

Krystian GOLEŃ*

DOI: https://doi.org/10.37190/JoT2022_03

ANALIZA I USPRAWNIENIE LOGISTYCZNEGO SYSTEMU MAGAZYNOWEGO POPRZEZ ZASTOSOWANIE SKŁADOWANIA TYPOWYCH JEDNOSTEK PALETOWYCH W REGALE Z ODZYSKIEM ENERGII

Słowa kluczowe: *odzysk energii, układ odzysku energii, regał przepływowy, regał grawitacyjny, przemiennej częstotliwości, składowanie*

W artykule omówiono zagadnienia związane z zastosowaniem regału przepływowego z odzyskiem energii w procesie składowania typowych jednostek paletowych. Opracowano założenia układu, model obliczeniowy i przeprowadzono analizę przemian energii jednostki ładunkowej podczas procesu składowania. Na podstawie otrzymanych wyników zaproponowano kompletny moduł układu pozwalający na odzyskanie i ponowne wykorzystanie części energii jednostki ładunkowej. Dla zaproponowanego rozwiązania przeprowadzono analizę jego odpowiedniego umiejscowienia. Oszacowano także sprawność zaproponowanego układu i przeanalizowano jego opłacalność ekonomiczną.

1. WSTĘP

Coraz powszechniejszy staje się odzysk energii zarówno w życiu codziennym jak i w przemyśle. W przypadku systemów magazynowych źródłem energii, którą można odzyskać jest energia (potencjalna, kinetyczna) palety umieszczonej na regale. Część jej energii potencjalnej odzyskuje np. układnica w trakcie opuszczania palety wyposażona w system do odzysku energii. Natomiast energię palety przemieszczającej się po regale przepływowym można odzyskać, np. stosując układy przekształcające energię kinetyczną rolki regału przekazaną przez sunącą paletę na energię elektryczną, z wykorzystaniem silnika elektrycznego pracującego w trybie prądnicowym.

W artykule przeanalizowano możliwość, celowość implementacji układów do odzysku energii do logistycznych systemów transportowo-magazynowych. Biorąc pod uwagę tego rodzaju systemy, zdecydowano się na analizę zastosowania układu zwrotu

* Politechnika Wrocławska

energii wykorzystującego działanie regałów przepływowych. Regały te służą do transportowania przeważnie jednostek paletowych pomiędzy poziomami magazynu, do tymczasowego składowania palet, czy do transportowania ich do miejsca załadunku w magazynie. Ruch palet odbywa się pod wpływem działania siły grawitacji po umieszczonych w stałych odległościach od siebie rolkach. Ruch obrotowy rolki spowodowany przez zsuwającą się paletę można wykorzystać do napędzenia urządzenia przekształcającego energię mechaniczną na elektryczną, którą można ponownie wykorzystać.

W dalszej części artykułu czytelnik znajdzie opis rozwiązania pozwalającego na odzyskanie części energii mechanicznej sunącej palety z ładunkiem i przekształcenie jej w energię elektryczną. Zaproponowanie rozwiązania wymagało przeanalizowania przemian energii zachodzących w trakcie ruchu palety. W tym celu opracowano model obliczeniowy dla kilku najważniejszych parametrów. Ponadto przeprowadzono analizę sprawności, opłacalności ekonomicznej opracowanego układu oraz ustalono zakres potencjalnych lokalizacji.

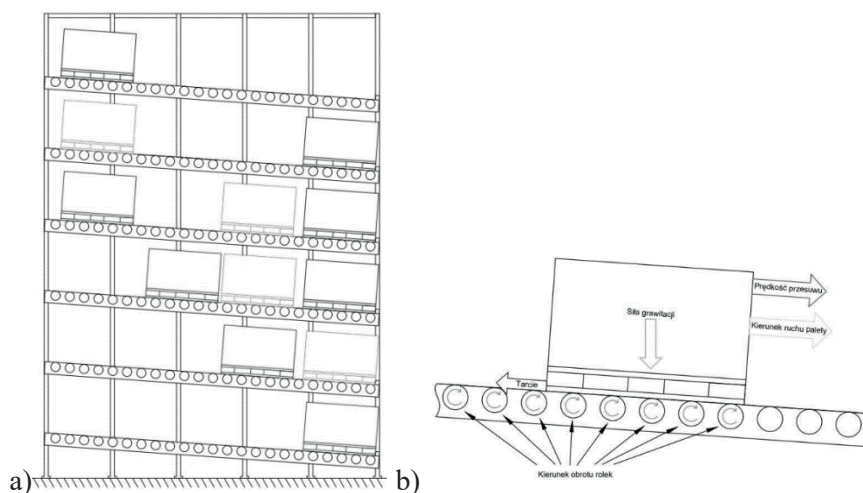
Celem artykułu jest omówienie możliwości odzysku części energii z procesu składowania w regałach przepływowych, przybliżenie opracowanego rozwiązania pozwalającego na odzysk energii oraz omówienie sprawności i analiza ekonomiczna proponowanego rozwiązania.

2. REGAŁY PRZEPIYWOWE

Regały przepływowe realizują składowanie dynamiczne. Z tego względu ich konstrukcja różni się od innych spotykanych rodzajów regałów. Pomiedzy słupami tworzącymi konstrukcję nośną regałów nie znajdują się półki, lecz rzędy rolek lub krążków tworzących przenośniki. Rzędy te ciągną się od jednego końca regału do drugiego. Rolki lub krążki zamontowane są w równych odstępach. Umieszczając paletę z jednej strony takiego regału, przesuwa się ona wraz z pobieraniem palet wcześniej umieszczonych w kierunku drugiego końca (Rys. 1a). Ciągi rolek są pochylone względem podłoża – ładunek przemieszcza się po nich dzięki działaniu siły grawitacji (Rys. 1b). Palety umieszczane są na regałach z wykorzystaniem wózków widłowych lub układnic. W celu zatrzymania poruszających się po regale palet montuje się na końcu hamulce i blokady uniemożliwiające niezamierzone zsuniecie się ładunku z regału. Blokady te zapewniają również odpowiednią odległość między paletą przeznaczoną do odbioru, a kolejną na przenośniku. Sprzężenie mechaniczne sprawia, że po pobraniu ostatniej palety blokada jest zwalniana i kolejna paleta zsuwa się na miejsce odbioru. W chwili dotarcia umieszczonej na regale palety do palety już stojącej następuje uderzenie. W jego wyniku ładunek może ulec uszkodzeniu. Sposób przemieszczania się palet po regałach jest zgodny z zasadą FIFO – pierwsza paleta, która zostaje umieszczona na regale przepływowym, jest pierwszą paletą, która zostanie z niego pobrana (Rys. 1a). Wykorzystanie rolek zamiast półek pozwala na zredukowanie dróg transportowych w magazynach wyposażonych w regały przepływowe. Z tego względu regały te można umieszczać na niemal

całej dostępnej powierzchni magazynu. Regały przepływowe wykorzystuje się przy składowaniu towarów o ograniczonej ważności, jak produkty spożywcze czy farmaceutyczne. Wadą regałów przepływowych jest brak możliwości pobrania konkretnej palety. Spotykane kąty pochylenia regałów przepływowych umożliwiające ruch palet pod wpływem siły grawitacji zawierają się w przedziale $1,5-8^\circ$ [1, 2].

Sposób działania regałów przepływowych stanowi potencjalnie ciekawy układ do aplikacji odzysku energii. Przesuwające się po regale palety przekształcają z pomocą siły grawitacji i tarcia swoją energię potencjalną względem podłoża na energię kinetyczną rolek (Rys. 1b). Jest to energia, którą można spróbować odzyskać i przetworzyć na postać użyteczną. Zaproponowane w niniejszej pracy rozwiązanie techniczne pozwala na odzyskanie jak największej części energii palet zsuwających się po regale.



Rys. 1. a) Schemat działania regału przepływowego wraz przedstawieniem zasady FIFO. b) Siły działające na paletę w trakcie jej ruchu po regale przepływowym i jej oddziaływanie na rolki regału [21].

Fig. 1. a) Flow rack operating diagram and FIFO rule. b) Forces acting on the pallet during its movement through the flow rack and its interaction with the rack rollers [21].

3. ROZWIĄZANIA TECHNICZNE W REGAŁACH MAGAZYNOWYCH

Przeprowadzona analiza literaturowa wykazała, że badania prowadzone w obszarze wiedzy związanej z procesami magazynowania skupiają się przede wszystkim na usprawnieniu procesu pod kątem skrócenia czasu obsługi ładunku. Badacze z Chin [3] i Włoch [4] proponują różnego rodzaju strategie układania ładunku w regałach pozwalające na skrócenie czasu od pobrania ładunku z regału do jego dotarcia do miejsca kompletacji. Strategie te umożliwiają zmodyfikowanie ułożenia ładunków pod kątem częstotliwości pobierania ich z regałów czy ich masy. Rodzaje składowanych ładunków są również dzielone na klasy pozwalające na składowanie bliżej punktu kompletacji towa-

rów o większej częstotliwości zapotrzebowania. Badania przeprowadzone przez chińskich naukowców skupiają się także na wprowadzeniu tzw. alokacji dynamicznej, w myśl której w przypadku częściowego zapotrzebowania na towar z danej palety, może ona wrócić na regał w inne miejsce, niż to z którego została pobrana [3].

Badacze z Włoch [4] zwracają uwagę na energochłonność procesu składowania i proponują stosowanie strategii składowania towarów zoptymalizowanych pod kątem zmniejszenia zużycia energii. Sugerują oni umieszczanie ładunków o większym zapotrzebowaniu bliżej punktu kompletacyjnego oraz składowanie cięższych towarów na niższych kondygnacjach, co pozwala na zredukowanie zapotrzebowania na energię oraz na materiały do budowy regałów. Badania przeprowadzone w Czechach i Słowenii [5] związane z energochłonnością procesu składowania wzięły pod uwagę również stosowane urządzenia transportu magazynowego. Porównano zysk z poprawienia przepustowości magazynu związanej z większymi przyspieszeniami i prędkościami urządzeń transportowych z kosztami związanymi z wdrożeniem i eksploatacją wydajniejszych systemów. Wzrost przyspieszeń i prędkości wymagał stosowania mocniejszych silników, co zwiększało zapotrzebowanie energetyczne, a zatem rosły także koszty układu. Wyniki badań pozwoliły udowodnić, że zastosowanie większej ilości urządzeń o mniejszej mocy, przyspieszeniach i prędkościach zamiast jednego urządzenia mocniejszego pozwala uzyskać zbliżoną przepustowość przy znacznie mniejszych kosztach.

Prowadzone dotychczas badania skupiały się na poprawie energochłonności procesów pod kątem redukcji zapotrzebowania energetycznego. Nie rozważano w nich możliwości wprowadzenia dodatkowego układu skoncentrowanego przede wszystkim na odzysku energii z procesu składowania. W związku z tym nie można porównać wyników uzyskanych w niniejszej pracy z innymi rozwiązaniami.

4. ZAŁOŻENIA UKŁADU ODZYSKU ENERGII

W celu zaprojektowania układu odzysku energii oraz oszacowania ilości możliwej do odzyskania energii sformułowano kilka założeń. Ponadto, aby jak najlepiej przedstawić opisywaną problematykę opracowano model w programie Excel pozwalający na obliczenie energii kinetycznej jednostki ładunkowej i jej prędkości w zależności od wybranych parametrów. Uznano, że największy wpływ na ilość możliwej do odzyskania energii ma masa jednostki ładunkowej, kąt nachylenia bieżni regału oraz długość tej bieżni związana z maksymalną ilością możliwych do składowania palet. Te trzy wymienione wielkości przyjęto jako parametry opracowanego modelu. W zależności od ich konfiguracji wyznaczano ilość możliwej do odzyskania energii.

Do wykonania obliczeń przyjęto, że jednostka ładunkowa umieszczona na regale ma postać standardowej palety EUR 1 o wymiarach $L_p = 1\,200\text{mm}$ długości, $W_p = 800\text{mm}$ szerokości i $H_p = 144\text{mm}$ wysokości. Umieszczony na niej ładunek jest tej samej szerokości i długości oraz wysokości $H_l = 856\text{mm}$, zatem całkowita wysokość jednostki ładunkowej wynosi $H = 1\,000\text{mm}$. Obliczenia w opracowanym modelu przeprowadzono

dla masy jednostki ładunkowej m wynoszącej $m_1 = 300\text{kg}$, $m_2 = 600\text{kg}$ oraz $m_3 = 1\,200\text{kg}$. Przyjęto, że środek ciężkości jednostki ładunkowej znajduje się w jej centralnym punkcie – w połowie długości palety, w połowie szerokości i w połowie wysokości jednostki ładunkowej. Rozkład masy będzie jednorodny. Spotykane wartości kąta pochylenia torów regałów przepływowych α wynoszą $1,5\text{--}8^\circ$ [1], [2]. Standardowo stosowana wartość wynosi $\alpha = 4^\circ$ [6]. Obliczenia w opracowanym modelu przeprowadzono dla wartości $\alpha_1 = 1,5^\circ$, $\alpha_2 = 4^\circ$ oraz $\alpha_3 = 8^\circ$. Regały przepływowe przeważnie montowane są w obszarach kompletacji zamówień, odbioru towaru z magazynu. Z tego względu nie spotyka się regałów przepływowych o wysokości powyżej 20m [7]. W opracowanym modelu przyjęto, że jednostki ładunkowe umieszczane są na regale tak, że ich środek ciężkości w chwili początkowej znajduje się na wysokości $h = 10\,000\text{mm}$ względem podłoża – Ziemi. Głębokość regału przepływowego D_R zależy od wymiarów składowanych ładunków oraz ilości jednostek ładunkowych mieszczących się w jednym torze regału. Producenci regałów zalecają przyjmowanie zapasów głębokości regału na poziomie 200mm bez wykorzystania zatrzymywacza palet oraz do 400mm przy wykorzystaniu zatrzymywacza, aby zapewnić bezpieczne składowanie [8]. Do wykonania obliczeń w opracowanym modelu przyjęto trzy warianty regałów wyposażonych w zatrzymywacze – pozwalających składować 8, 10 i 12 palet. Głębokości regałów wynosiły odpowiednio $D_{R1} = 10\,000\text{mm}$, $D_{R2} = 12\,400\text{mm}$ oraz $D_{R3} = 14\,800\text{mm}$. Stalowe rolki wykorzystywane w regałach przepływowych zazwyczaj mają średnicę $\Phi_r = 60\text{mm}$ [9], natomiast odległość między sąsiednimi rolkami wynosi $L_r = 150\text{mm}$ [10]. Do obliczeń współczynnik tarcia między stalą, a drewnem przyjęto $\mu_k = 0,31$ [11]. W wykonywanych obliczeniach przyjęto wartość przyspieszenia grawitacyjnego $g = 9,807 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.

Przyjęto, że w trakcie przemieszczania się palety po regale będzie ona pod wpływem dwóch głównych sił – siły tarcia między paletą a rolkami regału oraz oddziaływania grawitacyjnego.

Poza założeniami technicznymi przyjęto także założenia ekonomiczne. Energia odzyskana w wyniku działania układu będzie ponownie wykorzystana, co będzie prowadziło do pewnych oszczędności. Przez pewien okres działania układu, oszczędności przez niego generowane muszą skompensować koszty poniesione w związku z jego zakupem i montażem. Dopiero po wyrównaniu poniesionych kosztów układ zacznie przynosić korzyści. Okres przez jaki układ powinien wypracować zwrot kosztów ustalono na 4 lata. Jest to próg opłacalności inwestycji związany z ceną energii elektrycznej, ustalonej zgodnie ze średnią ceną za energię elektryczną w Polsce.

4.1 ENERGIA I PRĘDKOŚĆ JEDNOSTKI ŁADUNKOWEJ

Całkowita energia jednostki ładunkowej jest sumą kilku składowych wynikających z działających sił, ruchu samej jednostki oraz energii przekazanej jej w celu umieszczenia w pewnej wysokości względem podłoża. Do analizy ruchu jednostki ładunkowej

przyjęto układ składający się z regału, podłoża – Ziemi i jednostki ładunkowej (palety z ładunkiem).

Jak powszechnie wiadomo zmiana energii całkowitej układu jest równa energii dostarczonej do układu lub od niego odebranej. Twierdzenie to nazywane jest zasadą zachowania energii [12] i określa je zależność:

$$\Delta E = \Delta E_{mech} + \Delta E_{term} + \Delta E_{wewn} \quad (1)$$

gdzie:

ΔE – zmiana energii całkowitej układu [J],

ΔE_{mech} – zmiana energii mechanicznej układu [J],

ΔE_{term} – zmiana energii termicznej układu [J],

ΔE_{wewn} – zmiana energii wewnętrznej układu [J].

Energia mechaniczna jest sumą energii kinetycznej i potencjalnej. Na rozważany układ nie działają żadne siły zewnętrzne, jest to układ izolowany. Dla takiego układu zasada zachowania energii mówi, że jego całkowita energia nie może się zmieniać. Mogą zachodzić przemiany jednej postaci energii w inną.

$$\Delta E_{mech} + \Delta E_{term} + \Delta E_{wewn} = 0 \quad (2)$$

W trakcie ruchu po torze regału zmienia się energia mechaniczna palety. W chwili początkowej ruchu paleta ma tylko energię potencjalną przekazaną przez urządzenie umieszczające ją w regale.

Energię potencjalną opisuje zależność [12]:

$$E_p = m * g * h \quad (3)$$

gdzie:

m – masa jednostki ładunkowej [kg],

g – przyspieszenie grawitacyjne $\left[\frac{m}{s^2}\right]$,

h – wysokość względem podłoża [m].

W trakcie ruchu energia potencjalna jednostki ładunkowej zostaje przekształcona w energię kinetyczną ruchu postępowego, a paleta z towarem przemieszcza się. Energię kinetyczną w ruchu postępowym określa zależność [12]:

$$E_k = \frac{m * v^2}{2} \quad (4)$$

gdzie:

E_k – energia kinetyczna w ruchu postępowym [J],

m – masa ciała [kg],

v – prędkość ciała $\left[\frac{m}{s}\right]$.

W opracowanym modelu nie rozważano zmian energii termicznej ΔE_{term} oraz energii wewnętrznej ΔE_{wewn} innej niż energia termiczna. Skupiono się na zmianach energii mechanicznej ΔE_{mech} .

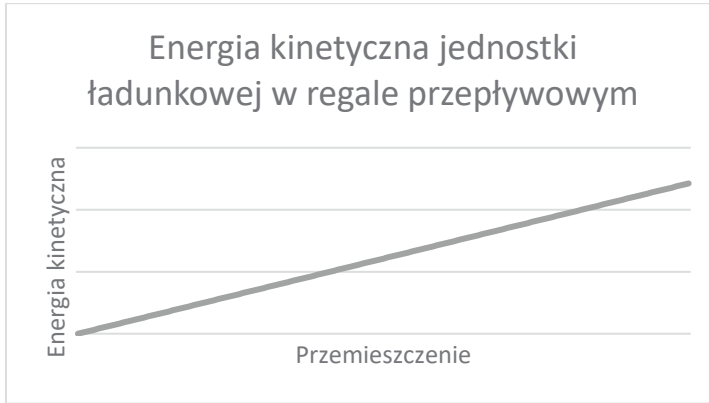
W modelu obliczeniowym przyjęto, że energia układu będzie analizowana od chwili umieszczenia jednostki ładunkowej na regale. Wówczas posiada ona jedynie energię potencjalną względem podłoża. W kolejnych chwilach część energii potencjalnej zostaje przekształcona w energię kinetyczną, a całkowita energia mechaniczna układu pozostaje stała i równa początkowej energii potencjalnej. W końcowej fazie ruchu paleta zwalnia ze względu na zastosowanie zatrzymywacza. Energia jest analizowana do momentu dotarcia palety do końca regału. Znając energię potencjalną i korzystając z zasady zachowania energii obliczana jest energia kinetyczna jednostki ładunkowej. Na jej podstawie wyznaczana jest prędkość palety z towarem.

4.2 ANALIZA OPRACOWANEGO MODELU

Model pozwalał na określenie energii potencjalnej i kinetycznej jednostki ładunkowej w różnych miejscach toru regału. Ruch każdej palety rozpatrywany był od chwili umieszczenia jej w torze regału, gdy miała jedynie energię potencjalną. Ruch każdej palety z towarem analizowano po umieszczeniu jej na wysokości $h = 10\,000\text{mm}$. Wówczas jej energia mechaniczna była równa jej energii potencjalnej. Następnie jednostka zaczęła poruszać się ruchem postępowym wzdłuż toru regału. Część jej energii potencjalnej zostanie przekształcona w energię kinetyczną, lecz całkowita energia mechaniczna układu pozostanie stała. W odległości 1,5m od końca regału paleta zaczęła zwalniać do całkowitego zatrzymania przez zastosowanie zatrzymywacza. Na pozostałej długości toru regału jednostka ładunkowa rozpędza się swobodnie.

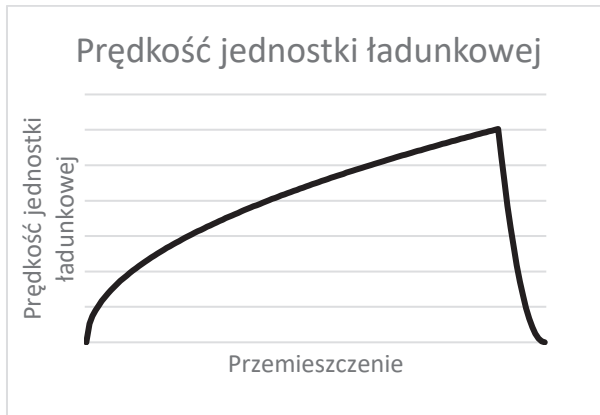
Obliczenia modelu przeprowadzono dla ładunków o trzech różnych masach $m_1 = 300\text{kg}$, $m_2 = 600\text{kg}$, $m_3 = 1\,200\text{kg}$, dla trzech różnych głębokości regału $D_{R1} = 10\,000\text{mm}$, $D_{R2} = 12\,400\text{mm}$ oraz $D_{R3} = 14\,800\text{mm}$, a także dla trzech różnych kątów nachylenia $\alpha_1 = 1,5^\circ$, $\alpha_2 = 4^\circ$ oraz $\alpha_3 = 8^\circ$. Analizę przeprowadzono dla każdej kombinacji parametrów. W sumie przeanalizowano 27 wariantów.

W układzie następuje jedynie przemiana energii potencjalnej w kinetyczną i brak jest elementów hamujących poza zatrzymywaczem na końcu regału. Zatem energia kinetyczna jednostki ładunkowej rośnie od początku ruchu proporcjonalnie do spadku energii potencjalnej (Rys. 2). Na poniższym rysunku nie uwzględniono fragmentu regału wyposażonego w zatrzymywacz.



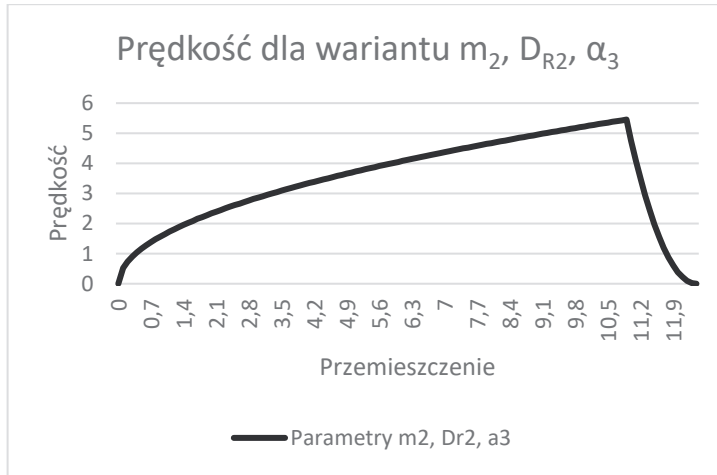
Rys. 2. Zmiany wartości energii kinetycznej wraz z przemieszczeniem ładunku w regale [21].
 Fig. 2. Changes in kinetic energy with movement of the load in the rack [21].

Profil prędkości jednostki ładunkowej kształtował się tak samo dla wszystkich wariantów (Rys. 3). Wraz ze wzrostem energii kinetycznej, prędkość jednostki ładunkowej wzrasta o odpowiednią wartość pierwiastka kwadratowego. W profilu prędkości uwzględniono fazę hamowania na końcu regału.

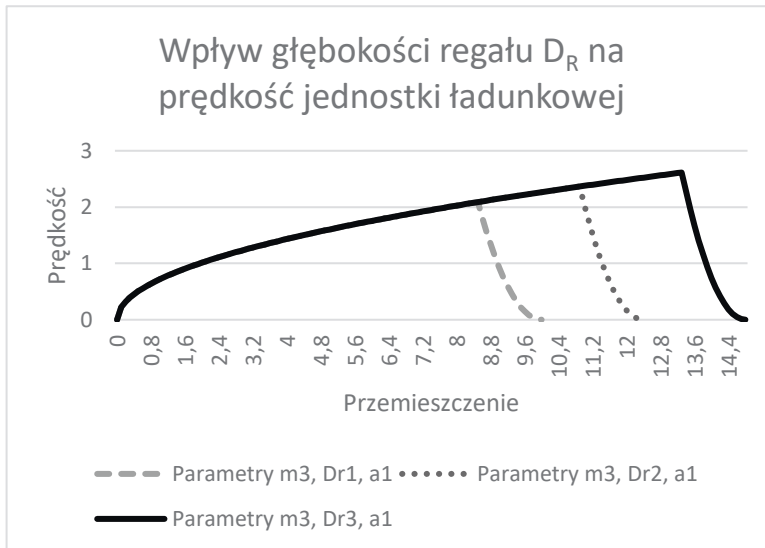


Rys. 3. Zmiana prędkości w trakcie ruchu jednostki ładunkowej w regale przepływowym [21].
 Fig. 3. Change of speed during movement of a load unit in a flow rack [21].

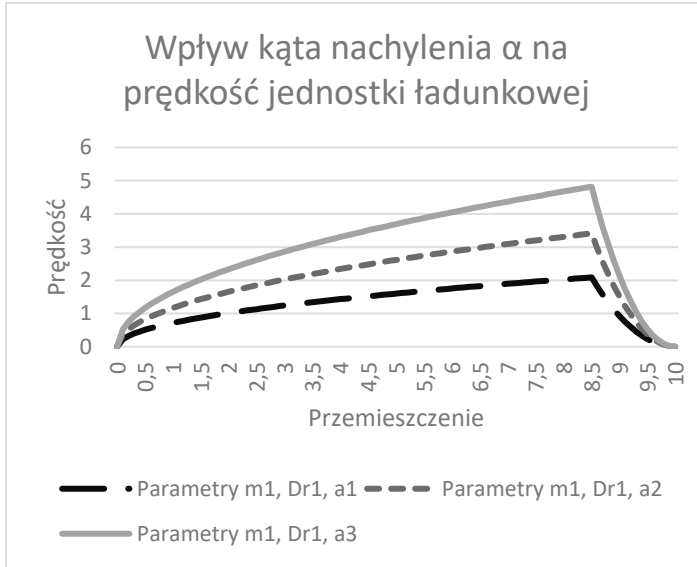
Analizując warianty modelu zauważono, że zmiany masy m jednostki ładunkowej nie mają wpływu na jej prędkość dla tych samych kątów nachylenia α oraz głębokości regału D_R (Rys. 4). Wynika to z zachodzących przemian energii. Zarówno we wzorze na energię kinetyczną jak i potencjalną występuje masa. Zatem jej zmiana powoduje proporcjonalne zmiany wartości danego rodzaju energii.

Rys. 4. Zmiana prędkości od przemieszczenia w wariantcie m_2, D_{R2}, α_3 [21].Fig. 4. Variation of speed from displacement in the variant m_2, D_{R2}, α_3 [21].

Głębokość regału D_R wpływa na maksymalnie osiągniętą przez jednostkę ładunkową prędkość. Przy tej samej masie m i kącie nachylenia α im większa głębokość regału tym większa jest maksymalnie osiągnięta przez jednostkę ładunkową prędkość (Rys. 5). Wynika to z faktu, że dla większej głębokości dłuższy jest odcinek, po którym paleta może się rozpędzać zanim dotrze do zatrzymywacza. Zatem więcej energii potencjalnej zostanie przekształcone w energię kinetyczną.

Rys. 5. Prędkości osiągnięte przez jednostkę ładunkową dla różnych głębokości regału D_R [21].Fig. 5. Speeds achieved by the loading unit for different racking depths D_R [21].

Kąt nachylenia α wpływa na stromość charakterystyki energii kinetycznej i prędkości. Im wartość kąta α była większa, tym w danym miejscu regału więcej energii potencjalnej było przekształcone w energię kinetyczną jednostki ładunkowej, co przekładało się na większą prędkość (Rys. 6).



Rys. 6. Prędkości osiągnięte przez jednostkę ładunkową dla różnych kątów nachylenia α [21].

Fig. 6. Speeds achieved by the load unit for different inclination angles α [21].

Z obserwacji wyników modelu wynika, że więcej energii potencjalnej zostanie przekształcone w energię kinetyczną w regale o większym nachyleniu i głębokości. Masa jednostek ładunkowych nie wpływa na ilość przekształconej energii. Zatem spośród analizowanych wariantów największą energię kinetyczną i prędkość jednostki ładunkowej odnotowano dla głębokości regału $D_{R3} = 14\ 800\text{mm}$, kąta nachylenia $\alpha_3 = 8^\circ$ dla wszystkich analizowanych mas.

4.3 ENERGIA KINETYCZNA ROLKI

Rolka przed kontaktem z paletą nie obraca się. W trakcie trwania kontaktu pomiędzy nimi występuje tarcie. Wówczas rolka zacznie się obracać. Prędkość liniowa punktu na obwodzie rolki nie powinna przekroczyć prędkości palety. Zgodnie z obliczeniami wykonanymi w opracowanym modelu największa prędkość jednostki ładunkowej wynosi $v = 6,025 \frac{m}{s}$. Tą wartość przyjęto jako maksymalną prędkość liniową rolki. Związek między prędkością liniową, a prędkością kątową w ruchu obrotowym określa poniższe równanie:

$$v = \omega * r \quad (5)$$

gdzie:

$$v - \text{prędkość liniowa} \left[\frac{m}{s} \right],$$

$$\omega - \text{prędkość kątowna} \left[\frac{rad}{s} \right],$$

$$r - \text{promień koła [m]}.$$

Dzieląc obustronnie powyższą zależność przez promień r można wyznaczyć prędkość kątową ω . Średnica rolki wynosi $\Phi_r = 60\text{mm}$, zatem maksymalna prędkość kątowna wynosi $\omega \approx 200,833 \frac{rad}{s}$. Rolki przenośników regałów przepływowych są ułożyskowanymi na obu końcach stalowymi rurami. Ich długość zależy od szerokości ładunku. Dla palet o szerokości $W_p = 800\text{mm}$, długość rolek wynosi $L=870\text{mm}$ [13]. Grubość ścianek wynosi $e_r = 2\text{mm}$, a ich średnica $\Phi_r = 60\text{mm}$ [13]. Rolki obracają się wokół swojej osi symetrii. Gęstość stali przyjęto $\rho_s = 7\,900 \frac{kg}{m^3}$ [14]. Moment bezwładności rolki wynosi $I_r \approx 0,002\text{kg}\cdot\text{m}^2$. Energię kinetyczną w ruchu obrotowym opisuje zależność:

$$E_{kobr} = \frac{I_b * \omega^2}{2} \quad (6)$$

gdzie:

$$E_{kobr} - \text{energia kinetyczna w ruchu obrotowym [J]},$$

$$I_b - \text{moment bezwładności bryły [kg}\cdot\text{m}^2],$$

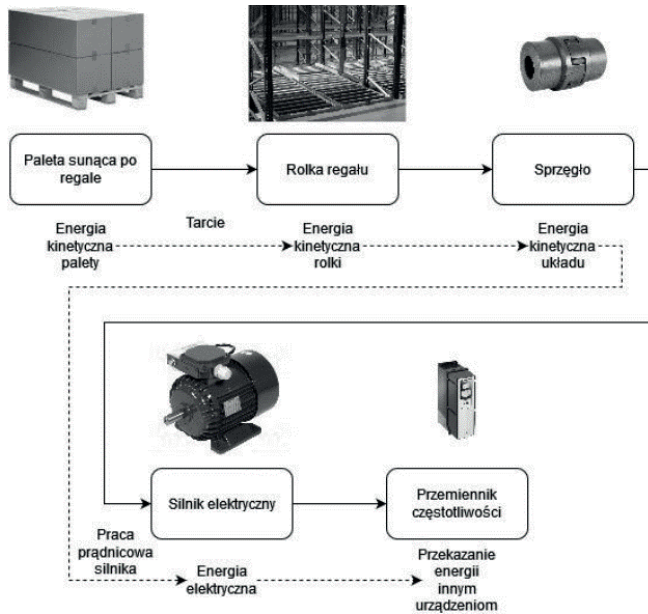
$$\omega - \text{prędkość kątowna} \left[\frac{rad}{s} \right].$$

Zatem energia kinetyczna rolki dla maksymalnej prędkości kątowej $\omega = 200,833 \frac{rad}{s}$ wynosi $E_{kr} \approx 40,334\text{J}$. Wyznaczona wartość jest wartością szczytową w badanym modelu. Maksymalna energia kinetyczna innych rolek w tym samym wariancie modelu będzie mniejsza od obliczonej. Energia możliwa do odzyskania będzie pomniejszona o straty zaproponowanego modułu układu odzysku energii.

5. KONCEPCJA ROZWIĄZANIA

Zaproponowany układ do odzysku energii umożliwia przetworzenie części energii kinetycznej rolki na energię elektryczną. Rolka pozyskuje energię kinetyczną od sunącej palety. Część tej energii przenosi układ mechaniczny, dzięki zmodyfikowanej rolce na adapter. Na adapterze umieszczono wał z wypustem, na którym zamocowano sprzęgło kłowe. Do drugiej piasty sprzęgła wprowadzono wał silnika elektrycznego. Obracająca się rolka napędza silnik za pośrednictwem sprzęgła.

Obracający się wirnik silnika, dzięki odpowiedniemu wystereowaniu przez podłączony do niego przemiennik częstotliwości, wprowadza silnik w pracę prądnicową. Wtedy część energii mechanicznej na wale silnika zmienia się w energię elektryczną. Energię tą można wykorzystać do zasilania innych urządzeń. Schemat ideowy układu przedstawiono poniżej (Rys. 7).



Rys. 7. Schemat ideowy układu odzysku energii z regału przepływowego [21].

Fig. 7. Schematic diagram of a flow rack energy recovery system [21].

5.1 ELEMENTY SKŁADOWE UKŁADU

Najważniejszymi elementami systemu są odpowiednio zmodyfikowane rolki z adapterem, silnik oraz przemiennik częstotliwości. Dzięki współpracy tych części możliwe jest odzyskanie energii w trakcie ruchu palety po torze regału przepływowego.

Standardowo stosowaną w regałach rolkę zmodyfikowano na potrzeby układu. Konieczne było przede wszystkim zaadoptowanie jej konstrukcji do przekazywania ruchu obrotowego. Wykorzystano dłuższą rolkę do ładunków 1 000mm, aby nie zmniejszać szerokości jednostek ładunkowych. Jej długość wynosi 1 070mm. W kątowniku regału wywiercono otwór, żeby zamocować rolkę. Konieczny był wówczas montaż łożyska, aby rolka mogła się obracać. Na część rolki poza zarysem regału nasunięto adapter. W rolce i adapterze są 4 otwory, aby je ze sobą skrócić. Pozwala to na przekazanie ruchu obrotowego. Część adaptera ma kształt wału $\Phi 19$ z występem, który wprowadzono do sprzęgła.

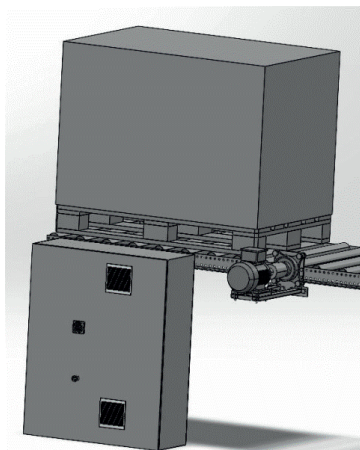
Do drugiej piasty sprzęgła wprowadzono wał silnika indukcyjnego. Uwzględniając prędkości kątowe rolek regału oraz dostępne na rynku przemienniki częstotliwości dobrano silnik o następujących parametrach:

- Wymiary 278x160x212mm,
- Wznios wału 80mm,
- Moc $P = 0,75\text{kW}$,
- Znamionowa prędkość obrotowa $n = 1\,440 \frac{\text{obr}}{\text{min}}$,
- Napięcie zasilania 400VAC,
- Prąd znamionowy $I_n = 1,9\text{A}$,
- Sprawność $\eta = 0,74$,
- Współczynnik mocy $\cos\Phi = 0,78$.

Kluczowym elementem układu jest przemiennik częstotliwości. Wprowadza i utrzymuje silnik w pracy prądnicowej i przekazuje odzyskaną energię. Posiada możliwość tworzenia niewielkich programów dzięki wbudowanemu sterownikowi, zatem może spełniać funkcje sterownicze układu - nie trzeba stosować dodatkowego sterowania. Ze względu na specyfikę układu nie zastosowano przemiennika regeneracyjnego, tylko standardowy. Nie zapewnia zwrotu energii do sieci, ale przy odpowiednich ustawieniach nadmiar energii można odzyskać z obwodu pośredniego. W tym celu zamiast rezystora, zastosowano przetwornice DC/DC. Wówczas odzyskaną energię można ponownie wykorzystać. Do właściwego sterowania silnikiem potrzebny był enkoder. Dobrano przemiennik ACS880-01-02A4-3+E202+L517.

5.2 PROPOZYCJA MODUŁU UKŁADU ODZYSKU ENERGII

Poniżej przedstawiono propozycję wizualizacji opracowanego układu (Rys. 8).

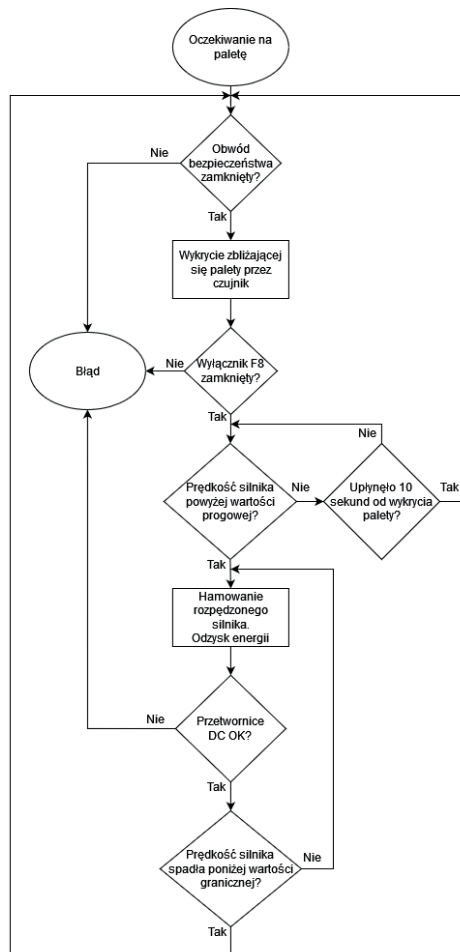


Rys. 8. Propozycja opracowanego modułu układu do odzysku energii [21].

Fig. 8. Proposal of the developed energy recovery system module [21].

5.3 SCHEMAT DZIAŁANIA UKŁADU

Zaproponowany układ wymaga dedykowanej aplikacji sterującej. Jej działanie zostanie zaimplementowane w programie przemiennika. Program uwzględnia stan wyłącznika awaryjnego. Aby układ poprawnie pracował konieczny był sygnał o zbliżającej się palecie od czujnika odbiciowego, sprzężenie zwrotne prędkości silnika zapewniane przez enkoder, sygnały o poprawnej pracy przetwornic DC/DC oraz położenie wyłącznika zabezpieczającego obwody za przetwornicami. Po uruchomieniu modulacji sygnałem sterującym jest prędkość silnika, na jej podstawie przemiennik wprowadza silnik w pracę prądnicową. Propozycję działania układu przedstawiono na Rys. 9.

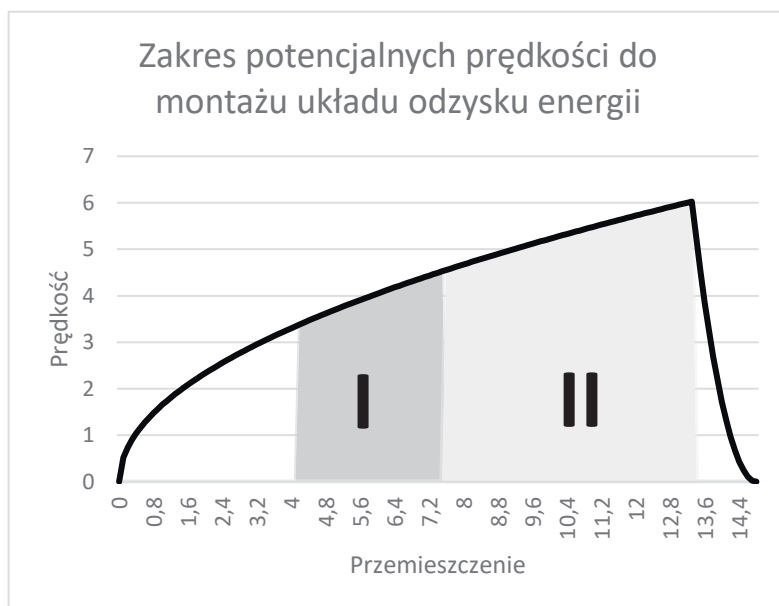


Rys. 9. Propozycja schematu działania układu odzysku energii [21].
Fig. 9. Proposal for an energy recovery system operating scheme [21].

6. LOKALIZACJA UKŁADU

Opracowany moduł układu odzysku energii powinien być zamontowany w miejscu regału, które pozwoli na odzyskanie jak największej ilości energii. Zgodnie z założeniami silnik powinien być utrzymywany w pracy prądnicowej powyżej $0,75n$ jego prędkości znamionowej. Pozwoli to na odzyskanie największej ilości energii elektrycznej. Zatem potencjalne lokalizacje montażu układu odzysku znajdują się tam, gdzie rolki osiągają prędkość z zakresu $0,75n-n$ prędkości znamionowej silnika. Dla dobranego silnika są to prędkości z przedziału ok. $1\ 080-1\ 440\frac{\text{obr}}{\text{min}}$.

Na podstawie modelu obliczeniowego układu odzysku energii wyznaczono obszar regału, gdzie potencjalnie można zamontować układ odzysku (Rys. 10). Analizę przeprowadzono dla najbardziej efektywnych pod względem energetycznym wariantów modelu.



Rys. 10. Obszar potencjalnego montażu układu odzysku w zależności od prędkości jednostki ładunkowej. Zakres I - prędkości rolek $1\ 080-1\ 440\text{obr}/\text{min}$, zakres II- prędkości rolek powyżej $1\ 440\text{obr}/\text{min}$ [21].

Fig. 10. Potential installation area of the recovery system depending on the speed of the loading unit. Scope I - roller speeds $1\ 080-1\ 440\text{rpm}$, scope II - roller speeds above $1\ 440\text{rpm}$ [21].

Przedstawiony powyżej profil prędkości wyróżnia dwa zakresy. Zakres I odpowiada prędkościom rolek z zakresu $1\ 080-1\ 440\frac{\text{obr}}{\text{min}}$, w którym energia powinna być odzyskiwana. Zakres II odpowiada prędkościom rolek powyżej $1\ 440\frac{\text{obr}}{\text{min}}$. Odzysk

energii w zakresie II również jest możliwy. W tym przypadku przemiennik będzie rozpoczynać modulację silnika po spadku prędkości jego wału poniżej $1440 \frac{obr}{min}$.

Miejsce montażu układu odzysku powinno być starannie dobrane. Powinno uwzględniać rodzaj i ilość ładunku, otoczenie i konstrukcję regału oraz specyfikę magazynu. Ponadto należy uwzględnić, że zaproponowana orientacja montażu układu wymaga zapewnienia przestrzeni o wymiarach przynajmniej 544x183x258mm obok kanału regału.

7. SPRAWNOŚĆ

Zaproponowany układ może odzyskać tylko część energii przekazanej przez jednostkę ładunkową i przetworzyć na energię elektryczną. Na jego sprawność wpływają sprawności części składowych. Najważniejszymi elementami wpływającymi na sprawność całkowitą są silnik, przemiennik częstotliwości oraz przetwornice DC/DC.

Sprawność silnika elektrycznego zależy przede wszystkim od obciążenia oraz punktu charakterystyki, w którym znajduje się silnik w trakcie pracy. Sprawność dobrego silnika wynosi $\eta = 0,74$ [15].

Przemienniki częstotliwości są poddawane badaniom pozwalającym określić ich sprawność. Norma IEC 61 800-9-2 definiuje metody pomiarowe, wymagania oraz trzy klasy sprawności energetycznej IE0, IE1 oraz IE2. Sprawność dobrego przemiennika ACS880-01-02A4-3+E202+L517 spełnia wymagania najwyższej klasy sprawności energetycznej IE2 [16], [17]. Sprawność przemiennika dla obciążenia znamionowego i prędkości wirnika na poziomie 45Hz wynosi $\eta_f = 0,965$ [18].

Praca przetwornic DC/DC wiąże się ze stratami energii. Część energii jest wykorzystywana do zasilenia układów przetwornic, a część zostaje rozproszona w postaci ciepła. Zgodnie z danymi producenta sprawność dobranych przetwornic zawiera się w przedziale 0,84–0,87. Przyjęto, że sprawność przetwornicy DC/DC wynosi $\eta_{pDC} = 0,86$ [19].

Sprawność całkowita układu jest równa iloczynowi sprawności elementów składowych. Wynosi ona:

$$\eta_u = \eta * \eta_f * \eta_{pDC} = 0,740 * 0,965 * 0,860 \approx 0,614 \approx 0,61 \quad (7)$$

gdzie:

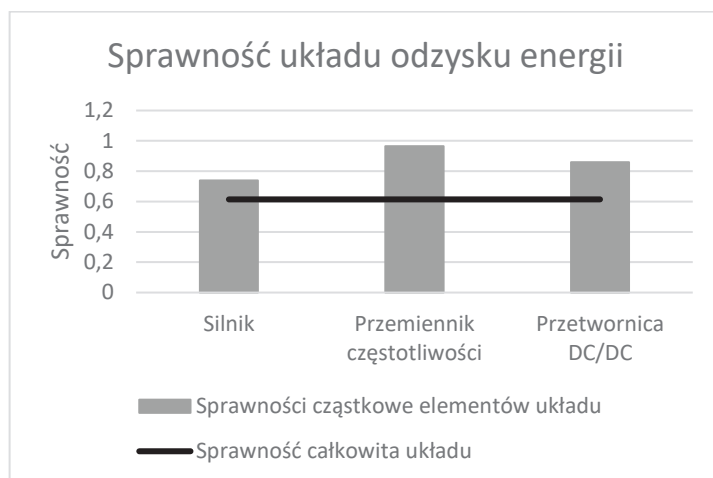
η_u – sprawność całkowita układu odzysku energii,

η – sprawność silnika,

η_f – sprawność przemiennika częstotliwości,

η_{pDC} – sprawność przetwornicy DC/DC.

Na wynik wpływają sprawności silnika oraz przetwornic DC/DC, co sprawia że całkowita sprawność jest niższa (Rys. 11).



Rys. 11. Sprawności cząstkowe elementów i sprawność całkowita układu odzysku energii [21].

Fig. 11. Partial efficiencies of the components and total efficiency of the energy recovery system [21].

8. ANALIZA OPŁACALNOŚCI EKONOMICZNEJ UKŁADU

Ilość energii możliwej do odzyskania przez układ powinna być na tyle duża, żeby koszt jej zakupu był większy od kosztów układu w ustalonym czasie. Zgodnie z założeniami koszty zakupu i montażu układu powinny zwrócić się w ciągu 4 lat, aby jego zastosowanie było ekonomicznie uzasadnione.

Energia możliwa do odzyskania przez układ przy przesuwie jednej jednostki ładunkowej przy założeniu, że przed kontaktem z paletą rolka nie obraca się wynosi maksymalnie $E_{kr} = 60,5J$. Wartość ta uwzględnia zastosowanie dłuższej rolki. Przyjęto, że silnik będzie zwalniany z prędkości $1440 \frac{obr}{min}$ do prędkości $1080 \frac{obr}{min}$ w czasie $t_z = 5s$. Uwzględniając czas zwalniania silnika, energię kinetyczną rolki dla prędkości początkowej oraz prędkość zakończenia modulacji wyznaczono, że w trakcie jednego cyklu zwalniania rolki możliwa do odzyskania energia kinetyczna wynosi $E_{kcal} \approx 133,239J$. Uwzględniając sprawność układu możliwa do odzyskania ilość energii wynosi $E_{kodz} \approx 81,276J$.

Energia elektryczna rozliczana jest w kWh, 1kWh to 3 600 000J. Zatem $E_{kodz} = 81,276J \approx 2,26 \cdot 10^{-5} kWh$.

Układ zamontowano w magazynie, gdzie w ciągu roku zachodzi 3 153 600 pełnych cykli odzysku. W ciągu roku układ jest w stanie odzyskać $E_{odz} \approx 71,20kWh$. Biorąc pod uwagę założenia, w ciągu 4 lat układ może odzyskać 284,8kWh. Koszty

budowy układu oszacowano na 15 109,41zł, z czego koszt zakupu elementów niezbędnych do budowy układu wyniósł 13 109,41zł. Koszt jednej kilowatogodziny przyjęto $K_{kWh} = 2,314zł/kWh$ [20]. Uwzględniając koszty zakupu i montażu układu oraz koszt jednej kilowatogodziny K_{kWh} oszacowano ilość energii, jaką układ powinien odzyskać, aby jego zakup był rentowny. Próg rentowności układu wynosi:

$$BEP = \frac{15109,41zł}{2,314 \frac{zł}{kWh}} = 6529,563kWh \quad (8)$$

gdzie:

BEP – próg rentowności [kWh].

Biorąc pod uwagę próg rentowności inwestycji BEP oraz energię, którą układ będzie w stanie odzyskać w ciągu 4 lat zakup proponowanego rozwiązania jest ekonomicznie nieuzasadniony.

9. PODSUMOWANIE

1. Artykuł miał na celu omówienie możliwości odzysku energii z regałów przepływowych, przedstawienie aktualnego stanu wiedzy w tej dziedzinie, przedstawienie założeń proponowanego układu i analizę modelu obliczeniowego. Ponadto omówiono zaproponowaną koncepcję rozwiązania, jej części składowe i zasadę działania. Przeanalizowano także sprawność układu i jego opłacalność ekonomiczną.

2. Zasada działania regałów przepływowych może stanowić ciekawą platformę do budowy układów odzyskujących energię. Obracające się rolki mogą napędzać urządzenia układu.

3. Naukowcy z wielu krajów na świecie prowadzą badania nad usprawnieniem procesów składowania, zmniejszeniu czasów kompletacji czy ograniczeniu energochłonności procesów magazynowych. Badania te biorą pod uwagę zarówno sposób rozmieszczenia ładunków, jak i zapotrzebowanie energetyczne urządzeń magazynowych.

4. Zaproponowanie układu odzysku wymagało oszacowania energii możliwej do odzyskania. W tym celu opracowano model obliczeniowy. Analiza modelu zmian energii w trakcie ruchu jednostki ładunkowej po torze regału pozwoliła stwierdzić, że ilość energii kinetycznej jest niezależna od masy ładunku. Energia ta wzrasta wraz ze wzrostem głębokości regału oraz kąta nachylenia toru.

5. Zaproponowany układ odzysku energii przyjmuje część energii kinetycznej przesuwanej się w regale palety i przetwarza na energię elektryczną o parametrach umożliwiających wykorzystanie jej ponownie. Składa się z części mechanicznej oraz aparatury elektrycznej. Jego działanie możliwe jest dzięki opracowanemu algorytmowi.

6. Model obliczeniowy z uwzględnieniem parametrów dobranych urządzeń tworzących układ pozwolił na wyznaczenie potencjalnego obszaru regału, gdzie układ jest uzasadniony pod względem energetycznym.

7. Przeprowadzono analizę sprawności zaproponowanego układu w celu określenia ilości energii potencjalnie możliwej do odzyskania. Całkowita sprawność opracowanego rozwiązania wynosi $\eta_u = 0,61$ (Rys. 11).

8. Uwzględnienie sprawności układu pozwoliło oszacować ilość energii, którą będzie on w stanie odzyskać. Biorąc pod uwagę koszty budowy układu oraz koszty energii elektrycznej określono, jaką ilość energii układ powinien odzyskać, aby być opłacalny. Z przeprowadzonej analizy wynika, że zastosowanie opracowanego rozwiązania jest ekonomicznie nieuzasadnione.

LITERATURA

- [1] WOJCIECHOWSKI A., *Regały przepływowe w praktyce*, Nowoczesny Magazyn nr 6, 20 Maj 2021.
- [2] www.bit.com.pl/pl/ekspertyza/artikel/jakie-sa-techniki-magazynowania/ (dostęp: 20.01.2022)
- [3] GANG C., HAOLIN F., KAIYI L., YANLI T., *Retrieval-oriented storage relocation optimization of an automated storage and retrieval system*, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, tom 155, 2021.
- [4] MENEGHETTI A., MONTI L., *Multiple-weight unit load storage assignment strategies for energy-efficient automated warehouses*, International Journal of Logistics: Research and Applications, tom 17, nr 4, pp. 304-322, 2014.
- [5] LERHER T., EDL M., ROSI B., *Energy efficiency model for the mini-load automated storage and retrieval systems*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, pp. 97-115, 2014.
- [6] JONAK J., NIEOCZYM A., *Logistyka w obszarze produkcji i magazynowania*, Politechnika Lubelska, Lublin 2014.
- [7] www.wdx.pl/oferta/regaly-przeplywowe-grawitacyjne/ (dostęp: 09.09.2022)
- [8] Katalog regałów przepływowych firmy Mecalux.
- [9] www.nedcon.pl/blog/jak-dzialaja-regaly-rolkowe/ (dostęp: 03.05.2022)
- [10] Materiały firmy MECALUX, *Regały przepływowe - idealna rotacja palet dzięki grawitacyjnemu systemowi przemieszczania ładunku*, Warszawa 2016.
- [11] SKOĆ A., SPAŁEK J., MARKUSIK S., *Podstawy konstrukcji maszyn*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2008.
- [12] HALLIDAY D., RESNICK R., WALKER J., *Podstawy fizyki Tom 1*, PWN, Warszawa 2015.
- [13] www.techprim.pl/oferta/przenosniki-rolkowe-grawitacyjne/rolki-i-profile-nosne/ (dostęp: 16.05.2022)
- [14] www.calculla.pl/tabela_gestosci (dostęp: 16.05.2022)
- [15] Katalog silników 3-fazowych firmy TAMEL S.A.
- [16] Materiały firmy ABB, *Pojedyncze przemienniki częstotliwości ACS880*, 2019
- [17] AARNIOVUORI L., KÄRKKÄINEN H., ANUCHIN A., PYRHÖNEN J., LINDH P., CAO W., *Voltage Source Converter Energy Efficiency Classification in Accordance with IEC 61800-9-2*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019.
- [18] www.ecodesign.drivesmotors.abb.com/drive (dostęp: 30.07.2022)

[19] Materiały firmy MeanWell, *Karta katalogowa przetwornic DC/DC serii DDRH-60*, New Taipei City 2019.

[20] www.rachuneo.pl/prad-dla-firm?subpage=energy-offers-list (dostęp: 01.08.2022)

[21] Opracowanie własne

ANALYSIS AND IMPROVEMENT OF THE LOGISTIC STORAGE SYSTEM BY MEANS OF STORING TYPICAL PALLET UNITS IN A RACK WITH ENERGY RECOVERY

Key words: *energy recovery, energy recovery system, flow rack, gravity flow rack, frequency converter, storage*

The paper describes the possibility of recovering a part of a pallet's kinetic energy during storage on a flow rack. In order to develop the solution, it was necessary to make assumptions, create a computational model and analyse energy transformations during the storage process. The proposed solution, based on the results of the model and analysis, is able to recover energy from flow racks and transform it into a usable form. The paper analyses an appropriate localisation for the energy recovery system, describes its efficiency and defines its cost effectiveness.

Corresponding author:

e-mail: kg.golen@gmail.com