

Karolina WOLSKA\*

DOI: [https://doi.org/JoT2021\\_07](https://doi.org/JoT2021_07)

## MODELOWANIE ENERGOCHŁONNOŚCI UKŁADNICY MAGAZYNOWEJ W ZADANYM CYKLU PRACY

**Słowa kluczowe:** *transport wewnętrzny, układnice magazynowe, modelowanie energochłonności*

W pracy zaproponowano modele układów napędowych układnicy magazynowej. Na ich podstawie przeprowadzono badania symulacyjne energochłonności układnicy w zadanym wzorcowym cyklu pracy. Wzorcowy cykl pracy układnicy uwzględniał 10 losowo rozłożonych lokalizacji gniazd regałowych, które układnica obsługiwała w trybie zatowarowania oraz w trybie kompletacji. Celem tych badań było określenie zużycia energii oraz umożliwienie porównywania efektywności urządzeń pochodzących od różnych dostawców. Wyniki symulacji wykazały zdecydowanie różne zużycie energii z zależności od trybu pracy układnicy. Są one inspiracją do doskonalenia modeli obliczeniowych i metody oceny różnych urządzeń.

### 1. WSTĘP

Nowoczesne magazyny zunifikowanych jednostek magazynowych są często wyposażane w zautomatyzowane urządzenia do składowania i kompletacji towarów. Bardzo często do tego celu wykorzystuje się układnice magazynowe. Są to urządzenia o udźwigu od kilku kilogramów do nawet 5000 kg. Obsługują one ściany regałowe o wysokości od kilku metrów nawet do 45 m [2, 3] (magazyny wysokiego składowania) i długości kilkudziesięciu metrów. Ściana regałowa może w takim przypadku posiadać kilkaset do kilku tysięcy miejsc regałowych. Urządzenia te są napędzane za pomocą silników elektrycznych. Coraz częściej wyposaża się je w urządzenia umożliwiające rekuperację energii pochodzącej z procesów hamowania lub opuszczania ładunków. Układnice pracują bardzo dynamicznie, szybkie rozpędzanie i hamowanie. Zatowarowany magazyn można przyrównać do pewnego rodzaju akumulatora zawierającego ogromną energię potencjalną, wyrażającą się jako iloczyn ciężaru wszystkich ładunków oraz wysokości ich położenia nad poziomem kompletacji. Energię potencjalną składowanych towarów można odzyskać podczas ich ściągania z regałów do poziomu kompletacji. Energię wye-

---

\* Koło Naukowe „Logistics”, Politechnika Wroclawska

mitowaną przez urządzenia i inne źródła muszą „wypompować” urządzenia chłodnicze. W sytuacji gdy energia ta nie podlegałaby odzyskowi, byłaby zamieniana w procesach hamowania na ciepło, co wymagałoby zainstalowania dodatkowych mocy chłodniczych. Podobnie na stan energetyczny magazynu (jego bilans cieplny) wpływają inne urządzenia będące na jego wyposażeniu takie jak wózki widłowe, suwnice, przenośniki cięgnowe, roboty kompletacyjne, windy, wciągarki itp. Z powyższych względów istotne jest określenie ilości energii możliwej do odzyskania podczas pracy tych urządzeń.

Badania symulacyjne energochłonności prowadzi się dla ściśle zdefiniowanych cykli pracy. W ten sposób można porównywać efektywność urządzeń różnych typów, w takich samych warunkach pracy. W przypadku wózków widłowych posługujemy się cyklem pracy zdefiniowanym w normie VDI 2198 [8]. Pozwala ona określić energochłonność urządzenia w tak zdefiniowanych warunkach pracy. Podobnych norm nie ma dla innych urządzeń magazynowych, dlatego podjęto próbę opracowania takiego cyklu dla układnicy. Celem pracy jest analiza zużycia energii przez układnicę o określonych parametrach technicznych w zadanych trybach pracy w magazynie zunifikowanych jednostek magazynowych oraz ocena możliwych oszczędności energii w przypadku jej rekuperacji.

Aby zrealizować postawiony cel wybrano określony typ i model układnicy, w tym przypadku była to układnica typu mini-load firmy TGW, model Mustang [1] o wysokości podnoszenia  $h = 9$  m, obsługującej regał o długości 25 metrów, z gniazdami na dwa pojemniki KLT 6428, o łącznej masie do 100 kg.

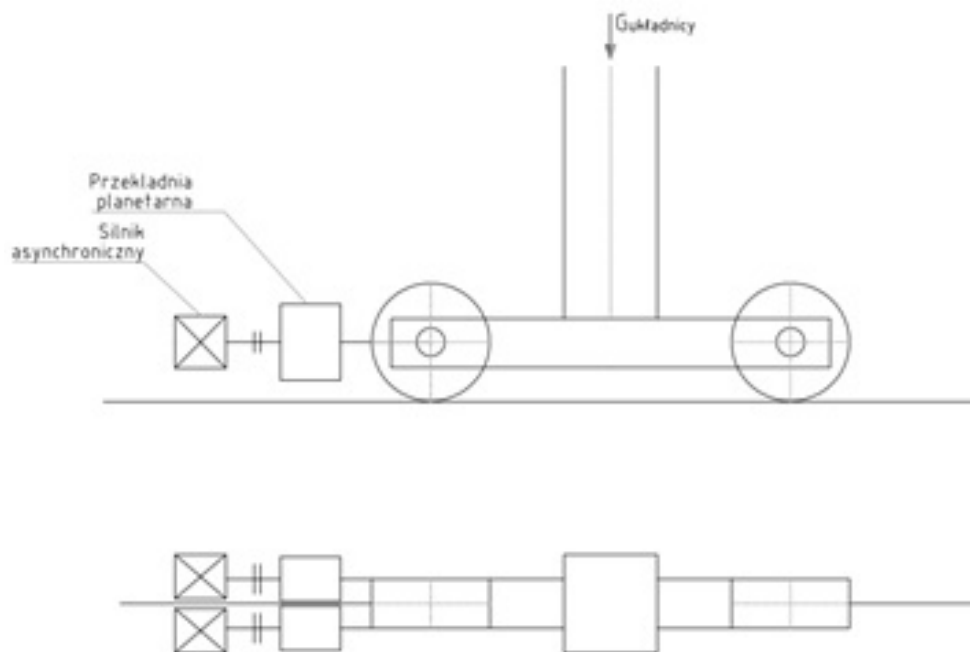
## 2. STRUKTURA UKŁADÓW NAPĘDOWYCH BADANEJ UKŁADNICY I ICH CHARAKTERYSTYKI TRAKCYJNE

W oparciu o dokumentację techniczno-ruchową (DTR) [1], zidentyfikowano wszystkie istotne parametry techniczne układnicy potrzebne do opracowania charakterystyk trakcyjnych poszczególnych napędów. Źródłem napędów układnicy są 4 silniki asynchroniczne oraz jeden silnik synchroniczny.

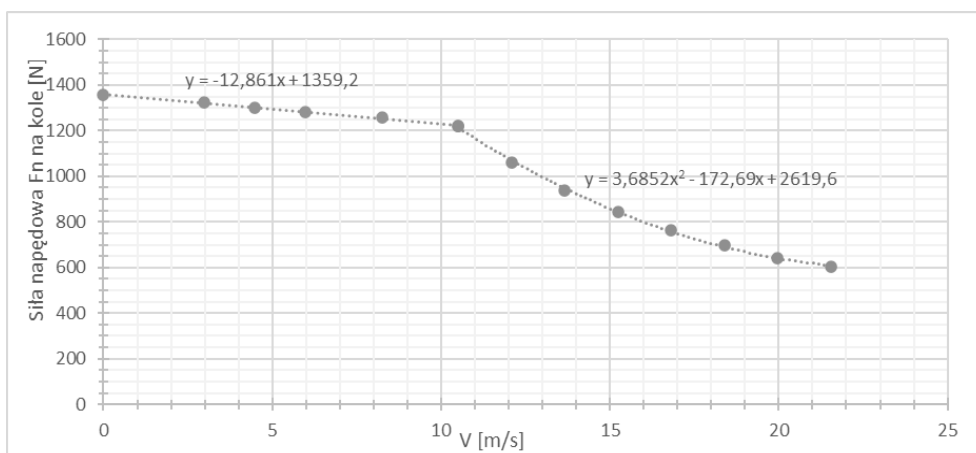
Napęd jazdy układnicy realizują dwa silniki o mocy  $P = 13,2$  kW, napędzają one jedno z kół układnicy poprzez przekładnię planetarną (Rys. 4.). Masa układnicy wynosi 2435 kg. Przełożenie przekładni planetarnej wynosi  $i_{PG} = 7$ .

Na podstawie tych danych wyznaczono charakterystykę trakcyjną napędu jazdy układnicy [10] jej postać graficzną ilustruje rysunek 2.

Układ podnoszenia karetki układnicy stanowią również dwa silniki asynchroniczne, przy czym jeden realizuje podnoszenie a drugi opuszczanie. Silniki współpracują z bębniem wciągarki (Rys. 3.). Przełożenie przekładni napędzającej bęben wynosi  $i_{PK} = 7,5$ .

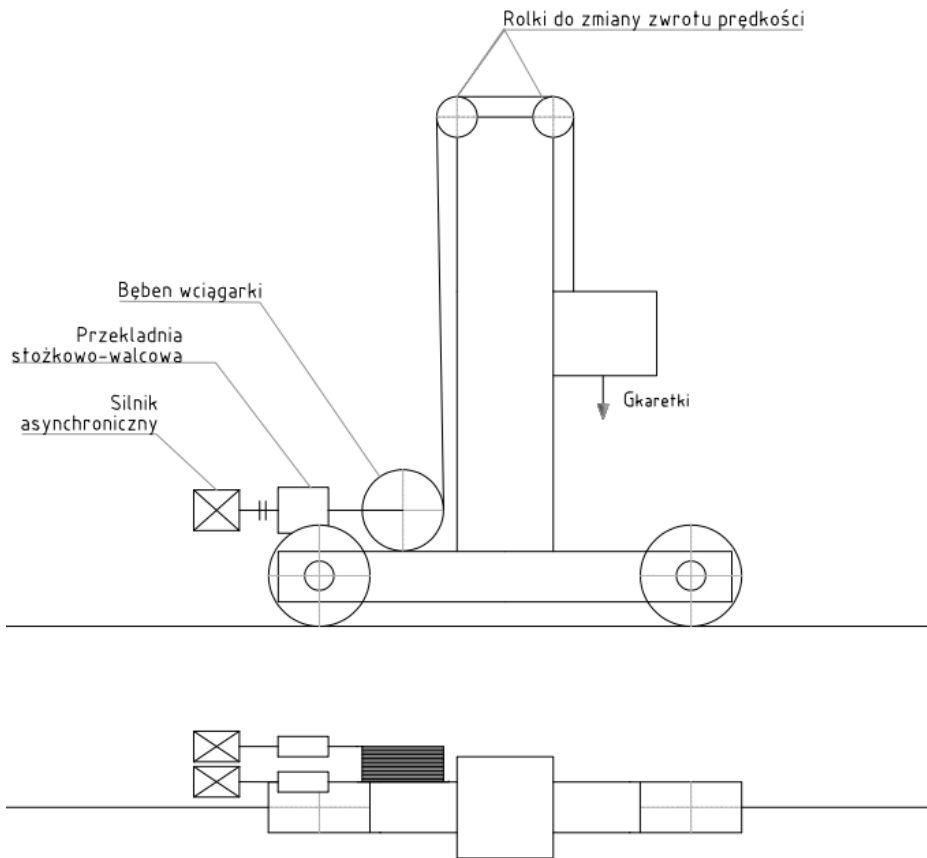


Rys. 1. Schemat układu napędu jazdy układnicy  
 Fig. 1. Diagram of the travel drive of the stacker crane



Rys. 2. Charakterystyka trakcyjna napędu jazdy układnicy [10]  
 Fig. 2. Traction characteristics of the stacker crane travel drive [10]

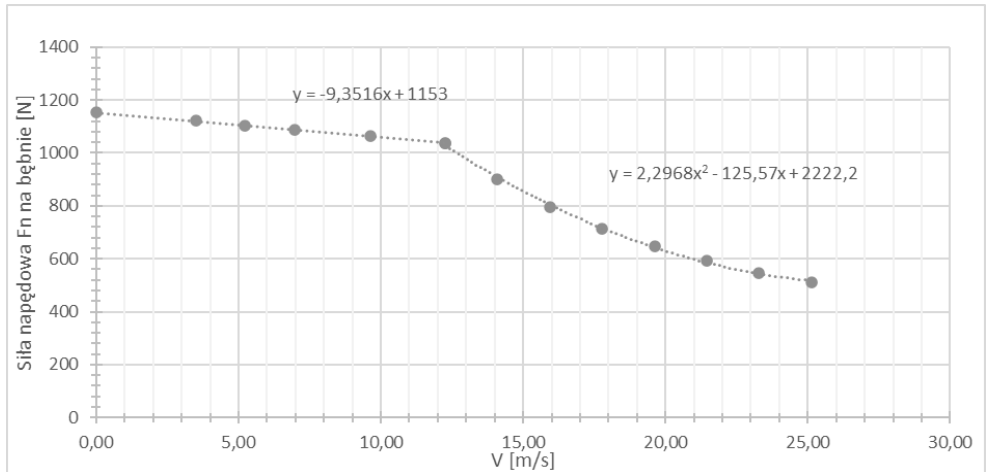
Masa karetki wynosi 370 kg [1] w stanie pustym i 470 kg w stanie załadowanym. Charakterystykę napędu wciągarki obliczoną na podstawie charakterystyki silnika oraz przełożeń w układzie napędowym przedstawia rysunek 4.



Rys. 3. Schemat napędu wciągarki układnicy (napęd karetki) [10]  
 Fig. 3. Diagram of the drive of the stacker crane winch (carriage drive) [10]

Ostatnim napędem występującym w badanej układnicy jest napęd manipulatora pobierającego i wsuwającego ładunki do gniazda regałowego. Napęd ten realizuje silnik synchroniczny o mocy  $P = 1,5$  kW. i przekładnia o przełożeniu  $i_{PW} = 20$ . Wysuwane widły są napędzane za pomocą łańcucha Galla (Rys. 5.).

Charakterystykę siłową napędu widel układnicy przedstawia rysunek 6.



Rys. 4. Charakterystyka napędu wciągarki (napęd karetki) zredukowana do płaszczyzny nawijania liny na bębnie wciągarki [10]

Fig. 4. Characteristics of the winch drive (carriage drive) reduced to the plane of the rope winding on the winch drum [10]

### 3. MODEL OBLICZENIOWY RUCHU MECHANIZMÓW UKŁADNICY

Modele obliczeniowe pracy poszczególnych mechanizmów oparto na równaniu ruchu – wynikającym z drugiej zasady Newtona (1)

$$\xi_i * m_i * \frac{dv}{dt} + W_i = F_{Ni} \quad (1)$$

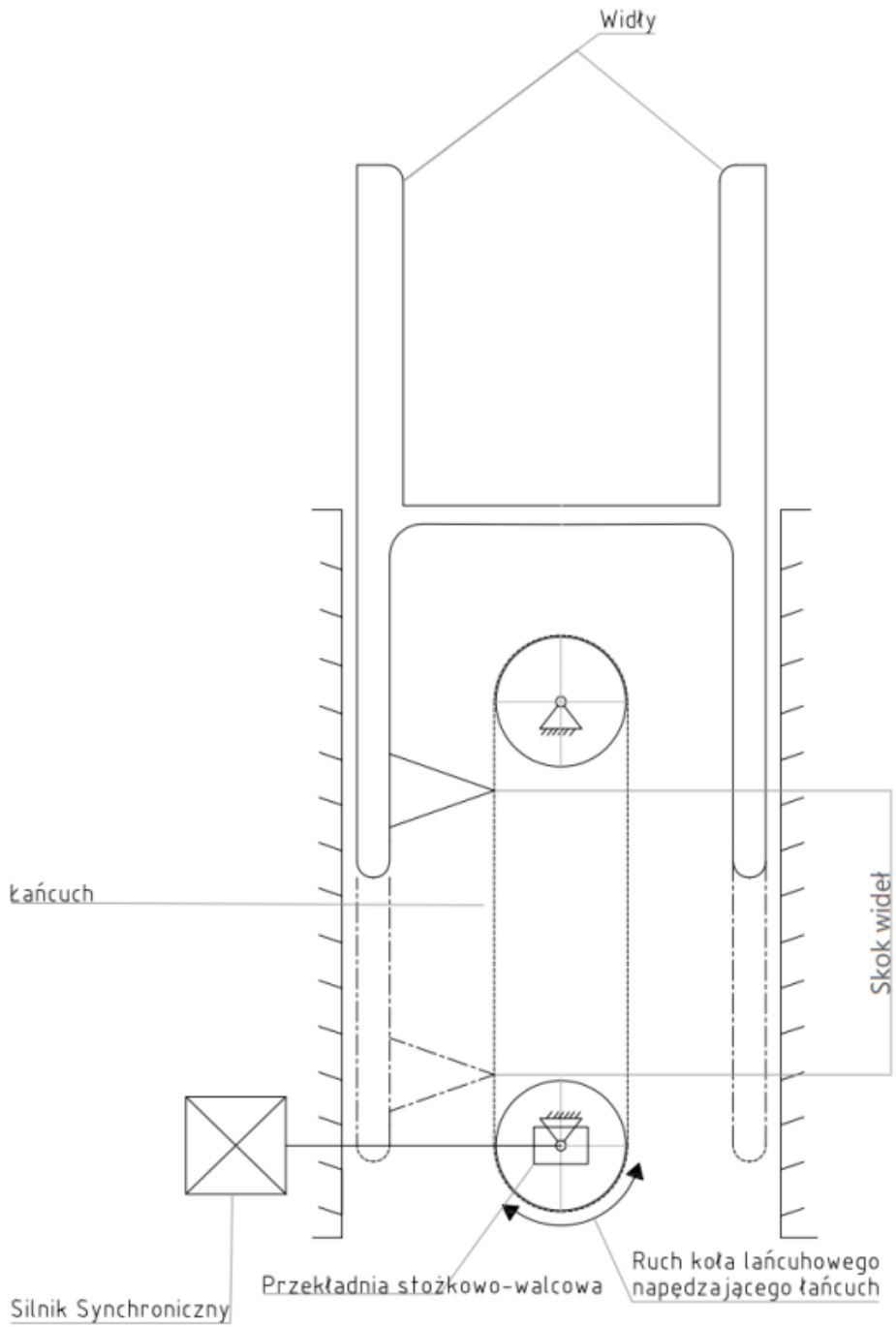
gdzie:

$\xi_i$ - współczynnik mas wirujących (uwzględniający wirujące elementy układu takie jak koła, silniki, elementy przekładni, itd.). W analizowanych układach nie przekracza zwykle wartości 1,05

$m_i$  - masa postępową układu napędzanego:  $i - 1$  ustroju nośnego układnicy,  $i - 2$  karetki poruszającej się po słupie układnicy, 3 – wysuwanych wideł z mechanizmem je napędzającym. W rozważaniach uwzględniano masy z jednostką ładunkową lub bez jednostki ładunkowej

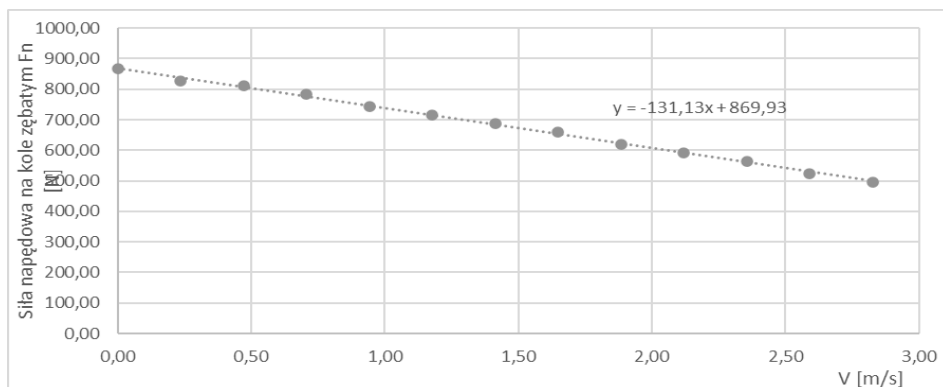
$W_j$  – opory ruchu danego układu napędowego

$F_{Ni}$  – siła napędowa: 1- układnicy, 2- podnoszenia karetki, 3- napędu wysuwu wideł



Rys. 5. Schemat napędowy mechanizmu wysuwania widel [10]

Fig. 5. Drive diagram of the fork extension mechanism [10]



Rys. 6. Charakterystyka siłowa napędu wideł układnicy [10]

Fig. 6. Force characteristics of the drive of the stacker crane forks [10]

Po przekształceniu wzoru, otrzymamy (2):

$$\frac{\xi}{g} * \frac{dv}{dt} = \frac{F_n - W_j}{G} \quad (2)$$

Oznaczając (3):

$$f_p(v, s) = \frac{F_n - W_j}{G} = f_n - w_j \quad (3)$$

gdzie:

$f_n$  - jednostkowa siła napędowa

$w_j$  - jednostkowe opory ruchu

otrzymamy (4):

$$\frac{\xi}{g} * \frac{dv}{dt} = f_p(v) \quad (4)$$

Zastępując pochodne różnicami skończonymi otrzymamy (5):

$$dv = \Delta v, \quad dt = \frac{\Delta s}{v_{sr}} \quad (5)$$

Podstawiając powyższe zależności (6), wyznaczamy zależność na przyrost drogi  $\Delta s$  (7) oraz pracę układu  $W$  (8):

$$\frac{\xi}{g} * \frac{\Delta v}{\Delta s} * V_{\dot{s}r} = f_p(v) \quad (6)$$

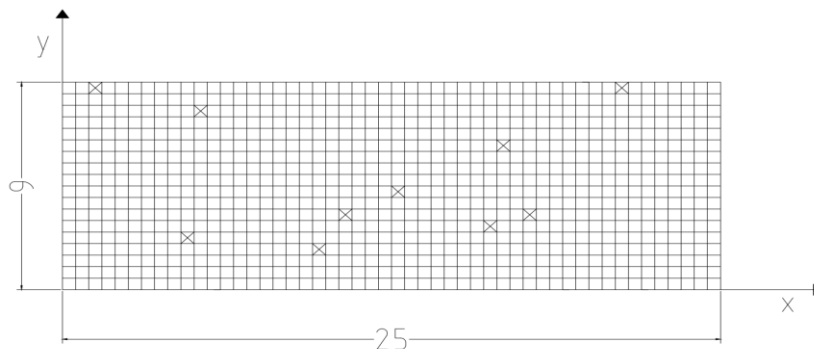
$$\Delta s = \frac{\xi}{g} * \frac{\Delta v}{f_p(v)} * V_{\dot{s}r} \quad (7)$$

$$\Delta W = \Delta s * F_n \quad (8)$$

Zależności te posłużyły do przeprowadzenia symulacji pracy układnicy wszystkich trzech mechanizmów. Zakładając interwał prędkości wyznaczano przyrosty drogi  $\Delta s$ , czasu operacji  $\Delta t$  oraz przyrostu zużytej lub odzyskanej energii  $\Delta W$ .

#### 4. BADANIA SYMULACYJNE PRACY UKŁADÓW NAPĘDOWYCH UKŁADNICY

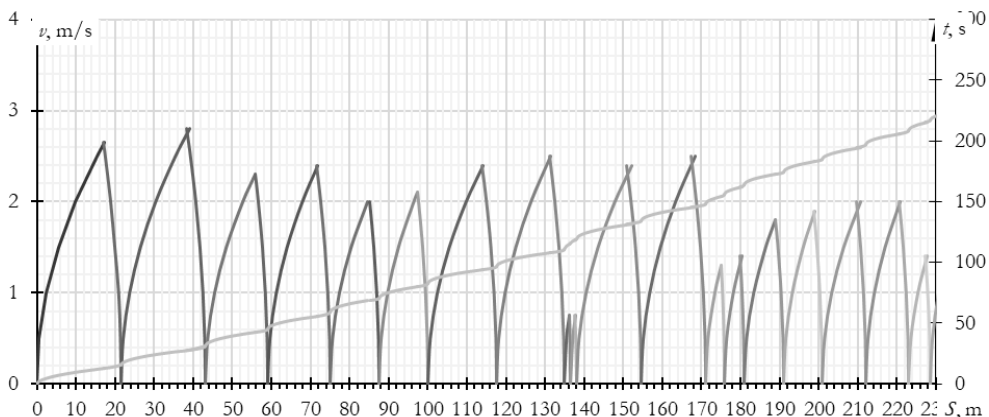
W badaniach symulacyjnych przyjęto następujący wzorcowy cykl obsługi gniazd regałowych, podziałka gniazd wynosi 0,5 m., wysokość regału:  $H = 9$  m, długość regału  $L = 25$  m.



Rys. 7. Schemat rozmieszczenia gniazd regałowych w zaproponowanym wzorcowym cyklu pracy układnicy [10]

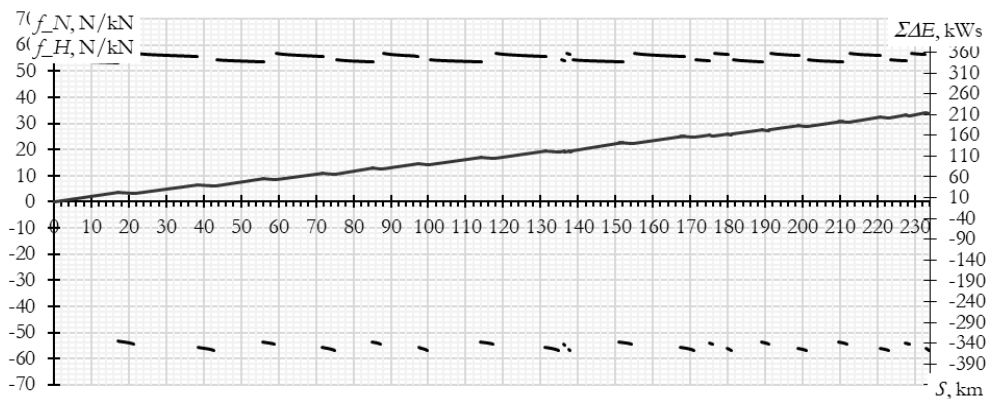
Fig. 7. Scheme of the arrangement of rack sockets in the proposed model work cycle of the stacker crane [10]





Rys. 8. Przejazd układnicy magazynowej w cyklu zatowarowania  
 Fig. 8. Travel of the warehouse stacker crane in the stocking cycle

Wyniki symulacji pracy układu napędowego jazdy układnicy przy obsłudze dziesięciu lokalizacji zgodnie z cyklem wzorcowym przy zatowarowaniu, przedstawia rysunek 8. oraz rysunek 9.



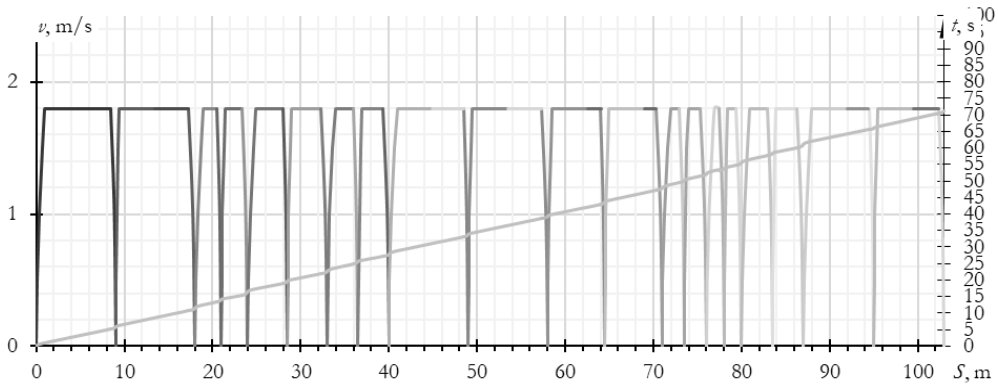
Rys. 9. Zużycie energii układu jazdy układnicy magazynowej w cyklu zatowarowania  
 Fig. 9. Energy consumption of the stacker crane drive system in the stocking cycle

Suma zużytej energii przez układ jazdy w czasie całego cyklu wzorcowego wynosi (9):

$$\sum E_{1-10} = 212,5 \text{ kW}s \quad (9)$$

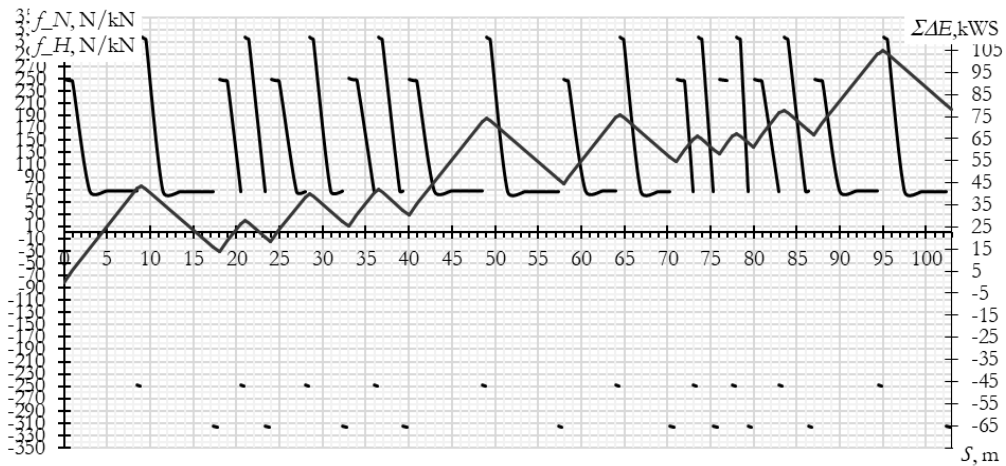
Natomiast sumaryczny czas cyklu jazdy wynosi (10):

$$\sum t_{1-10} = 224,45 \text{ s} \quad (10)$$



Rys. 10. Symulacja poruszania się napędu podnoszenia i opadania karetki w trybie zatowarowania  
 Fig. 10. Simulate the movement of the carriage raising and lowering in the stocking mode

Analogicznie dokonano takich samych obliczeń przy zatowarowaniu regału dla układu podnoszenia i opuszczania karetki. Wyniki zostały przedstawione na wykresach na rysunku 10. oraz rysunku 11.



Rys. 11. Zużycie energii napędu podnoszenia karetki w czasie trybie zatowarowania  
 Fig. 11. Carriage lift drive energy consumption during stocking mode

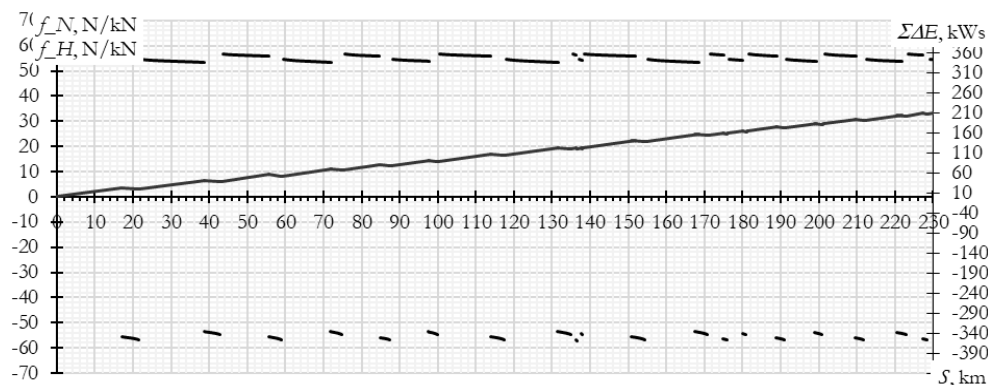
Dodatkowo należało jeszcze dodać energie wykorzystaną na poruszanie się osprzętu do przejmowania ładunku (ruch wideł). Sumaryczna energia zużyta przez układnicę na wszystkie trzy napędy podczas zatowarowania wyniesie (11):

$$\sum E_c = 212,5 + 78,36 + 28,9 = 319,8 \text{ kW} \cdot \text{s} \quad (11)$$

Całkowity czas zatowarowania 10 gniazd regałowych zgodnie z wzorcowym cyklem pracy wyniesie (12):

$$\sum \Delta t = 224,45 + 71,13 + 10 * 0,71 + 10 * 0,71 = 309,78 \text{ s} \quad (12)$$

Przykładowe zużycie energii dla układu napędowego układnicy przy obsłudze 10 lokalizacji zgodnie z cyklem wzorcowym przy **kompletacji**, przedstawia rysunek 12.



Rys. 12. Zużycie energii układu jazdy układnicy magazynowej w trybie kompletacji

Fig. 12. Energy consumption of the stacker crane drive system in order picking

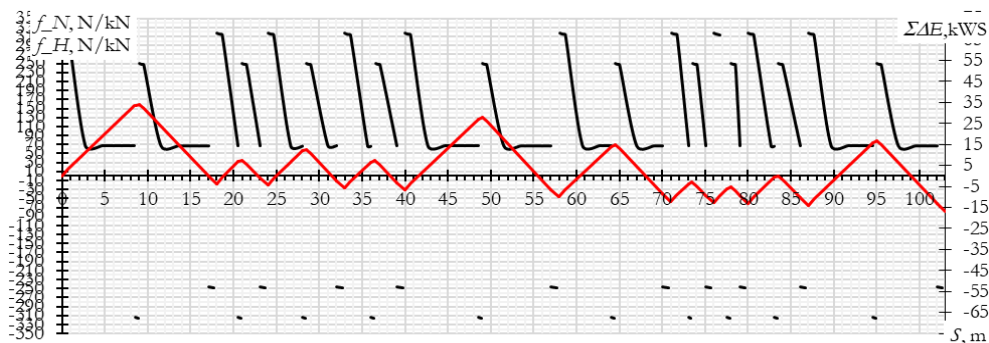
Energię zużytą na ruch podnoszenia i opuszczania karetki w cyklu zatowarowania, przedstawiono na rysunku 13.

Całkowity czas kompletacji z poborem towarów z 10 gniazd regałowych zgodnie z wzorcowym cyklem pracy wyniesie (13):

$$\sum \Delta t = 243,04 \text{ s} \quad (13)$$

Natomiast zużyta energia przez układnicę – wszystkie trzy układy napędowe z uwzględnieniem rekuperacji wyniosły (14):

$$\sum E_c = 212,5 + (-16,81) + 28,9 = 224,59 \text{ kW} \cdot \text{s} \quad (14)$$



Rys. 13. Zużycie energii napędu podnoszenia karetki z uwzględnieniem rekuperacji w trybie kompletacji

Fig. 13. Energy consumption of the carriage lifting drive including recuperation in the picking mode

## 5. PODSUMOWANIE

Celem pracy była analiza energochłonności układnicy magazynowej – jako jednego z urządzeń, które występują w magazynach zwłaszcza drobnych elementów o wysokich indeksach asortymentowych. Urządzenia te wspomagają pracę pracowników zatrudnionych w strefie kompletacji. Od ich pracy zależy przepustowość magazynów oraz wyniki ekonomiczne. Na rynku inwestycyjnym różne firmy oferują swoje układnice. Urządzenia te są zwykle sprzedawane łącznie z systemami sterowania ich pracą. Są to rozwiązania wysoce zaawansowane technicznie oparte na komponentach mechatronicznych. Wobec różnych trybów pracy układnic (zatowarowanie, kompletacja) oraz różnorodności urządzeń na rynku w pracy zaproponowano do oceny układnic wzorcowe cykle pracy dla tych urządzeń, które pozwalałyby na porównanie energochłonności tych urządzeń pochodzących od różnych producentów.

Analizę energochłonności przeprowadzono na przykładzie układnicy magazynowej mini-load firmy TGV typu Mustang. Wykorzystując równanie ruchu pojazdów przeprowadzono symulację pracy układnicy w zaproponowanych cyklach zatowarowania oraz kompletacji. Wyniki symulacji okazały się bardzo pouczające. Wyraźnie widać różnice w zużyciu energii w zależności od trybu pracy.

Wyniki symulacji pracy układnicy w trybie kompletacji wskazały, że zużycie sumaryczne energii na napęd układnicy może być prawie bliskie zera. Magazyn zatowarowany – jest pewnego rodzaju zasobnikiem energii potencjalnej, która podczas jego opróżniania może być odzyskiwana i wykorzystana do napędu układnicy.

Wnioski jakie z tego doświadczenia wypływają nie mają jednak charakteru uniwersalnego, wszystko zależy od parametrów magazynu, jego wysokości oraz od masy pojemników sytuowanych w gniazdach regałowych. Ze względu na bardzo

dużą rozpiętość wielkości układnic do wysokości  $h = 6$  m do wysokości  $h = 45$  m (magazyny wysokiego składowania) [7] oraz od zróżnicowania mas własnych układnic od kilkuset kilogramów do kilkudziesięciu tys. kilogramów nie można zbudować jednego cyklu wzorcowego dla tych urządzeń. Zróżnicowanie wielkości tych urządzeń wynika z wielkości wykorzystywanych pojemników regałowych, mogą to być skrzynki o masie brutto 50 kg, aż do europalet o masie do kilkuset kilogramów.

Wykorzystywane w pracy modele obliczeniowe pozwalają na ciekawe i interesujące analizy zarówno kinematyczne jak i energetyczne. Modele te symulowały pracę układu napędu jazdy układnicy, napędu podnoszenia karetki oraz napędu urządzenia manipulującego (lokowaniem i pobieraniem pojemników z regału).

Praca ta i wypływające z niej wnioski są inspiracją do dalszych prac nad opracowaniem wskaźników porównawczych dla układnic, które pozwalałyby, niezależnie od ich wielkości, na jednoznaczną ocenę pod względem energochłonności tych maszyn.

## LITERATURA

- [1] Dokumentacja Techniczno – Ruchowa (DTR) układnicy magazynowej firmy TGW, typu Mustang.
- [2] FIJAŁKOWSKI J. Projektowanie magazynów wysokoregłowych, Wyd. Arkady W-wa, 1983
- [3] KORZEŃ Z., *Logistyczne Systemy w transporcie bliskim i magazynowaniu Tom I: Infrastruktura*, Technika, Informacja, Wyd. ILiM. Poznań, 1997
- [4] KWAŚNIEWSKI S., *Teoria Ruchu Pojazdów – Konspekt do wykładów*, Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny, Wrocław, 2020
- [5] Materiały ze strony internetowej firmy Macalux
- [6] <https://www.mecalux.pl/realizacje/paolo-astori-wlochy> (dostęp: 02.06.2020 r.)
- [7] *Pr. zb. Zarządzanie gospodarką magazynową* PWE W-wa 2002
- [8] SKRZYMOWSKI W., *Układnie magazynowe*, Wyd. KaBe Krosno, 2012
- [9] Stowarzyszenie inżynierów niemieckich Norma VDI 2198 „Typenblätter für Flrförderzeuge” Düsseldorf 2019r.
- [10] SZUMANOWSKI A: Akumulacja energii w pojazdach. WKiŁ Warszawa 1984
- [11] WOLSKA K., *Modelowanie energochłonności układnicy magazynowej w zadanym cyklu pracy*, Praca dyplomowa –inżynierska, promotor dr inż. Stanisław Kwaśniewski. Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny, Wrocław, 2021

## MODELING OF ENERGY CONSUMPTION OF A WAREHOUSE STACKER CRANE IN A GIVEN WORK CYCLE

**Keywords:** *internal transport, stacker cranes, energy consumption modeling*

The study proposes models of the drive systems of the warehouse stacker crane. On their basis, simulation tests of the energy consumption of the stacker crane were carried out in a given model work cycle. The model work cycle of the stacker crane took into account 10 randomly distributed locations of the rack nests that were operated by the stacker crane in the stockpicking mode and in the picking mode. The aim of these studies was to determine energy consumption and to enable an effectiveness comparison of devices from different suppliers. The simulation results showed significantly different energy consumption depending on the operating mode of the stacker crane. They inspire improvement of computational models and evaluation methods for various devices.