

Bartosz Wieczorek, Mateusz Kukła, Łukasz Warguła

## Algorytm adaptacyjnego układu sterującego wspomagającego ręczny napęd wózka inwalidzkiego

JEL: L62 10.24136/atest.2018.505

Data zgłoszenia: 19.11.2018 Data akceptacji: 15.12.2018

W artykule omówiona została koncepcja adaptacyjnego algorytmu sterującego elektrycznym układem wspomagającym ręczny napęd wózka inwalidzkiego. Algorytm ten znajduje zastosowanie w hybrydowych wózkach inwalidzkich. Według założonej koncepcji układ wyposażony jest w trzy tryby wspomagania w których elektryczny układ napędowy reaguje na zmieniające się warunki otoczenia.

**Słowa kluczowe:** wózek inwalidzki, napęd hybrydowy, układ sterowania.

### Wstęp

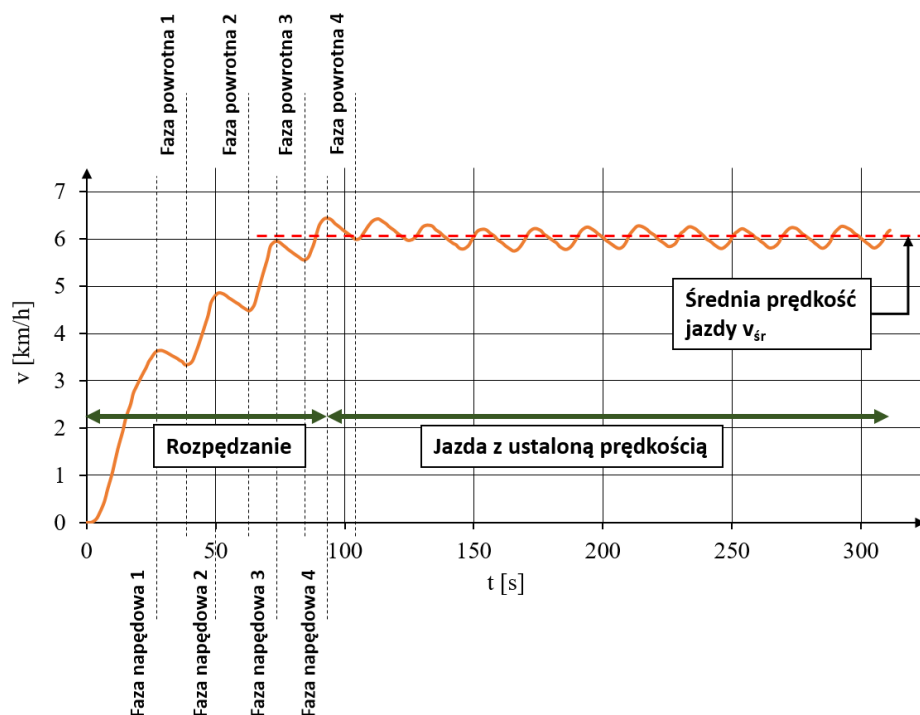
Rzeczywisty ruch wózka składa się z trzech głównych etapów: rozpędzania, jazdy z ustaloną prędkością i hamowania (rys. 1). Wszystkie etapy po za etapem hamowania składają się z faz napędowych i powrotnych [1], [2]. Podczas trwania fazy napędowej kończyzna operatora wózka ma kontakt z elementem napędowym i jednocześnie przekazuje siłę mięśniową na koło napędowe zamieniając ją na siłę napędową. Przetwarzanie siły mięśniowej na siłę napędową odbywa się za pomocą różnych mechanizmów napędowych w które wyposażony jest wózek inwalidzki. Efektem działania siły napędowej jest zwiększanie prędkości wózka inwalidzkiego przyśpieszenia.

Podczas trwania fazy napędowej, w większości konstrukcji wózków, kończyzna górna ma kontakt z elementami napędowymi np. ciągami. W związku z tym z przyczyn budowy anatomicznej człowieka i cech antropotechnicznych układu człowiek-wózek musi być

ona zakończona po upływie pewnego czasu lub po wykonaniu pewnego obrotu przez element napędzany. Przerwa w fazie napędowej niezbędna jest na powrót dłoni operatora wózka na pozycję początkową. Moment w którym dłoń operatora wraca na pozycję początkową nazywany jest w literaturze fazą powrotną. W czasie trwania fazy powrotnej nie jest generowana siła napędowa a wózek porusza się tylko dzięki sile bezwładności i energii skumulowanej podczas fazy napędowej. Ponadto podczas trwania ruchu wózka cały czas działają na niego opory ruchu. Efektem działania tych oporów jest opóźnienie  $a_h$ , które w fazie powrotnej zmniejsza prędkość wózka inwalidzkiego. W konsekwencji czego wymusza to od operatora powtórzenie fazy napędowej aby zwiększyć prędkość lub utrzymać stałą średnią prędkość jazdy. Zaznaczyć należy, że w rzeczywistych warunkach wartość opóźnienia i czas trwania fazy powrotnej nie powodują całkowitego zatrzymania wózka, a jedynie kilku procentową utratę prędkości względem prędkości maksymalnej zanotowanej podczas fazy napędowej. Takie zjawisko umożliwia rozpędzenie wózka do pewnej średniej prędkości jazdy i na utrzymywanie jej przez dłuższy czas [3].

Podczas trwania fazy powrotnej prędkość wózka może spaść do zera w przypadku braku powtórzenia fazy napędowej przez odpowiednio długi okres. Wynika to z działania przyśpieszenia hamowania zatrzymującego wózek inwalidzki (1). Opóźnienie  $a_h$  wynika z oporów ruchu jakie działają na wózek inwalidzki. W zależności od wartości opóźnienia czas trwania fazy powrotnej  $t_{fp}$  może się wydłużyć nie powodując jednocześnie zatrzymania wózka inwalidzkiego.

$$v(t) = v_0^i - a_h^i t_{fp} \quad (1)$$



Rys. 1. Przebieg zmiany prędkości w czasie podczas napędzania wózka inwalidzkiego

Gdzie:

$v(t)$  – aktualna prędkość wózka inwalidzkiego,

$v_0$  – prędkość liniowa wózka po zakończeniu i-tej fazy napędowej,

$a_h^i$  – opóźnienie w i-tej fazie powrotnej,

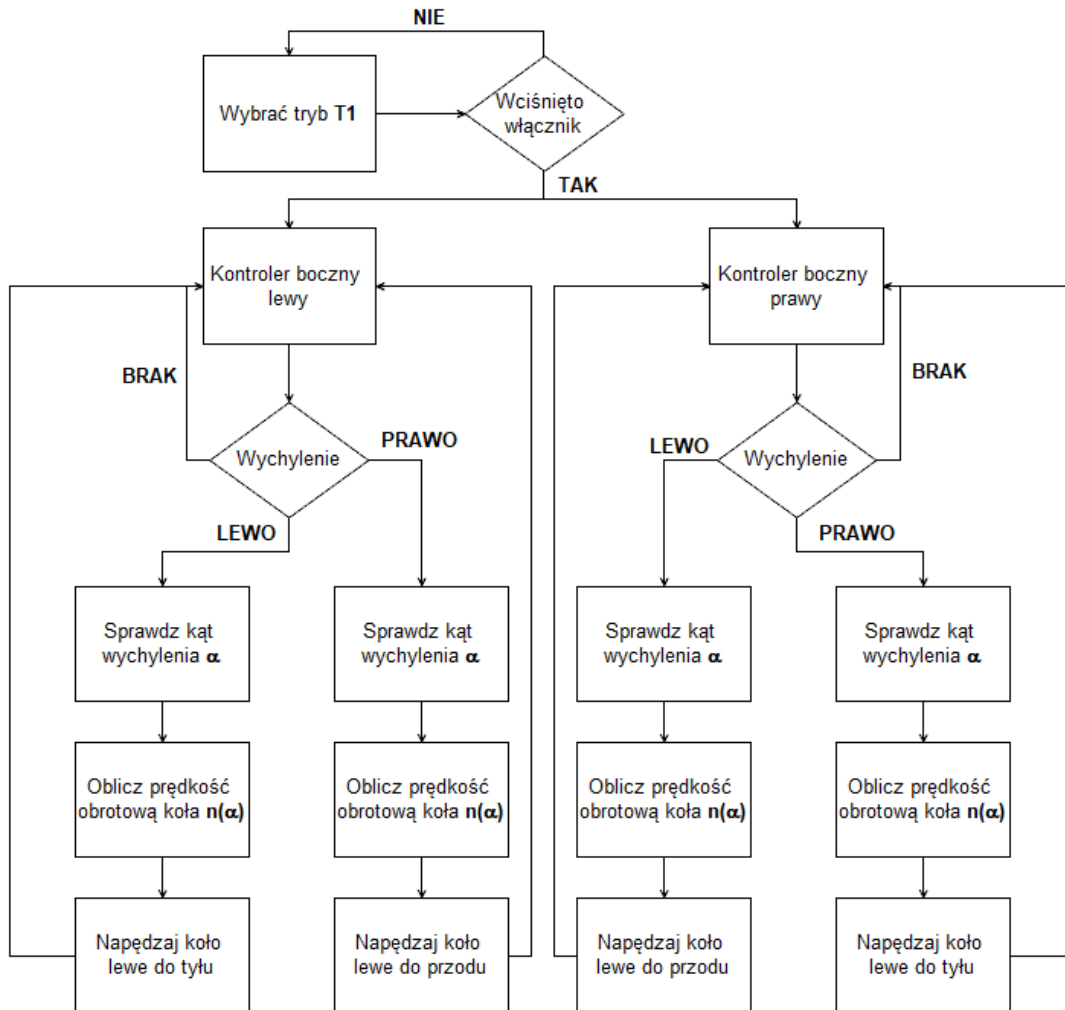
$t_p$  – czas trwania fazy powrotnej.

Zaznaczyć należy że w przypadku poruszania się po równej nawierzchni przyspieszenie hamowania zeruje się po zatrzymaniu wózka inwalidzkiego. Natomiast w przypadku poruszania się na wzniesieniu po wyhamowania ruchu do przodu, przyspieszenie

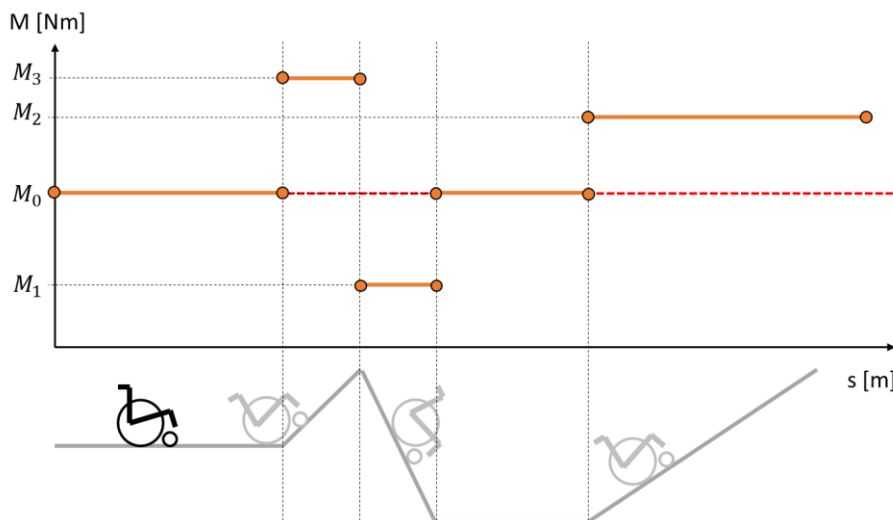
hamowania wywołuje ruch wsteczny.

## 1 Funkcje hybrydowego układu napędowego wózka inwalidzkiego

Wózek inwalidzki wyposażony w układ hybrydowy mięśniowo-elektryczny wspomagający napędzanie posiada trzy kontrolery (rys. 2). Kontrolery boczny lewy (1) i kontroler boczny prawy (2) zamocowane są do rur stelaża siedziska wózka inwalidzkiego. Operator obsługuje je za pomocą łokci i może dociskać je do siebie albo rozwierać na zewnątrz wózka. Kontrolery boczne wykorzystywane



Rys. 4. Schemat kontrolerów sterujących elektrycznym układem napędowym



Rys. 5. Schemat zmiany momentu siły oporów zewnętrznych

są przy obsłudze konkretnego trybu wspomagania napędem elektrycznym. Wybór trybu wspomagania dokonywany jest za pomocą kontrolera sterującego (3). Kontroler ten zamocowany jest do boczku wózka. Wyposażony jest on w wyświetlacz (3a) informujący o wybranym trybie, trzy przyciski (3b) pozwalające wybrać tryb asysty oraz przycisk włączania i wyłączenia trybu (3c).

Tab. 1. Wykaz trybów opisywanego układu [5]

Oznaczenie trybu	Opis
T1	Tryb wózka inwalidzkiego, w którym układ elektryczny całkowicie zastępuje ręczny układ napędowy. Sterowanie wózkiem w tym trybie odbywa się za pomocą kontrolerów bocznych. Sygnały generowane za pomocą kontrolerów bocznych sterują niezależnie lewym i prawym silnikiem zabudowanym w piaście koła napędowego wózka inwalidzkiego.
T2	Tryb wózka w którym analizowane jest jego pochylenie. Na podstawie pochylenia wózka przez silniki generowany jest moment wspomagający redukujący opory wynikające z pochylenia wózka inwalidzkiego.
T3	Tryb asysty rozpędzania wózka inwalidzkiego, w którym układ elektryczny podtrzymuje prędkość uzyskaną na końcu fazy napędowej aż do rozpoczęcia kolejnej fazy napędowej.

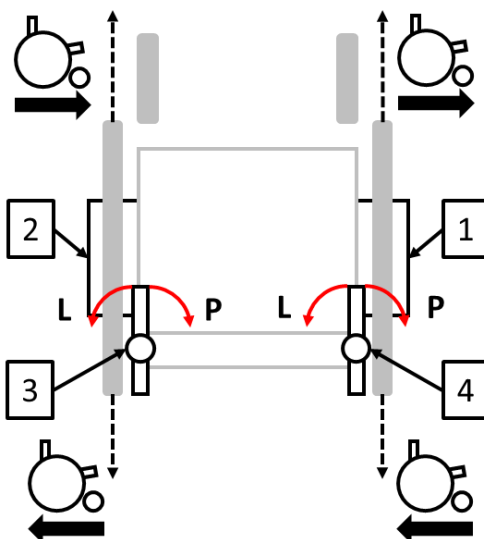
Układ elektryczny wspomagający ręczny napęd posiada trzy tryby T1, T2, T3 opisane w tabl. 1. Każdy z trybów wykorzystuje te same silniki zamontowane w piastach koła napędowego wózka

inwalidzkiego. Ponadto do ich obsługi wykorzystywane są kontrolery boczne. Użytkownik do wyboru posiada trzy tryby: wózka elektrycznego (T1), redukcji oporów zewnętrznych (T2) oraz asysty napędzania (T3).

## 2 Algorytm sterujący hybrydowym układem napędowym wózka inwalidzkiego

### 2.1 Tryb wózka elektrycznego

W trybie tym układ elektryczny w pełni zastępuje układ ręczny w napędzaniu wózka. Operator wózka steruje jego ruchem poprzez odchylenie kontrolerów bocznych (rys. 3). Kontroler boczny prawy (4) służy do sterowania silnikiem prawym (1), natomiast kontroler boczny lewy (3) steruje silnikiem lewym (1). Silniki prawy i lewy pracują niezależnie.



Rys. 3. Schemat wózka i elementów niezbędnych dla trybu T1

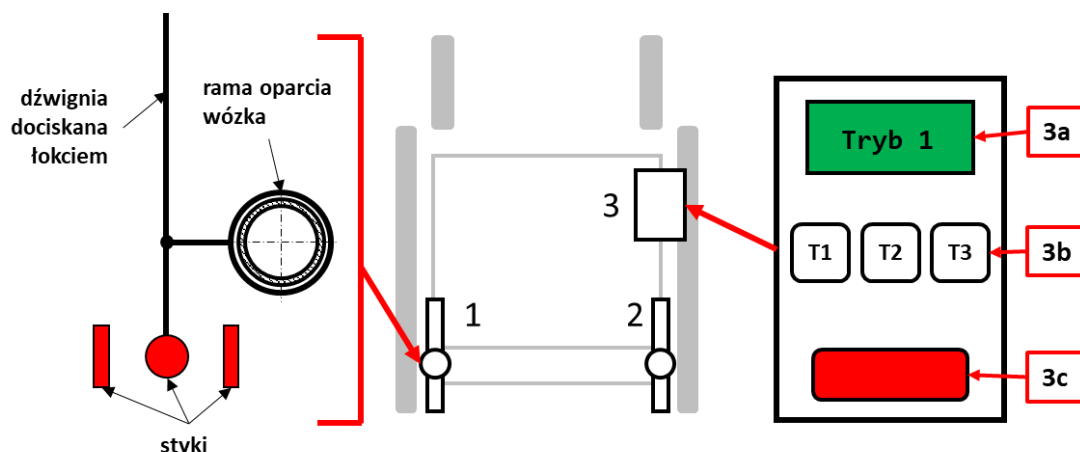
Tryb wózka elektrycznego uruchamiany jest przez wybranie przycisku trybu na kontrolerze sterującym i wciśnięciu włączenia trybu (rys. 4). Sterowanie silnikami odbywa się poprzez wychylenie kontrolerów bocznych. Wychylenie kontrolera bocznego lewego w prawo powoduje napędzanie koła lewego do przodu. Natomiast wychylenie kontrolera bocznego lewego w lewo powoduje napędzanie koła lewego do tyłu. Sytuacja jest odwrotna dla kontrolera bocznego prawego. W jego przypadku wychylenie w lewo powoduje napędzanie koła prawego do przodu. Wartość prędkości napędzania koła napędowego jest proporcjonalna dla kąta wychylenia kontrolera bocznego.

### 2.2 Tryb redukcji oporów zewnętrznych

Tryb ten w swoim działaniu powinien redukować opory wynikające z zmiany pochylenia drogi po jakiej porusza się wózek inwalidzki. Wózek inwalidzki poruszający się po poziomej nawierzchni w przybliżeniu obciążony jest stałym momentem siły oporów zewnętrznych  $M_0$  (rys. 5). W przypadku gdy wózek znajduje się na podjeździe wartość tego momentu zwiększona zostaje o moment siły oporów wzniesienia  $F_w$  wynikającej z masy wózka  $Q$  i kąta pochylenia podjazdu  $\alpha$  (2).

$$M_i = M_0 + \frac{Q \sin(\alpha) D}{2} \quad (2)$$

Gdzie:  $M_i$  – moment siły oporów zewnętrznych na  $i$ -tym odcinku drogi,  $M_0$  – moment siły oporów zewnętrznych na poziomym odcinku drogi,  $Q$  – siła ciężkości wózka inwalidzkiego,  $D$  – średnica koła



Rys. 2. Schemat kontrolerów sterujących elektrycznym układem napędowym

napędowego,  $\alpha$  – kąt pochylenia wzniesienia.

Istotą tego trybu wspomagania napędu ręcznego jest dążenie układu sterującego silnikami elektrycznymi do utrzymywania stałego momentu oporów ruchu na poziomie momentu  $M_0$ . Aby to osiągnąć silniki powinny generować moment równy momentowi siły oporów pokonywania wzniesienia  $F_w$  (3,4).

$$M_0 = M_i \pm \frac{Q \sin(\alpha) D}{2} \quad (3)$$

$$F_w = \pm Q \sin(\alpha) \quad (4)$$

Znak przed siłą oporów wzniesienia informuje o tym czy jest to podjazd czy też zjazd. W przypadku zjazdu siła ta przyjmuje wartość ujemną tak więc obniża moment siły oporów zewnętrznych. Powodując tym samym przyspieszenie wózka. Dlatego układ sterujący w tym przypadku powinien tak zwiększyć moment  $M_i$  aby utrzymać stałą wartość  $M_0$  taką jak podczas jazdy po równym terenie.

Algorytm działania trybu redukcji oporów zewnętrznych zakłada w pierwszej kolejności wybranie takiego trybu na kontrolerze centralny i jego uruchomienie po przez wciśnięcie włącznika (rys. 2, 6). Następnie sprawdzane jest czy operator wcisnął kontroler boczny po uruchomieniu trybu T2. Jeżeli tak tryb ten zostaje zatrzymany aż do ponownego wciśnięcia kontrolera bocznego. Aby zatrzymać działanie tego trybu nie istotne jest który kontroler boczny wysłał impuls, taka sama zasada obowiązuje przy wznawianiu trybu.

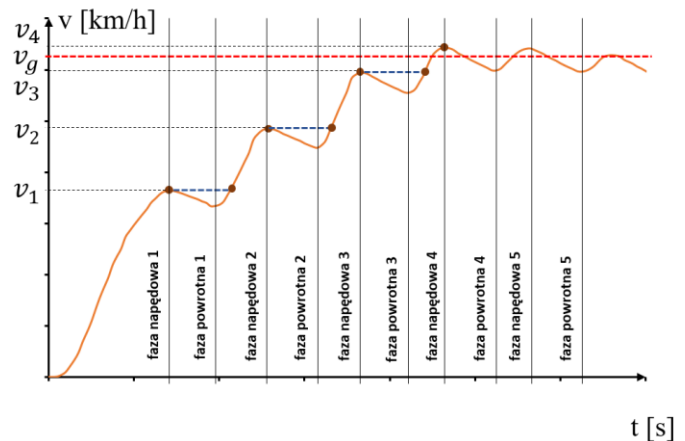
Jeżeli warunki uruchomienia trybu zostały spełnione wykonywany jest pomiar kąta pochylenia wózka inwalidzkiego. Na tej podstawie przeliczana jest wartość siły oporów wzniesienia i z niej obliczany moment siły oporów wzniesienia. Moment ten należy po równo podzielić na silnik lewy i prawy. Następnie uruchomione zostają silniki i generują obliczone wartości momentu wspomagającego.

W przypadku zjazdu z wzniesienia silniki będą musiały hamować wózek inwalidzki. Pozytywnym rezultatem takiej sytuacji było by przejście silników w tryb generatorów ładujących układ zasilający.

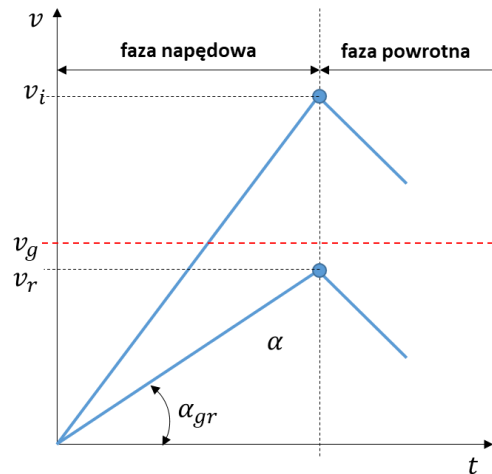
### 2.3 Tryb asysty rozpędzania

Program asysty podczas rozpędzania ma niwelować stratę prędkości wózka podczas trwania fazy powrotnej (rys. 7). Co do zasady działania programu ma on uruchamiać się po zakończeniu fazy napędowej i utrzymywać stałą prędkość wózka. Następnie ma się zakończyć wraz z pojawieniem się wzrostu prędkości spowodowanego ruchem napędowym wykonywanym przez operatora wózka. Ponad to gdy wózek przekroczy pewną graniczną prędkość pro-

gram ma czekać aż spadnie ona do ustalonej wartości granicznej a następnie podtrzymać ją.

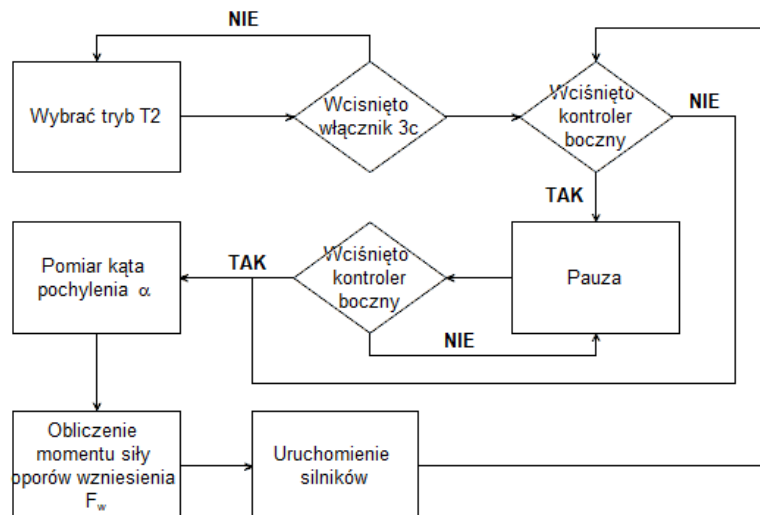


Rys. 7. Wykres zmiany prędkości wózka z naniesionymi prędkościami wynikającymi z asysty rozpędzania

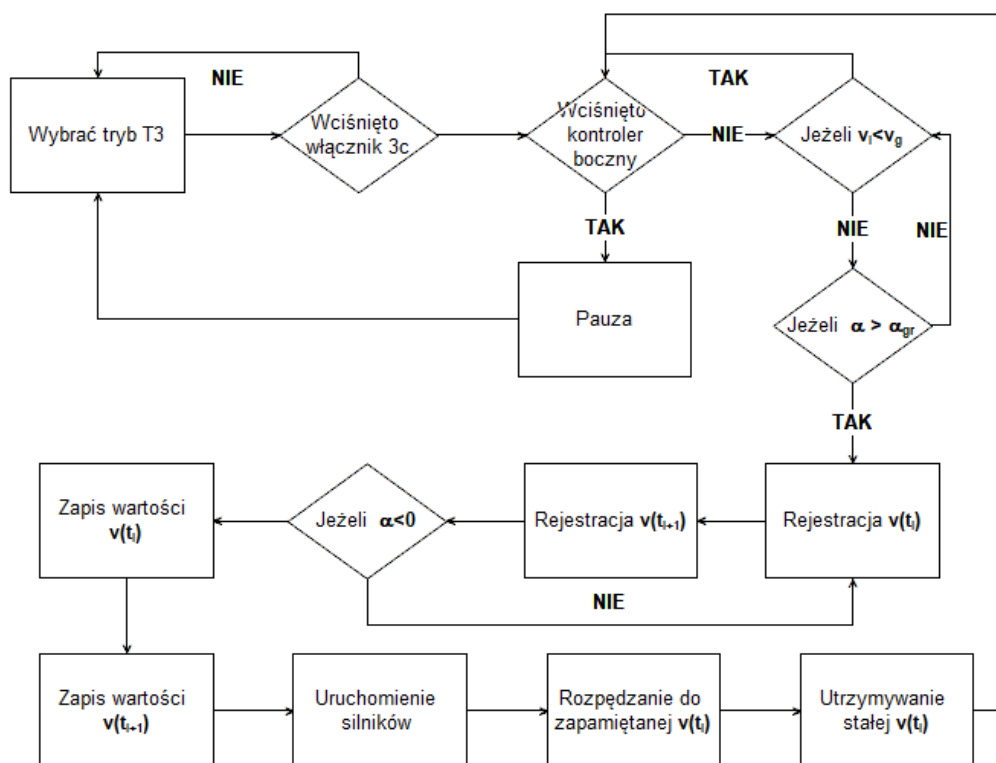


Rys. 8. Wykres przebiegu zmiany prędkości w fazach napędowej i powrotnej dla rozpędzania wózka  $v_i$  i manewrowania wózkiem

Uruchomienie programu (rys. 9) rozpoczyna się po wybraniu na kontrolerze centralnym odpowiedniego przycisku trybu i potwierdzeniu tego włącznikiem (rys. 2). Po uruchomieniu tego trybu program



Rys. 6. Algorytm trybu redukcji oporów zewnętrznych



Rys. 9. Algorytm trybu asysty rozpędzania wózka inwalidzkiego

powinien sprawdzać czy wciśnięto lewy lub prawy kontroler boczny. Jego wciśnięcie zatrzymuje działanie programu aż do ponownego wciśnięcia jednego z kontrolerów bocznych. Zatrzymanie programu kontrolerem bocznym powinno również restartować zapisane wartości prędkości wózka zarejestrowane przed wciśnięciem kontrolera bocznego.

Chcąc uniknąć uruchomienia wspomaganego rozpędzania podczas wykonywania manewrowania sprawdzane są dwa warunki logiczne których spełnienie powoduje rozpoczęcie programu wspomagającego. Pierwszy warunek sprawdza czy osiągnięto prędkość graniczną  $v_g$  a drugi warunek sprawdza czy użytkownik manewruje wózkiem czy też go rozpędza.

Na wykresie rys. 8 przedstawiono graficzną interpretację wykazującą różnicę między ruchem podczas manewrowania w przypadku którego faza napędowa kończy się prędkością  $v_r$ , a ruchem podczas napędzania w którym faza napędowa kończy się prędkością  $v_i$ . Sprawdzenie w warunkach logicznych prędkości granicznej pozwala sprawdzić czy użytkownik nie wykonuje ruchów manewrowych z niską prędkością w czasie trwania których wspomaganie przeszkadza.

## Podsumowanie

Przedstawiony algorytm stanowił początek prac nad hybrydowym wózkiem inwalidzkim, w którym połączono klasyczny ciągowy napęd ręczny z napędem elektrycznym w postaci silników BLCD zabudowanych w piastach kół napędowych. Adaptacyjność układu sterowania uzyskana została po przez odczyt, za pomocą sensorów, wymuszeń zewnętrznych. Do wymuszeń tych wliczamy prędkość obrotową koła napędowego i pochylenie ramy wózka inwalidzkiego względem poziomemu. Układ sterowania posiada trzy tryby z czego dwa umożliwiają adaptację do miejsca (pochylenie terenu) i sposobu (rozpędzanie) eksploatacji. Jeden z trybów pozwala eksploatować wózek ręczny tak jak wózek elektryczny z tą różnicą, że użytkownik steruje niezależnie kołem napędowym lewym oraz prawym. Ponad to idea napędu hybrydowego umożliwia napędzanie wózka tylko przy pomocy napędu ręcznego, co ułatwia poruszanie

się w pomieszczeniach zamkniętych. Badania realizowano w ramach projektu Lider VII „badania biomechaniki napędzania ręcznych wózków inwalidzkich dla innowacyjnych napędów ręcznych i hybrydowych” (LIDER/7/0025/L-7/15/2016) finansowanym przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

## Bibliografia:

1. Shimada S.D., Robertson R.N., Bonninger M.L., Cooper R.A., Kinematic characterization of wheelchair propulsion. Journal of Rehabilitation Research and Development, Vol. 35 No. 2, pp. 210-218, 1998
2. Vanlandewijck Y., Theisen D., Daly D., Wheelchair Propulsion Biomechanics. Implications for Wheelchair Sports. Sports Med Vol. 31 No. 5, pp. 339-367, 2001
3. Goosey-Tolfrey V.L., Moss A.D., Wheelchair velocity of tennis players during propulsion with and without the use of racquets. Adapted physical activity quarterly, Vol. 22, pp. 291-301, 2005

## The algorithm of an adaptive control system supporting the wheelchair's manual drive

The article discusses the concept of an adaptive algorithm controlling the electric system supporting the manual wheelchair drive. This algorithm is used in hybrid wheelchairs. According to the assumed concept, the system is equipped with three support modes in which the electric drive system reacts to changing environmental conditions.

**Keywords:** wheelchair, hybrid drive, control system.

## Autorzy:

dr inż. **Bartosz Wiczorek** – Politechnika Poznańska, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, bartosz.wiczorek@put.poznan.pl  
 dr inż. **Mateusz Kukla** – Politechnika Poznańska  
 dr inż. **Łukasz Warguła** – Politechnika Poznańska