81)$$

$$\bar{T}_1=0,324138 \text{ s}, \quad (82)$$

$$\bar{T}_2=0,286897 \text{ s}. \quad (83)$$

W kolejnym kroku wyznaczono wariancję populacji dla powyższych wartości, aby wyeliminować wartości skrajne. Wobec czego wariancja z populacji dla opóźnienia σ_{τ}^2 wynosi:

$$\sigma_{\tau}^2=0,10523. \quad (84)$$

Przyjmując przedział ufności równy trzem wariancjom, otrzymujemy następujący przedział:

$$\tilde{\tau} \in (0,485345 ; 1,116724). \quad (85)$$

W konsekwencji nowy zbiór wartości zapisano w tabeli 3:

Tabela 3. Zmodyfikowany zbiór wartości pomiarowych dla kąta skręcenia koła samonastawnego $\varphi=-\pi$ rad.

Nr próbki	τ [s]	T_1 [s]	T_2 [s]
9	0,60	0,34	0,28
10	0,60	0,34	0,28
11	0,60	0,34	0,28
12	0,68	0,34	0,28
13	0,68	0,34	0,28
14	0,70	0,34	0,28
15	0,76	0,32	0,30
16	0,78	0,30	0,28
17	0,82	0,32	0,28
18	0,88	0,32	0,28
19	0,88	0,32	0,28
20	0,90	0,28	0,26
21	0,90	0,28	0,26
22	1,00	0,26	0,28
23	1,00	0,26	0,28
24	1,08	0,30	0,30

Nowe wartości średniej arytmetycznej dla opóźnienia $\bar{\tau}_1$ i czasów inercji \bar{T}_1^1 oraz \bar{T}_2^1 wynoszą odpowiednio:

$$\bar{\tau}_1=0,80375, \quad (86)$$

$$\bar{T}_1^1=0,3125 \text{ s}, \quad (87)$$

$$\bar{T}_2^1=0,28 \text{ s}. \quad (88)$$

Korzystając z (87) i (88) wyznaczono średnią ze średnich wg następującego wzoru:

$$\tilde{\tau}=0,8 \text{ s}, \quad (89)$$

$$\hat{T}_1 = (\bar{T}_1 + \bar{T}_1^1) / 2 = 0,318 \text{ s}, \quad (90)$$

$$\hat{T}_2 = (\bar{T}_2 + \bar{T}_2^1) / 2 = 0,283 \text{ s}. \quad (91)$$

Na tej podstawie przyjęto dla skręcenia koła samonastawnego, opóźnienie $\tau \approx 0,8 \text{ s}$, natomiast czasy inercji $T_1 \approx 0,32 \text{ s}$ oraz $T_2 \approx 0,28 \text{ s}$.

Wobec powyższego określono odpowiedź obiektu inercyjnego II-go rzędu aproksymującego dynamikę koła samonastawnego, wykorzystując zależność (80), dla każdego z początkowych kątów skręcenia koła samonastawnego:

a) kąt startowy $\varphi = \pi/4$ rad:

$$h(t) = k \left[1 - \frac{(0,08e^{-t/0,08} - 0,4e^{-t/0,4})}{-0,32} \right], \quad (92)$$

b) kąt startowy $\varphi = -\pi/4$ rad:

$$h(t) = k \left[1 - \frac{(0,06e^{-t/0,06} - 0,36e^{-t/0,36})}{-0,30} \right], \quad (93)$$

c) kąt startowy $\varphi = -\pi/2$ rad:

$$h(t) = k \left[1 - \frac{(0,2e^{-t/0,2} - 0,34e^{-t/0,34})}{-0,14} \right], \quad (94)$$

d) kąt startowy $\varphi = \pi/2$ rad:

$$h(t) = k \left[1 - \frac{(0,23e^{-t/0,23} - 0,28e^{-t/0,28})}{-0,05} \right], \quad (95)$$

e) kąt startowy $\varphi = 3\pi/4$ rad:

$$h(t) = k \left[1 - \frac{(0,25e^{-t/0,25} - 0,32e^{-t/0,32})}{-0,07} \right], \quad (96)$$

f) kąt startowy $\varphi = -3\pi/4$ rad:

$$h(t) = k \left[1 - \frac{(0,28e^{-t/0,28} - 0,34e^{-t/0,34})}{-0,06} \right], \quad (97)$$

g) kąt startowy $\varphi = -\pi$ rad:

$$h(t) = k \left[1 - \frac{(0,32e^{-t/0,32} - 0,28e^{-t/0,28})}{0,04} \right]. \quad (98)$$

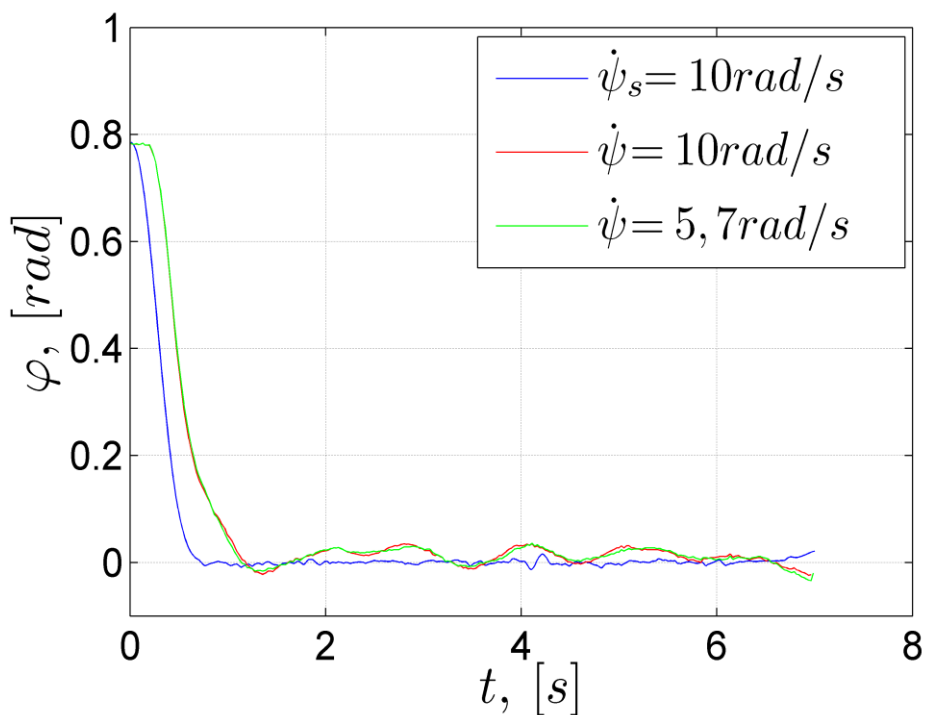
Poza przypadkiem z początkowym kątem skręcenia $\varphi = \pm \pi/4$, czasy inercji są do siebie bardzo zbliżone. Korzystając z zależności (92÷98) można opisać zachowanie koła samonastawnego i tą informację umieścić w algorytmie sterującym.

W tabeli 4 dokonano porównania wyników pomiarowych z wynikami oszacowania (indeks i), przy czym czas opóźnienia τ oraz różnica pomiędzy kątem początkowym a końcowym k zostały wyznaczone z przebiegów graficznych. Poza przypadkiem z początkowym kątem skręcenia koła samonastawnego równym π rad, wyniki oszacowania są zbieżne z wynikami otrzymanymi metodą graficzną, co potwierdza poprawność wykonanych badań.

Tabela 4. Wyniki pomiarowe i oszacowania czasów inercji dla robota rozpoczynającego ruch

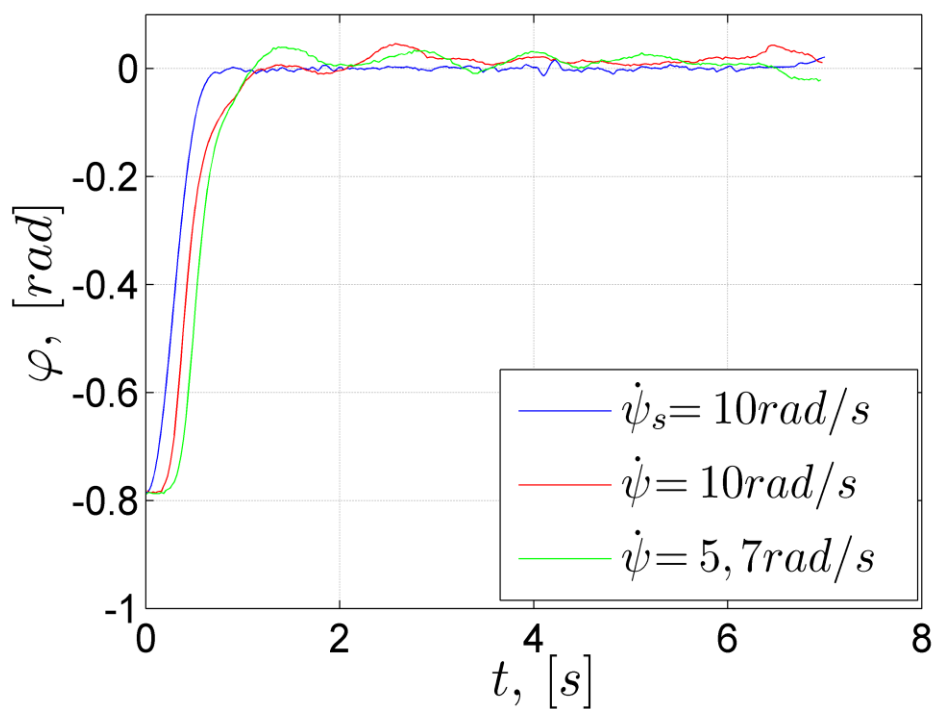
Kąt startowy φ [rad]	τ [s]	T_{1i} [s]	T_{2i} [s]	k	T_1 [s]	T_2 [s]
$-\pi$	0,86	0,4799	0,4799	3,16	0,32	0,28
$-\pi/2$	0,22	0,20794	0,20789	1,57	0,20	0,34
$\pi/2$	0,11	0,19459	0,19464	-1,58	0,23	0,28
$-\pi/4$	0,20	0,07774	0,22568	0,81	0,06	0,36
$\pi/4$	0,20	0,16946	0,16947	-0,76	0,08	0,40
$3\pi/4$	0,15	0,20650	0,20645	-2,36	0,25	0,32
$-3\pi/4$	0,12	0,23377	0,23375	2,39	0,28	0,34

Dodatkowo przeprowadzono symulację wybranych kątów i porównano z wynikami pomiarów, przy czym przeprowadzono pomiar dla dwóch prędkości $\dot{\psi} = 5,7$ rad/s oraz $\dot{\psi} = 10$ rad/s. Przy prędkości $\dot{\psi} = 5,7$ rad/s, wartość współczynnika głębokości modulacji PWM jest niewielka i dlatego silniki nie napędzają robota w sposób ciągły. W chwilach braku napędu ze strony silników, robot porusza się, wykorzystując zgromadzoną energię kinetyczną, w związku z czym, koło samonastawne może przy takim ruchu chwilami odbiegać od zadanej trajektorii. Dlatego też tę prędkością przyjęto do analizy. Dla prędkości $\dot{\psi} = 10$ rad/s zmniejszanie prądu do zera nie występuje, gdyż wartość współczynnika głębokości modulacji PWM jest znacznie większa. Z punktu widzenia przeprowadzonych badań, interesujące jest porównanie tych dwóch prędkości. Na wykresach zostały przedstawione wartości średnie z 10 próbek pomiarowych.



Rys. 67. Porównanie wyników symulacji i pomiarów dla kąta skręcenia koła samonastawnego $\varphi = \pi/4$ rad.

Wyniki przedstawione na rysunku 67 i 68 charakteryzują się dużą zbieżnością pomiarów z symulacją, a niewielka różnica wynika z przyjętego w symulacji współczynnika tarcia dla koła samonastawnego.



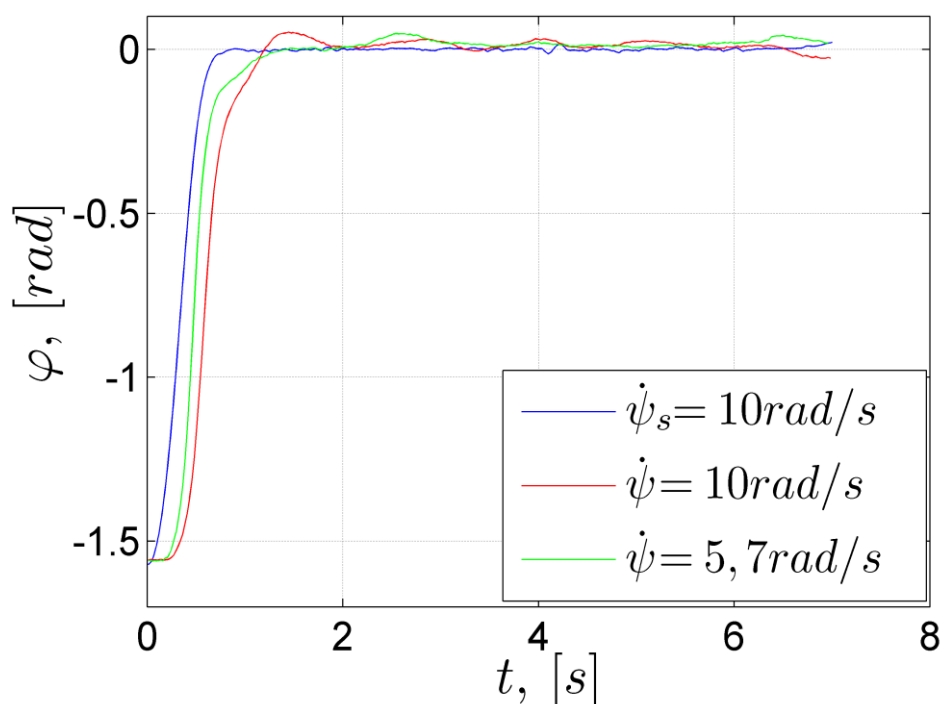
Rys. 68. Porównanie wyników symulacji i pomiarów dla kąta skręcenia koła samonastawnego $\varphi = \pi/4$ rad.

Na kolejnych rysunkach (69÷73), przedstawiono również wyniki dla kątów $\pm \pi/2$ rad oraz $\pm 3\pi/4$ rad. Dla dodatnich wartości kąta początkowego, koło samonastawne cechuje się mniejszym opóźnieniem przy większej prędkości ($\dot{\psi} = 10$ rad/s), jednak dla ujemnej wartości kąta, występuje sytuacja odwrotna, co jest spowodowane przez mniejsze tarcie mechaniczne w jednym z silników oraz tarcie mechaniczne na mocowaniu trzpienia, na którym jest zamocowany enkoder. Takie różnice można skompensować np. przez dokładniejsze łożyskowanie trzpienia, na którym zamocowany jest enkoder oraz lepszy dobór silników.

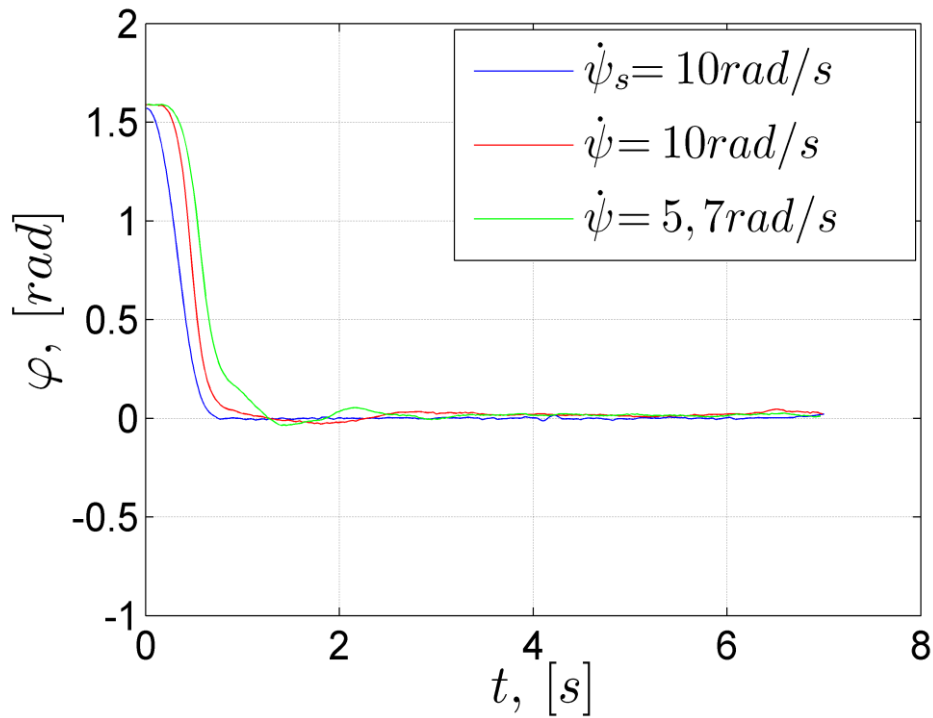
O ile przy kątach początkowych różnych od π rad, występuje duża zbieżność z symulacją, to przy kącie początkowym koła samonastawnego $\varphi = -\pi$ rad, różnica między symulacją a wynikami pomiarów jest znaczna. Wynika to z dwóch przyczyn:

- do symulacji przyjęto kąt początkowy nieznacznie mniejszy od $-\pi$ rad, gdyż przy wartości równej wartości $-\pi$ rad, koło samonastawne nie zmieniłoby położenia,

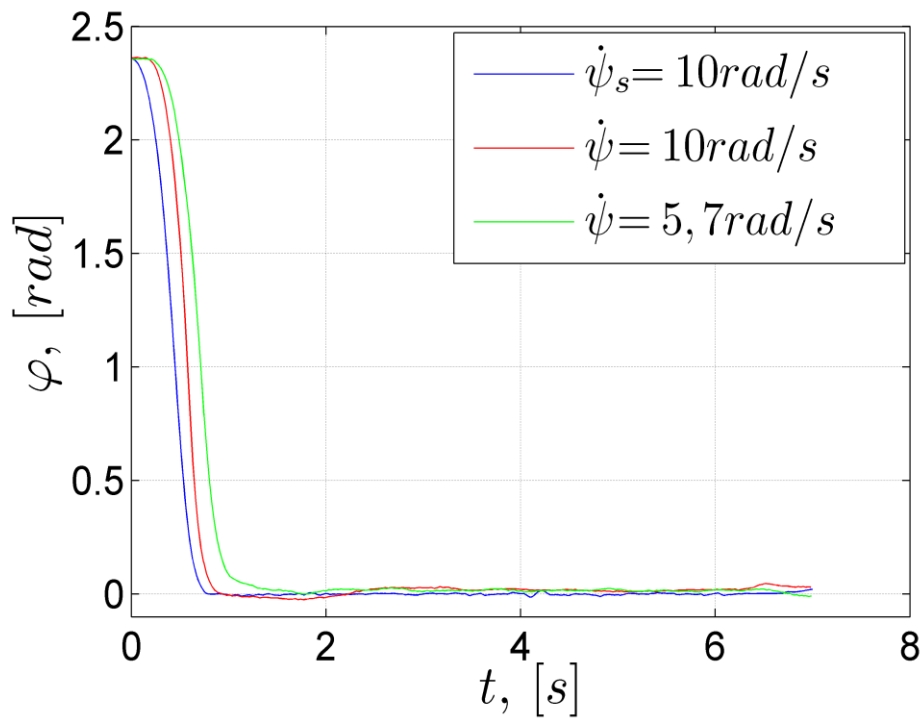
- uzyskanie kąta ustawienia koła samonastawnego równego $-\pi$ rad jest stosunkowo trudne, gdyż za każdym razem pojawia się błąd związany z rozdzielczością enkodera, a do tego dochodzi wpływ nierównej powierzchni. Warto również zwrócić uwagę, na końcową fazę ruchu robota, czyli hamowanie. Kąt skręcenia φ koła samonastawnego przyjmuje wtedy wartość ujemną, co ma związek z niedopasowaniem silników, gdyż jeden z silników ma mniejsze opory wewnętrzne (mechaniczne). Koło, które jest na nim zamocowane wykonuje minimalnie większą drogę (kąt obrotu) podczas hamowania, co powoduje w konsekwencji skręt koła samonastawnego.



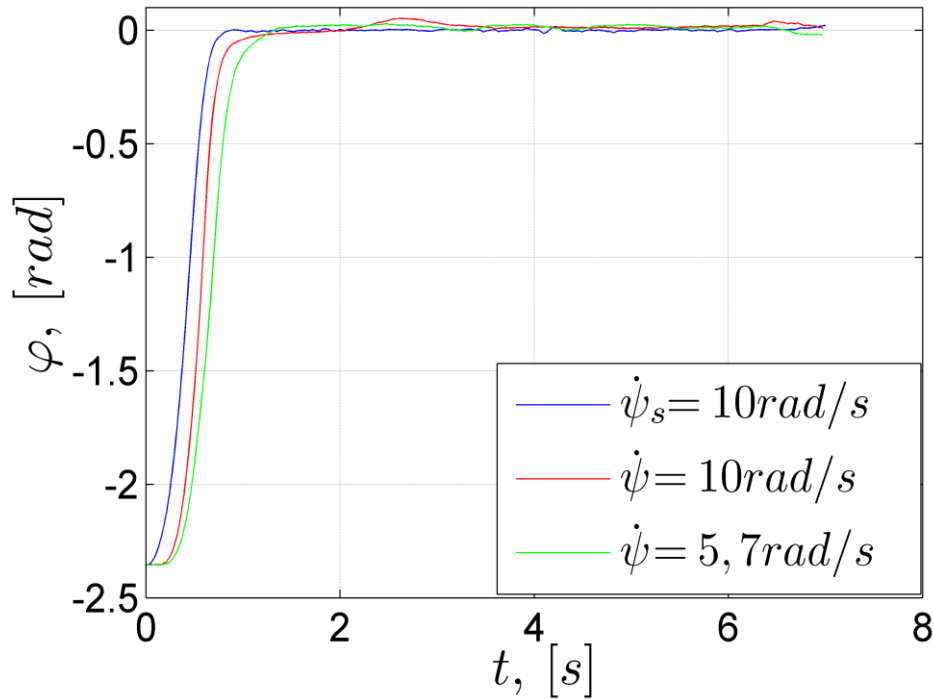
Rys. 69. Porównanie wyników symulacji i pomiarów dla kąta skręcenia koła samonastawnego $\varphi = -\pi/2$ rad.



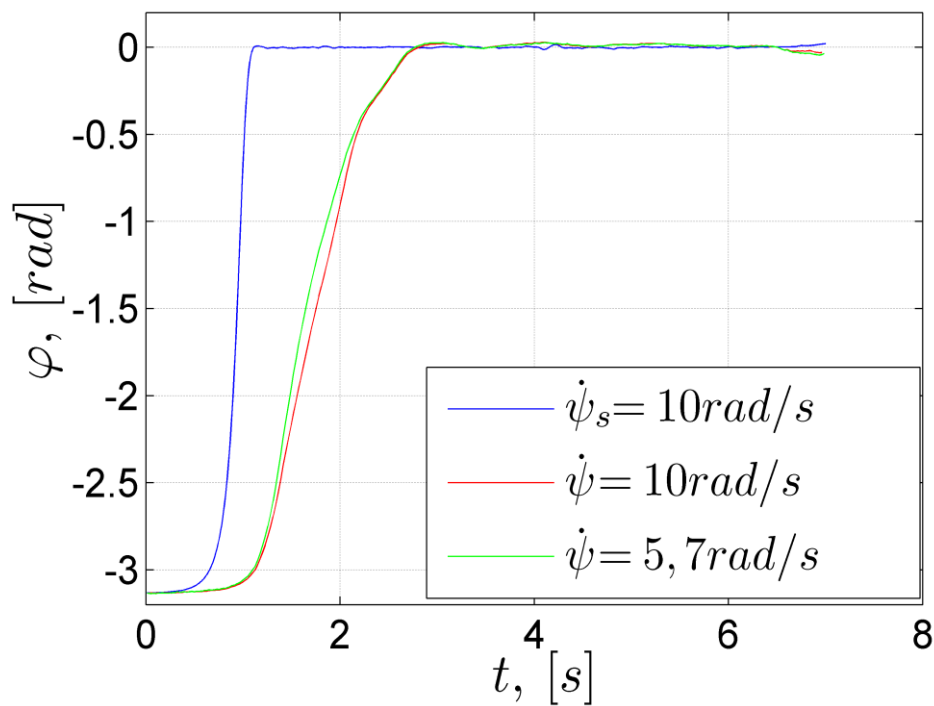
Rys. 70. Porównanie wyników symulacji i pomiarów dla kąta skręcenia koła samonastawnego $\varphi = \pi/2$ rad.



Rys. 71. Porównanie wyników symulacji i pomiarów dla kąta skręcenia koła samonastawnego $\varphi = 3\pi/4$ rad.



Rys. 72. Porównanie wyników symulacji i pomiarów dla kąta skręcenia koła samonastawnego $\varphi = -3\pi/4$ rad.

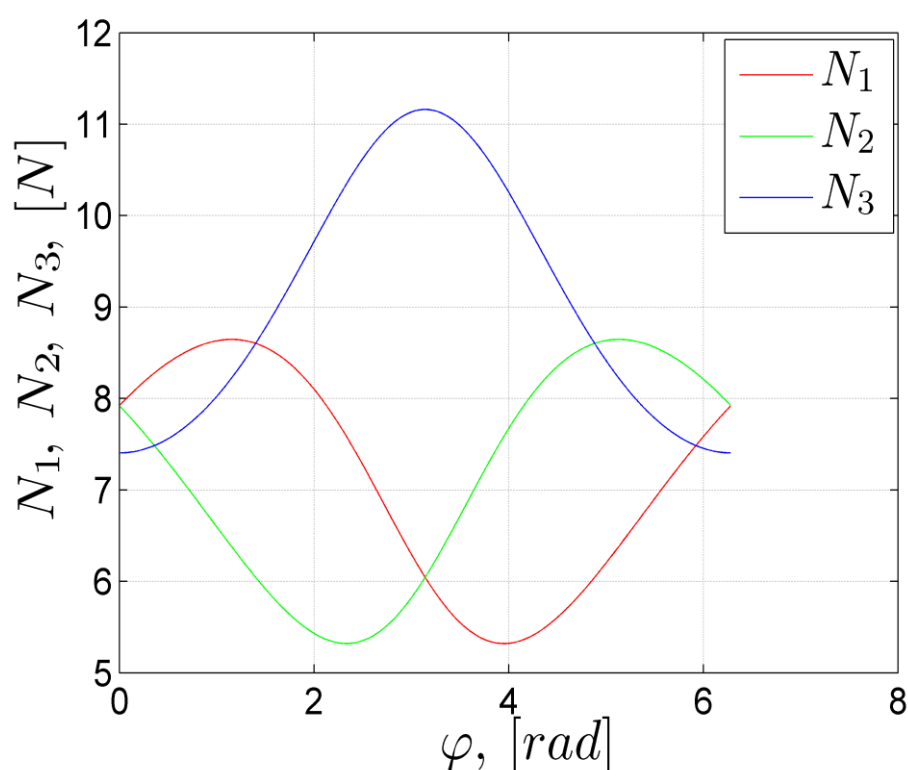


Rys. 73. Porównanie wyników symulacji i pomiarów dla kąta skręcenia koła samonastawnego $\varphi = -\pi$ rad.

Dla wszystkich analizowanych przypadków, wartości zmierzone zbiegają się z symulacją, co potwierdza poprawność określenia zachowania koła samonastawnego i pozwala na wykorzystanie tej informacji w algorytmie sterującym. Różnica przy kącie początkowym równym π rad wynika stąd, że wartości do oszacowania zostały wzięte z przebiegu uśrednionego (średnia arytmetyczna), a jak przedstawiono na rysunku 58, do uśrednienia wykorzystano 28 przebiegów pomiarowych. Dodatkowo, zaobserwowano wpływ oscylacji, w wyniku czego, proces szacowania wskazywał na obiekt inercyjny wyższego rzędu niż II-gi.

Powyzsze rozważania dotyczyły badania zachowania koła samonastawnego w trakcie ruchu. Dodatkowo, istnieje możliwość użycia informacji o kącie skręcenia koła samonastawnego do korekcji ruchu robota, co może w konsekwencji ograniczyć błędy wynikające z odometrii.

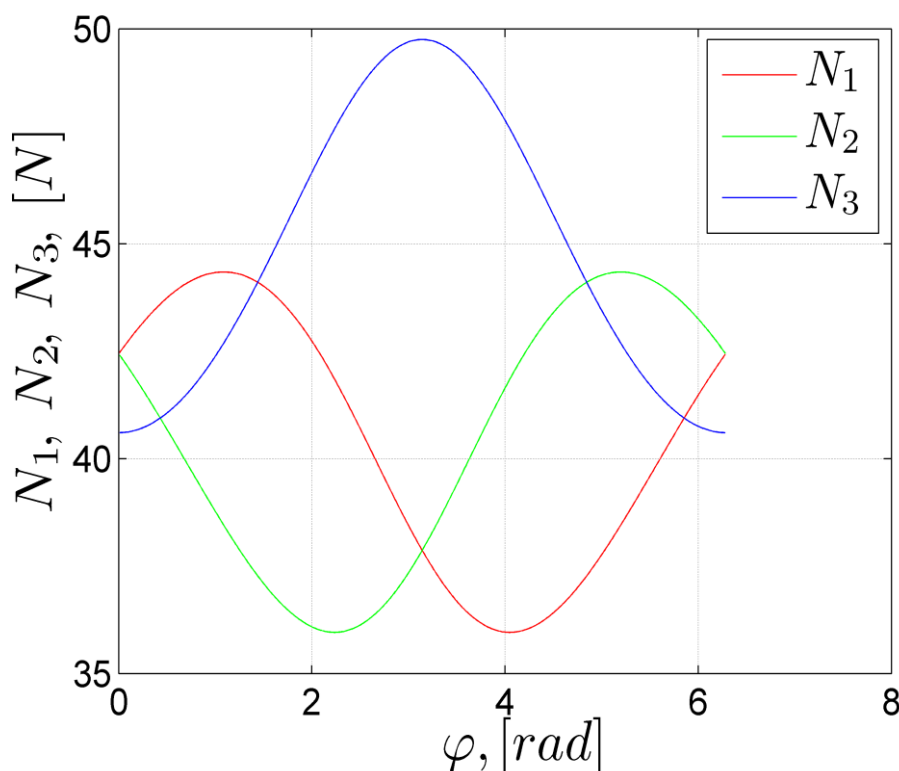
Koło samonastawne ma jeszcze jedną własność, która w dotychczasowej literaturze była pomijana, a mianowicie, wraz ze zmianą kąta skręcenia koła samonastawnego, zmieniają się siły nacisku kół na podłoże. Korzystając z równań (61÷63), można je wyznaczyć w sposób statyczny zmieniając kąt skręcenia φ koła samonastawnego. Wynik obliczeń tych równań, przedstawiono na poniższych rysunkach (74 i 75):



Rys. 74. Wyniki obliczania zmiany wartości sił nacisku dla robota eksperymentalnego.

Jak zostało przedstawione na rysunkach 74 i 75, przy skręceniu koła samonastawnego w stronę kół napędowych – przy kącie $\varphi = \pi$ rad, większość masy jest podtrzymywana przez

koło samonastawne, co jest bardzo istotne z punktu widzenia konstrukcji robota, gdyż nadmierne obciążenie koła samonastawnego, może doprowadzić do jego uszkodzenia. Przy zmianie kąta skręcenia koła samonastawnego, siły nacisku na kołach napędowych robota eksperymentalnego zmieniają się nawet o 30%, natomiast w robocie przemysłowym, o około 20%.



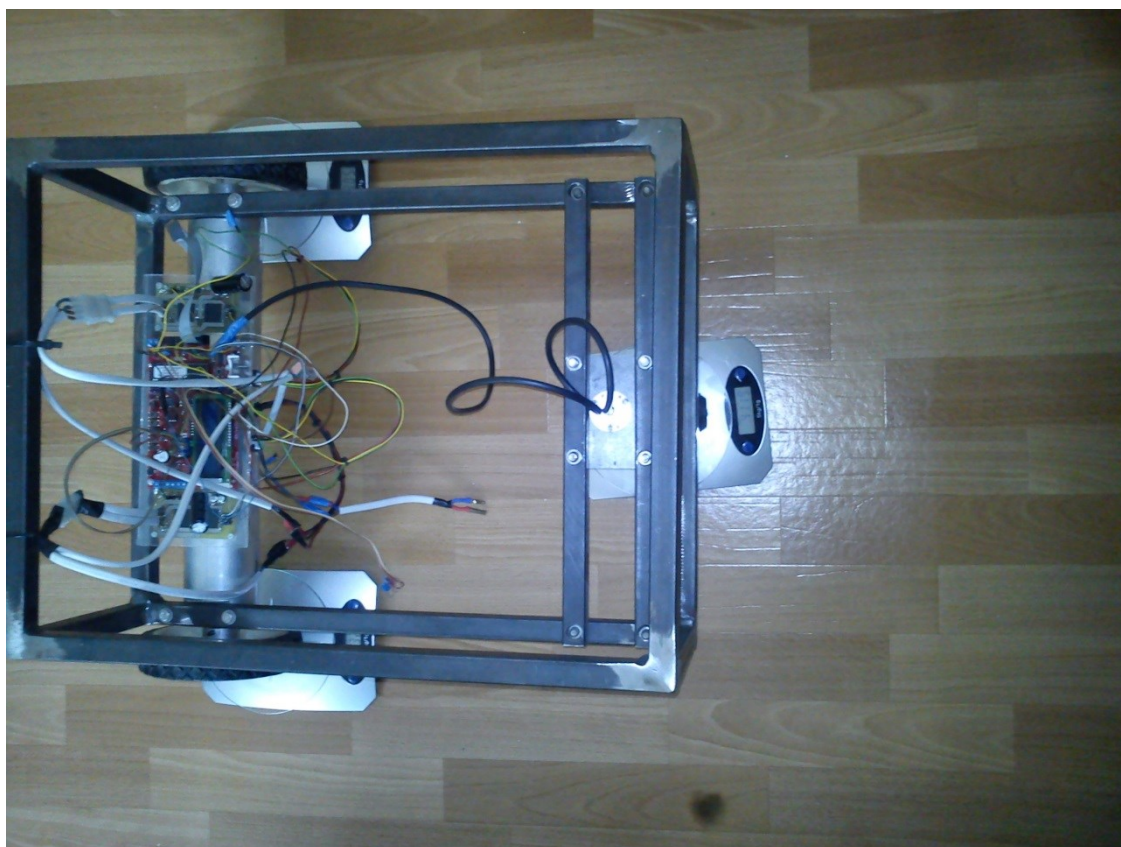
Rys. 75. Wyniki obliczenia zmiany wartości zmiany sił nacisku dla robota przemysłowego.

Aby zestawić wyniki obliczeń z rzeczywistymi wartościami, dokonano eksperymentu, polegającego na wykorzystaniu trzech takich samych wag i pomiarze zmian masy, w zależności od położenia koła samonastawnego. Błąd wskazania wag wynosił 1 g. Zmianę kąta skręcenia koła samonastawnego wykonywano co 10 stopni, a wartość kąta skręcenia odczytywano ze wskazań enkodera absolutnego. Układ pomiarowy przedstawiono na poniższych rysunkach 76 i 77. Wyniki pomiarowe przemnożono przez przyspieszenie ziemskie g i na tej podstawie uzyskano wartości siły nacisku, które porównano z wynikami uzyskanymi z równań (61÷63).

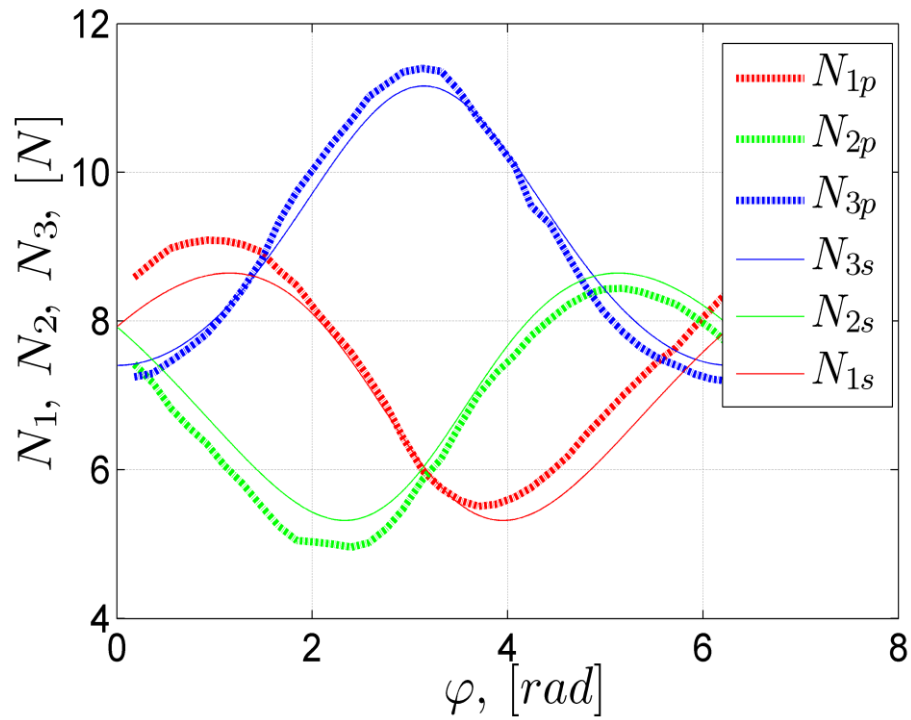
Na rysunkach 78 i 79 przedstawiono porównanie wyników obliczeń (indeks s), z wartościami uzyskanymi z eksperymentu, przy czym poprzez indeks p oznaczono wartości pomiarowe.



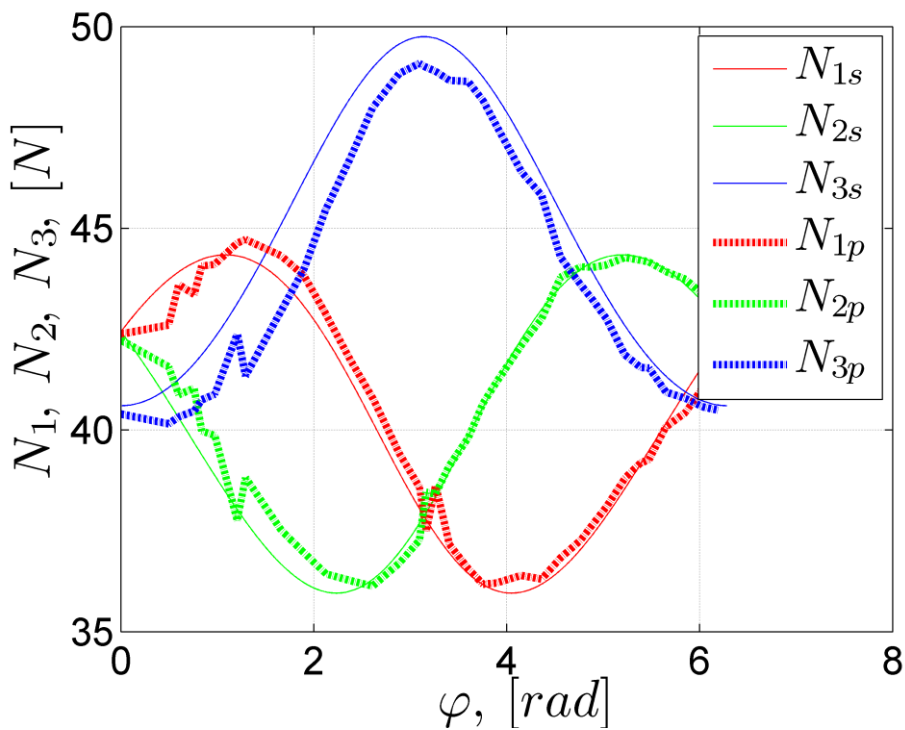
Rys. 76. Układ pomiarowy do pomiaru zmian wartości sił nacisku w robocie eksperymentalnym [106].



Rys. 77. Układ pomiarowy do pomiaru zmian wartości sił nacisku w robocie przemysłowym.



Rys. 78. Porównanie wartości sił nacisku uzyskanych z eksperymentu i obliczeń dla robota eksperymentalnego(*s*-wartości obliczone, *p*-wartości zmierzone) [106].



Rys. 79. Porównanie wartości sił nacisku uzyskanych z eksperymentu i obliczeń dla robota przemysłowego(*s*-wartości obliczone, *p*-wartości zmierzone).

Jak widać na rysunkach 78 i 79, uzyskano dużą zgodność wyników eksperymentu z wynikami obliczeń równań (61÷63), co potwierdza poprawność równań. Istotnym wnioskiem jest więc fakt, że zmiana kąta skręcenia koła samonastawnego powoduje zmianę sił nacisku kół na podłoże. Ta informacja może być użyta w sterowaniu, do poprawy ruchu robota mobilnego po trajektorii.

Do sterowania silnikami prądu stałego użyto regulatora PD. Struktura regulatora nie uwzględniającego zmiany sił nacisku kół napędowych na podłoże wygląda następująco:

$$\begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \end{bmatrix} = \frac{255}{k_{v_{\max}}} \begin{bmatrix} K_P(\alpha_{1d} - \alpha_1) + K_D(\dot{\alpha}_{1d} - \dot{\alpha}_1) \\ K_P(\alpha_{2d} - \alpha_2) + K_D(\dot{\alpha}_{2d} - \dot{\alpha}_2) \end{bmatrix} = \frac{255}{k_{v_{\max}}} \begin{bmatrix} K_{10} \\ K_{20} \end{bmatrix}. \quad (99)$$

Liczba 256 wynika z największego możliwego wypełnienia PWM i odpowiada maksymalnej prędkości ruchu robota. Z kolei regulator uwzględniający wpływ koła samonastawnego, a tym samym zmianę sił nacisku opisany jest jako [18]:

$$\begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \end{bmatrix} = \frac{255}{k_{v_{\max}}} \begin{bmatrix} K_{10} + k_N |N_1 - N_2| \\ K_{20} + k_N |N_1 - N_2| \end{bmatrix}, \quad (100)$$

gdzie: K_1 oznacza skalowany (przez 255) współczynnik głębokości modulacji PWM silnika dla koła 1, zaś K_2 oznacza skalowany współczynnik głębokości modulacji PWM koła 2, K_{10} i K_{20} oznaczają skalowane współczynniki głębokości modulacji PWM bez uwzględnienia wpływu koła samonastawnego i zmiany sił nacisków, $k_{v_{\max}}$ oznacza współczynnik odpowiadający maksymalnej prędkości robota ($v_{\max}=12$ rad/s dla robota eksperymentalnego lub $v_{\max}=18$ rad/s dla robota przemysłowego), K_P , K_D , k_N , k_φ oznaczają wzmocnienia, indeks d oznacza wartości zadane.

Dodatkowo w regulatorze uwzględniono różnicę pomiędzy kątem skręcenia koła samonastawnego wynikającym z zadanej trajektorii, a rzeczywistym kątem skręcenia tego koła. Dla dowolnej trajektorii można określić zadany kąt skręcenia koła samonastawnego φ_d , wraz z chwilowym promieniem skręcenia R . Wobec czego można zapisać zależność [17]:

$$\varphi_d = \arccos \left(\frac{-l_3 l + \sqrt{(l^2 R^2 + R^4 - R^2 l_3^2)}}{l^2 + R^2} \right), \quad (101)$$

$$R = \frac{(\dot{x}_A^2 + \dot{y}_A^2)^{3/2}}{\begin{vmatrix} \dot{x}_A & \dot{y}_A \\ \ddot{x}_A & \ddot{y}_A \end{vmatrix}}, \quad (102)$$

gdzie: φ_d – oznacza zadany kąta skręcenia koła samonastawnego, R – chwilowy promień skręcenia wynikający z zadanej trajektorii, \dot{x}_A, \dot{y}_A – prędkość punktu charakterystycznego A, \ddot{x}_A, \ddot{y}_A – przyspieszenie punktu charakterystycznego A. Różnicę pomiędzy wartością kąta zadanego a wskazaniem z enkodera, można zapisać następująco:

$$\Delta\varphi = \varphi_d - \varphi. \quad (103)$$

Pozwala to na modyfikację algorytmu sterującego do postaci:

$$\begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \end{bmatrix} = \frac{256}{k_{v_{\max}}} \begin{bmatrix} K_{10} + k_N |N_1 - N_2| + k_\varphi h^*(t - t_{z\Delta\varphi}) \Delta\varphi \\ K_{20} + k_N |N_1 - N_2| - k_\varphi h^*(t - t_{z\Delta\varphi}) \Delta\varphi \end{bmatrix}. \quad (104)$$

Przyjmując za czasy inercji największe wartości z tabeli 4, funkcję $h^*(t)$ można zapisać jako:

$$h^*(t - t_{z\Delta\varphi}) = \left[1 - \frac{(0,32e^{-(t-t_{z\Delta\varphi})/0,32} - 0,40e^{-(t-t_{z\Delta\varphi})/0,40})}{-0,08} \right], \quad (105)$$

przy czym $t_{z\Delta\varphi} = t$ jeśli $\Delta\varphi$ zmienia znak, co w konsekwencji powoduje, że każdorazowa zmiana $\Delta\varphi$ skutkuje tym, że funkcja $h^*(t - t_{z\Delta\varphi})$ poprawnie startuje z wartości zero. Ze względu na niewielką wartość czasu opóźnienia τ oszacowaną w trakcie ruchu robota w porównaniu do wartości otrzymanych dla przypadku, gdy robot rozpoczynał ruch, autor zdecydował się na pominięcie opóźnienia τ w równaniu (104 i 105).

Autor zdecydował się na implementację regulatora w taki sposób, jak w równaniu (104), gdyż jego zdaniem, to właśnie częstotliwość PWM i moc obliczeniowa mikrokontrolera, stanowi jedno z ograniczeń poprawnego sterowania. Ponadto w sterowaniu wykorzystano informację o chwilowym promieniu skrętu robota, zapisanego w równaniu (102), zamiast korzystać z obliczeń środka chwilowego obrotu robota, zaproponowanego w artykule [50].

Im wyższa częstotliwość PWM, tym sterowanie jest dokładniejsze, co wiąże się również z użyciem bardziej złożonych algorytmów sterowania, np. adaptacyjnego [75, 76, 77, 55, 15, 12], ślizgowego [78, 79, 80] lub algorytmów genetycznych [81]. Można również skorzystać z wielowarstwowego sterowania, tak jak zaproponowano w artykule [82], gdzie wykorzystano trzy warstwy sterowania: I warstwa dotyczy silników, do których użyto regulatora P lub PI, II warstwa sterowania zawiera regulator na zadaną pozycję, a w III warstwie użyty jest regulator wykorzystujący informację o dynamice robota. Sterowanie dynamiczne wymaga znajomości momentów i taki rodzaj sterowania przedstawiono w [83]. W przypadku, gdy moc obliczeniowa jest ograniczona, zdaniem autora korzystne jest użycie prostszych algorytmów sterowania szczególnie, gdy dodatkowym ograniczeniem jest częstotliwość taktowania mikrokontrolera. Dlatego też przyjęto, że sterowanie będzie występowało nie rzadziej niż co 1 ms, gdyż powyżej tej wartości sterowanie może być niewystarczające i robot wypadnie z zadanej trajektorii ruchu [84]. Równanie (104), to jedna z przykładowych implementacji regulatora, która wykorzystuje informację o zmianie kąta skręcenia koła samonastawnego.

Poniżej przedstawiono wyniki pomiarów dla algorytmu sterowania, z uwzględnieniem koła samonastawnego i bez uwzględnienia koła samonastawnego, podczas jazdy robota eksperymentalnego po trajektorii zbliżonej do cyfry osiem.

Na rysunku 80 przedstawiono wyniki pierwiastka błędów średniokwadratowych (RMSE), zdefiniowanych dla kąta obrotu ψ zastępczego koła napędowego umieszczonego w punkcie charakterystycznym A. Pierwiastek błędu średniokwadratowego Δw zdefiniowano następująco [56, 57, 85].

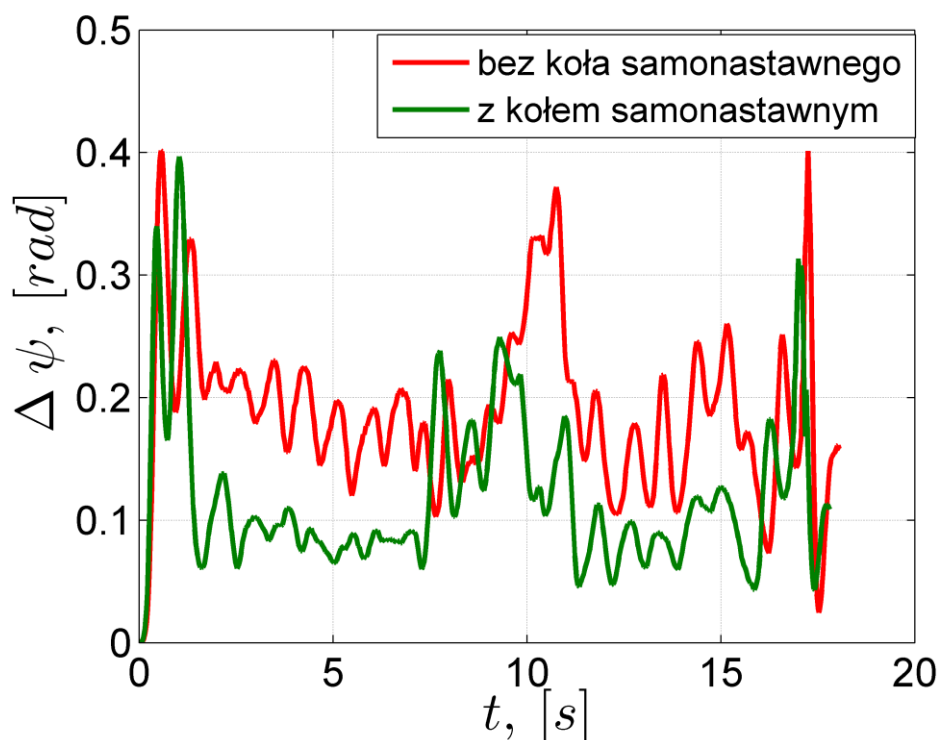
$$\Delta w = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (w_{di} - w_i)^2}, \quad (106)$$

gdzie: n – oznacza liczbę próbek, w_{di} – oznacza wartość zadaną, w_i – oznacza wartość zmierzoną lub obliczoną w danej chwili czasowej. Błąd średni $\Delta\bar{w}$ zdefiniowano następująco:

$$\Delta\bar{w} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (w_{di} - w_i), \quad (107)$$

gdzie: n – oznacza liczbę próbek, w_{di} – oznacza wartość zadaną, w_i – oznacza wartość zmierzoną lub obliczoną w danej chwili czasowej. W dalszym ciągu pracy zmienna w będzie oznaczać, w zależności od rozważanego kontekstu albo kąt obrotu ψ zastępczego koła napędowego, albo kąty obrotu α_1, α_2 kół napędowych, albo kąt skręcenia φ koła samonastawnego.

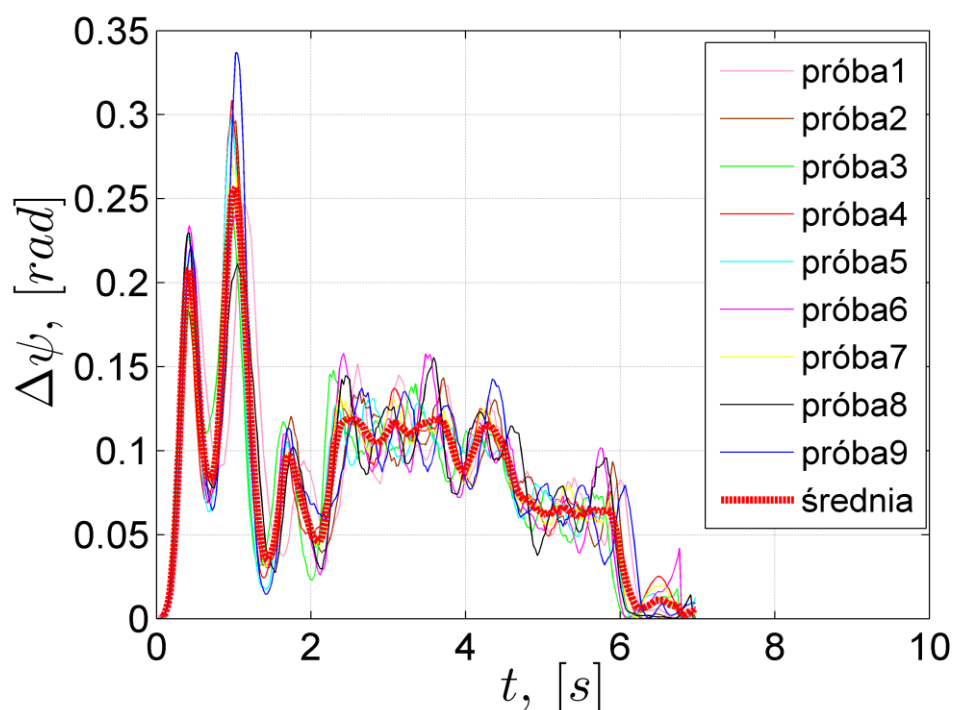
Dokonano pomiaru przemieszczenia punktu charakterystycznego A, dla robota poruszającego się z prędkością $\dot{\psi}=5,7$ rad/s. Dla algorytmu sterującego bez koła samonastawnego, pierwiastek z błędu średniokwadratowego wyniósł $\Delta\psi=0,43$ rad, natomiast dla algorytmu uwzględniającego wpływ koła samonastawnego pierwiastek z błędu średniokwadratowego wyniósł $\Delta\psi=0,35$ rad. Wynik pomiaru przedstawiono na rysunku 80.



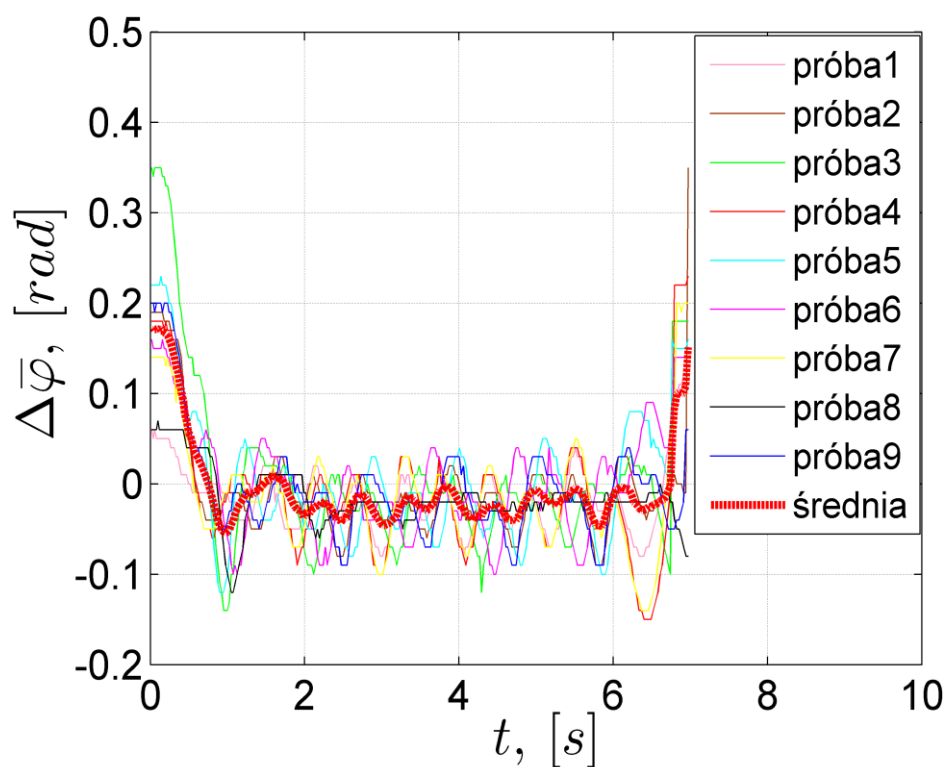
Rys. 80. Wyniki porównania algorytmu uwzględniającego koło samonastawne i bez koła samonastawnego.

Ponadto dokonano sprawdzenia, czy korekcja kąta skręcenia koła samonastawnego, wpływa na poprawę ruchu robota mobilnego po trajektorii. W tym celu zbadano ruch robota eksperymentalnego po prostej w następującej konfiguracji: przez 1 sekundę robot przyśpieszał, następnie poruszał się przez 6 sekund z prędkością 5,7 rad/s, po czym przez 1 sekundę hamował. Warto zwrócić uwagę na to, że podczas jazdy po prostej, siły nacisku kół napędowych o podłoże są sobie równe. Poniżej przedstawiono wyniki pomiaru dla przypadku, w którym wpływ koła samonastawnego był uwzględniany i pomijany. Na rysunku 81 przedstawiono wyniki pomiaru pierwiastków błędów średniokwadratowych kąta obrotu

ψ zastępczego koła napędowego, dla przypadku, w którym wpływ koła samonastawnego jest pomijany w sterowaniu. Na rysunku 82 zaprezentowano błędy średnie skręcenia koła samonastawnego.

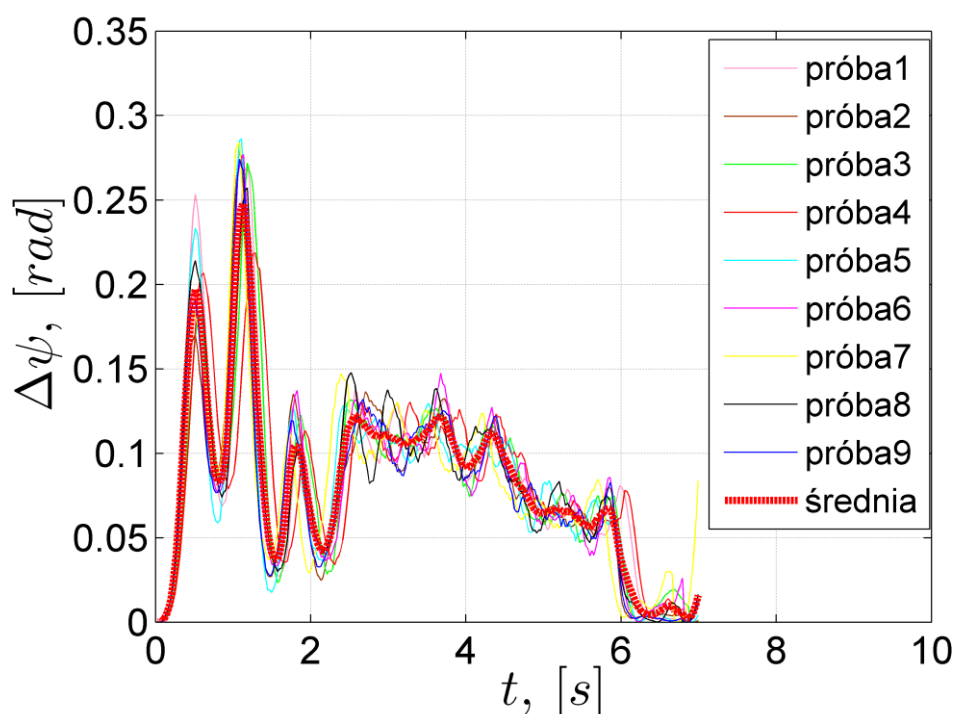


Rys. 81. Pierwiastki z błędów średniokwadratowych kąta obrotu ψ zastępczego koła napędowego bez uwzględnienia wpływu koła samonastawnego w algorytmie sterującym.

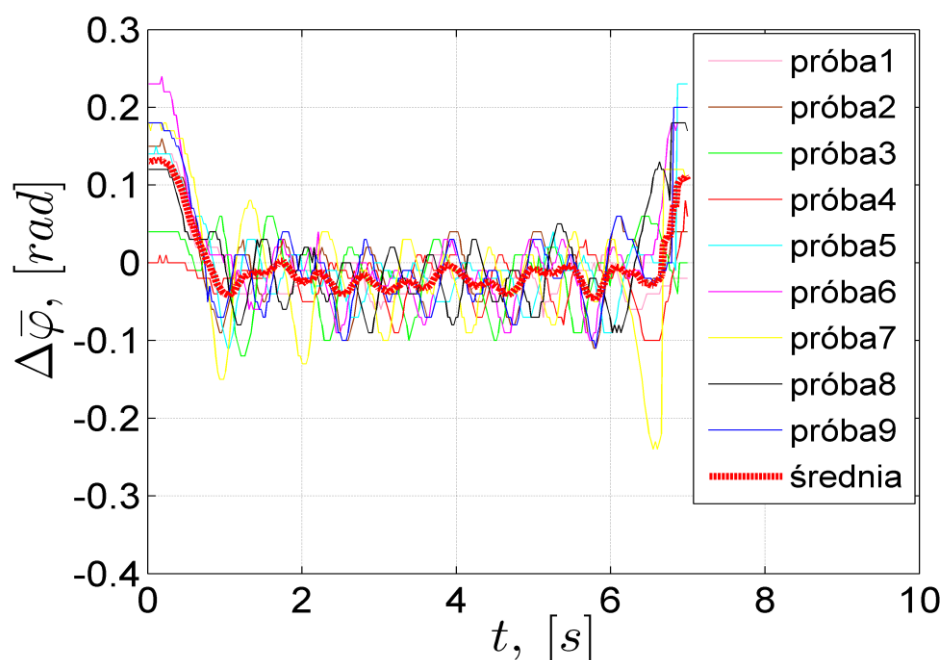


Rys. 82. Średnie błędy skręcenia koła samonastawnego bez uwzględnienia wpływu koła samonastawnego w algorytmie sterującym.

Na rysunkach 83 i 84 przedstawiono wyniki pomiaru dla przypadku, w którym uwzględnione jest koło samonastawne w sterowaniu. Największe błędy pojawiły się na początku i na końcu ruchu, czyli podczas przyśpieszania i hamowania. Koła napędowe wprawiają w ruch robota, jednak ze względu na opory mechaniczne, koła te nie startują równocześnie, co powoduje przesunięcie punktu charakterystycznego A od zadanej trajektorii oraz skręcenie koła samonastawnego.



Rys. 83. Pierwiastki z błędów średniokwadratowych kąta obrotu ψ zastępczego koła napędowego z uwzględnieniem wpływu koła samonastawnego w sterowaniu.

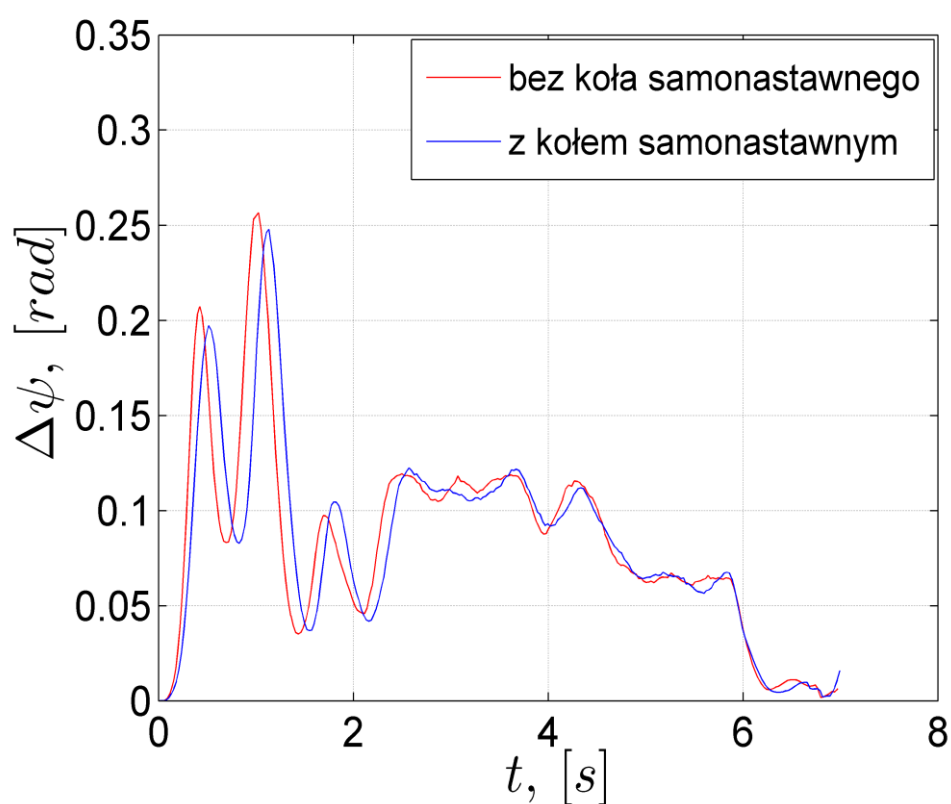


Rys. 84. Średnie błędy skręcenia koła samonastawnego z uwzględnieniem wpływu koła samonastawnego w sterowaniu.

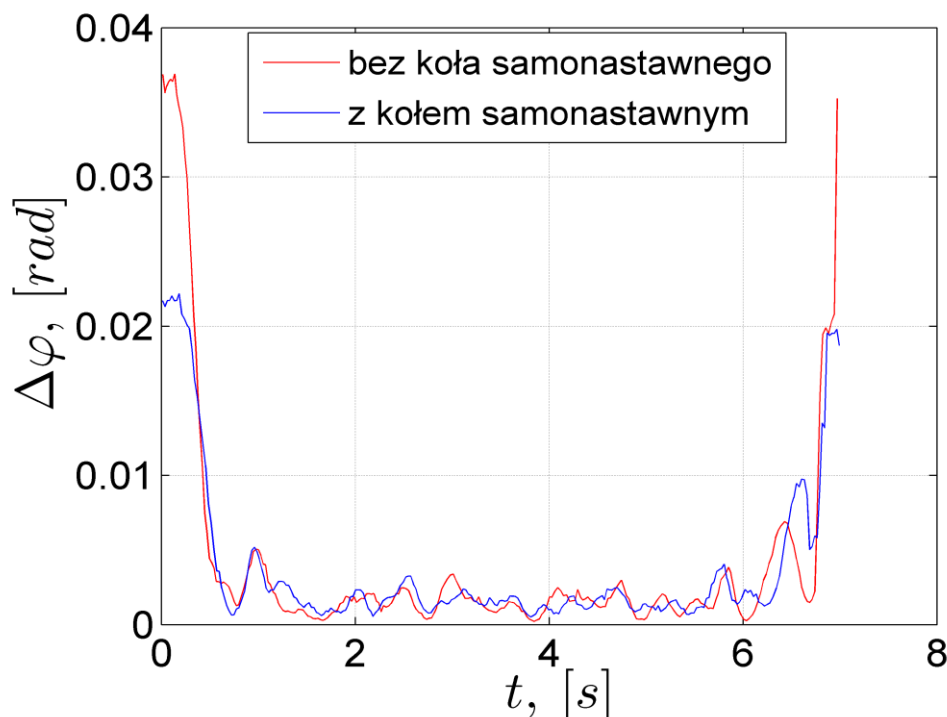
Przy hamowaniu robota występuje podobne zjawisko, bowiem ze względu na opory mechaniczne, koła posiadają różne tarcia mechaniczne, w związku z czym następuje przemieszczenie punktu charakterystycznego A oraz skręcenie koła samonastawnego. Poniżej przedstawiono uzyskane wartości błędów:

- pierwiastek z błędu średniokwadratowego kąta obrotu ψ koła zastępczego umieszczonego w punkcie charakterystycznym A bez uwzględnienia koła samonastawnego w sterowaniu wyniósł: $\Delta\psi=0,290$ rad. Dla przypadku z uwzględnieniem skrętu koła samonastawnego w sterowaniu, pierwiastek z błędu średniokwadratowego kąta obrotu ψ koła zastępczego umieszczonego w punkcie charakterystycznym A wyniósł: $\Delta\psi=0,287$ rad.
- pierwiastek z błędu średniokwadratowego skręcenia koła samonastawnego bez uwzględnienia tego koła w sterowaniu wyniósł: $\Delta\varphi=0,007$ rad. Dla przypadku z uwzględnieniem skrętu koła samonastawnego w sterowaniu, pierwiastek z błędu średniokwadratowego skręcenia koła samonastawnego wyniósł: $\Delta\varphi=0,003$ rad,
- błąd średni kąta obrotu koła 1 bez uwzględnienia koła samonastawnego wyniósł: $\Delta\bar{\alpha}_1=0,190$ rad, natomiast dla koła 2 wyniósł: $\Delta\bar{\alpha}_2=0,175$ rad. Dla przypadku z uwzględnieniem skrętu koła samonastawnego w sterowaniu, błąd średni kąta obrotu koła 1 wyniósł: $\Delta\bar{\alpha}_1=0,188$ rad, natomiast dla koła 2 wyniósł: $\Delta\bar{\alpha}_2=0,171$ rad.

Poniżej porównano regulator uwzględniający i nie uwzględniający informacji z koła samonastawnego.



Rys. 85. Porównanie kąta obrotu ψ dla zastępczego koła napędowego umieszczonego w punkcie charakterystycznym A.



Rys. 86. Porównanie pierwiastków z błędów średniokwadratowych kąta skręcenia koła samonastawnego.

3.3. Zastosowanie filtrów sygnałów pomiarowych

Dane zbierane w trakcie pomiaru mogą być zakłócone, co w konsekwencji może wpływać na układ regulacji i robot może popełniać większe błędy podczas poruszania się po zadanej trajektorii. W literaturze opisane są różne metody filtracji, począwszy od najprostszych będących przykładowo estymatorami wykorzystującymi metodę Rungego-Kutty II-go rzędu [86], na filtrach Kalmana skończywszy [45]. Ze względu na ograniczenia wynikające z zastosowanego mikrokontrolera, skoncentrowano się na najprostszych filtrach. W tym celu dokonano porównania filtru uśredniającego, z algorytmem do całkowania numerycznego Gear'a III-go rzędu [87]. Uśrednianie dla filtru uśredniającego wykonywano z dziesięciu próbek. Algorytm całkowania numerycznego Gear'a od I-go do III-go ma postać [87]:

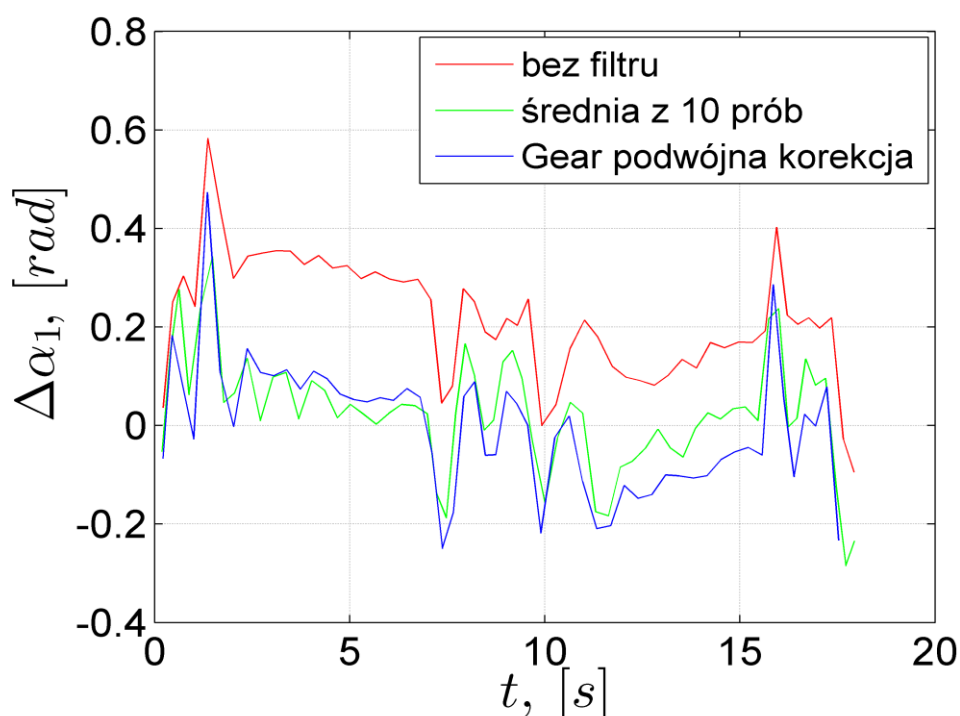
$$x_{n+1} = x_n + h[f(x_{n+1}, t_{n+1})], \quad (108)$$

$$x_{n+1} = \frac{4}{3}x_n - \frac{1}{3}x_{n-1} + h\left[\frac{2}{3}f(x_{n+1}, t_{n+1})\right], \quad (109)$$

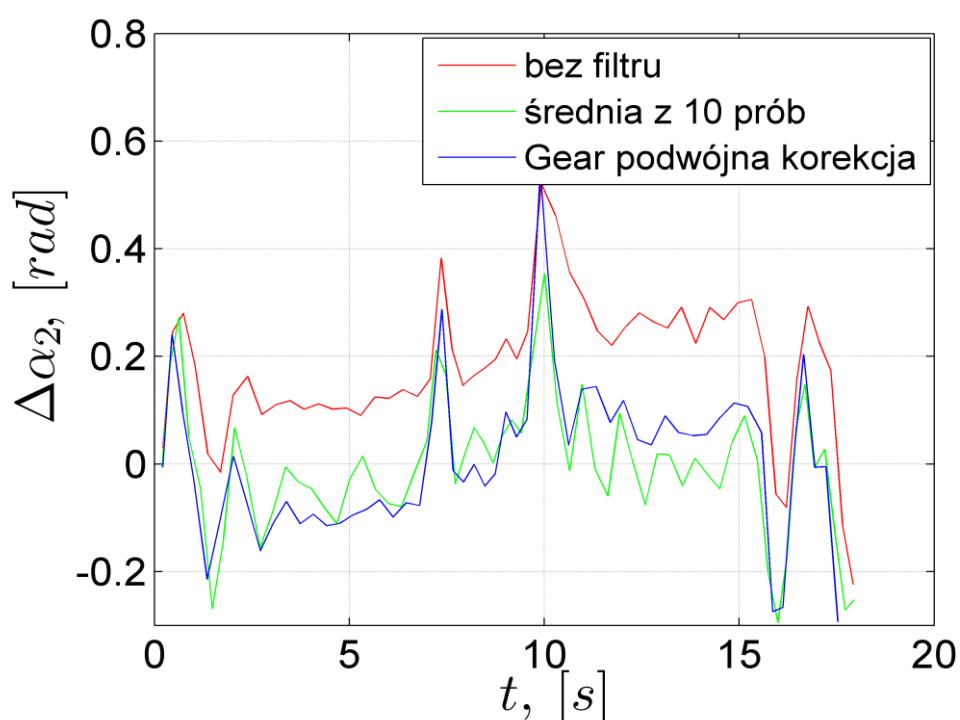
$$x_{n+1} = \frac{18}{11}x_n - \frac{9}{11}x_{n-1} + \frac{2}{11}x_{n-2} + h\left[\frac{6}{11}f(x_{n+1}, t_{n+1})\right]. \quad (110)$$

Dla pierwszego punktu ruchu, wykorzystano zależność (108), dla drugiego punktu zależność (109), a następnie dla kolejnych zależność (110).

Sprawdzenia dokonano dla trajektorii zbliżonej do cyfry osiem. Porównano zatem wyniki otrzymane z pomiarów bez użycia filtru, z użyciem średniej z dziesięciu pomiarów i wyników z algorytmu Gear'a III-go rzędu (108) z podwójną korekcją, dla którego, po zakończeniu etapu startowego, uśrednienie realizowano na podstawie czterech próbek.



Rys. 87. Pierwiastki z błędów średniokwadratowych obrotu koła 1.



Rys. 88. Pierwiastki z błędów średniokwadratowych obrotu koła 2.

Wyniki przeprowadzonych pomiarów przedstawiono na rysunkach 87 i 88. Dla filtra uśredniającego uzyskano zbliżone wyniki, jak dla filtra korzystającego z całkowania numerycznego Gear'a III-go rzędu, z podwójną korekcją. Pierwiastki z błędów średniokwadratowych dla obu tych filtrów są o połowę mniejsze aniżeli dla pomiaru nie używającego żadnego filtra. Każdy filtr może być traktowany jako estymator, tak jak postąpiono w artykule [86], gdzie jako estymatora użyto metody do całkowania numerycznego Rungego-Kutty II-go rzędu. W artykule [88], jako estymatory użyto również metod do całkowania numerycznego, co zmniejszyło błędy po trajektorii.

Podsumowanie

W podrozdziale 3.2 zostały przedstawione dwie konstrukcje robotów mobilnych: eksperymentalnego, zdolnego przewieźć ładunek do 2 kg oraz przemysłowego, który może przewieźć ładunek do 80 kg. Została omówiona budowa tych robotów, zastosowane mikrokontrolery oraz czujniki. Dodatkowo, zostały również przedstawione moduły Bluetooth (nadawczy i odbiorczy), które umożliwiły transmisję danych. W tym rozdziale dokonano analizy zachowania koła samonastawnego, określono własności koła samonastawnego oraz opisano zachowanie koła samonastawnego za pomocą inercji II-go rzędu z opóźnieniem. Zmiana kąta skręcenia skutkuje zmianą sił nacisku kół o podłoże, co wcześniej było pomijane w literaturze. Następnie uwzględniono w układzie sterującym informację o kącie skręcenia koła samonastawnego, co spowodowało zmniejszenie pierwiastków błędów średniokwadratowych po trajektorii.

W rozdziale udowodniono wpływ części mechanicznej koła samonastawnego, którego skręt powoduje zmianę sił nacisku kół o podłoże. Wyniki symulacji zweryfikowano poprzez przeprowadzenie pomiaru, przy czym uzyskano zbieżność pomiędzy wartościami zmierzonymi a zasymulowanymi. Ponadto przeprowadzono badanie ruchu koła samonastawnego skręconego o dowolny kąt początkowy i obserwowano, w jaki sposób to koło ustali się względem kąta zadanego. Ruch koła samonastawnego był zbliżony do ruchu obiektu inercyjnego II-go rzędu, co opisano równaniem (105). Następnie sprawdzono wpływ korekcji skręcenia koła samonastawnego, dla ruchu po trajektorii i otrzymano poprawę zgodności ruchu zadanego i otrzymanego.

Rozdział 4

Analiza energetyczna robota mobilnego

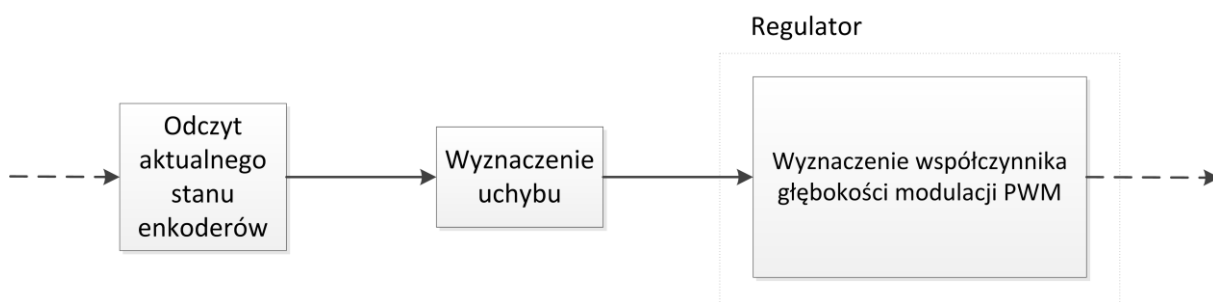
W celu wsparcia tezy dokonano analizy wpływu części energoelektronicznej i napędowej. Analiza taka weryfikuje model robota a jej poprawność potwierdza poprawność

wnioskowania wykorzystującego ten model. Celem rozdziału była identyfikacja parametrów energoelektronicznych i mechanicznych robota oraz weryfikacja wyników symulacji na podstawie wyników pomiarowych. Mając w pełni zidentyfikowany model, można podjąć dyskusję na temat zużycia energii przez robota mobilnego trójkołowego.

4.1. Implementacja uproszczonego modelu przekształtnika

W tej części pracy zostanie przedstawiona analiza zachowania się robota eksperymentalnego pod względem energetycznym.

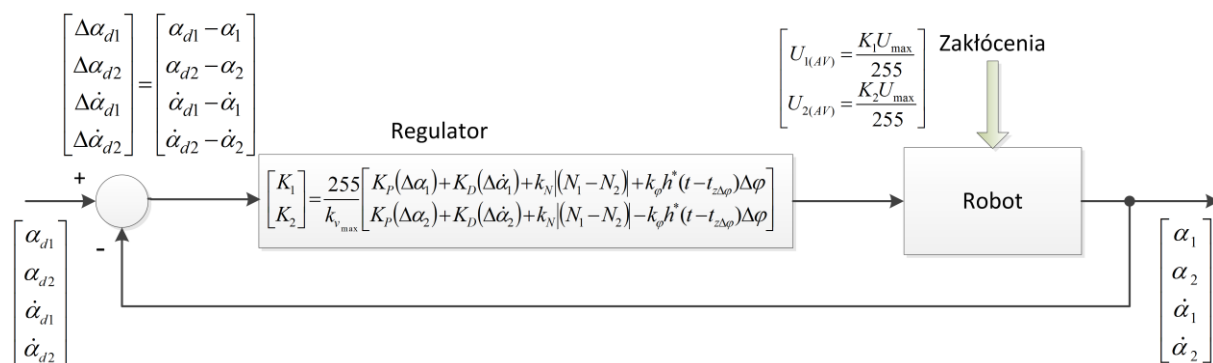
Straty energetyczne zależą od założonego algorytmu (typu) sterowania. Schemat blokowy takiego algorytmu przedstawiono na rysunku 89:



Rys. 89. Schemat ideowy algorytmu sterowania robota.

Na rysunku 90 zamieszczono również układ automatycznej regulacji, jaki zastosowano w omawianym robocie mobilnym trójkołowym z kołem samonastawnym. Układ sterujący realizowany jest za pomocą mikrokontrolera Atmega 32. Regulator zaimplementowano w części realizującej PWM. Skalowane współczynniki głębokości modulacji PWM oznaczono K_1 i K_2 odpowiednio dla koła 1 i 2. Robot (obiekt) porusza się po zadanej trajektorii, w której α_{1d} , α_{2d} oznaczają zadany obrót kół 1 i 2, a $\dot{\alpha}_{1d}$, $\dot{\alpha}_{2d}$ oznaczają prędkości zadane dla kół 1 i 2. Różnica pomiędzy wartościami zadanymi i uzyskanymi w wyniku ruchu robota jest użyta w regulatorze do wyznaczenia współczynnika głębokości modulacji PWM. W realizowanym układzie PWM, zastępczy (skalowany) współczynnik jest w zakresie $0 \div 255$. Sygnałem sterującym są napięcia uzyskane z PWM, zależne od skalowanych współczynników głębokości modulacji K_1 – dla silnika z kołem napędowym 1 oraz K_2 – dla silnika z kołem napędowym 2. Poprzez U_{max} oznaczono maksymalne napięcie zasilania ze źródła ($U_{max}=12,0$ V), natomiast $U_{1(AV)}$ i $U_{2(AV)}$ oznaczają średnie napięcie sterujące, które jest podane na silniki napędowe. Gdy parametry K_1 i K_2 będą równe 255, to wtedy całe napięcie zasilania jest podawane na silniki. Gdy uchyb maleje, to skalowane współczynniki głębokości modulacji również maleją, natomiast wzrost uchybu, powoduje wzrost wartości tych współczynników. Takie proste podejście umożliwia sterowanie robotem

mobilnym. Należy jednak zwrócić uwagę, na to co się dzieje, gdy skalowane współczynniki głębokości modulacji K_1 bądź K_2 są małe (do około 20% wartości maksymalnej). Wtedy robot może nie ruszyć z miejsca ze względu na zbyt mały moment rozruchowy. Konsekwencją tego jest nagrzewanie się uzwojenia w silnikach. Dlatego przy projektowaniu ramp rozruchowych, warto ten fakt uwzględnić w sterowaniu, żeby bez potrzeby nie nagrzewać uzwojenia i generować strat. Modelowania elementów energoelektronicznych dokonano bazując na artykułach [89÷93]. W artykułach [89, 91] zostało przedstawione proste zastosowanie modeli uśrednionych w modelowaniu przetwornic. W artykule [93] omówiono modelowanie przetwornic z poprawą współczynnika mocy. Sterowanie przetwornicy DC/DC za pomocą 8-bitowego mikrokontrolera przedstawiono w artykule [92]. W artykule [90] przedstawiono modelowanie w środowisku MATLAB. Jako punkt wyjścia przyjęto modelowanie za pomocą modeli uśrednionych, następnie do uśrednionych modeli obwodowych zastosowano w miarę zaawansowany model układu tranzystor IGBT i połączona przeciwrównoległe dioda. W pracy [15], wykonano sterowanie przy pomocy sterownika PLC firmy GE Fanuc serii UAL004 dla algorytmu sterującego jak i sterowania PWM dla silników napędowych. Algorytm przedstawiony na rysunku 90 jest prostszy, co pozwala na jego uniwersalne zastosowanie zarówno do prostych jak i zaawansowanych rozwiązań. Algorytm ten cechuje się nowym rozwiązaniem polegającym na uwzględnieniu w sterowaniu kąta skręcenia koła samonastawnego i wynikającego z tego kąta skręcenia, zmiennych w czasie sił nacisku kół na podłoże.



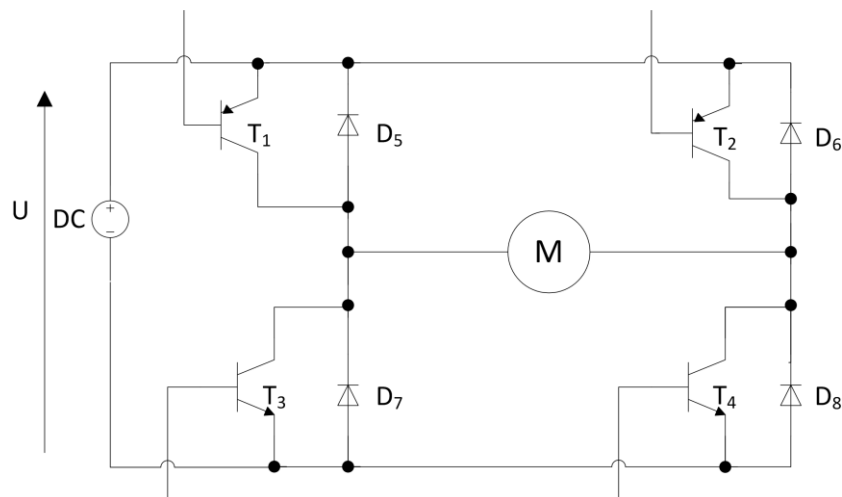
Rys. 90. Algorytm sterujący zaimplementowany w omawianym robocie.

Tak zdefiniowany algorytm zaimplementowano do robota mobilnego i zasymulowano.

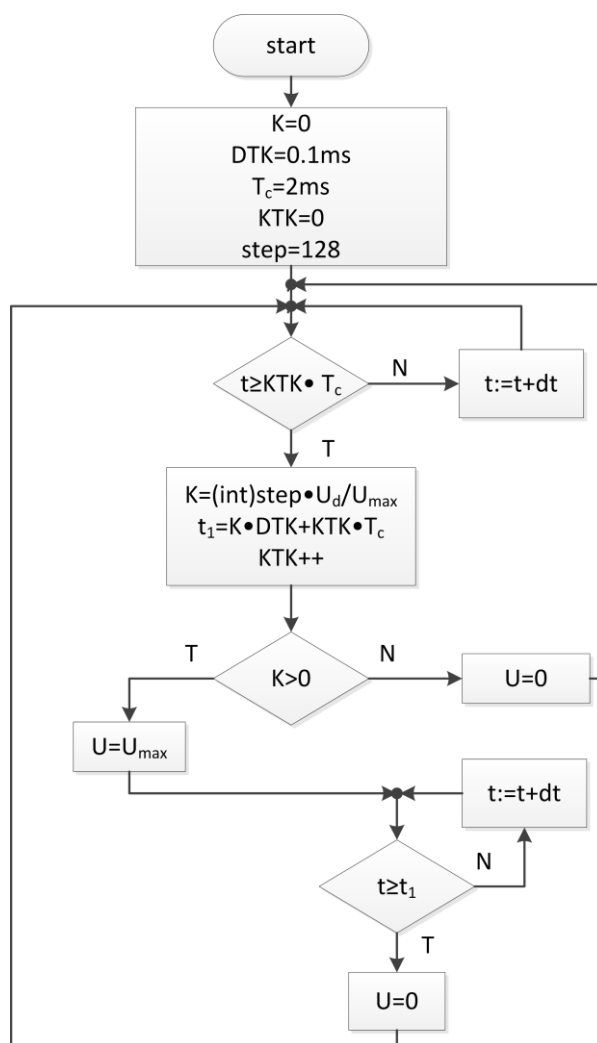
W przypadku symulacji możliwe są trzy podejścia z punktu widzenia energoelektroniki:

- pełne odwzorowanie przekształtnika – w symulacjach wymagana jest bardzo duża moc obliczeniowa, aby poprawnie zasymulować zachowanie elementów energoelektronicznych,
- brak uwzględnienia przekształtnika – najczęściej spotykane w literaturze rozwiązanie, które w znaczny sposób przyspiesza proces symulacji. Przy takim podejściu nie da się oszacować strat w układzie robota, a tym samym podjąć dyskusji na temat bilansu energetycznego robota mobilnego,

- c) uwzględnienie uproszczonego przekształtnika – jest to pewien kompromis pomiędzy symulacją pełnego modelu przekształtnika, a brakiem symulacji przekształtnika. Takie podejście pozwala na oszacowanie strat na elementach energoelektronicznych, przy względnie krótkim czasie symulacji. Takie rozwiązanie zastosowano w niniejszej pracy i zostanie ono szerzej omówione.



Rys. 91. Układ mostka H.



Rys. 92. Algorytm sterowania modulacji szerokości impulsu PWM (Pulse Width Modulation) [17].

Układ przekształtnika zazwyczaj realizowany jest za pomocą mostka H, który przestawiono na rysunku 91, gdzie: T_1, T_2, T_3, T_4 – oznaczają tranzystory, D_5, D_6, D_7, D_8 oznaczają diody a M oznacza silnik.

Cały algorytm modulacji szerokości impulsu PWM, który zawiera uproszczony przekształtnik [17], został przedstawiony na rysunku 92, przy czym $DTK=0,1ms$, U_d – wektor napięć sterujących otrzymany z regulatora na podstawie wektora momentów zadanych \mathbf{M}_d , \mathbf{K} – wektor nieskalowanego współczynnika głębokości modulacji. Ponadto przyjęto, że okres wypracowania decyzji dotyczącej pojedynczego impulsu PWM wynosi $T_c = 2 ms$, a dt – oznacza krok czasowy.

Wektor napięć sterujących z regulatora wynosi:

$$\mathbf{U}_d = \begin{bmatrix} U_{d1} \\ U_{d2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_{a1}M_{d1} / \mathcal{G}\phi) + \mathcal{G}\phi\dot{\alpha}_1 \\ (R_{a2}M_{d2} / \mathcal{G}\phi) + \mathcal{G}\phi\dot{\alpha}_2 \end{bmatrix}, \quad (111)$$

gdzie: \mathcal{G} oznacza przekładnię ($\mathcal{G}=55,7$) a ϕ oznacza stałą momentu. W procesie symulacji uwzględniono również równania silnika DC, które zapisano w następującej formie [17, 18]:

$$\ddot{\mathbf{Q}} = \begin{bmatrix} \ddot{Q}_1 \\ \ddot{Q}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (U_{1out} - R_{a1}\dot{Q}_1 - e_{a1}) / L_a \\ (U_{2out} - R_{a2}\dot{Q}_2 - e_{a2}) / L_a \end{bmatrix}, \quad (112)$$

gdzie: \dot{Q}_1, \dot{Q}_2 – prądy, e_{a1}, e_{a2} – indukowane napięcie (siła elektromotoryczna), L_a – indukcyjność wirnika, U_{1out}, U_{2out} – oznaczają napięcia otrzymane na wyjściu PWM z uwzględnieniem przekształtnika, U_1 i U_2 są napięciami na wyjściu PWM bez uwzględnienia przekształtnika i zależą bezpośrednio od wektora napięć \mathbf{U}_d , R_{a1}, R_{a2} – zastępcza rezystancja wirnika. Indukowane napięcia (siła elektromotoryczna) są równe:

$$e_{a1} = \mathcal{G}\phi\dot{\alpha}_1, \quad (113)$$

$$e_{a2} = \mathcal{G}\phi\dot{\alpha}_2. \quad (114)$$

W modelowanym przekształtniku uwzględniono zmianę rezystancji zastępczej wirnika oraz spadków napięć w silniku, co określono następującymi zależnościami [17]:

$$R_{a1} = R_a + R_{c1}, \quad (115)$$

$$R_{a2} = R_a + R_{c2}, \quad (116)$$

przy czym R_a – oznacza rezystancję wirnika (wg danych katalogowych), natomiast rezystancje elementów półprzewodnikowych (diod i tranzystorów), oznaczono dla każdego z silników napędowych odpowiednio przez R_{c1} i R_{c2} . W zależności od stanu przewodzenia przekształtnika realizowanego przez mostek H, zastępcze rezystancje elementów półprzewodnikowych obliczane są w następujący sposób:

$$R_{c1} = \sum_{i=1}^4 \delta_{Ti} R_{Ti} + \sum_{j=1}^4 \delta_{Dj} R_{Dj}, \quad (117)$$

$$R_{c2} = \sum_{i=1}^4 \delta_{Ti} R_{Ti} + \sum_{j=1}^4 \delta_{Dj} R_{Dj}. \quad (118)$$

Do symulacji przyjęto, że wyłączenie tranzystora oznacza zmianę jego rezystancji na $R_T=10\text{k}\Omega$, natomiast podczas przewodzenia przyjęto, że rezystancja tranzystora wynosi $R_T=0,005\Omega$. Rezystancja diody podczas przewodzenia wynosi $R_D=0,002 \Omega$. Zmiana rezystancji na elementach półprzewodnikowych, powiązana jest ze zmianą spadku napięcia na tych elementach, w związku z czym, wypadkowe spadki napięcia na elementach półprzewodnikowych oznaczono przez ΔU_{c1} i ΔU_{c2} . Mogą być one opisane zależnościami:

$$\Delta U_{c1} = \sum_{i=1}^4 \delta_{Ti} U_{C(TO)} + p \sum_{j=1}^4 \delta_{Dj} U_{F(TO)}, \quad (119)$$

$$\Delta U_{c2} = \sum_{i=1}^4 \delta_{Ti} U_{C(TO)} + p \sum_{j=1}^4 \delta_{Dj} U_{F(TO)}. \quad (120)$$

Wobec powyższego (120 i 121) napięcia U_{1out} i U_{2out} wynoszą:

$$U_{1out} = U_1 - \Delta U_{c1}, \quad (121)$$

$$U_{2out} = U_2 - \Delta U_{c2}, \quad (122)$$

przy czym: $U_{C(TO)}$ – napięcie przewodzenia tranzystora ($U_{C(TO)}=0,2 \text{ V}$), $U_{F(TO)}$ – napięcie przewodzenia diody ($U_{F(TO)}=0,7 \text{ V}$), δ – delta Kroneckera, i, j – indeksy, $U_1, U_2 \in \{0, 12\}$, gdzie U_1 lub $U_2=12 \text{ V}$, gdy dwa tranzystory lub dwie diody przewodzą, (współczynnik $p=-1$) oraz U_1 lub $U_2=0 \text{ V}$ w przeciwnym wypadku (współczynnik $p=1$). Jeśli $\delta_T=1$ lub $\delta_D=1$, to oznacza, że tranzystor lub dioda przewodzą.

Po obliczeniu napięć i prądów w procesie symulacji, przystąpiono do obliczania momentów, jakie powinny znaleźć się na wale silnika (M_{1w}, M_{2w}):

$$M_{1w} = \phi \dot{Q}_1, \quad (123)$$

$$M_{2w} = \phi \dot{Q}_2. \quad (124)$$

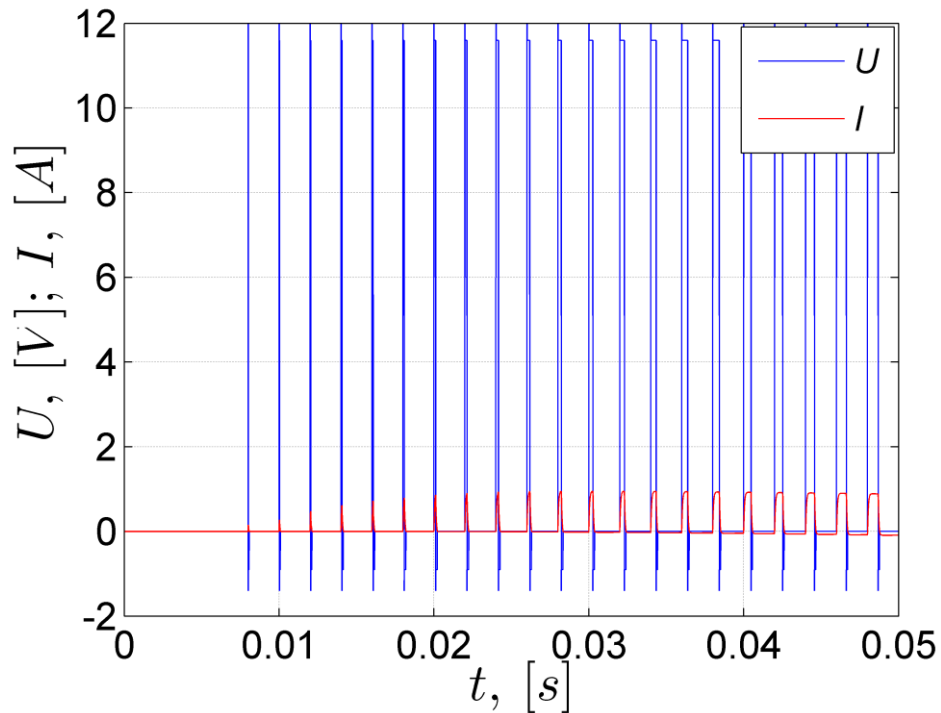
W samym silniku występują jednak straty elektryczne i mechaniczne, które są uwzględnione, ponadto, człon przekładni charakteryzuje się pewną sprawnością (η), zatem obliczone momenty (M_1, M_2), które są wykorzystane w symulacji mogą być wyrażone jako:

$$M_1 = (\phi \dot{Q}_1 - B_m \dot{\alpha}_1 \mathcal{G}) \mathcal{G} \eta, \quad (125)$$

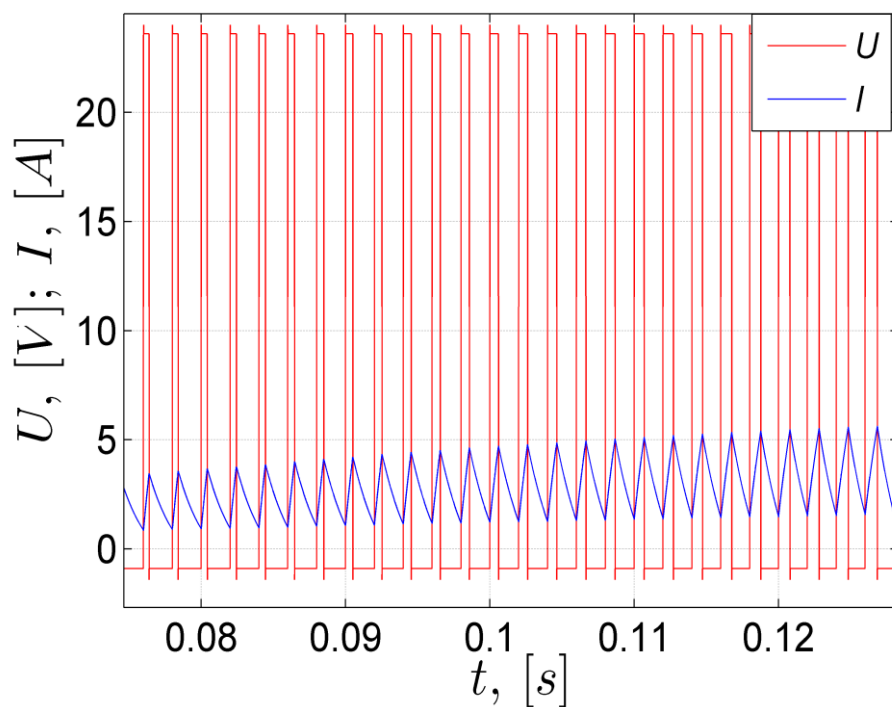
$$M_2 = (\phi \dot{Q}_2 - B_m \dot{\alpha}_2 \mathcal{G}) \mathcal{G} \eta, \quad (126)$$

przy czym straty przekładni w opisywanym robocie eksperymentalnym wynosiły $\eta=0,65$, natomiast przez B_m oznaczono współczynnik strat mechanicznych.

Na rysunkach 93 i 94 zamieszczono fragment symulacji przebiegu napięć i prądów na wyjściu PWM, z uwzględnieniem uproszczonego przekształtnika, w trakcie przyśpieszania robota. Tak jak to ma miejsce w rzeczywistym przebiegu PWM, uwzględniono również w uproszczony sposób przebiegi, które pojawiają się przy komutacji elementów półprzewodnikowych.



Rys. 93. Fragment przebiegu napięć i prądów dla symulowanego silnika napędowego z robota eksperymentalnego.



Rys. 94. Fragment przebiegu napięć i prądów dla symulowanego silnika napędowego z robota przemysłowego.

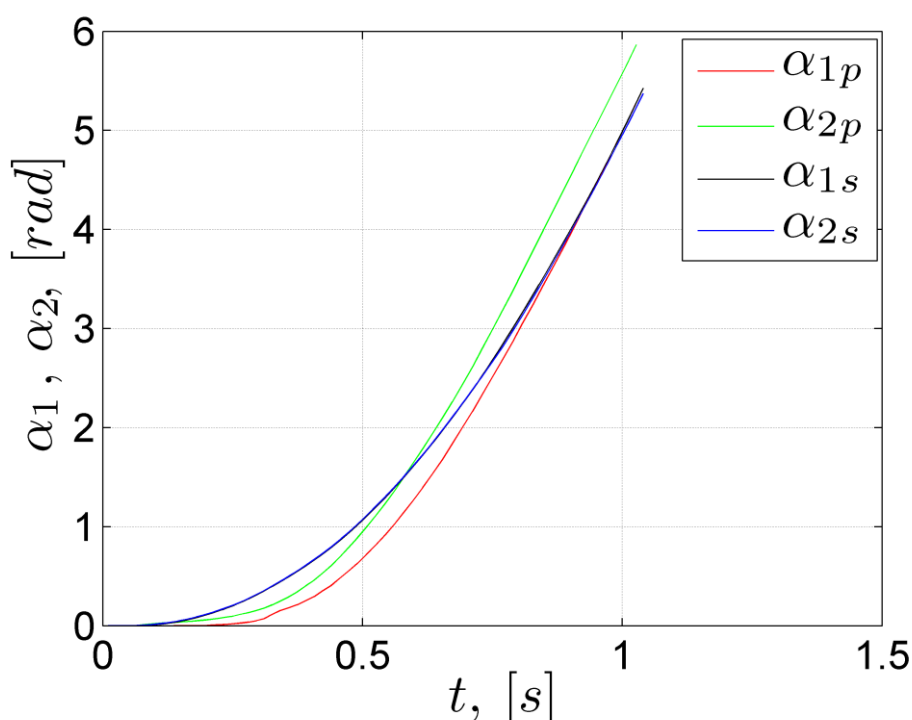
Ze względu na to, iż źródło zasilania się rozładowuje, w procesie symulacji uwzględniono zmianę napięcia źródła zasilania, którą opisano jako:

$$U_{\max}(t) = U_{\max}(0) - \frac{1}{C_z} \int_0^t i(\tau) d\tau, \quad (127)$$

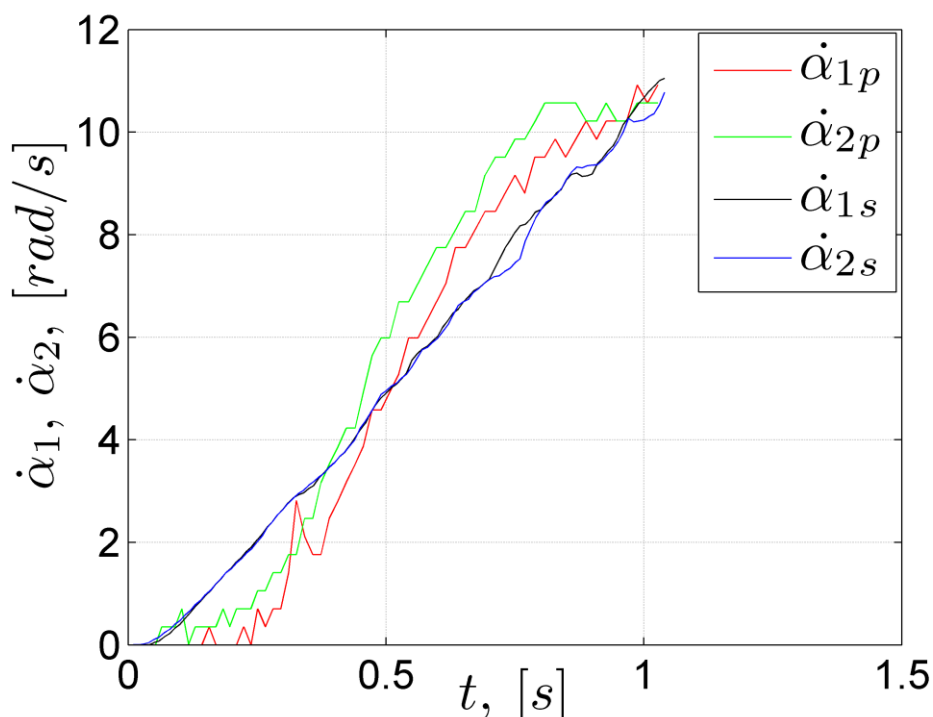
gdzie $U_{\max}(t)$ oznacza aktualną wartość napięcia źródła zasilania a C_z – pojemność zastępcza źródła zasilania.

4.2. Analiza energii zużytej przez robota mobilnego

Korzystając z równań dynamiki wyprowadzonych w rozdziale 3 oraz równań silników wraz z przekształtnikiem, przystąpiono do identyfikacji parametrów energoelektronicznych i mechanicznych robota. Identyfikacja ta polegała na tym, że skalowany współczynnik głębokości modulacji był zwiększany zarówno w programie symulacyjnym jak i rzeczywistym robocie. Następnie został zmierzony dystans, jaki pokonał robot i porównano to z odległością, jaka została uzyskana z symulacji. Ruch robota symulowany, jak i mierzony odbywał się po prostej. Identyfikację parametrów energoelektronicznych i mechanicznych przeprowadzono dla robota eksperymentalnego. Porównanie wyników pomiarowych oraz uzyskanych z modelowania przedstawiono na rysunkach 95 (obrót kół napędowych) i 96 (prędkości obrotowe kół napędowych).

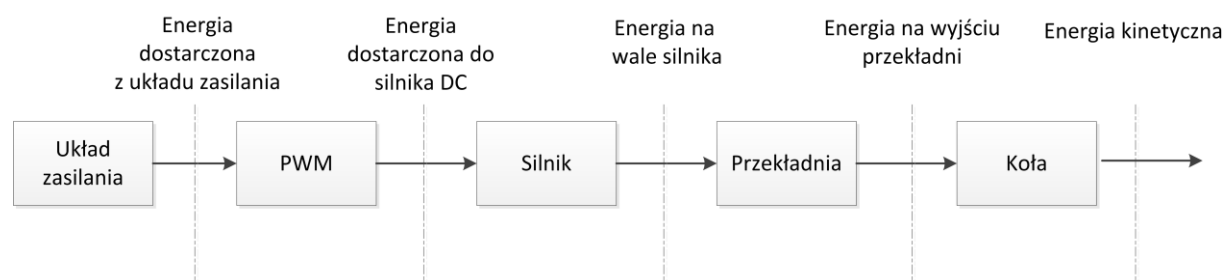


Rys. 95. Identyfikacja parametrów silnika – porównanie kątów obrotu kół napędowych z symulacji (indeks s) i z pomiaru (indeks p).



Rys. 96. Identyfikacja parametrów silnika – porównanie prędkości obrotowych kół napędowych z symulacji (indeks s) i z pomiaru (indeks p).

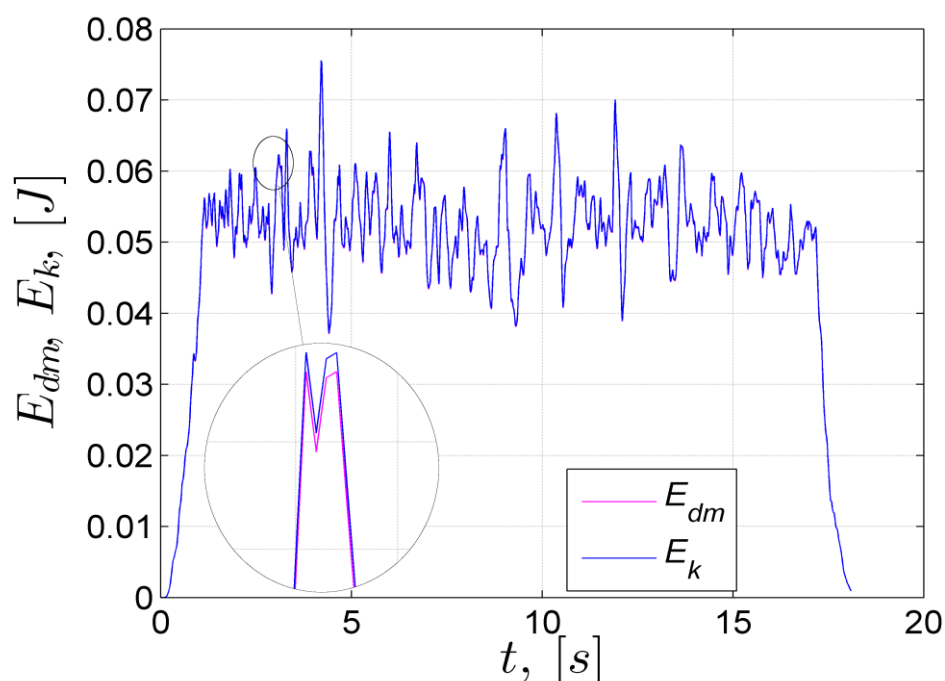
Na rysunkach 95 i 96 uzyskano wystarczającą, do potwierdzenia poprawności metody, zgodność przebiegów. Różnice pomiędzy wartościami zmierzonymi (indeks p), a symulowanymi (indeks s), są niewielkie. Uzyskanie tak dużej zbieżności, pozwala na przeprowadzenie dyskusji na temat zużycia energii w robocie mobilnym trójkołowym. W analizie tej uwzględniono straty zarówno części elektrycznej (np. straty na rezystancji wirnika), jak i mechanicznej (np. straty wynikające ze sprawności przekładni), co przedstawiono na rysunku 97. Z punktu widzenia strat energii układ robota mobilnego można schematycznie przedstawić blokowo:



Rys. 97. Schemat blokowy zużycia energii w robocie mobilnym trójkołowym (część napędowa).

Na rysunku 97 przedstawiono blokowo miejsca, w których następuje strata energii. W pracy skoncentrowano się na części napędowej, która jest najtrudniejsza do oszacowania, ze względu na zmiany występujące w tej części z bardzo dużą częstotliwością. Układ zasilania na rysunku 97 oznacza źródło energii (np. akumulator). W badanym robocie mobilnym, źródłem zasilania jest akumulator litowo-polimerowy (LiPo). Dostarczona energia

pochodząca ze źródła zasilania, jest następnie poddana modulacji szerokości impulsu (PWM), w której wartość skalowanego współczynnika głębokości modulacji, wynika z układu sterowania robota mobilnego. W bloku oznaczonym jako PWM, zastosowano przekształtnik z uproszczoną komutacją wg algorytmu z rysunku 92. Straty na przekształtniku zależą między innymi od czasów przełączeń zastosowanych elementów półprzewodnikowych. Energia, która znajduje się na wyjściu przekształtnika, dostarczona jest do układu zasilania silnika. W wirniku silnika występują straty elektryczne, a ze względu na ruch wirnika, występują także straty mechaniczne. Następnym blokiem jest układ zawierający przekładnię, dla których uwzględniono sprawności przekładni. Powoduje to również, że energia jest tam tracona. Przedostatni przekrój na rysunku 97 określa energię, która jest przekazana na koła napędowe. Jest to energia potrzebna do pokonania sił tarcia i zmiany prędkości ruchu robota. W wyniku zbilansowania, czyli różnicy energii dostarczonej do kół napędowych i tarcia, uzyskujemy energię kinetyczną. Następnie dokonano porównania wartości energii kinetycznej (E_k), uzyskanej przez robota wg zależności (64) z rozdziału 2, z bilansem energii dostarczonej od strony źródła wg schematu blokowego przedstawionego na rysunku 97, którą nazwano (E_{dm}). Obie energie porównano, a wynik porównania przedstawiono na rysunku 98, w którym energia dostarczona do części mechanicznej (E_{dm}) robota, przy uwzględnieniu strat energii wynikających z tarcia, jest praktycznie równa energii kinetycznej (E_k), co potwierdza poprawność zastosowanej metodyki oraz poprawność równań opisujących ruch robota.



Rys. 98. Bilans energetyczny.

Sprawdzenia bilansu energetycznego dokonano dla trajektorii zbliżonej do cyfry osiem. Poniżej zaprezentowano pozostałe wyniki uzyskane w procesie symulacji, dla obu typów robota (eksperymentalnego i przemysłowego). Przeanalizowano przypadek uwzględniający

koło samonastawne i pomijający to koło. Dla badanej trajektorii uzyskano następujące wartości energii, które umieszczono w tabeli 5. Symulacji dokonano dla ruchu robota eksperymentalnego z maksymalną prędkością $\dot{\psi} = 5,7$ rad/s, natomiast dla robota przemysłowego przyjęto prędkość $\dot{\psi} = 10$ rad/s.

Tabela 5. Wyniki analizy energii w poszczególnych członach dla trajektorii zbliżonej do cyfry osiem

Algorytm sterujący	Energia dostarczona z układu zasilania [J]	Energia czynna za PWM [J]	Straty energii na rezystancji [J]	Energia na wale silnika [J]	Straty na przekładni [J]	Sprawność [%]
Regulator bez uwzględnienia koła samonastawnego, robot eksperymentalny	30,31	29,23	8,40	13,50	7,33	44,5
Regulator uwzględniający koło samonastawne, robot eksperymentalny	30,30	29,21	8,43	13,47	7,31	44,5
Regulator bez uwzględnienia koła samonastawnego, robot przemysłowy	351,52	337,25	49,41	233,08	54,75	66,31
Regulator uwzględniający koło samonastawne, robot przemysłowy	351,90	337,98	49,87	233,30	54,81	66,30

W tabeli 5 przedstawiono wyniki symulacji dla zużycia energii przez robot eksperymentalny i przemysłowy. Warto zwrócić uwagę na to, jak dużo energii tracone jest, nim zostanie przekazane do części mechanicznej (koła napędowe). Nie bez znaczenia są takie parametry, jak opory wewnętrzne silnika, czy też sprawność przekładni. Obliczona sprawność wynosi

~45% dla robota eksperymentalnego i ~66% dla robota przemysłowego. Jeżeli robot porusza się z małą prędkością, znaczna część energii tracona jest na straty elektryczne na wirniku silnika prądu stałego. Im prędkość robota bliższa jest prędkości znamionowej, tym wyższa jest sprawność całego robota.

W celu weryfikacji poprawności zadanego ruchu, dokonano analizy rozbieżności uzyskanych wartości dla pierwszego i drugiego koła oraz punktu charakterystycznego A. Pierwiastki z błędów średniokwadratowych oznaczono jako $\Delta\alpha_1$, $\Delta\alpha_2$, $\Delta\psi$. Indeks p oznacza wartości zmierzone.

Tabela 6. Wyniki pierwiastków błędów średniokwadratowych dla trajektorii zbliżonej do cyfry osiem

Algorytm sterujący	$\Delta\alpha_1$ [rad]	$\Delta\alpha_2$ [rad]	$\Delta\alpha_{1p}$ [rad]	$\Delta\alpha_{2p}$ [rad]	$\Delta\psi$ [rad]	$\Delta\psi_p$ [rad]
Regulator bez uwzględnienia koła samonastawnego, robot eksperymentalny	0,65	0,65	1,21	0,82	0,51	0,90
Regulator uwzględniający koło samonastawne, robot eksperymentalny	0,58	0,58	0,79	0,62	0,44	0,53
Regulator bez uwzględnienia koła samonastawnego, robot przemysłowy	0,65	0,60	0,72	0,82	0,63	0,96
Regulator uwzględniający koło samonastawne, robot przemysłowy	0,44	0,45	0,62	0,69	0,43	0,46

W tabelach 6 oraz 7 przedstawiono błędy kątów obrotu kół napędowych oraz zastępczego koła napędowego umieszczonego w punkcie charakterystycznym A, uzyskane dla ruchu po trajektorii, zarówno w procesie modelowania jak i pomiaru wartości z przejazdu

rzeczywistego robota. Zarówno w robocie eksperymentalnym jak i przemysłowym, uzyskano mniejsze błędy po trajektorii, dla regulatora wykorzystującego informację o kącie skręcenia koła samonastawnego. Przedstawione w tabelach wartości pomiarowe i modelowane, niewiele od siebie odbiegają, co potwierdza poprawnie przeprowadzoną identyfikację parametrów robota mobilnego. W tabeli 7 przedstawiono błędy maksymalne Δw_{max} po trajektorii, przy czym błąd maksymalny został zdefiniowany następująco:

$$\Delta w_{max} = \max(|w_{di} - w_i|), \quad (128)$$

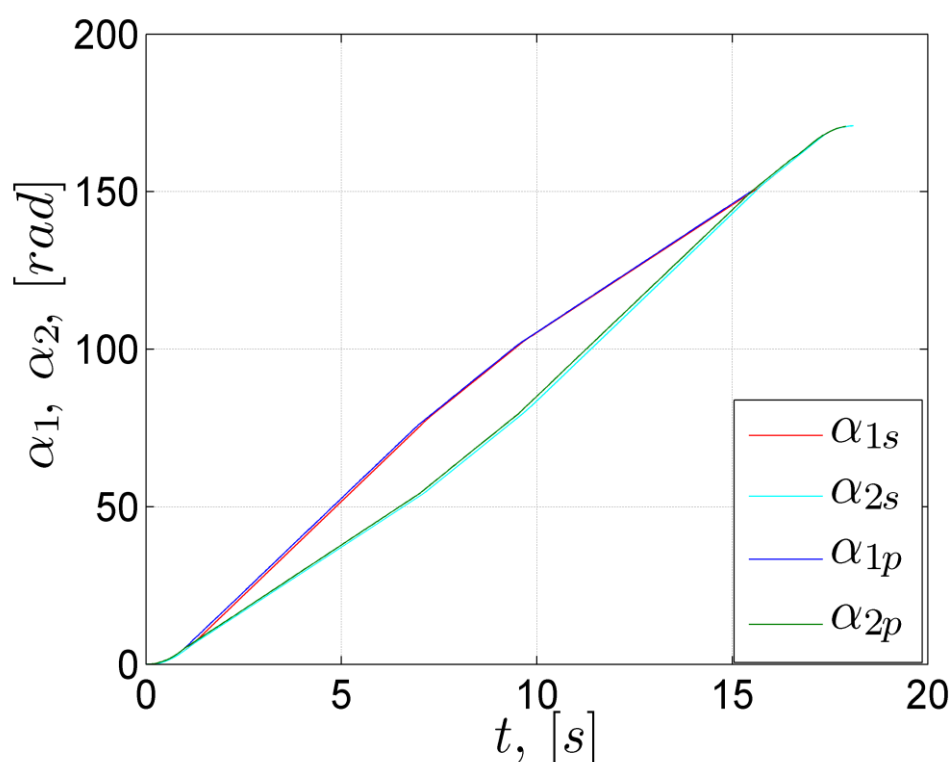
gdzie: w_{di} – oznacza wartość zadaną, w_i – oznacza wartość zmierzoną lub zasymulowaną w danej chwili czasowej. W dalszym ciągu zmienna w będzie oznaczać w zależności od rozważanego kontekstu albo kąt obrotu ψ zastępczego koła napędowego, albo kąty obrotu α_1 , α_2 kół napędowych.

Tabela 7. Wyniki błędów maksymalnych dla trajektorii zbliżonej do cyfry osiem

Algorytm sterujący	$\Delta\alpha_{1max}$ [rad]	$\Delta\alpha_{2max}$ [rad]	$\Delta\alpha_{1pmax}$ [rad]	$\Delta\alpha_{2pmax}$ [rad]	$\Delta\psi_{max}$ [rad]	$\Delta\psi_{pmax}$ [rad]
Regulator bez uwzględnienia koła samonastawnego, robot eksperymentalny	1,00	1,01	2,22	1,67	0,66	1,86
Regulator uwzględniający koło samonastawne, robot eksperymentalny	0,88	0,87	1,33	1,26	0,61	0,96
Regulator bez uwzględnienia koła samonastawnego, robot przemysłowy	0,95	0,85	1,59	1,50	0,75	1,70
Regulator uwzględniający koło samonastawne, robot przemysłowy	0,92	0,80	1,38	1,63	0,76	1,67

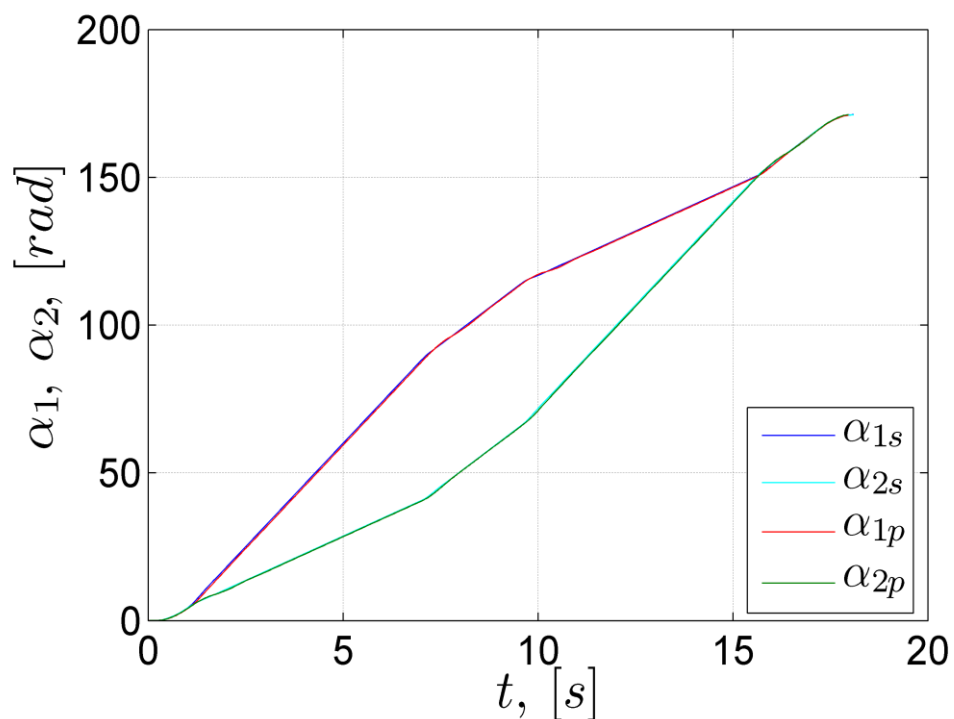
Przedstawiono wartości zasymulowane (indeks s) oraz zmierzone (indeks p) po trajektorii w kształcie cyfry osiem. Z tego prostego zestawienia w tabelach 5, 6 oraz 7 można wysunąć wniosek, że przy bardzo zbliżonym zużyciu energii, algorytm wykorzystujący informację o kącie skręcenia koła samonastawnego zaprezentowany w zależności (104), charakteryzuje się mniejszymi wartościami pierwiastków błędów średniokwadratowych po trajektorii. Dodatkowo zostały odczytane błędy maksymalne, przy czym dla kątów obrotu wartość bezwzględna błędów maksymalnych jest na korzyść algorytmu, który wykorzystuje informację o kole samonastawnym.

Wartości pierwiastków błędów średniokwadratowych są mniejsze w przypadku użycia algorytmu uwzględniającego wpływ koła samonastawnego. Jednak w przypadku błędów maksymalnych w robocie przemysłowym, dla przypadku, w którym regulator uwzględnia wpływ koła samonastawnego, błąd w jednym z kół jest minimalnie wyższy. Poniżej przedstawiono porównanie kątów obrotu kół napędowych α_1 i α_2 , uzyskanych z pomiaru i symulacji, gdzie indeks s oznacza wyniki symulacji, a p oznacza wartości pomiarowe (rysunek 99).

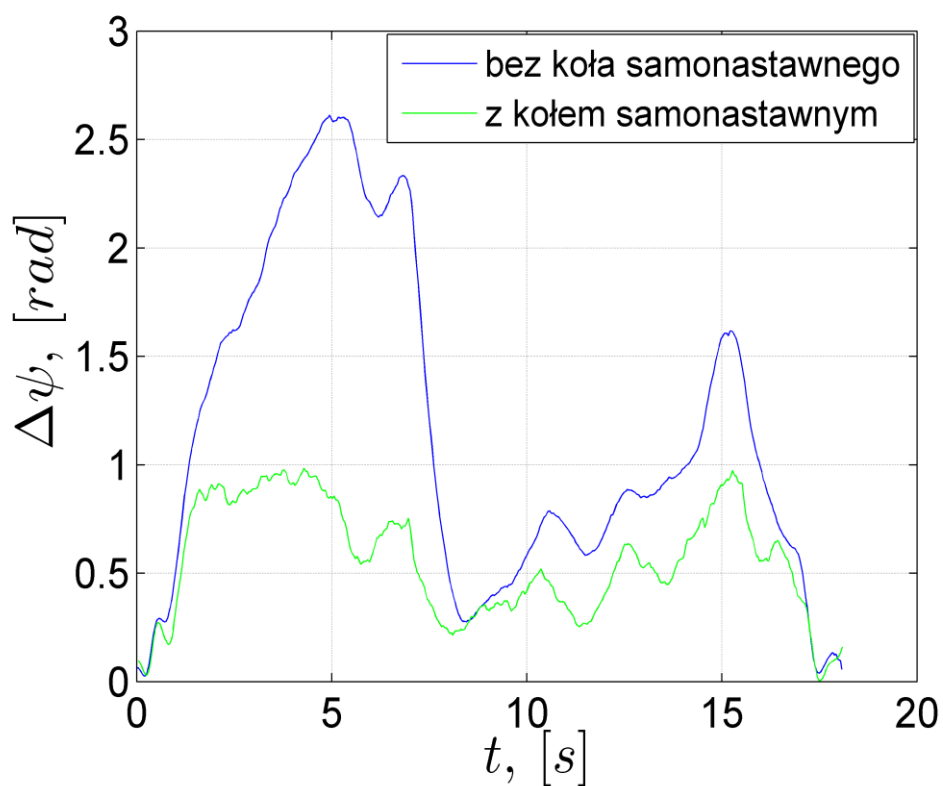


Rys. 99. Porównanie kątów obrotu kół napędowych w robocie eksperymentalnym.

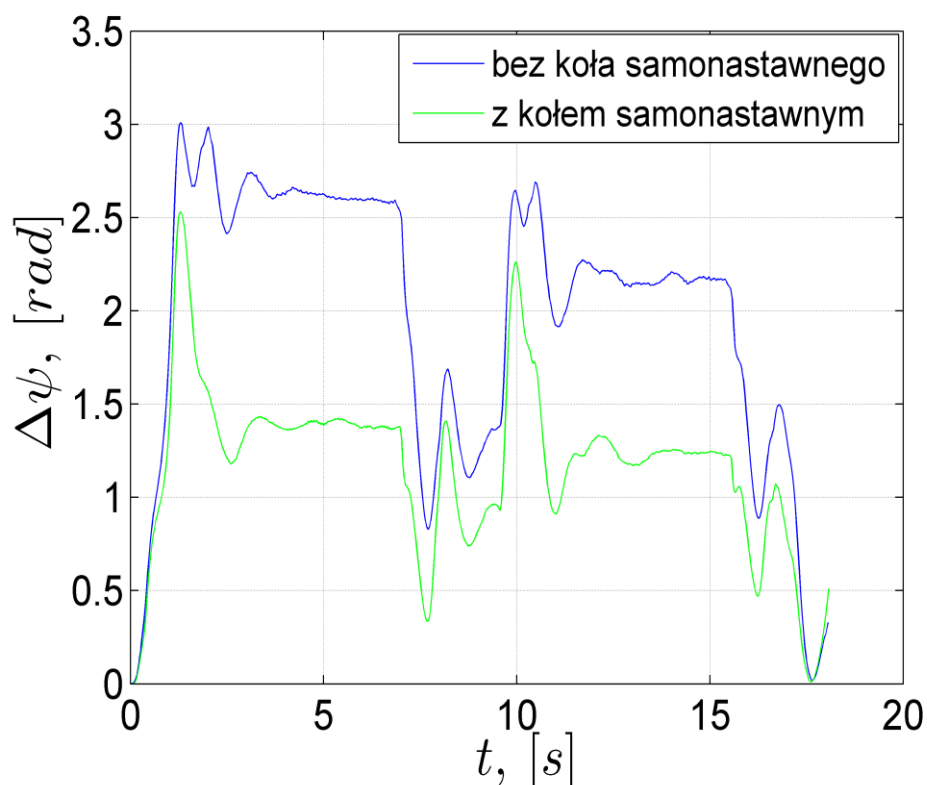
Z kolei na rysunku 100 porównano kąt obrotu kół napędowych dla robota przemysłowego.



Rys. 100. Porównanie kątów obrotu kół napędowych w robocie przemysłowym.



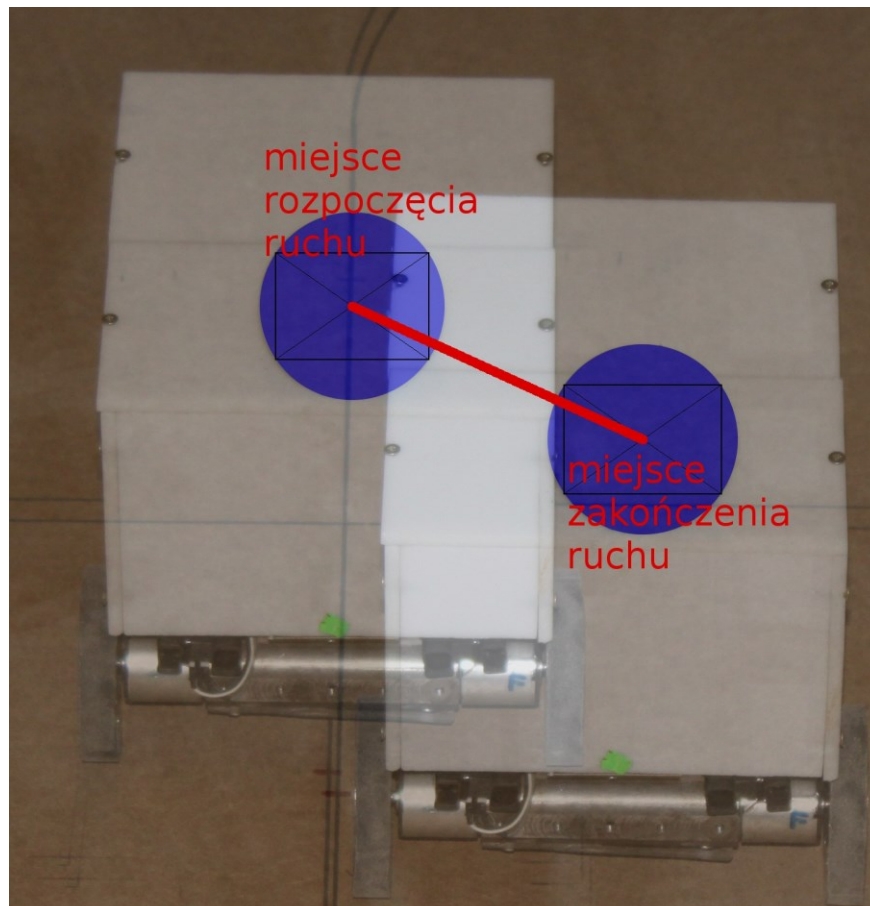
Rys. 101. Pierwiastki z błędów średniokwadratowych obrotu zastępczego koła napędowego umieszczonego w punkcie charakterystycznym A w robocie eksperymentalnym.



Rys. 102. Pierwiastki z błędów średniokwadratowych obrotu zastępczego koła napędowego umieszczonego w punkcie charakterystycznym A w robocie przemysłowym.

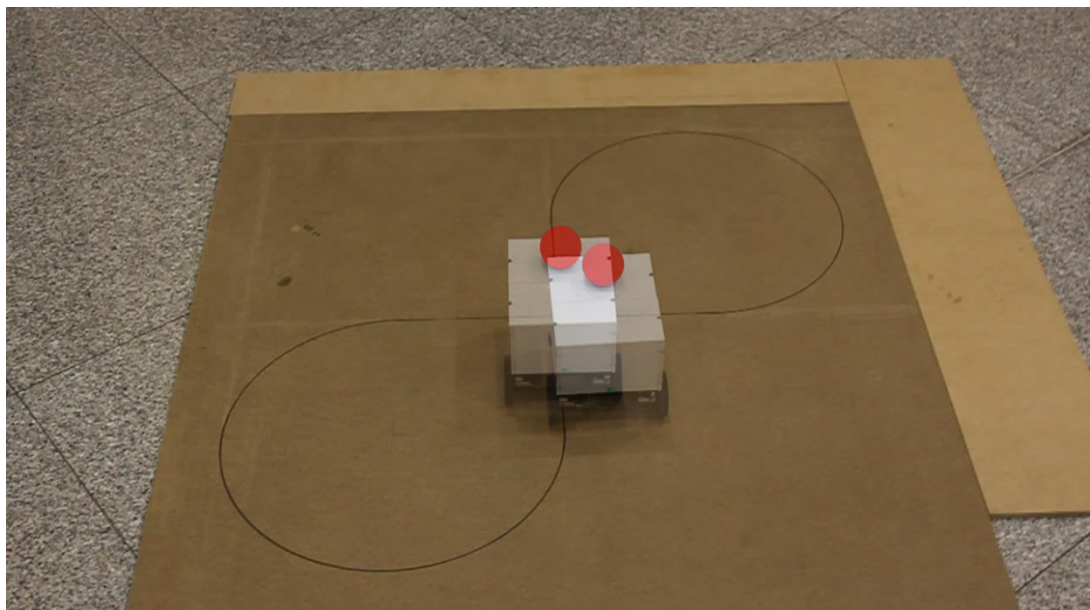
W wyniku porównania otrzymano dużą zbieżność pomiędzy symulacją a pomiarem obu robotów. Na rysunkach 101 i 102, przedstawiono zmierzone wartości pierwiastków z błędów średniokwadratowych obrotu koła zastępczego napędowego umieszczonego w punkcie charakterystycznym A. Uwzględnienie koła samonastawnego poprawia jakość ruchu po trajektorii, bowiem błędy dla przypadku tego ruchu są mniejsze. Wyniki pomiarowe przedstawione powyżej, bazowały na pomiarach odometrycznych [15]. Ze względu na poślizgi kół oraz ich nieidentyczne wymiary a także zróżnicowane podłoże, ta metoda charakteryzuje się błędami podczas poruszania się po trajektorii. Zgodnie z [15, 70] uzyskane błędy mogą być systematyczne i niesystematyczne.

Dlatego też w celu dodatkowej weryfikacji przeprowadzono pomiar z wykorzystaniem analizy obrazu. Ideę pomiaru przedstawiono to na rysunku 103. Na robocie umieszczono piłkę, która stanowiła element odniesienia przy porównywaniu zdjęć. Następnie obszar piłki wypełniono jednolitym kolorem i wrysowano prostokąt wraz z przekątnymi. Dzięki temu zabiegowi, możliwe było precyzyjne określenie środka piłki, przed i po wykonaniu trajektorii. Zmierzono odległość pomiędzy środkami dwóch okręgów. Średnica piłki wynosiła 6,2 cm. Podczas pomiaru bez uwzględnienia koła samonastawnego, uzyskano różnicę 13,1 cm (wynik przedstawiono na rysunku 104), natomiast podczas pomiaru z uwzględnieniem koła samonastawnego, uzyskano różnicę 9,7 cm (wynik przedstawiono na rysunku 105).

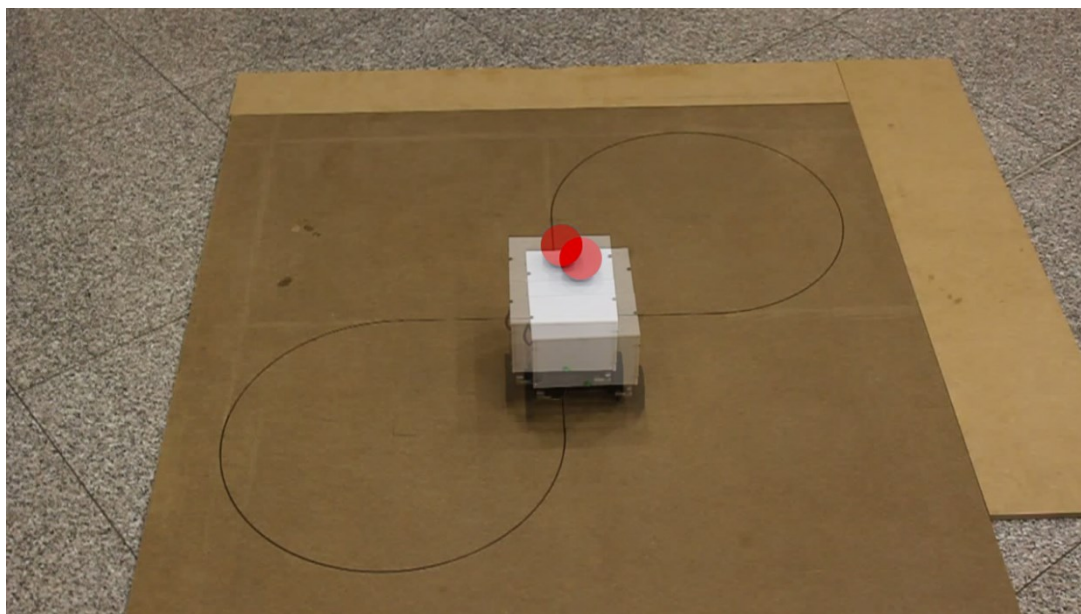


Rys. 103. Weryfikacja dokładności uzyskania punktu końcowego ruchu dla robota.

W celu uproszczonej weryfikacji statystycznej wykonano 10 pomiarów (podobnie jak w artykule [94]) i wyniki umieszczono w tabeli 8.



Rys. 104. Weryfikacja dokładności uzyskania punktu końcowego ruchu dla robota eksperymentalnego bez uwzględnienia koła samonastawnego w sterowaniu.



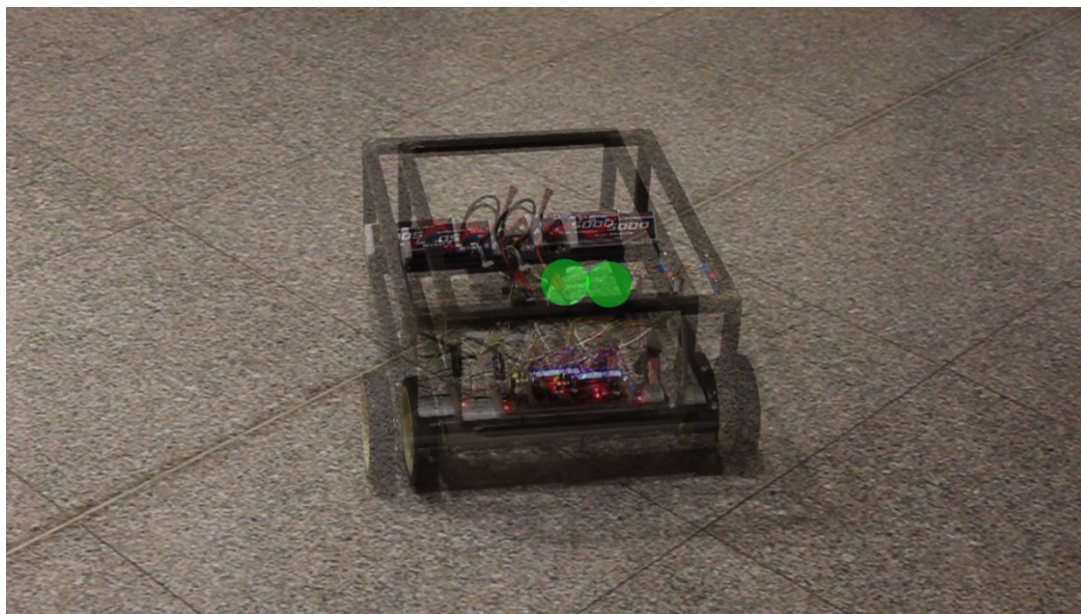
Rys. 105. Weryfikacja dokładności uzyskania punktu końcowego ruchu dla robota eksperymentalnego z uwzględnieniem koła samonastawnego w sterowaniu.

Tabela 8. Pomiar przesunięcia uzyskany z analizy obrazów

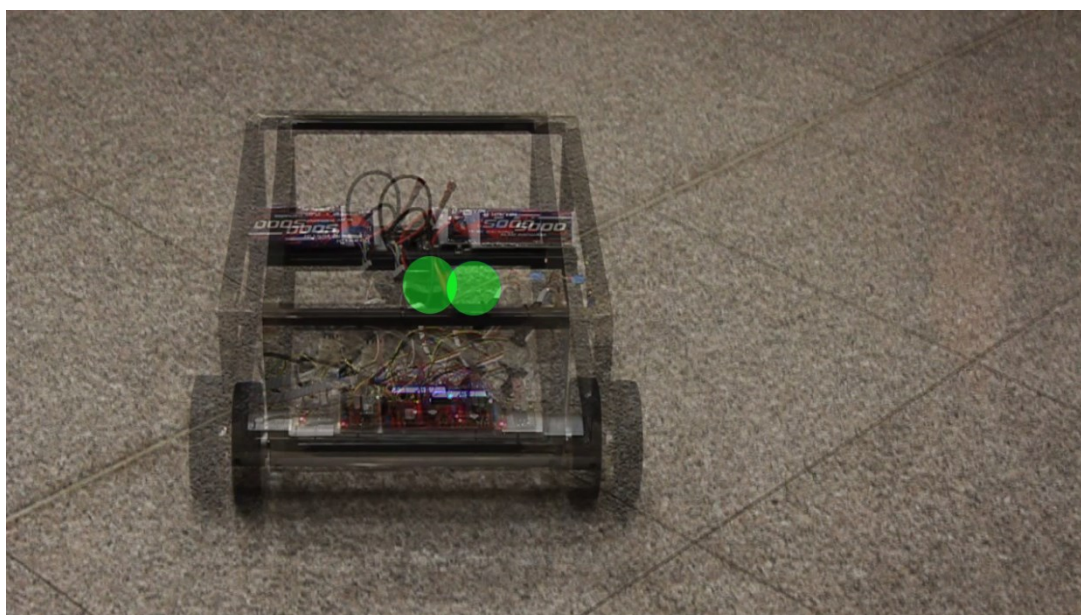
L.p.	Przesunięcie przy regulatorze bez uwzględnienia skrętu koła samonastawnego [m]	Przesunięcie przy regulatorze z uwzględnieniem skrętu koła samonastawnego [m]
1.	0,022	0,042
2.	0,084	0,076
3.	0,222	0,048
4.	0,146	0,077
5.	0,024	0,089
6.	0,140	0,063
7.	0,163	0,065
8.	0,120	0,090
9.	0,058	0,080
10.	0,152	0,060

Wobec powyższego, średni błąd dla przypadku, gdy koło nie jest uwzględniane wyniósł prawie 11,3 cm, natomiast przy uwzględnieniu koła samonastawnego, średni błąd wyniósł 6,9 cm.

Dla robota przemysłowego również dokonano weryfikacji. Różnica położenia pomiędzy robotem uwzględniającym koło samonastawne, a robotem bez uwzględnienia koła samonastawnego, wyniosła 1 cm, co przedstawiono na rysunku 106 i 107.

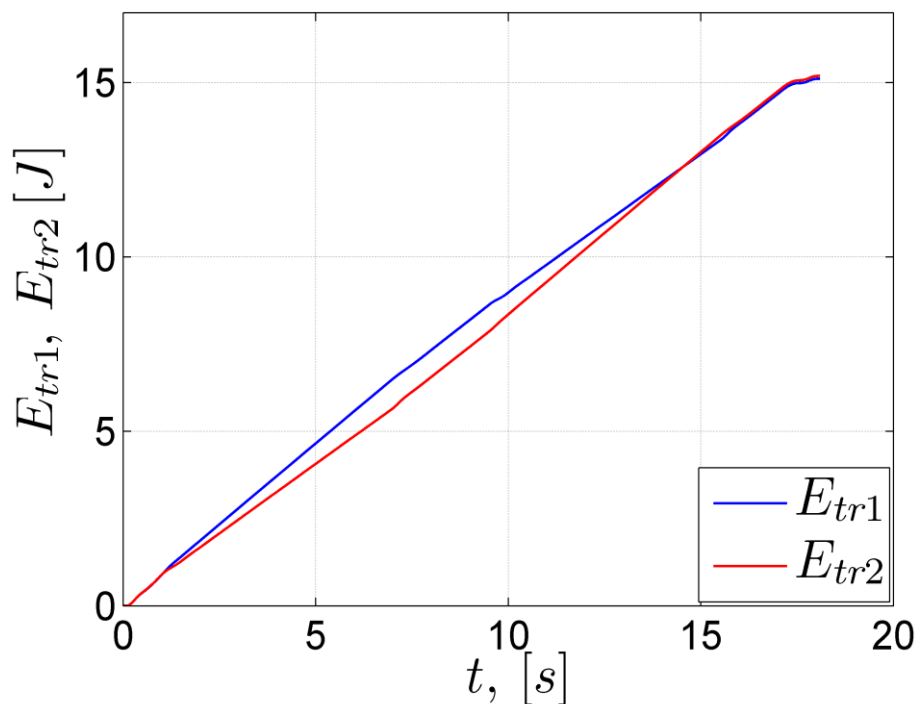


Rys. 106. Weryfikacja dokładności uzyskania punktu końcowego ruchu dla robota przemysłowego bez uwzględnienia koła samonastawnego w sterowaniu.



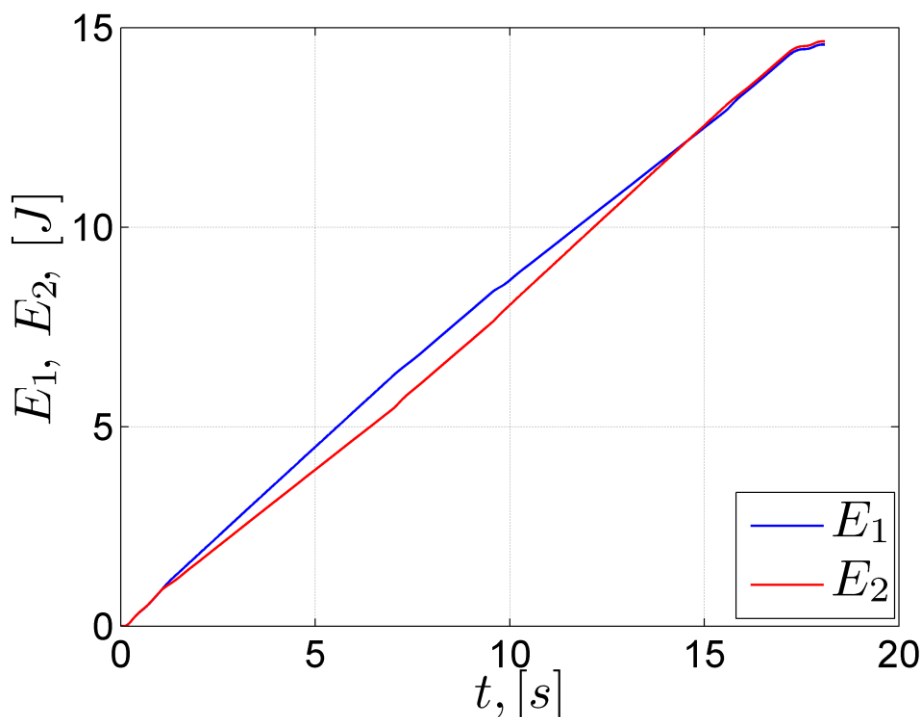
Rys. 107. Weryfikacja dokładności uzyskania punktu końcowego ruchu dla robota przemysłowego z uwzględnieniem koła samonastawnego w sterowaniu.

Na rysunku 108 przedstawiono energię zasilania, która dostarczona jest przez akumulatory podłączone do robota eksperymentalnego. Ta energia zgodnie z rysunkiem 97 podlega modulacji szerokości impulsu PWM.

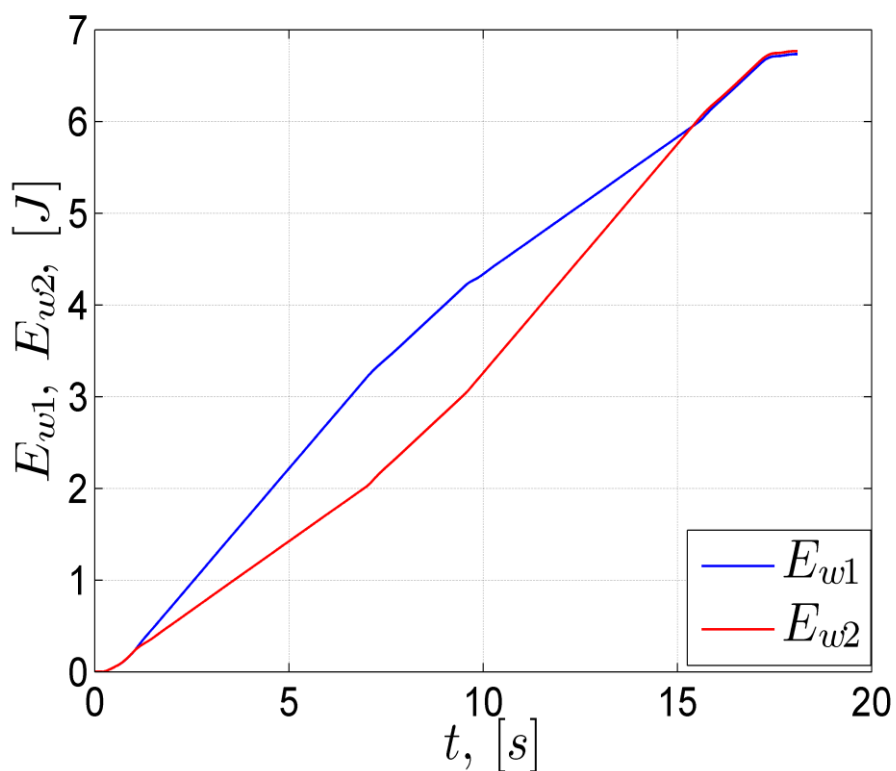


Rys. 108. Energia pobrana z zasilania robota eksperymentalnego (E_{tr}).

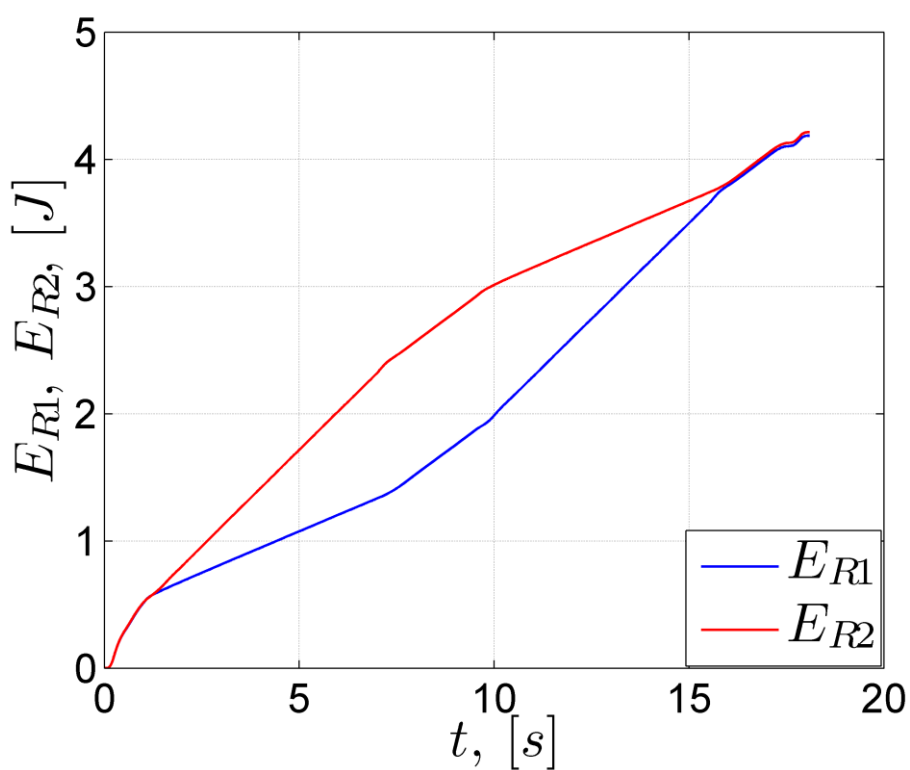
Przekształconą energię zaprezentowano na rysunku 109. W przyjętym modelu przekształtnika straty energii nie przekroczyły 5%. Tak jak przedstawiono w tabeli 5, stosunkowo duża część energii tracona jest na rezystancji. Energię na wale, która napędza koła w robocie eksperymentalnym, przedstawiono na rysunku 110.



Rys. 109. Energia na wyjściu falownika PWM w robocie eksperymentalnym (E).



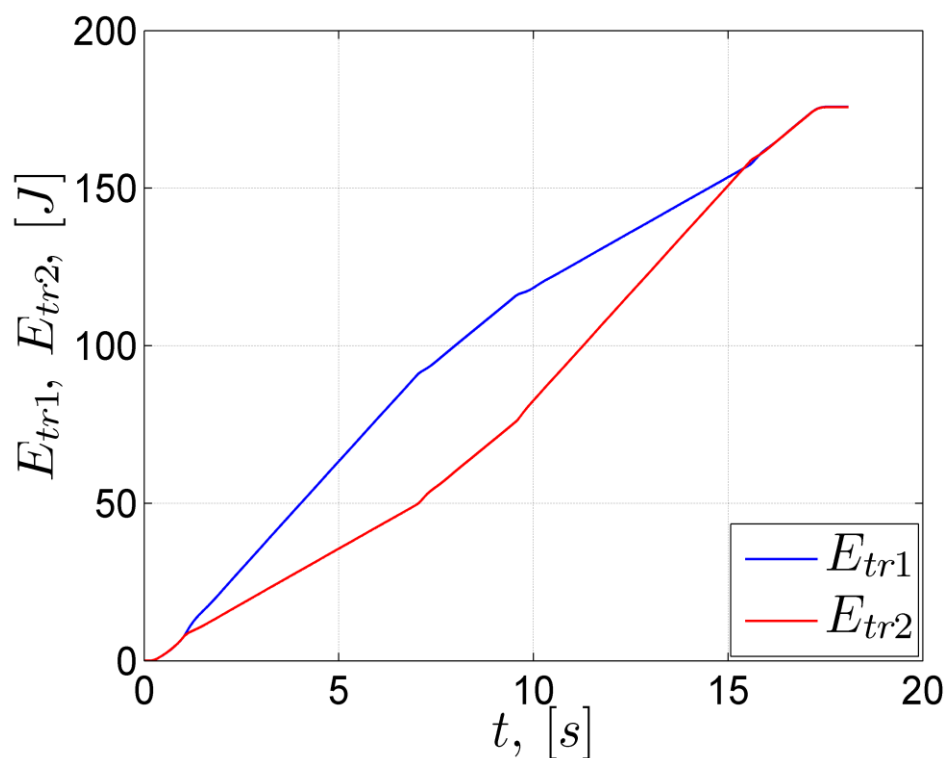
Rys. 110. Energia na wale silnika robota eksperymentalnego (E_w).



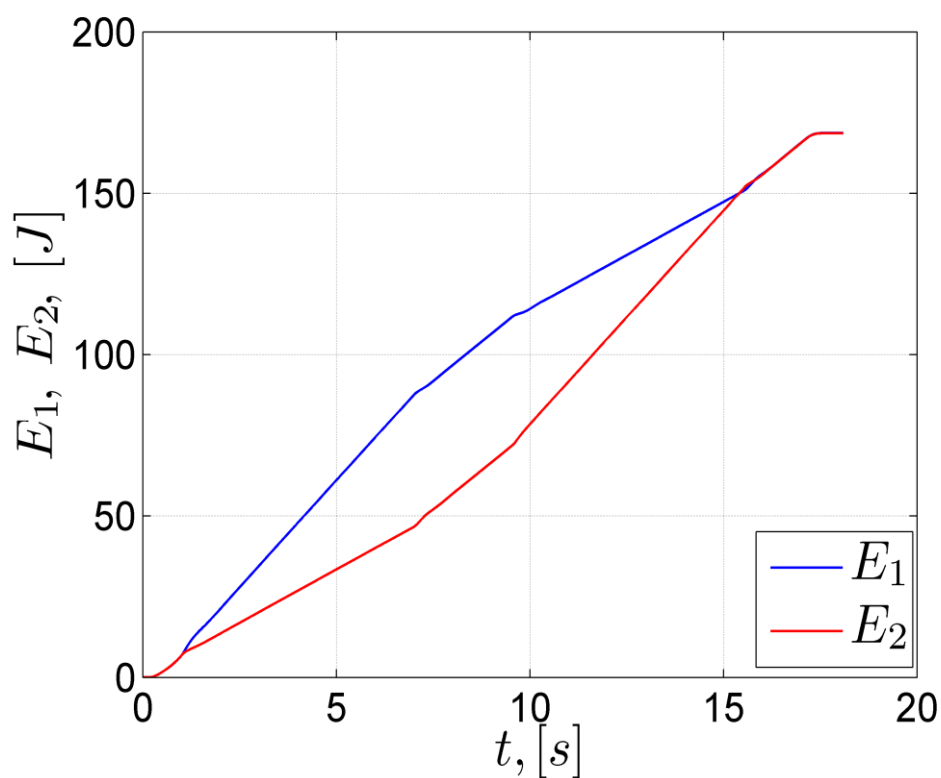
Rys. 111. Straty energii na rezystancji w robocie eksperymentalnym (E_R).

Warto zwrócić uwagę, że energia na wale jest niewiele większa od energii strat na wale. Bardzo duży wpływ na straty energii mają parametry silnika i przekształtnika (w robocie

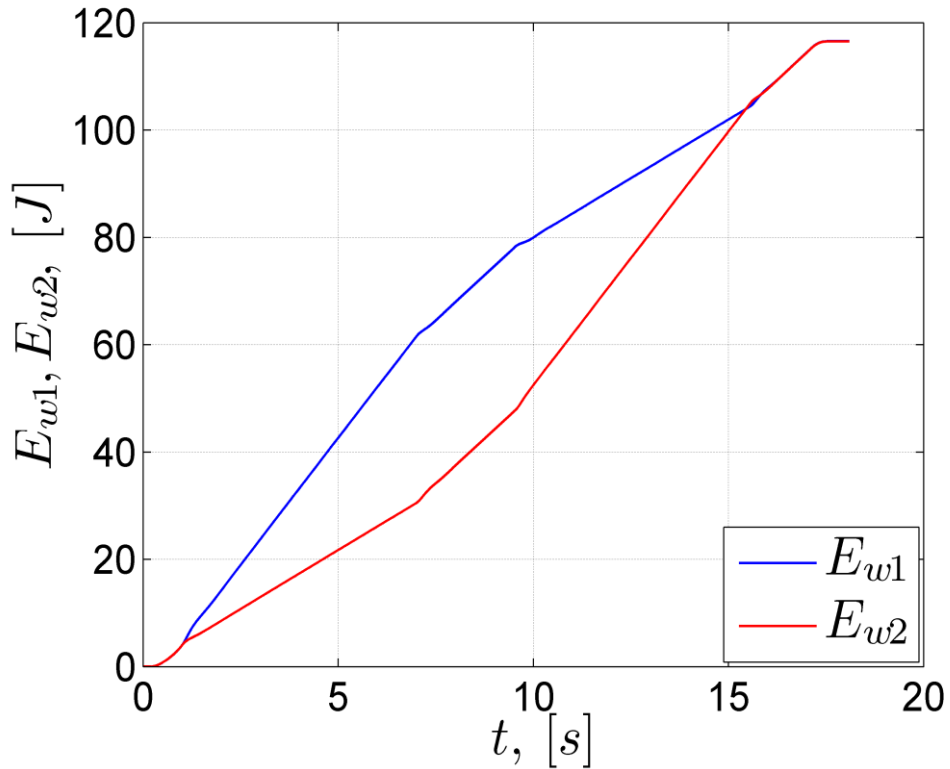
eksperymentalnym zastosowano silniki z przekładnią o sprawności 65%). Przebieg strat energii na rezystancji przedstawiono na rysunku 111. Na rysunkach 112÷115 przedstawiono wyniki zużycia energii dla robota przemysłowego:



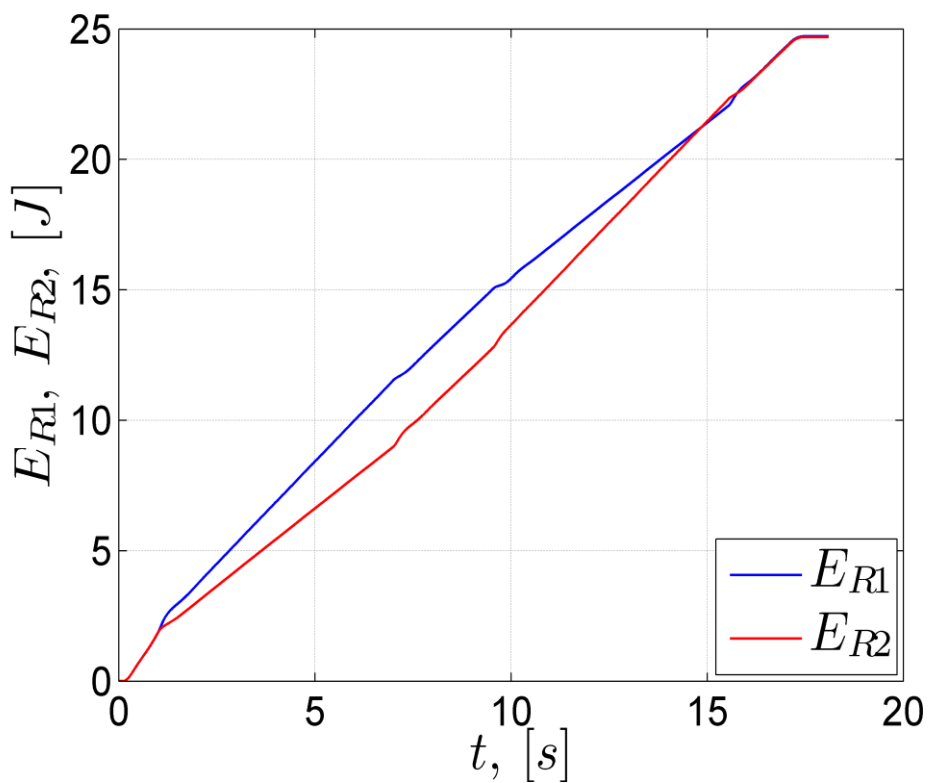
Rys. 112. Energia pobrana z zasilania robota przemysłowego (E_r).



Rys. 113. Energia na wyjściu PWM w robocie przemysłowym (E).



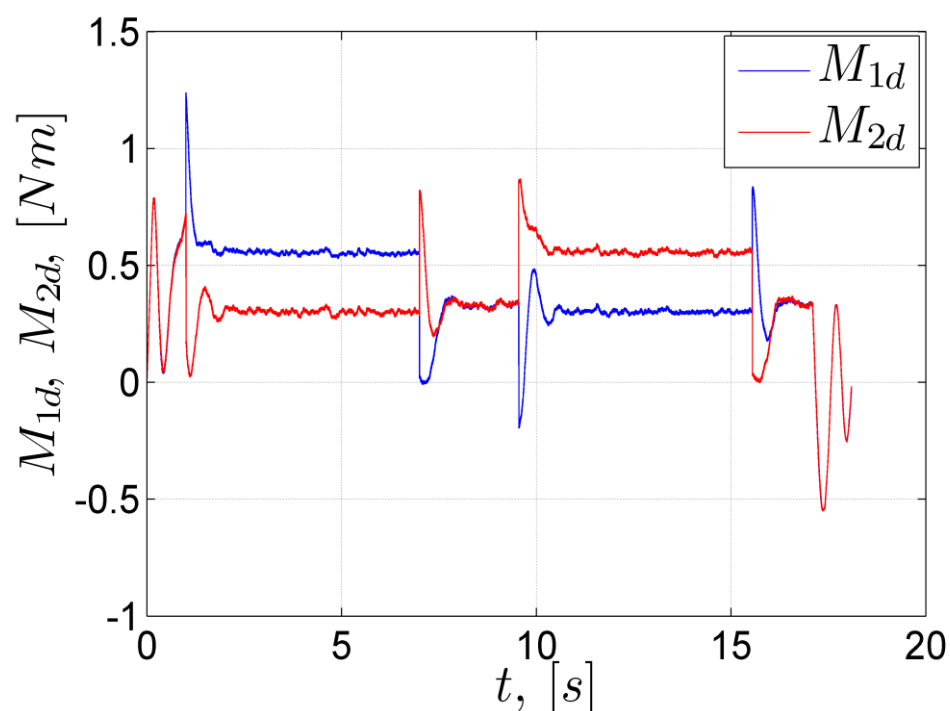
Rys. 114. Energia na wale silnika robota przemysłowego (E_w).



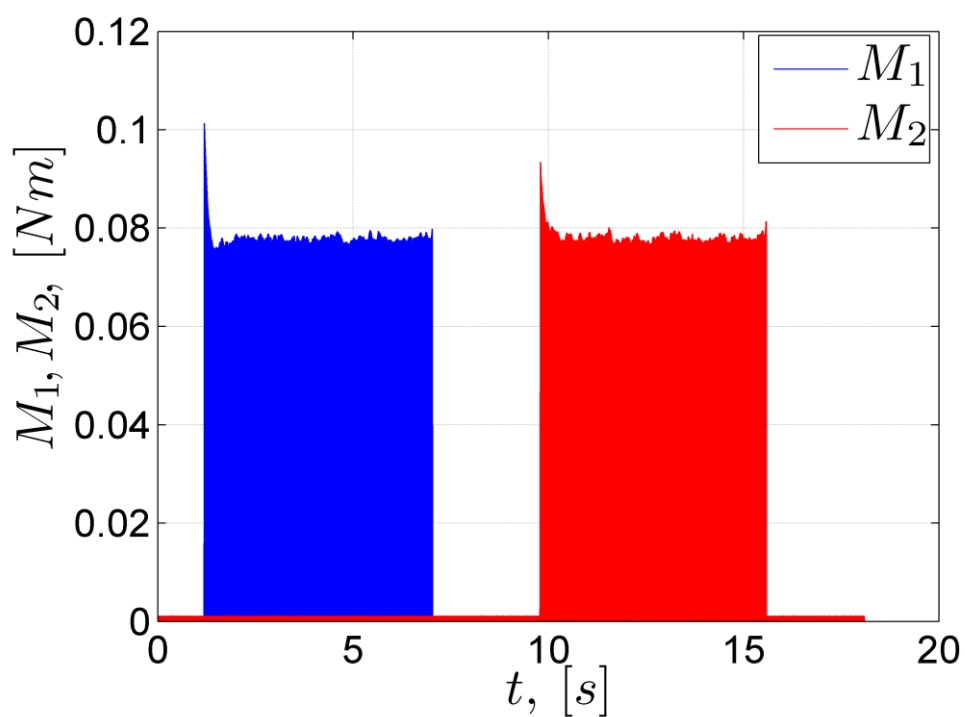
Rys. 115. Straty energii na rezystancji w robocie przemysłowym (E_R).

W robocie eksperymentalnym, energia na wale była niewiele większa od energii strat na rezystancji. Natomiast w robocie przemysłowym, energia na wale jest wielokrotnie większa

od strat na rezystancji. Poza tym sprawność przekładni tego silnika wynosi 81%. Małe straty wynikają z bardzo dobrych parametrów silników, które zostały zamontowane w robocie przemysłowym.

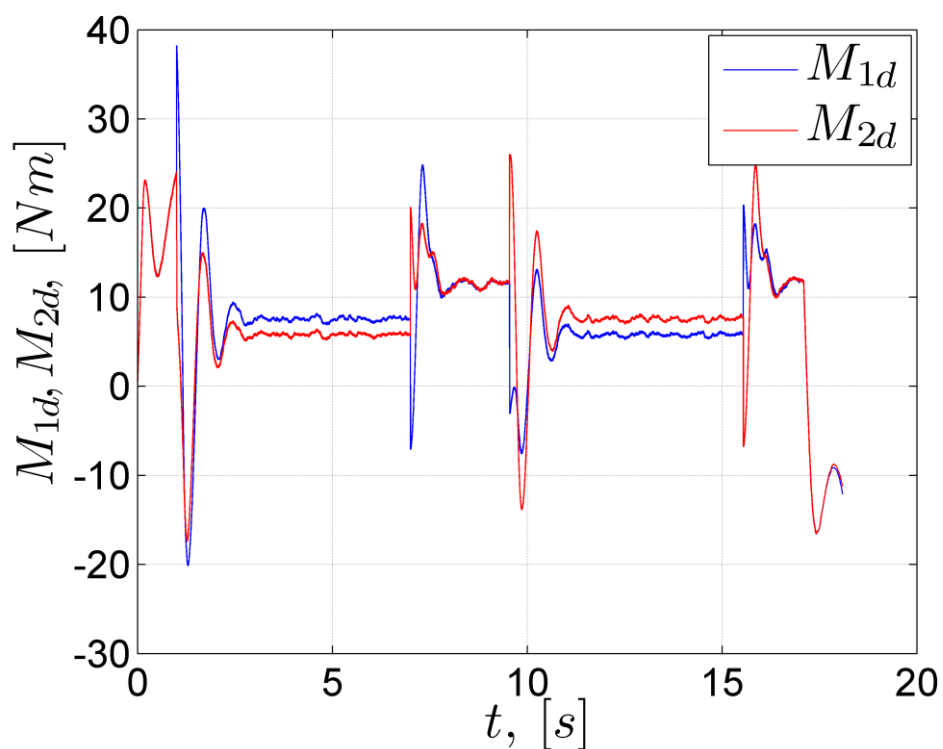


Rys. 116. Momenty napędowe zadane w robocie eksperymentalnym.

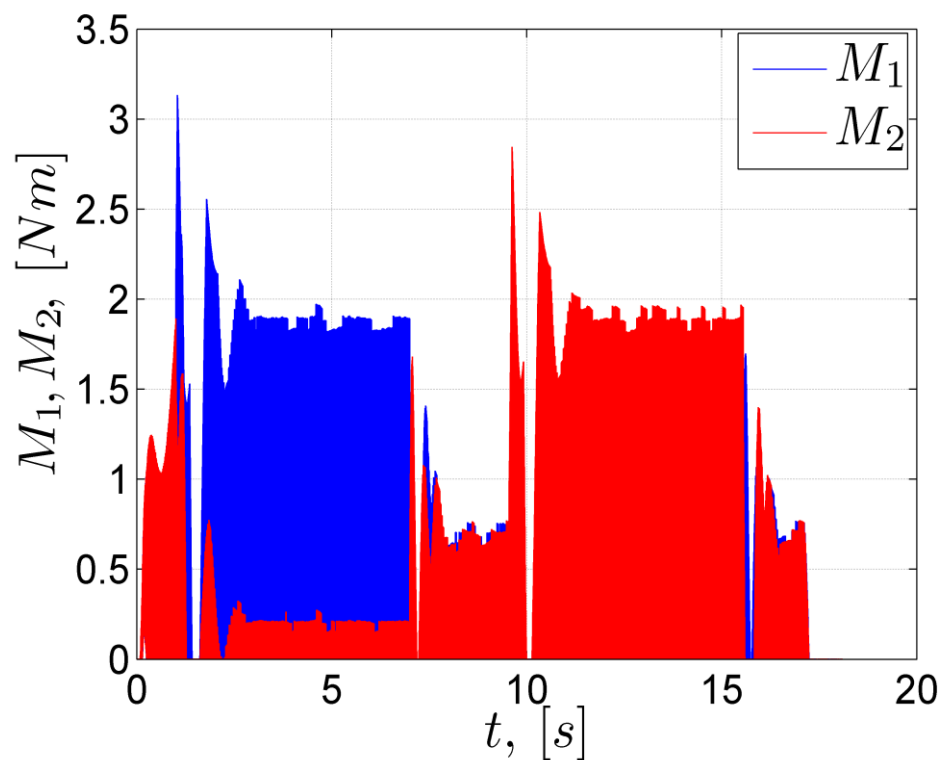


Rys. 117. Momenty napędowe wynikające z działania falownika o sterowaniu PWM w robocie eksperymentalnym.

Na rysunkach 116 i 117 przedstawiono momenty napędowe zadane i momenty napędowe, wynikające z działania falownika o sterowaniu PWM, dla robota eksperymentalnego.



Rys. 118. Momenty zadane w robocie przemysłowym.



Rys. 119. Momenty wynikające z działania falownika o sterowaniu PWM w robocie przemysłowym.

Na rysunkach 118 i 119 przedstawiono momenty napędowe, wynikające z działania falownika o sterowaniu PWM i momenty zadane, dla robota przemysłowego.

Podsumowanie

W rozdziale przedstawiono sposób identyfikacji parametrów elektrycznych robota eksperymentalnego oraz zademonstrowano sposób przeprowadzenia analizy zużycia energii w robocie eksperymentalnym i przemysłowym. Ponadto przedstawiono uproszczony model przekształtnika oraz algorytmu PWM zastosowanym w robotach w rozwiązaniu sprzętowym. Została przeprowadzona identyfikacja parametrów energoelektronicznych i mechanicznych robota, w wyniku której uzyskano dużą zbieżność pomiarów z symulacjami (zarówno dla obrotu kół napędowych jak i prędkości obrotowych).

Dzięki poprawnie przeprowadzonej identyfikacji i uwzględnieniu w modelu robota części energoelektronicznej oraz napędowej, możliwe było przeprowadzenie dyskusji na temat zużycia energii przez robota mobilnego. Dokonano zatem symulacji, dla robota mobilnego poruszającego się po trajektorii w kształcie cyfry osiem. Symulację wykonano dla regulatora uwzględniającego wpływ koła samonastawnego i z pominięciem tego wpływu. W wyniku uwzględnienia w sterowaniu wpływu koła samonastawnego, otrzymano mniejsze błędy dla ruchu po trajektorii dla podobnego zużycia energii. Oszacowano zużycie energii i sprawność robota. Dla robota eksperymentalnego sprawność wyniosła około 40%, natomiast w robocie przemysłowym sprawność wyniosła powyżej 60%.

Dokonano również weryfikacji wizualnej wyników pomiarowych z wykorzystaniem dodatkowego pomiaru, bazującego na analizie zdjęć trajektorii ruchu robota (pomiar punktu położenia początkowego i końcowego). Po przeprowadzeniu weryfikacji z wykorzystaniem analizy obrazu, również otrzymano mniejszy błąd dla regulatora uwzględniającego wpływ koła samonastawnego.

Rozdział 5

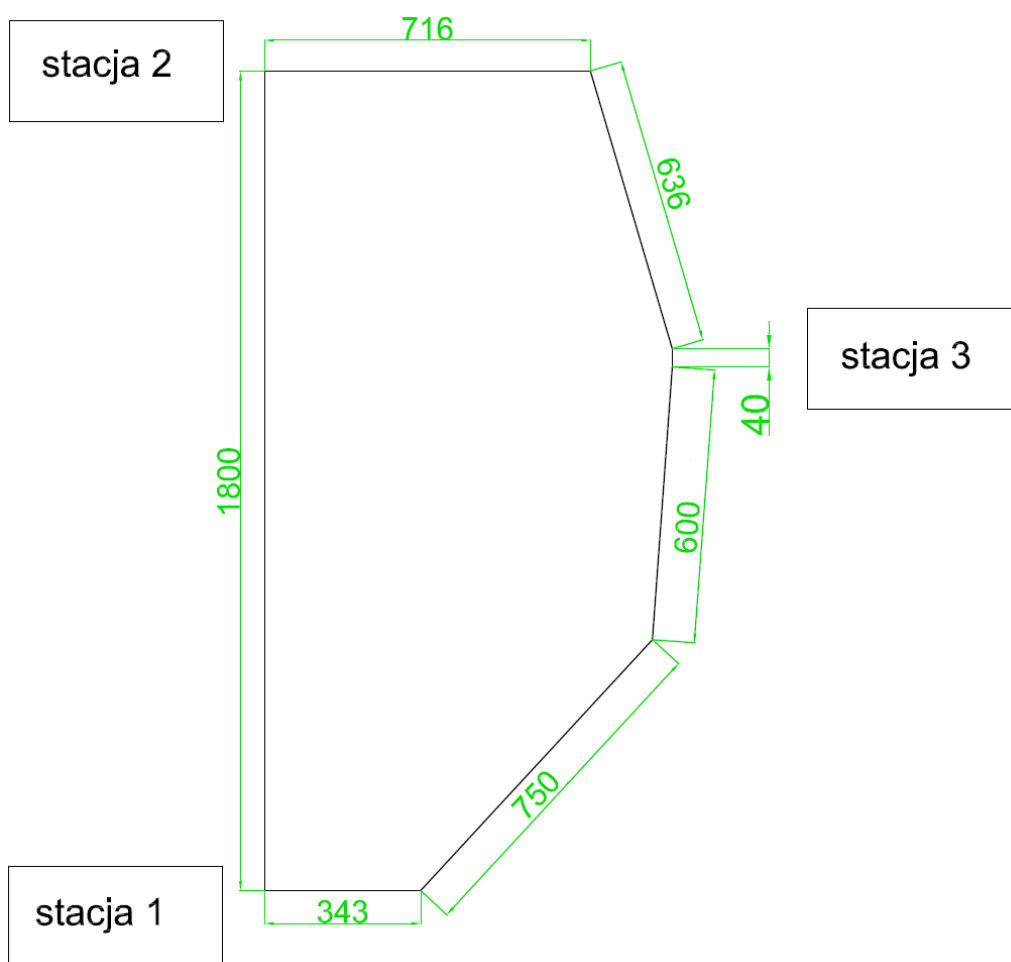
Przykładowe zastosowanie robota mobilnego do transportu w warunkach przemysłowych

W rozdziale zaprezentowano robota mobilnego przeznaczonego do pracy w warunkach przemysłowych w zakładzie HALUPCZOK-STOLARSTWO s. c. W robocie mobilnym zaimplementowano regulator uwzględniający koło samonastawne w trakcie ruchu po

trajektorii. Celem rozdziału jest udowodnienie, że robot trójkołowy uwzględniający koło samonastawne porusza się lepiej nie tylko na przykładowych trajektoriach, ale również w praktycznym rozwiązaniu.

5.1. Robot mobilny jako środek transportujący w zagadnieniu logistycznym

Bazując na modelu robota przedstawionym w niniejszej rozprawie, dokonano przykładowej aplikacji robota eksperymentalnego, jako środka transportującego w zakładzie STOLARSTWO-HALUPCZOK s. c. W hali produkcyjnej ustawiono trzy stacje robocze, wynikające ze specyfiki produkcji. Układ stacji przedstawiono na rysunku 119 a odległości podano w cm.



Rys. 119. Widok hali produkcyjnej wraz z zaznaczonymi stacjami roboczymi.

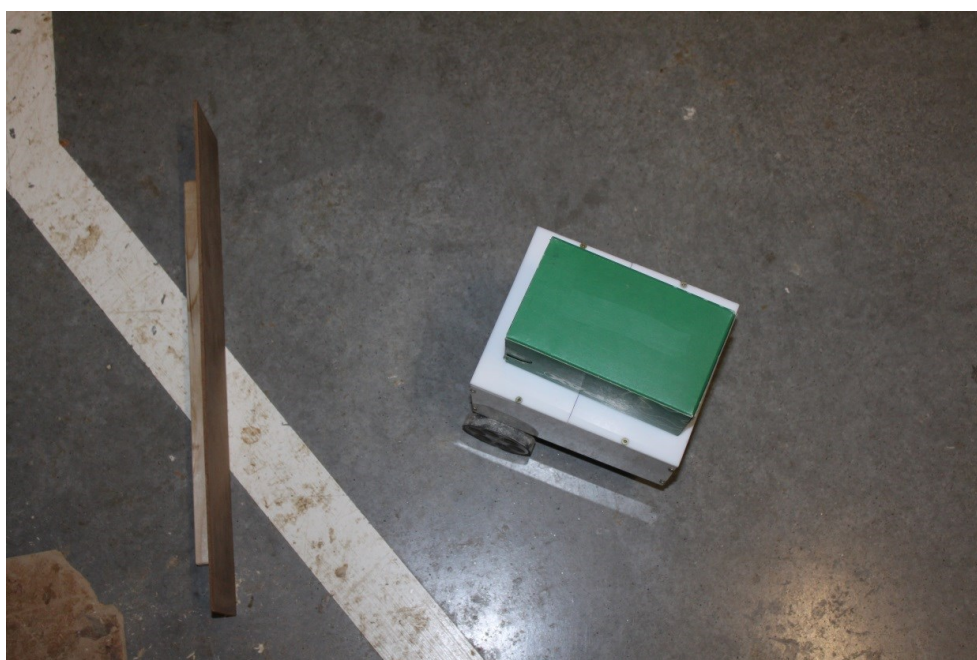
W każdej stacji został umieszczony moduł nadawczy Bluetooth, który został zaprezentowany na rysunku 45a. W robocie eksperymentalnym umieszczono również moduł Bluetooth, co pozwoliło na komunikację robota ze stacjami nadawczymi. Do sterowania

użyto algorytmu wykorzystującego informację o skręceniu koła samonastawnego wg równania (104). Błędy wynikające z odometrii (pomiaru odometrycznego), kompensowano w dwojaki sposób:

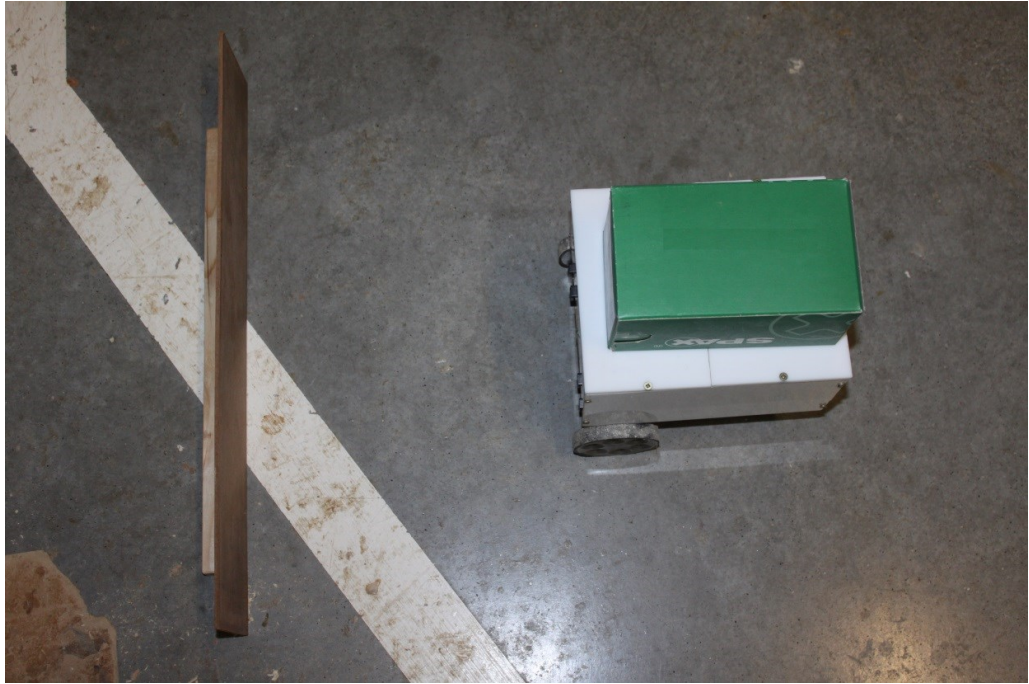
- poprzez pozycjonowanie z użyciem czujników zbliżeniowych przed i po przejeździe pomiędzy stacjami rozmieszczonymi w hali produkcyjnej,
- poprzez kompensację kąta skręcenia koła samonastawnego w trakcie ruchu robota eksperymentalnego.

Drugi sposób został przytoczony w rozdziale 3, gdzie zachowanie koła samonastawnego można opisać za pomocą inercji drugiego rzędu. Przy jeździe po prostej można korygować poruszanie się robota, poprzez kontrolę skręcenia koła samonastawnego. W tym celu wykonano doświadczenie, polegające na jeździe po prostej z użyciem informacji o skręceniu koła samonastawnego i bez tej informacji. W rezultacie, przy wykorzystaniu informacji o skręceniu koła samonastawnego, uzyskano mniejsze błędy w trakcie ruchu po trajektorii.

Wobec powyższego przeprowadzono pomiar ruchu robota eksperymentalnego wg trajektorii przedstawionej na rysunku 119. W celu realizacji zagadnienia logistycznego wybrano moduły BTM112 (przedstawione na rysunku 45a i 45b), które posiadają ograniczony do 10 metrów zasięg, aby wzajemnie się nie zakłócały, gdyż komunikacja z robotem powinna następować w trakcie zbliżania się do stacji docelowych, w których umieszczono moduły. Ruch robota składał się z trzech odcinków: stacja1-stacja2, stacja2-stacja3, stacja3-stacja1. Robot przed rozpoczęciem ruchu może być umieszczony w dowolnej pozycji, przy czym praktycznie niemożliwe jest idealne ustawienie początkowe robota. W związku z tym, przed rozpoczęciem ruchu robot ustawia się prostopadłe do obiektu, wykorzystując czujniki zbliżeniowe. Za każdym razem wykonywane jest obliczenie odległości jako wartości średniej z 10 próbek pomiarowych, co trwa około 0,5 sekundy.

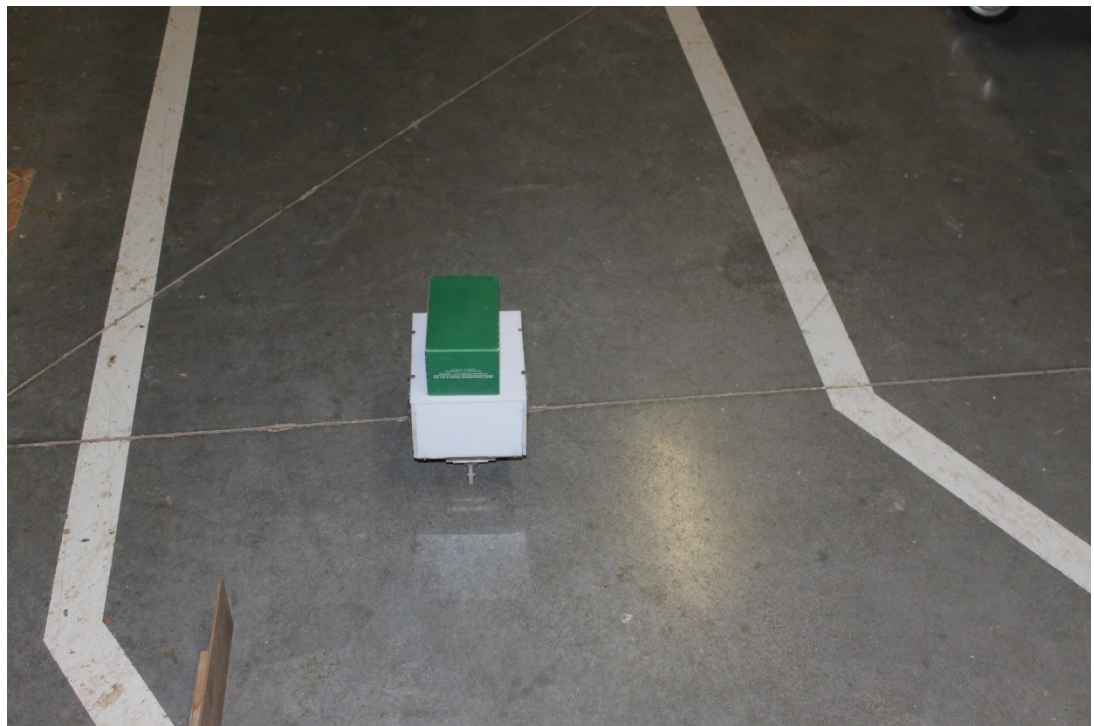


Rys. 120. Początkowe ustawienie robota eksperymentalnego.



Rys. 121. Ustawienie po pozycjonowaniu robota eksperymentalnego.

Przykładowe ustawienie robota eksperymentalnego przed rozpoczęciem ruchu pokazano na rysunku 120. Wynik pozycjonowania przedstawiono na rysunku 121. Funkcja pozycjonująca działa tak długo, dopóki różnica pomiędzy czujnikami zbliżeniowymi będzie przekraczała dopuszczalny zakres (tolerancję). Na poniższych rysunkach (120÷124) przedstawiono przypadek, robota przewożącego ładunek. Następnie na rysunku 122 została przedstawiona przykładowa trajektoria pomiędzy stacją 1 a stacją 2.

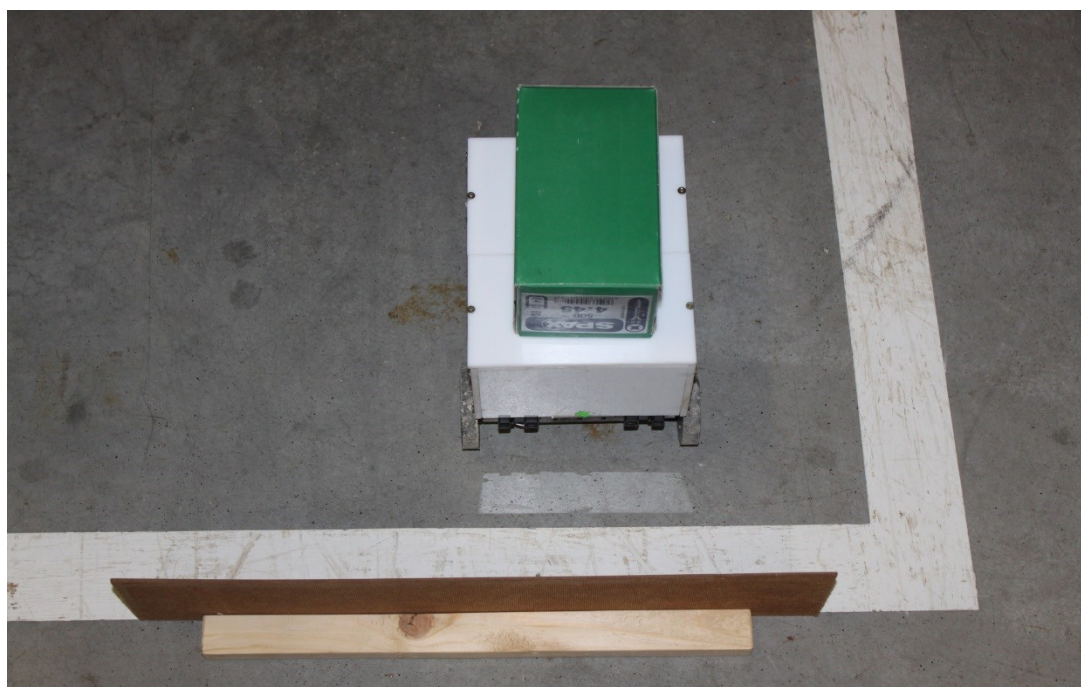


Rys. 122. Fragment z ruchu robota eksperymentalnego.



Rys. 123. Fragment ruchu robota eksperymentalnego w trakcie wykonywania zagadnienia logistycznego.

Końcową fazę ruchu pokazano na rysunku 124.



Rys. 124. Końcowa faza ruchu wraz z pozycjonowaniem robota.

W końcowej fazie ruchu robot pozycjonuje się w celu skompensowania błędów wynikających z odometrii. Podczas wykonywania eksperymentu, oprócz systematycznych błędów wynikających z odometrii, zauważono również wpływ zapylenia, które może znajdować się na hali produkcyjnej. Pył może nawarstwiać się na kołach, w wyniku czego, zmienia się średnica kół, co w konsekwencji powoduje dodatkowy błąd w poruszaniu się po trajektorii. Kolejnym zagadnieniem jest powierzchnia, po której porusza się robot, hala produkcyjna posiada gładką powierzchnię, w związku z czym istnieje problem poślizgów kół.

Pewnym rozwiązaniem mogłoby być wykorzystanie czujników zbliżeniowych i poruszanie się wzdłuż ścian, tak jak w [95], jednak zdaniem autora, w warunkach przemysłowych to rozwiązanie nie mogłoby znaleźć zastosowania.

Poniżej (tabela 8) przedstawiono, uzyskane na podstawie symulacji, zużycie energii podczas ruchu pomiędzy stacjami roboczymi (tzw. zagadnienie logistyczne). Jest to o tyle istotne, gdyż pozwala odpowiedzieć na pytanie jak długo robot może pracować w modelowanych warunkach. Kolejnym argumentem może być możliwość opracowania sterowania, które uwzględniałoby zmniejszone zużycie energii (jak np. w artykule [96]) i dobranie takich nastaw regulatora, aby robot pracował jak najdłużej. Tabela 8 zawiera wyniki dla ruchu robota eksperymentalnego po trajektorii przedstawionej na rysunku 119 z dodatkową masą i bez dodatkowej masy.

Tabela 8. Zużycie energii w trakcie ruchu pomiędzy stacjami roboczymi.

Algorytm sterujący	Energia czynna [J]	Energia czynna za PWM [J]	Straty energii [J]	Energia na wale silnika [J]	Straty na przekładni [J]	Sprawność [%]
Robot bez dodatkowej masy	271,04	260,10	87,68	106,76	65,66	39,38
Robot z dodatkową masą 2kg	489,99	472,61	174,76	188,65	109,20	38,51

Następnie dokonano pomiaru dla ruchu pomiędzy stacją 1 a stacją 2 (18 metrów po prostej), w celu udowodnienia wpływu koła samonastawnego na poprawę ruchu w praktycznym zastosowaniu. Wyniki błędu średniego położenia punktu charakterystycznego A ($\Delta \bar{A}$), obliczonego na podstawie 10 pomiarów, pomiędzy zadaniem położeniem (indeks d), a uzyskanym położeniem końcowym wyrażono jako:

$$\Delta \bar{A} = \frac{1}{10} \sum_{k=1}^{10} \sqrt{(x_{Adk} - x_{Ak})^2 + (y_{Adk} - y_{Ak})^2}. \quad (129)$$

Wyniki przedstawione w tabeli 9, zostały uzyskane z wykorzystaniem analizy graficznej (Rys. 103).

Tabela 9. Wartości błędów położenia punktu charakterystycznego A.

Rodzaj regulatora w robocie eksperymentalnym	$\Delta \bar{A}$ [cm]
Regulator bez uwzględnienia wpływu koła samonastawnego	35,48
Regulator uwzględniający wpływ koła samonastawnego	25,96

Dla regulatora uwzględniającego wpływ koła samonastawnego, uzyskano znacznie mniejszy błąd po trajektorii i ograniczono tym samym błędy wynikające z odometrii. Należy jednak zwrócić uwagę na to, że w warunkach przemysłowych istnieje szereg czynników, które mogą zakłócić ruch robota. Oprócz wspomnianych wcześniej błędów wynikających z odometrii, należy uwzględnić zapylenie, które szczególnie może zakłócić działanie czujników

zblizeniowych. Zdaniem autora, konieczne jest przeprowadzenie dalszych badań, nad udoskonaleniem ruchu robotów mobilnych, uwzględniających warunki panujące w środowisku przemysłowym.

Podsumowanie

W niniejszym rozdziale przedstawiono przykładową aplikację robota eksperymentalnego, jako środka transportującego, użytego w zakładzie przemysłowym. W tabeli 8 przedstawiono przykładowe zużycie energii dla robota eksperymentalnego, poruszającego się z dodatkową masą 2 kg i bez dodatkowej masy. Podczas poruszania się po trajektorii przedstawionej na rysunku 119, robot pozycjonował się w każdej ze stacji za pomocą pomiarów z czujników optycznych. To pozycjonowanie było konieczne, żeby zniwelować błędy z odometrii, powstałe w trakcie ruchu lub po jego zakończeniu (np. w skutek różnej bezwładności silników, robot przy hamowaniu mógł lekko skrócić). Dodatkową przyczyną błędów pojawiających się w trakcie ruchu robota, są błędy powstałe podczas jego obrotu, gdyż jest to bezpośrednio powiązane z błędami wynikającymi z odometrii. Dzięki określeniu parametrów robota, możliwa jest dyskusja na temat zużycia przez niego energii. Możliwe jest dopasowanie sterowania robota w taki sposób, aby robot wykonywał przejazd pomiędzy stacjami w jak najkrótszym czasie, bądź też można tak dopasować sterowanie, żeby robot pracował jak najdłużej. W ramach przeprowadzonych badań udowodniono również, że uwzględnienie koła samonastawnego, pozwala na ograniczenie błędów spowodowanych wpływem odometrii. Dlatego też, wskazane są dalsze prace na taką konstrukcją, która może znaleźć zastosowanie w przemyśle, nie tylko jako środek transportujący, ale także jako autonomiczny pojazd. Uwzględnienie sił nacisku kół na podłoże w sterowaniu, może być również wykorzystane w motoryzacji, poprzez pomiar ciśnienia kół w samochodzie. Dzięki czemu jest możliwość zwiększenia bezpieczeństwa oraz poprawa sterowania w pojazdach autonomicznych, które poruszają się bez udziału kierowcy.

Rozdział 6

Podsumowanie

W pracy wykazano, jak wielkie znaczenie ma uwzględnienie koła samonastawnego w trójkołowym robocie mobilnym. Koło to podczas skręcenia, wpływa bowiem na zmianę sił nacisku pozostałych kół na podłoże. Wynika to nie tylko z rezultatów symulacji, w których wyraźnie widoczny jest wpływ koła samonastawnego. Przeprowadzone badania z wykorzystaniem prototypowych robotów, także potwierdziły wpływ tego koła.

W celu uzyskania zgodności wyników symulacji z rezultatami pomiarów, została przeprowadzona identyfikacja parametrów mechanicznych, energoelektronicznych i napędowych robota. Została przeprowadzona także weryfikacja wpływu koła samonastawnego, na zmianę sił nacisku kół na podłoże. Weryfikację tę przeprowadzono za pomocą pomiaru, z wykorzystaniem trzech wag. Uzyskano dużą zgodność wyników pomiarowych z rezultatami obliczeń, stosując do nich wyprowadzone w pracy wzory. Dodatkowo oszacowano współczynniki tarcia toczonego. Opis tego oszacowania znajduje się w podrozdziale 2.3.

W kolejnym kroku zaimplementowano regulator PD z członem zawierającym informację o kole samonastawnym, który został umieszczony w warstwie sterowania PWM. Takie rozwiązanie zdaniem autora uzasadnione było z kilku względów:

- ograniczenia mocy obliczeniowej w zastosowanym mikrokontrolerze,
- prostoty implementacji.

Wykorzystując zbudowany prototypowy model robota mobilnego eksperymentalnego, dokonano weryfikacji wyników symulacji. Wyniki te, dotyczyły szczególnie badania zachowania koła samonastawnego, które dotychczas było pomijane, bądź traktowane jako punkt podparcia. Wykorzystując serię pomiarów z różnym początkowym kątem skręcenia, określono, jak zmienia się kąt skręcenia koła samonastawnego w procesie zbiegania kąta skręcenia koła do kąta, odpowiadającego zadanej trajektorii. Wywnioskowano, że zachowanie koła samonastawnego przypomina obiekt inercyjny II-go rzędu z opóźnieniem. W celu określenia czasów inercji obiektu II-go rzędu przeprowadzono oszacowanie z wykorzystaniem funkcji minimalizującej *fminsearch()*. Oszacowanie to pozwoliło na uzyskanie i wykorzystanie syntetycznych informacji o właściwościach koła samonastawnego w sterowaniu robotem mobilnym trójkołowym. Przy wykorzystaniu tej informacji, uzyskano poprawę ruchu robota po trajektorii. Ponadto wykorzystanie w regulatorze informacji o kącie skręcenia koła samonastawnego, pozwala na poprawę ruchu robota bez dodatkowego zużycia energii. Przeprowadzone badania wskazują na to, że wykorzystanie informacji o ruchu koła samonastawnego pozwala także, co jest istotne, na ograniczenie błędów wynikających z odometrii. Zdaniem autora, korekcja kąta skręcenia koła samonastawnego, poprawia trajektorię ruchu robota, zarówno w robocie posiadającym koło niezorientowane osiowo (off-centered orientable wheel) jak i zorientowane osiowo (centerd orientable wheel). Problematyka błędów wynikających z odometrii, jest obecnie bardzo aktualna, dotychczas zostały zaproponowane metody obliczeniowe pozwalające na zmniejszenie błędów wynikających z odometrii, jednak bazowały one jedynie na impulsach zliczanych z enkoderów kół napędowych. Inne stosowane rozwiązania wykorzystywały zewnętrzne systemy nawigacji, takie jak GPS. Niestety te rozwiązania cechują się niedokładnościami, rzędu pojedynczych metrów. Poza tym, zewnętrznych systemów GPS, nie można stosować w obiektach zamkniętych, takich jak hale produkcyjne. Alternatywnym rozwiązaniem jest zastosowanie systemu wizyjnego do pozycjonowania. Taka metoda charakteryzuje się znacznie większą dokładnością. Wadą tego rozwiązania, jest niewielka mobilność, gdyż w razie zmiany miejsca, konieczne jest przeniesienie kamer oraz ewentualne doposażenie nowego obiektu, w dodatkowe kamery. W chwili obecnej, rozwiązanie zastosowane w pracy jest ograniczone tylko do płaskich powierzchni, jednak planowane są dalsze badania na innych, zróżnicowanych rodzajami podłoża.

Podsumowując, użycie informacji o kącie skręcenia koła samonastawnego, zmniejsza błędy powstałe w czasie ruchu robota po trajektorii, poprawiając jakość jego ruchu. Tym samym teza pracy została udowodniona. Uwzględnienie właściwości koła samonastawnego w regulatorze, znacząco poprawiło sterowanie zarówno w robocie eksperymentalnym, jak i przemysłowym. Informacja o zmieniających się siłach nacisku kół na podłoże, może być zastosowana nie tylko w robotach mobilnych, ale również w samochodach, gdzie zmiana sił nacisku może być mierzona, czujnikami zamontowanymi w oponach. W dobie prac nad pojazdami, które mają być całkowicie autonomiczne, taka informacja może znacznie poprawić sterowanie tego typu pojazdów.

Bibliografia

- [1] Toyota Annual Report 2014.
- [2] Daimler Hightech Report 2/2002.
- [3] www.eliomotors.com/
- [4] www.polaris.com/en-us/slingshot
- [5] **F. Fahim**, Autonomous Robots: Modeling, Path-Planning and Control, New York [London] Springer, 2008.
- [6] **L. S. Martins-Filho et al**, Kinematic control of mobile robots to produce chaotic trajectories, ABCM Symposium Series in Mechatronics Vol. 2, pp. 258-264, 2006.
- [7] **J. Giergiel, Z. Hendzel, W. Żylski**, Symboliczne generowanie dynamicznych równań ruchu mobilnego robota Pioneer-2DX, Przegląd Mechaniczny nr 11/2001, str. 24-29, 2001.
- [8] **D. Chakarov**, Kinematics Model of Nonholonomic Wheeled Mobile Robots for Mobile Manipulation Tasks, Proc. of the 5th Baltic-Bulgarian Conference on Bionics and Prosthetics , pp.59-61, 2006.
- [9] **J. Giergiel, W. Żylski**, Description of motion of a mobile robot by Maggie's equations, Journal of Theoretical and Applied Mechanics 43, pp. 511-521, 2005.
- [10] **M. J. Jung et al**, The Miniature Omni-directional Mobile Robot OmniKity-I (OK-I), in Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2686-2691, 1999.
- [11] **M. Trojnacki, K. Kurc**, Analiza mobilności robota trzykołowego na bazie jego modelu, Modelowanie Inżynierskie 44, str. 265-275, 2012.
- [12] **Z. Hendzel, W. Żylski, T. Burghardt**, Autonomiczne mobilne roboty kołowe: mechatroniczne projektowanie i sterowanie, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2008.
- [13] **S. Staicu**, Dynamics equations of a mobile robot provided with caster wheel, Nonlinear Dynamics 58, pp. 237-248, 2009.
- [14] **M. Giergiel, P. Małka**, Modelowanie kinematyki i dynamiki mobilnego minirobota, Modelowanie Inżynierskie 32, str. 157-162, 2006.
- [15] **P. Małka**, Pozycjonowanie i nadążanie minirobota kołowego, Praca doktorska, AGH 2007.
- [16] **R. Beniak, T. Pyka**, Dobór nastaw regulatora dla robota trójkołowego przy uwzględnieniu wpływu koła włączanego i zmiennych współczynników tarcia kół o podłoże, Pomiary-Automatyka-Kontrola nr 11, str. 1390-1395, 2010.
- [17] **R. Beniak, T. Pyka**, Influence of PWM on Trajectory Accuracy in Mobile Robot Motion, JAMRIS Vol.6, pp. 50-56, 2012.
- [18] **R. Beniak, T. Pyka**, Modelling and Control-Related Analysis of the Ground Pressure Exerted by Wheels in a Tri-Wheel Mobile Robot, Proc. of the 19th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics MMAR Międzyzdroje, 2014.
- [19] **M. Śmieszek**, Ruch i zapotrzebowanie na energię automatycznie kierowanego pojazdu transportowego – kołowego robota mobilnego, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2000.

- [20] **Ch. H. Kim and B. K. Kim**, Energy-Saving 3-Step Velocity Control Algorithm for Battery-Powered Wheeled Mobile Robots, Proc. of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation Barcelona, Spain, pp. 2375-2380, 2005.
- [21] **Ch. H. Kim, B. K. Kim**, Minimum-Energy Motion Planning for Differential-Driven Wheeled Mobile Robots, Motion Planning, Xing-Jian Jing (Ed.) ISBN: 978-95307619-01-5, InTech, 2008.
- [22] **Y. Mei et all**, Energy-Efficient Motion Planning for Mobile Robots, Proc. of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation New Orleans, LA, pp. 4344-4349, 2004.
- [23] **Y. Mei**, Energy-Efficient Mobile Robots, PhD Work, Purdue University, 2007.
- [24] **R. Beniak, T. Pyka**, Zgłoszenie patentowe P.407263 pt. „Podwozie pojazdu trójkołowego z kołem samonastawnym”, 2014.
- [25] **W. W. Grey**, An imitation of life, Scient. Am. 182, pp. 42-45, 1950.
- [26] **B. d’Andrea-Novel, G. Bastin and H. Campion**, Modelling and Control of Non Holonomic Wheeled Mobile Robots, Proc. Of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation Sacramento, California, pp. 1130-1135, 1991.
- [27] **G. Campion, G. Bastin, B. D’Andrea-Novel**, Structural Properties and Classification of Kinematic and Dynamic Models of Wheeled Mobile Robots, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 12, No. 1, pp. 47-61, 1996.
- [28] **M. Wada and Sh. Mori**, Holonomic and Omnidirectional Vehicle with Conventional Tires, Proc. of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation Minneapolis, Minnesota, pp. 3671-3676, 1996.
- [29] **R. Fierro, F. L. Lewis**, Control of a Nonholonomic Mobile Robot: Backstepping Kinematics Into Dynamics, Journal of Robotic Systems, pp. 149-164, 1997.
- [30] **I. Bonilla, F. Reyes and M. Mendoza**, Modelling and Simulation of a Wheeled Mobile Robot in Configuration Classical Tricycle, Proc. of the 5th WSEAS International Conference on Instrumentation, Measurement, Control, Circuits and System, IMCCAS 2005.
- [31] **L. Garcia, J. Tornero**, Kinematic control of wheeled mobile robots, Latin American Applied Research 38, pp. 7-16, 2008.
- [32] **D. R. Parhi and B. B. V. L. Deepak**, Kinematic model of three wheeled mobile robot, Journal of Mechanical Engineering Research Vol. 3 (9), pp. 307-318, 2011.
- [33] **S. K. Saha and J. Angeles**, Kinematics and Dynamics of a Three-Wheeled 2-DOF AGV, in Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1572-1577, 1989.
- [34] **B. Stouten, A. J. de Graaf**, Cooperative Transportation of a Large Object – Development of an Industrial Application, Proc. of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation New Orleans, LA, pp. 2450-2455, 2004.
- [35] **H. Weber**, A motion planning and execution system for mobile robot driven by stepping motors, Robotics and Autonomous Systems 33, pp. 207-221, 2000.
- [36] **J. E. Normey-Rico et all**, Mobile robot path tracking using robust PID controller, Control Engineering Practice 9, pp. 1209-1214, 2001.
- [37] **M. J. Giergiel, Z. Hendzel, W. Żylski**, Modelowanie i sterowanie mobilnych robotów kołowych, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2002.

- [38] **H. S. Shim, Y. H. Sung**, Asymptotic control for wheeled mobile robots with driftless constraints, *Robotics and Autonomous Systems* 43, pp. 29-37, 2003.
- [39] **J. Giergiel, T. Buratowski**, Modelowanie kinematyki i dynamiki w konstrukcjach mobilnych minirobotów kołowych, *Pomiary Automatyka Kontrola* 11/2004, str. 16-18, 2004.
- [40] **F. Kuhne W. F. Lages, J. M. G. da Silva Jr.**, Model Predictive Control of a Mobile Robot Using Linearization, *Mechatronics and Robotics* 2004, pp. 525-530, 2004.
- [41] **Ch. F. Chang, Ch. I. Huang and L. Ch. Fu**, Nonlinear Control of a Wheeled Mobile Robot with Nonholonomic Constraints, 2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, pp. 5404-5410, 2004.
- [42] **F. Kuhne, W. F. Lages, J. M. G. da Silva Jr**, Mobile robot trajectory tracking using model predictive control, *Proc. of the 2005 Latin-American Robotics Symposium*, 2005.
- [43] **S. Noga**, Kinematics and dynamics of some selected two-wheeled mobile robots, *Archives of Civil and Mechanical Engineering* Vol. VI No. 3, pp. 55-70, 2006.
- [44] **J. A. Battle, A. Barjau**, Holonomy in mobile robots, *Robotics and Autonomous Systems* 57, pp. 433-440, 2009.
- [45] **T. Buratowski, J. Giergiel**, Dynamics Modeling and Identification of the Amigobot Robot, *Mechanics and Mechanical Engineering* Vol. 14 No. 1, pp. 65-79, 2010.
- [46] **T. Buratowski**, Kinematics Modeling of the Amigobot Robot, *Mechanics and Mechanical Engineering* Vol. 14 No. 1, pp. 57-64, 2010.
- [47] **Z. Hendzel, M. Szuster**, Neuronowe programowanie dynamiczne w sterowaniu behawioralnym mobilnym robotem kołowym, *Acta Mechanica et Automatica* Vol. 5, No. 1, str. 28-36, 2011.
- [48] **M. Trojnecki**, Modelowanie i symulacja ruchu mobilnego robota trzykołowego z uwzględnieniem poślizgu kół jezdnych, *Modelowanie Inżynierskie* 41, str. 411-420, 2011.
- [49] **M. Nawrocki, A. Burghardt, Z. Hendzel**, Identyfikacja parametryczna mobilnego robota Amigobot, *Modelowanie Inżynierskie* 42, str. 289-294, 2011.
- [50] **A. Srebro**, Modelowanie trajektorii ruchu dwukołowego robota mobilnego na podstawie ruchu obrotowego względem środka chwilowego obrotu, *Modelowanie Inżynierskie* 42, str. 407-418, 2011.
- [51] **Z. Yaghoubi, H. Zarabadipour and M. A. Shoorehdeli**, Energy Reduction with Anticontrol of Chaos for Nonholonomic Mobile Robot System, *Abstract and Applied Analysis* Volume 2012, 14 pages, 2012.
- [52] **J. Wang et all**, A Reduced-Order Analytical Solution to Mobile Robot Trajectory Generation in the Presence of Moving Obstacles, *Proc. of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation* New Orleans, LA, pp. 4301-4307, 2004.
- [53] **A. Ailon, N. Berman, S. Arogeti**, On controllability and trajectory tracking of a kinematic vehicle model, *Automatica* 41, pp. 889-896, 2005.
- [54] **R. Solea, A. Filipescu and U. Nunes**, Sliding-Mode Control for Trajectory-Tracking of a Wheeled Mobile Robot in Presence of Uncertainties, *Asian Control Conference ASCC* 2009, pp. 1701-1706, 2009.
- [55] **C. De La Cruz, T. F. Bastos, R. Carelli**, Adaptive motion control law of a robotics wheelchair, *Control Engineering Practice* 19, pp. 113-125, 2011.

- [56] **M. Sugisaka, D. Hazry**, Development of a proportional control method for mobile robot, *Applied Mathematics and Computational* 18, pp. 74-82, 2007.
- [57] **G. J. Battaglia**, Mean square error, *AMP Journal of Technology* 5, pp. 31-36, 1996.
- [58] **P. Wach**, Skrypt uczelniany nr 148. Układy elektromechanicznego przetwarzania energii, Opole, 1991.
- [59] **R. Beniak, P. Wach**, Skrypt uczelniany nr 220. Zadania z dynamiki układów elektromechanicznych przy zastosowaniu Maple V, Opole, 1999.
- [60] **J. Leyko**, *Mechanika ogólna tom 2*, PWN, Warszawa 1969.
- [61] **K. Yoshida, H. Hamano**, Motion dynamics and control of a planetary rover with slip-based traction model, *Proc. of SPIE - The International Society for Optical Engineering* Vol. 4715, pp. 275-286, 2002.
- [62] **N. Sidek and N. Sarkar**, Dynamic Modeling and Control of Nonholonomic Mobile Robot with Lateral Slip, *Proc. of the 7th WSEAS international Conference on SIGNAL PROCESSING, ROBOTICS and AUTOMATION (ISPRA 08)*, pp. 66-74, 2008.
- [63] **W. Żylski, S. Noga**, Ocena wpływu współczynników modelu na parametry ruchu mobilnego robota kołowego, *Przegląd Mechaniczny* 6/2002, str. 20-24, 2002.
- [64] **D. Haliday, R. Resnick, J. Walker**, *Podstawy fizyki T.1*, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2005.
- [65] **R. Hooke, T. A. Jeeves**, "Direct search" solution of numerical and statistical problems, *J. Assoc. Comp.*, 8(2), pp. 212-229, 1961.
- [66] **R. Beniak**, Estymacja parametrów wybranych napędów przekształtnikowych z wykorzystaniem w procesie modelowania matematycznego sformalizowanej metody zmiennej struktury, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej*, 2013.
- [67] **D. C. Conner et al**, Improved dead reckoning using caster wheel sensing on a differentially steered 3-wheeled autonomous vehicle, *Proc. of SPIE- the International Society for Optical Engineering* Vol. 4195, pp. 139-150, 2000.
- [68] **D. DeVon and T. Bretl**, Kinematic and Dynamic Control of a Wheeled Robot, *Proc. of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems San Diego, CA, USA*, pp. 4065-4070, 2007.
- [69] www.and-tech.pl
- [70] **J. Borenstein and L. Feng**, Measurement and Correction of Systematic Odometry Errors in Mobile Robots, *IEEE Transactions on Robotics and Automation* Vol. 12, No. 6, pp. 869-880, 1996.
- [71] **A. De Luca et al**, Experiments in Visual Feedback Control of a Wheeled Mobile Robot, *Proc. of the 2002 IEEE International Conference on Robotics & Automation Washington, DC*, pp. 2073-2078, 2002.
- [72] **J. Giergiel, M. Giergiel, P. Malka**, Metody nawigacji minirobotów kołowych na przykładzie minirobota kołowego m. r. k., *Pomiary Automatyka Kontrola* vol. 53 nr 10/2007, str. 50-54, 2007.
- [73] **T. Buratowski**, *Mobile Robots – Selected Issues, Tom 266 z Rozprawy, Monografie*, Wydawnictwo AGH, 2013.
- [74] **A. Urbaniak**, *Podstawy Automatyki*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2007.

- [75] **F. N. Martins et al**, An adaptive dynamic controller for autonomous mobile robot tracking trajectory, *Control Engineering Practice* 16, pp. 1354-1363, 2008.
- [76] **J. Ye**, Adaptive control of nonlinear PID-based analog neural networks for a nonholonomic mobile robot, *Neurocomputing* 71, pp. 1561-1565, 2008.
- [77] **F. Pourboghrat, M. P. Karlsson**, Adaptive control of dynamic mobile robots with nonholonomic constraints, *Computers and Electrical Engineering* 28, pp. 241-253, 2002.
- [78] **J. M. Yang and J. H. Kim**, Sliding Mode Control for Trajectory Tracking of Nonholonomic Wheeled Mobile Robots, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 15, No. 3, pp. 578-587, 1999.
- [79] **V. Sankaranarayanan, A. D. Mahidrakar**, Switched control of a nonholonomic mobile robot, *Commun Nonlinear Sci Numer Simulat* 14, pp. 2319-2327, 2009.
- [80] **V. M. de Oliveira, W. F. Lages, E. R. de Pieri**, Mobile Robot Control Using Sliding Mode and Neural Network, *Robot Control 2003, Proc. of the 7th IFAC Symposium Wrocław*, pp. 491-496, 2003.
- [81] **Y. Hu and S. X. Yang**, A Knowledge Based Genetic Algorithm for Path Planning of a Mobile Robot, *Proc. of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation New Orleans, LA*, pp. 4350-4355, 2004.
- [82] **J. Velagic, B. Lacevic, B. Perunicic**, A 3-level autonomous mobile robot navigation system designed by using reasoning/search approaches, *Robotics and Autonomous Systems* 54, pp. 989-1004, 2006.
- [83] **Y. T. Wang, Y. Ch. Chen, M. Ch. Lin**, Dynamic Object Tracking Control for a Non-Holonomic Wheeled Autonomous Robot, *Tamkang Journal of Science and Engineering Vol. 12, No. 3*, pp. 339-350, 2009.
- [84] **R. Beniak, T. Pyka**, Control stepsize optimization for tri-wheel mobile robot, *Proc. of the 3rd International Student Conference Electrodynamics and Mechatronics (SCE III)*, pp. 73-76, 2011.
- [85] **R. Nowak**, *Statystyka dla fizyków*, Wydawnictwo PWN, Warszawa, 2002.
- [86] **A. De Luca, G. Oriolo, M. Vendittelli**, *Control of Wheeled Mobile Robots: An Experimental Overview*, RAMSETE — Articulated and Mobile Robotics for Services and Technologies, Springer-Verlag, 2001.
- [87] **L. O. Chua and P. M. Lin**, *Computer Aided Analysis of Electronic Circuits: Algorithms and Computational Techniques*, Prentice-Hall, Englewood Cliff, New Jersey, 1975.
- [88] **T. Pyka**, *Poprawa sterowania z użyciem algorytmów typu predyktor-korektor*, Politechnika Opolska Prace Doktorantów-Ćlánky Doktorandů, 2012.
- [89] **E. van Dijk et al**, PWM-Switch Modelling of DC-DC Converters, *IEEE Transactions on Power Electronics Vol. 10, No. 6*, pp. 659-665, 1995.
- [90] **A. Ammous et al**, An Advanced PWM-Switch Model Including Semiconductor Device Non-Linearities, *IEEE Transactions on Power Electronics Vol. 18, No. 5*, pp. 1-9, 2003.
- [91] **V. Vorperian**, Simplified Analysis of PWM Converters Using Model of PWM Switch Part II: Discontinuous Conduction Mode, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems Vol. 26 No. 3*, pp. 491-505, 1990.

- [92] **R. R. Boudreaux, R. M. Nelms, J. Y. Hung**, Simulation and Modeling of a DC-DC Converter Controlled by an 8-bit Microcontroller, Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1997. APEC '97 Conference Proceedings 1997, Twelfth Annual, pp. 963-969, 1997.
- [93] **D. Maksimovic et al**, Modeling and Simulation of Power Electronic Converters, Proc. of the IEEE IECON 21st International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, pp. 27-32, 1995.
- [94] **I. Zohar, A. Ailon, R. Rabinovici**, Mobile robot characterized by dynamic and kinematic equations and actuator dynamics: Trajectory tracking and related application, Robotics and Autonomous Systems, Vol. 59 Issue 6 , pp. 343-353, 2011.
- [95] **S. Kim**, Autonomous Cleaning Robot: Roboking System Integration and Overview, Proc. of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation New Orleans, LA, pp. 4437-4441, 2004.
- [96] **T. Wang et al**, Staying-Alive and Energy-Efficient Path Planning for Mobile Robots, Proc. of the 2008 American Control Conference, pp. 868-873, 2008.

Pozostałe publikacje własne autora

- [A1] **T. Pyka**, Influence of a free wheel on a motion trajectory in a three wheeled robot, Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej, Elektryka z.66 nr 342/2011, 2011.
- [A2] **T. Pyka**, Effect of Rounding Duty Cycle on the PWM Modulation, WOFEX Ostrava, pp. 546-549, 2012.
- [A3] **T. Pyka**, Regulator odporny H_2 w robocie mobilnym, Pomiary Automatyka Robotyka nr 10/2012, str. 66-70, 2012.
- [A4] **T. Pyka**, Wpływ modulacji napięcia silnika napędowego na dokładność odtwarzania trajektorii ruchu robota mobilnego, Politechnika Opolska Prace Doktorantów-Články Doktorandů, 2012.
- [A5] **T. Pyka**, Uncertainty in mobile robot-selected issues, Elektryka z.68 nr 347/2012 pp. 57-58, 2012.
- [A6] **T. Pyka**, Dobór kroku sterowania w zależności od tarcia o podłozę, Elektryka z.67 2012, str. 99-103, 2012.
- [A7] **T. Pyka**, Niepewność w robocie mobilnym, Politechnika Opolska Prace Doktorantów-Články Doktorandů, Opole 2012, str. 63-66, 2012.
- [A8] **T. Pyka**, An application of sliding control in mobile robot motion, Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej, Elektryka z.69 nr 350/2013, pp. 89-90, 2013.
- [A9] **T. Pyka**, Predictive algorithms for three-wheeled mobile robot control, WOFEX 2013, Ostrava, pp. 138-142, 2013.
- [A10] **T. Pyka**, Comparison of simulation mobile robot motion including PWM and without PWM, Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej, Elektryka z.70 nr 352/2014, pp. 85-86, 2014.