

Dr hab. inż. Ilona Jacyna-Golda

Wydział Inżynierii Produkcji, Politechnika Warszawska
Narbutta 85, 02-524 Warszawa, Polska
E-mail: jacyna.golda@gmail.com

Dr inż. Konrad Lewczuk

Wydział Transportu, Politechnika Warszawska
Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, Polska
E-mail: kle@wt.pw.edu.pl

The method of estimating dependability of supply chain elements on the base of technical and organizational redundancy of process

Metoda szacowania niezawodności elementów łańcucha dostaw na podstawie charakterystyk nadmiarowości technicznej i organizacyjnej procesu

Keywords: *warehouse dependability, technological redundancy, organizational redundancy, material flow pile-up, supply chain.*

Słowa kluczowe: *niezawodność magazynu, nadmiarowość technologiczna, nadmiarowość organizacyjna, spiętrzenia w przepływie materiałów, łańcuch dostaw*

Abstract: The quality of supply chain operation depends on quality of its particular elements, including warehouses. The paper presents an attempt to describe the quality of warehouse operation in terms of dependability. Authors discussed issues related to assessing warehouse operation, quality problems and solutions to increase the quality of work. The technical and organizational redundancy was proposed as a primary factor increasing dependability of warehouse operation in supply chain and thereby improving the quality of services. Authors discussed dependability of supply chain and warehouses and have proposed an approach to determination of dependability of warehouse facility based on technological and organisational redundancy related to material flow pile-ups. The approach was founded on *OTIFEF* index as a base for dependability estimation. Construction of that index basing on probabilities of correct realization of different aspects of logistics service was proposed. An important element of the approach presented in the paper is proposal of technical and organisational indicators defining different aspects of redundancy in aspect of dependability. The example of redundancy assessment in function of technical and organisational methods of increasing warehouse efficiency has been provided.

Streszczenie: Jakość pracy łańcucha dostaw jest wynikiem jakości pracy jego elementów, w tym magazynów. W artykule przedstawiono próbę ujęcia zagadnień jakościowych pracy magazynu w kategoriach niezawodnościowych. Omówiono zagadnienia oceny pracy magazynów, źródła problemów jakościowych i stosowane rozwiązania zwiększające jakość pracy. Wskazano nadmiarowość techniczną i organizacyjną jako podstawowy środek zwiększania niezawodności realizacji zadań przez magazyny w łańcuchu dostaw i tym samym poprawę jakości świadczonych usług. Autorzy omówili zagadnienia niezawodności łańcucha dostaw i magazynów jako ich podstawowych elementów i zaproponowali podejście do określania niezawodności magazynu oparte o nadmiarowość technologiczną i organizacyjną ustalaną w oparciu o przewidywane spiętrzenia przepływu materiałów. Do tego celu wykorzystano miernik *OTIFEF* jako podstawę szacowania niezawodności.

Zaproponowano konstrukcję tego miernika w oparciu o prawdopodobieństwa poprawnej realizacji różnych aspektów usług logistycznych. Ważnym elementem podejścia proponowanego w artykule jest propozycja technicznych i organizacyjnych wskaźników określających różne aspekty nadmiarowości w funkcji niezawodności magazynu. Przedstawiono przykład szacowania nadmiarowości z wykorzystaniem technicznych i organizacyjnych metod zwiększania efektywności.

1. Wprowadzenie

Ważną charakterystyką każdego systemu technicznego, w tym i systemu logistycznego, jest jakość pracy wyrażająca stopień spełnienia oczekiwań użytkowników tego systemu. Jakość pracy systemu logistycznego może być rozważana w odniesieniu do terminowości (czasu) dostaw, bezpieczeństwa, niezawodności itp. w funkcji kosztów [9], [11]. Jakość realizacji usług przez system logistyczny może być rozważana z wykorzystaniem zagadnień niezawodności, jednak stosowanie klasycznych miar niezawodności i mechanizmów jej wyznaczania w stosunku do systemów logistycznych jest utrudnione ze względu na ich złożoność i konieczne podejście procesowe do badanych obiektów.

Szczególnym przypadkiem systemu logistycznego jest łańcuch dostaw. Ze względu na jego szeregową strukturę można uznać, że jakość jego pracy, szczególnie w warstwie technicznej, zależy od jakości pracy poszczególnych składowych [5]. Składowe te, obiekty i podsystemy, realizują procesy przemieszczania, przechowywania i przekształcania materiałów.

Podsystem transportowy w łańcuchu dostaw warunkuje efektywność i czas przemieszczania, może być też źródłem opóźnień oraz uszkodzeń i ubytków materiałów. Magazyny zaś są miejscami przechowywania i przekształcania materiałów oraz w pewnym zakresie również przemieszczania. Dodatkowo magazyny służą do tworzenia i rozmieszczania zapasu, tak więc warunkują dostępność towarów dla klientów i czas reakcji na zapotrzebowanie. Są też miejscami, w których dokonywane są manipulacje na najmniejszych możliwych postaciach materiałów, dlatego są źródłem błędów jakościowych i ilościowych. Procesy magazynowe są obciążone ryzykiem uszkodzenia materiałów. Dodatkowo składowanie materiałów przyczynia się do obniżenia ich wartości i generuje koszty utrzymania zapasu. Wymienione negatywne zjawiska muszą być badane i eliminowane w celu poprawy jakości usług świadczonych w całym łańcuchu dostaw.

W związku z powyższym procesy magazynowe wydają się mieć duże znaczenie dla jakości usług w łańcuchu dostaw ze względu na szerokie spektrum możliwych do zaistnienia błędów i zjawisk niekorzystnych z punktu widzenia klienta. W przypadku podsystemu transportowego możliwe jest doraźne przeciwdziałanie niedostatkom jego wydajności przez stosowanie dodatkowych środków transportowych. W przypadku magazynu zwiększenie wydajności nie da się często zrealizować tak prostymi metodami organizacyjnymi. Wydajność zaś warunkuje terminowość, a ta z kolei decyduje o jakości.

Nieprawidłowości w realizacji usług logistycznych wynikają z błędów planowania zaopatrzenia i dystrybucji (nie rozważanych w tym artykule) oraz niedostatków technicznych i nieodpowiedniej organizacji. Powstaje więc pytanie jak powinny funkcjonować obiekty magazynowe, a zwłaszcza w jakie powinny być wyposażone środki techniczne, aby procesy magazynowe przebiegały zgodnie z oczekiwaniami klientów? Jedną z podstawowych metod zwiększania niezawodności systemów jest *nadmiarowość*. Jako nadmiarowość rozumiane jest zastosowanie większej w stosunku do tego, co konieczne lub przyjęte na ogół: liczby urządzeń, ludzi, przestrzeni lub informacji w celu zabezpieczenia na wypadek uszkodzenia lub braku wydajności części systemu.

W artykule autorzy zaproponowali pewne ujęcie zagadnień jakościowych pracy magazynów w kategoriach niezawodnościowych. Na tej podstawie przedyskutowali możliwość

zwiększania niezawodności procesów magazynowych w oparciu o nadmiarowość technologiczną i organizacyjną. W tym kontekście przedstawili stan badań dotyczących niezawodności systemów logistycznych ze szczególnym uwzględnieniem rozwiązań technicznych realizacji procesów magazynowych w łańcuchu dostaw. Ważnym elementem przedstawionego podejścia jest model określania charakterystyk niezawodności magazynu w odniesieniu do spiętrzeń w przepływie materiałów (rozdział 5). Sformułowano także propozycje wskaźników nadmiarowości technologicznej i organizacyjnej wchodzących w skład struktury niezawodnościowej magazynu.

2. Zagadnienia niezawodności w procesach magazynowych i łańcuchów dostaw

Zgodnie z normami PN-82/N-04001 i PN-93/N-50191, niezawodność systemu definiowana jest jako zespół właściwości, które opisują gotowość obiektu oraz wpływające na nią nieuszkodzalność (ang. – *reliability*), obsługiwalność (ang. – *maintainability*) i zapewnienie środków obsługi (ang. – *maintenance support*). Definiując niezawodność systemu logistycznego, jak pisze Nowakowski [19, 20], należy zauważyć, że:

- niezawodność tego systemu jest rozumiana tylko jako miara realizacji zadania w czasie, co można porównać do pojęcia nieuszkodzalności systemu technicznego,
- w ujęciu logistycznym nie sformułowano odpowiednika charakterystyki obsługiwalności czy naprawialności,
- wszystkie miary mają charakter współczynników, na ogół wskaźników struktury; nie korzysta się z innych charakterystyk, mimo że oceniane procesy mogą być również procesami losowymi.

W innym miejscu T. Nowakowski [19] definiuje niezawodność systemu logistycznego przez jego gotowość. W klasycznym ujęciu funkcja gotowości obiektu naprawialnego jest prawdopodobieństwem, że w określonej chwili obiekt będzie realizował poprawnie swoje zadanie [34]. *Gotowość* magazynu zaś jest zdolnością do terminowego podejmowania i pomyślnej realizacji zadań wynikających z łańcucha dostaw, warunkowaną przez dostępność zasobów, tj. urządzeń i środków transportu wewnętrznego, czasu dysponowanego, środków kontrolno-pomiarowych i zdolności buforowania ([16] za *Logistics Management Institute*). Niezawodność magazynu to funkcja gotowości do obsługi dostaw (wyładunek, przyjęcie i wprowadzenie do stref rezerw) oraz wysyłki (wyprowadzanie, uzupełnianie, pobieranie, sortowanie, konsolidacja, załadunek). Poziom usług magazynowych można uznać za wystarczający, a tym samym gotowość magazynu za zadowalającą, jeżeli przy stałych kosztach, w określonym czasie i przy określonej strukturze strumieni materiałowych:

- liczba i struktura błędów jakościowych są na dopuszczalnym poziomie,
- usługi realizowane są terminowo, tj. zgodnie z umową z klientem,
- przyspieszanie bądź anulowanie realizacji zleceń jest możliwe w określonych warunkach,
- jest możliwe obsłużenie spiętrzeń w przepływach materiałów bez negatywnego skutku dla pozostałych uczestników łańcucha dostaw,
- obiekt może, w określonych granicach, reagować na zmianę struktury asortymentu lub zmianę struktury zleceń klientów nie zwiększając liczby błędów i utrzymując terminowość.

Niezawodność jest czynnikiem trudno-mierzalnym uwzględnianym przy projektowaniu systemów logistycznych [10, 18]. W sieciach zaopatrzenia pojęcie niezawodności najczęściej ogranicza się do procesu dostawy. W tym zakresie Nowakowski [19, 20] wskazuje, że niezawodność działania łańcuchów dostaw może oznaczać: terminowe wykonanie zadania, kompletną realizację zamówienia oraz otrzymanie lub wydanie towaru bez uszkodzeń. Miarą niezawodności funkcjonowania systemu są zakłócenia oraz stopień obniżenia jego wydajności

[10, 18]. W tym kontekście analizie poddawana jest elastyczność układu, tj. zdolność adaptacji i zmian obszaru działania oraz możliwości rozbudowy obszaru działania.

Niezawodność łańcuchów dostaw jest szeroko omawiana w literaturze. Liczne badania dotyczące problemów niezawodności łańcuchów dostaw [1-3, 8], biorą pod uwagę zagadnienia dotyczące obniżenia wydajności systemu i zmian obciążenia tras transportowych sieci [24, 27]. Na przykład Sohn i Choi [28] rozważają zagadnienia sterowania łańcuchem dostaw w odniesieniu do niezawodności kolejnych jego etapów, w tym procesów magazynowych wskazując konieczność uwzględnienia aspektów niezawodnościowych już na etapie projektowania. Bukowski i Feliks [6] poszukują zunifikowanej koncepcji oceny niezawodności złożonych łańcuchów dostaw. Baghalian i inni [1] prezentują matematyczny model kształtowania sieci wieloasortymentowych łańcuchów dostaw, który uwzględnia niepewność po stronie popytowej i podażowej. Niepewność taka przekłada się na spiętrzenia przepływu materiałów na wejściu i wyjściu magazynów.

Dość ciekawe badania wpływu zjawiska sezonowości na poziom niezawodności w usługach przewozowych części zamiennych przedstawiają Juściński i Piekarski [12]. Autorzy wyznaczyli wartość indeksów sezonowych dla badanego okresu i poddali ocenie rozkład ich zmian w aspekcie przewidywanego zapotrzebowania na części zamienne do maszyn.

Zagadnienia strategicznego sterowania łańcuchem dostaw i projektowania niezawodnych magazynów pracujących w warunkach normalnych i warunkach nieprzewidzianych zakłóceń są przedmiotem analiz wielu autorów [21, 25]. Peng i inni [21] przedstawiają model minimalizacji kosztu realizacji zadań logistycznych przy jednoczesnej minimalizacji ryzyka przerwania realizacji zadań. Neo i inni [15] analizują wpływ braku wydajności technicznej magazynu na wybrane kryteria oceny jakości jego pracy. Wskazują przy tym dokładność informacji, procesy kompletacji i terminową realizację dostaw jako kluczowe wskaźniki jakości.

Rizzi i Zamboni [23] analizują procesy logistyczne w manualnym magazynie wyrobów gotowych, z wykorzystaniem systemu klasy ERP, którego celem jest poprawa efektywności magazynu. Autorzy zaznaczyli, że samo wdrożenie zintegrowanego systemu informacyjnego nie gwarantuje racjonalizacji pracy magazynu.

Werbińska-Wojciechowska [33] przedstawia model utrzymania systemów technicznych na przykładzie systemów logistycznych z wykorzystaniem koncepcji opóźnień czasowych. Wykazuje skuteczność opracowanego modelu na przykładzie urządzeń transportu wewnętrznego. W pracy [32] Autorka przedstawia zagadnienie integracji systemu realizującego zadanie z systemem wspierającym.

Jakość realizacji usług jako ważny aspekt niezawodności jest uwypuklana w dociekaniach naukowych [26, 29, 30]. Autorzy traktują jakość jako stopień spełnienia wymagań klientów przez podmioty prowadzące działalność usługową. Na przykład w pracy [26], Autor opisując wielowymiarowość pojęcia jakości wskazuje, iż ocena jakości powinna dotyczyć również niezawodności działania: środków transportowych, zasobów ludzkich, zasobów informacyjnych, infrastruktury wraz z wyposażeniem technicznym, zasad organizacji systemu. Natomiast Chung i inni [7] podnoszą zagadnienie jakości pracy i niezawodności magazynów w odniesieniu do specjalizacji łańcucha dostaw i wynikającej z niej możliwości ponownego wykorzystania zasobów zużywanych w procesach pakowania. Autorzy proponują algorytmy genetyczne jako narzędzie skutecznego planowania niezawodności.

Istotnym aspektem niezawodności łańcucha dostaw i pracujących w nim magazynów jest wyznaczenie prawdopodobieństwa bezbłędnego działania systemu jako całości. Jest to trudne dla tak złożonych struktur jak systemy logistyczne, w przypadku których nie można mówić o klasycznym uszkodzeniu powodującym niezdatność. Często to właśnie procesy magazynowe stanowią istotne źródło nieprawidłowości. W tym kontekście ważny jest

odpowiedni dobór i liczba środków technicznych. Z tego powodu konieczne jest podanie wybranych miar technologicznych i organizacyjnych doboru środków technicznych zabezpieczających realizację procesów magazynowych przy uwzględnieniu różnorodności zamówień odbiorców i nierównomierność dostaw.

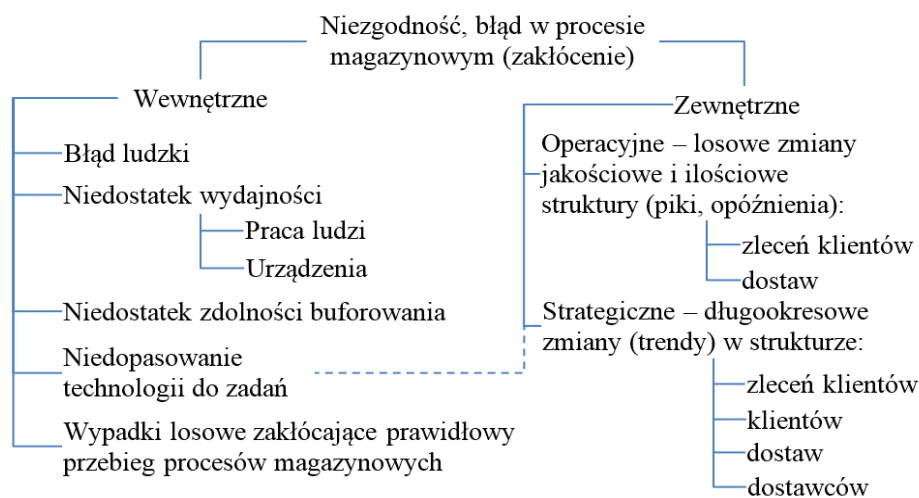
Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury stwierdzono, że występuje luka badawcza dotycząca wpływu nadmiarowości na niezawodność i koszt działania systemu magazynowego, szczególnie w aspekcie rozwiązań technicznych możliwych do uwzględnienia na etapie projektowania – kiedy nie jest znany dokładny przebieg procesów opisany historią realizacji zleceń i obsługi dostaw.

3. Nadmiarowość technologiczna i organizacyjna pracy a niezawodność magazynu

Analiza literatury i obserwacje praktyczne wskazują, że *zawodność* procesu magazynowego wiąże się z:

- błędami ludzkimi generującymi zadania naprawcze (dodatkowa pracochłonność, koszt i opóźnienie), powodującymi niezgodność stanów magazynowych i zmniejszającymi jakość usług w łańcuchu dostaw,
- nieprzewidzianymi spiętrzeniami w przepływie materiałów skutkującymi nieobsłużeniem bieżących dostaw lub wysyłek,
- sezonowymi i długookresowymi zmianami w strukturze dostaw i wysyłek skutkującymi niedostatkami wydajności oraz niedopasowaniem technologicznym do zadań,
- zawodnością wyposażenia mechanicznego i urządzeń – zwłaszcza kluczowych elementów systemów magazynowych, takich jak AS/RS,
- błędami (niedopasowaniem) systemu informacyjnego przedsiębiorstwa,
- błędami planowania.

Błędy w procesie magazynowym mogą mieć charakter: *wewnętrzny* lub *zewnętrzny*. Pierwsze to najczęściej efekt pomyłki człowieka, obiektywnego niedostatku wydajności, niedopasowania technologii do zadań, niedostatku możliwości buforowych i składowania oraz wypadków losowych. Przyczyny zewnętrzne, z punktu widzenia magazynu, wynikają wyłącznie z przyczyn losowych związanych ze zjawiskami w łańcuchu dostaw. Charakter i zakres tych drugich zmian nie jest analizowany na poziomie magazynu lecz jest przedmiotem planowania łańcucha dostaw (rys. 1).



Rysunek 1. Klasyfikacja źródeł błędów i utrudnień zmniejszających niezawodność magazynu.

Źródło: [14].

Prowadzone badania [4, 16, 17] wskazują jednoznacznie na konieczność analizy próby danych historycznych w celu wyznaczenia mierzalnych wskaźników niezawodności odnoszących się do liczby i typów popełnianych błędów. Na tej podstawie można następnie dobrać technologie magazynowe oraz metody organizacyjne pozwalające na zmniejszenie liczby lub zmianę struktury pomyłek przy realizacji procesów magazynowych.

Problemy w realizacji procesów magazynowych, takie jak brak terminowości wynikają z braku potencjału obsługowego lub niedopasowania potencjału do spiętrzeń w przepływie materiałów [31]. Negatywny wpływ losowych spiętrzeń w przepływach materiałów na zdolność magazynu do niezakłóconej pracy ograniczany jest w fazie projektowej przez stosowanie współczynników spiętrzeń wyrażających nadmiarowość technologiczną. Wartości średnie wolumenów przemnożone przez współczynniki spiętrzeń dają przepływy miarodajne (nominalne), tj. uwzględniające krótkookresowe piki w przepływie materiałów (rozdział 5). Stosowanie współczynników spiętrzeń opisujących odpowiednio procesy dostaw i wysyłki pozwala na uwzględnienie nadmiaru wydajnościowego przy projektowaniu procesów magazynowych, a tym samym zwiększenie niezawodności obiektu.

Współczynniki spiętrzeń nie uwzględniają sytuacji nadzwyczajnych i długoterminowych trendów zmian w łańcuchu dostaw wynikających z sezonowej zmiany struktury przepływów materiałowych oraz długoterminowych zmian rynkowych. Podstawowym sposobem radzenia sobie ze zjawiskami sezonowymi jest okresowa zmiana organizacji i dostosowanie wydajności. Długoterminowe zmiany zmniejszają gotowość magazynu i wymagają rozwiązań elastycznych, dających możliwość adaptacji systemu magazynowego. Te z kolei związane są z uniwersalnością technologiczną oraz z przewidzianą nadmiarowością (praktycznie zainstalowaną i potencjalną).

Typowe sposoby eliminowania wymienionych wyżej problemów to:

- *nadmiarowość technologiczna* zwiększająca niezawodności systemu, w tym:
 - zwiększanie pojemności obszarów magazynowych (szczególnie rezerw),
 - zwiększanie liczby ludzi oraz urządzeń,
 - stosowanie urządzeń wydajniejszych, niż aktualne wymagania,
- *uniwersalizm (elastyczność) technologii*,
- *zmiany organizacyjne* zwiększające czas dysponowany pracy i powodujące zmniejszenie wymaganej liczby zasobów,
- *wprowadzanie zintegrowanych systemów zarządzania* (np. WMS) eliminujących działania pozasystemowe,
- *wprowadzanie programów motywacyjnych* dla pracowników.

Analizując powyższe, można stwierdzić że w projektowaniu obiektu magazynowego konieczne jest uwzględnienie nadmiarowości o charakterze:

- *Funkcjonalnym* (elastyczność, uniwersalizm), tj. możliwości rekonfiguracji funkcjonalnej systemu w celu dopasowania do charakteru realizowanych zadań logistycznych
- *Technologicznym* (przewymiarowanie), tj. naddatek wydajności względem potrzeb.

Nadmiarowość zawsze musi być konfrontowana z efektywnością magazynu i całego łańcucha dostaw. Przewymiarowanie ponad rzeczywiste wymagania skutkuje wysokim kosztem jednostkowym realizacji zadań a uniwersalizm może prowadzić do spadku konkurencyjności. Adekwatność tego kosztu wynika z uwarunkowań rynkowych.

Metody organizacyjne zwiększania niezawodności magazynu bazują na:

- racjonalnym przydziale zasobów do zadań magazynowych w czasie,
- określaniu czasu dysponowanego realizacji zadań w ciągu doby,
- doborze urządzeń uniwersalnych, które można przesuwac między zadaniami,
- stosowaniu metod ukierunkowujących przepływ materiałów do i z lokacji w celu zmniejszenia pracochłonności procesu,

w funkcji kosztu realizacji zadań i dostępności zasobów.

Niezawodność magazynu może być okresowo podnoszona poprzez działania organizacyjne zwiększające stopień wykorzystania czasu pracy (np. motywacja pracowników) lub stale przez stosowanie systemów kierowania magazynem. Do doraźnych czynników zwiększających wydajność, a co za tym idzie poprawiających ogólną niezawodność magazynu w łańcuchu dostaw należy możliwość wydłużenia dobowego czasu pracy. Długookresowe zwiększenie wydajności przez zwiększenie dobowego czasu pracy wymaga zatrudnienia dodatkowych pracowników.

Nadmiarowość funkcjonalna kryje się także w harmonogramie realizacji procesu magazynowego determinującym spiętrzenia pracy. Planowanie procesu w sposób zwiększający czas dysponowany realizacji zadań przy zachowaniu tego samego stanu zasobów spowoduje zwiększenie potencjału systemu [13].

Zarówno nadmiarowość technologiczna jak i funkcjonalna są niezbędne do poprawnej realizacji procesów magazynowych. Pewne aspekty nadmiarowości technologicznej i funkcjonalnej mogą być uwzględnione na etapie projektu, co przedstawiono poniżej.

4. Syntetyczna miara niezawodności magazynu

Niezawodność magazynu może być odniesiona do podstawowych cech poprawnie zrealizowanej usługi logistycznej definiowanych przez regułę 7R (lub 7W – [19]), co oznacza *przekształcenie strumieni materiałów wchodzących od dostawców w strumienie materiałów wychodzących do odbiorców zgodnie z zamówieniami, w określonym czasie oraz z odpowiednią jakością i po odpowiednich kosztach*. Jakość usług magazynowych może zostać uznana za odpowiednią, a w konsekwencji i niezawodność magazynu, jeżeli liczba i struktura błędów jakościowych jest dopuszczalna z punktu widzenia odbiorcy, usługi są realizowane terminowo, a magazyn jest w stanie obsłużyć dające i nie dające się przewidzieć spiętrzenia strumieni materiałów. W takim przypadku możliwe jest sformułowanie ogólnej miary niezawodności magazynu *OTIFEF (On-Time, In-Full, Error-Free)* w oparciu o historię jego działalności [14, 19]. *OTIFEF* jest stosunkiem liczby zadań zrealizowanych w sposób całkowicie satysfakcjonujący klienta (modelowy) do liczby wszystkich zleconych zadań.

Warunki brzegowe pracy magazynu są określone przez strukturę dostaw z jednej strony i strukturę wysyłek z drugiej. Satysfakcja odbiorców musi iść w parze z poprawną obsługą dostawców. Z tego względu *OTIFEF_{in}* opisuje jakość obsługi dostawców (zasilanie magazynu) a *OTIFEF_{out}* opisuje jakość wysyłek do odbiorców (opróżnianie magazynu) [14]. Obie miary są definiowane przez zbiory parametrów opisujących jakość pracy, ale w ogólności mogą być zbudowane następująco

$$\forall m \in M \quad OTIFEF_{in}(m) = P_{OTin}(m) \cdot P_{IFin}(m) \cdot P_{EFin}(m) \quad (1)$$

gdzie:

$P_{OTin}(m)$ – prawdopodobieństwo terminowego przyjęcia wszystkich dostaw (dobowych) w m -tym magazynie,

$P_{IFin}(m)$ – prawdopodobieństwo kompletnego przyjęcia wszystkich dostaw (dobowych) w m -tym magazynie,

$P_{EFin}(m)$ – prawdopodobieństwo bezbłędnego przyjęcia wszystkich dostaw (dobowych) w m -tym magazynie.

Analogiczna funkcja jest formułowana dla wysyłek:

$$\forall m \in M \quad OTIFEF_{out}(m) = P_{OTout}(m) \cdot P_{IFout}(m) \cdot P_{EFout}(m) \quad (2)$$

gdzie:

- $P_{OTout}(m)$ – prawdopodobieństwo terminowej realizacji wszystkich wysyłek (dobowych) w m -tym magazynie,
 $P_{IFout}(m)$ – prawdopodobieństwo kompletnej realizacji wszystkich wysyłek (dobowych) w m -tym magazynie,
 $P_{EFout}(m)$ – prawdopodobieństwo bezbłędnej realizacji wszystkich wysyłek (dobowych) w m -tym magazynie.

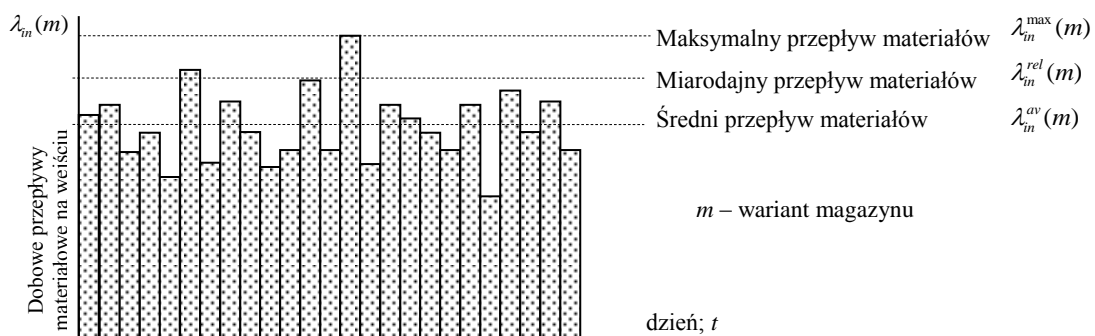
Na potrzeby badań przyjęto, że prawdopodobieństwa są niezależne. Może to skutkować niedoszacowaniem (niezawodności magazynu wyrażonej formułami (1) i (2)), ale jest akceptowalne kiedy zależności te wykorzystywane są do porównania wariantów projektowych.

Prawdopodobieństwa terminowej obsługi dostaw i wysyłek P_{OT} są zależne bezpośrednio od potencjału technicznego magazynu. Prawdopodobieństwa wystąpienia błędu jakościowego P_{EF} są związane z niedoskonałością człowieka i czynnikami losowymi. Prawdopodobieństwa P_{IF} przyjęcia dobowych dostaw i realizacji wysyłek w całości są związane z dostępnością odpowiednio miejsca i zamówionych towarów w magazynie, która z kolei jest funkcją strategii planowania i zamawiania oraz pośrednio pojemności.

5. Miarodajne wielkości przepływu materiałów a terminowość

Podstawowym krokiem projektowania magazynu jest wyznaczenie miarodajnych (nominalnych) wielkości przepływów materiałów na wejściu (dostawy) i na wyjściu (wysyłki). Miarodajne wielkości przepływów materiałowych są podstawą wyznaczania liczby urządzeń i pracowników oraz szacowania przestrzeni. Zainstalowany potencjał technologiczny musi być w stanie obsłużyć całe dobowe dostawy i wysyłki z uwzględnieniem losowych spiętrzeń w przepływach materiałów.

Strumienie materiałów wchodzących do magazynu i opuszczających go można opisać rozkładem (przykładowy strumień dostaw przedstawiono na rys. 2).



Rysunek 2. Rozkład wielkości przepływów materiałów na wejściu do magazynu (dostawy).

Źródło: opracowanie własne.

Dobowe przepływy materiałowe na wejściu opisano zmienną losową $\{\lambda_{in}(m), p(\lambda_{in}(m))\}$ a na wyjściu (wysyłki) zmienną losową $\{\lambda_{out}(m), p(\lambda_{out}(m))\}$. Wielkości przepływów materiałowych są wyrażone w ujednoliconych jednostkach. Uśrednione przepływy materiałowe wyznaczane są jako:

$$\forall m \in \mathbf{M} \quad \lambda_{in}^{av}(m) = E(\lambda_{in}(m)) \text{ oraz} \quad (3)$$

$$\forall m \in \mathbf{M} \quad \lambda_{out}^{av}(m) = E(\lambda_{out}(m)) \quad (4)$$

Miarodajna wielkość przepływów materiałowych to taka wielkość, która powinna być obsługiwana terminowo, nawet przy wystąpieniu statystycznie spodziewanych uszkodzeń sprzętu i niedyspozycyjności pracowników (konieczna nadmiarowość). Ustalenie miarodajnych przepływów materiałowych jest trudne i zależy od rodzaju magazynu, organizacji łańcucha dostaw i rodzaju obsługiwanej działalności biznesowej.

Zmienne losowe $\{\lambda_{in}(m), p(\lambda_{in}(m))\}$ i $\{\lambda_{out}(m), p(\lambda_{out}(m))\}$ charakteryzują się współczynnikiem zmienności V :

$$V_{in}(m) = \frac{\sigma_{in}(m)}{\mu_{in}(m)} \text{ oraz } V_{out}(m) = \frac{\sigma_{out}(m)}{\mu_{out}(m)} \quad (5)$$

gdzie μ jest średnią z próby zaś σ jest odchyleniem standardowym.

Współczynnik zmienności V jest zróżnicowany w zależności od strategii przepływu materiałów w łańcuchu dostaw, jednak obserwacje i analizy w ramach badań pozwoliły na ustalenie wartości odniesienia (Tabela 1).

Tabela 1. Przykłady współczynników zmienności przepływu materiałów w różnych obiektach magazynowych

Rodzaj magazynu	Minimalny V	...	Maksymalny V
Magazyn przemysłowy (produkcyjny) – dostawy	0,03	0,07	0,12
Magazyn przemysłowy (produkcyjny) – wysyłki	0,02	0,05	0,1
Magazyn dystrybucyjny (zasilanie detalistów) – dostawy	0,2	0,35	0,65
Magazyn dystrybucyjny (zasilanie detalistów) – wysyłki	0,35	0,45	1,12

Źródło: opracowanie własne.

Współczynnik zmienności $V < 0,1$ oznacza, że cecha uznawana jest za nieistotną, co ma swoje odzwierciedlenie w sposobie określania miarodajnej wielkości przepływu materiałów na wejściu i na wyjściu z magazynu:

$$\forall m \in \mathbf{M} \text{ jeżeli } \begin{cases} V_{in}(m) \leq k1_{in}(m) \rightarrow & \lambda_{in}^{rel}(m) = \lambda_{in}^{max} = \max \{ \lambda_{in}(m) \} \\ V_{in}(m) > k1_{in}(m) \rightarrow & \lambda_{in}^{rel}(m) = E(\lambda_{in}(m)) + k2_{in} \sqrt{E((\lambda_{in}(m))^2) - E(\lambda_{in}(m))^2} \end{cases} \quad (6)$$

oraz

$$\forall m \in \mathbf{M} \text{ jeżeli } \begin{cases} V_{out}(m) \leq k1_{out}(m) \rightarrow & \lambda_{out}^{rel}(m) = \lambda_{out}^{max} = \max \{ \lambda_{out}(m) \} \\ V_{out}(m) > k1_{out}(m) \rightarrow & \lambda_{out}^{rel}(m) = E(\lambda_{out}(m)) + k2_{out} \sqrt{E((\lambda_{out}(m))^2) - E(\lambda_{out}(m))^2} \end{cases} \quad (7)$$

gdzie:

$k1_{in/out}(m)$ – graniczna wartość wskaźnika zmienności oznaczająca nieistotność cechy w określonej sytuacji decyzyjnej,

$k2_{in/out}(m)$ – parametr definiujący wymaganą jakość usług realizowanych przez magazyn.

Niska wartość V oznacza że przepływ materiału nie jest zakłócany losowymi spiętrzeniami i jest niezmienny, tak więc miarodajna wielkość przepływu materiałów jest równa maksymalnej. Taka sytuacja jest charakterystyczna dla magazynów obsługujących duże wolumeny jednorodnych, nieszonowych produktów (np. zaopatrzenie produkcji, cross-docking). Duża wartość współczynnika zmienności V oznacza duże spiętrzenia materiałów w magazynie. W wielu przypadkach spiętrzenia pojawiają się rzadko i nie uzasadniają instalowania redundantnego wyposażenia. Spiętrzenia takie przekraczają miarodajne przepływy materiałowe, więc muszą być obsługiwane przez dodatkowy potencjał, pozyskany na jeden z trzech sposobów, które mogą być stosowane w różnych kombinacjach (Tabela 2).

Tabela 2. Możliwości obsługi spiętrzeń w przepływie materiałów przekraczających miarodajne wielkości przepływów

Przypadek	Opis
A	uniwersalne wyposażenie i pracownicy mogą zostać przesunięci z realizacji innych zadań oraz z innych obszarów magazynowych w celu obsłużenia spiętrzeń w przepływie materiałów na wejściu lub wyjściu z magazynu,
B	dobowy czas pracy może zostać wydłużony (np. dodatkowa zmiana robocza) lub można krótkoterminowo zwiększyć wydajność pracy i wykorzystania czasu pracy przez stosowanie metod motywacyjnych,
C	dodatkowe wyposażenie, przestrzenie magazynowe i pracownicy mogą być pozyskane z zewnątrz (wypożyczanie, wynajem, pracownicy tymczasowi).

Źródło: opracowanie własne.

Możliwe jest zatem sformułowanie kluczowych dla projektowania magazynu współczynników spiętrzeń:

$$\forall m \in \mathbf{M} \quad \varphi_{in}(m) = \frac{\lambda_{in}^{rel}(m)}{\lambda_{in}^{av}(m)} \quad \text{oraz} \quad (8)$$

$$\forall m \in \mathbf{M} \quad \varphi_{out}(m) = \frac{\lambda_{out}^{rel}(m)}{\lambda_{out}^{av}(m)} \quad (9)$$

W takim przypadku magazyn może zostać opisany przez charakterystyki niezawodnościowe:

$$\forall m \in \mathbf{M} \quad P\left(\frac{\lambda_{in}(m)}{\lambda_{in}^{av}(m)} \leq \varphi_{in}(m)\right) = \alpha_{in}(m) \quad (10)$$

oraz

$$\forall m \in \mathbf{M} \quad P\left(\frac{\lambda_{out}(m)}{\lambda_{out}^{av}(m)} \leq \varphi_{out}(m)\right) = \alpha_{out}(m) \quad (11)$$

Przyjęto, że $\alpha_{in}(m) = \alpha_{out}(m) \geq 0,96$ jest wartością odniesienia, jednak musi ona zostać ustalona w odniesieniu do analizowanego przypadku. Liczba ludzi i urządzeń, a także powierzchnie i pojemności dobierane są zgodnie z przyjętą w projekcie wielkością przeładunków. Zakładając pewne uproszczenia i przyjmując niezmienność technologii, można przyjąć, że jest ona proporcjonalna do wielkości przepływów materiałowych.

Podsumowując formuły (1), (2) i (6), (7) niezawodność magazynu w zakresie terminowości może być rozważana w odniesieniu do nadmiarowości technologicznej na dwa sposoby:

- zdarzenie H_{1in} kiedy $\lambda_{in}(m) \leq \lambda_{in}^{rel}(m)$ – wielkość przepływów na wejściu jest poniżej miarodajnej, tak więc przyjmuje się, że może być obsłużona terminowo w 100%.
- zdarzenie H_{2in} kiedy $\lambda_{in}(m) > \lambda_{in}^{rel}(m)$ – wielkość przepływów na wejściu jest powyżej miarodajnej, tak więc przyjmuje się że nie może być obsłużona terminowo w 100%.
- zdarzenie H_{1out} kiedy $\lambda_{out}(m) \leq \lambda_{out}^{rel}(m)$ – wielkość przepływów na wyjściu jest poniżej miarodajnej, tak więc przyjmuje się, że może być obsłużona terminowo w 100%
- zdarzenie H_{2out} kiedy $\lambda_{out}(m) > \lambda_{out}^{rel}(m)$ – wielkość przepływów na wyjściu jest powyżej miarodajnej, tak więc przyjmuje się że nie może być obsłużona terminowo w 100%.

Jeżeli $\lambda_{in}^{rel}(m) = \lambda_{in}^{max}(m)$ dla m -tego magazynu (formuła (6)), wtedy:

$$P_{OTin}(m) = P(H_{1in}) \approx 1, \quad (12)$$

oraz analogicznie, jeżeli $\lambda_{out}^{rel}(m) = \lambda_{out}^{max}(m)$ dla m -tego magazynu (formuła (7)), wtedy:

$$P_{OTout}(m) = P(H_{1out}) \approx 1. \quad (13)$$

Jeżeli $\lambda_{in}^{rel}(m) < \lambda_{in}^{max}(m)$ dla m -tego magazynu (formuła (6)), wtedy stosowane mogą być wskazane w tab. 2. sposoby radzenia sobie ze spiętrzeniami:

$$\begin{aligned} P_{OTin} = & P(H_{2in} / A) \cdot P(A) + P(H_{2in} / B) \cdot P(B) + P(H_{2in} / C) \cdot P(C) + \\ & + P(H_{2in} / A \cap B \cap C) \cdot P(A \cap B \cap C) + P(H_{2in} / A \cap B) \cdot P(A \cap B) + \\ & + P(H_{2in} / A \cap C) \cdot P(A \cap C) + P(H_{2in} / B \cap C) \cdot P(B \cap C) \end{aligned} \quad (14)$$

gdzie $P(A)$, $P(B)$ i $P(C)$ są odpowiednimi prawdopodobieństwami opisującymi dostępność danego rozwiązania w analizowanym magazynie w momencie wystąpienia spiętrzeń.

Analogicznie, jeżeli $\lambda_{out}^{rel}(m) < \lambda_{out}^{max}(m)$ dla m -tego magazynu (formuła (7)), wtedy:

$$\begin{aligned} P_{OTout} = & P(H_{2out} / A) \cdot P(A) + P(H_{2out} / B) \cdot P(B) + P(H_{2out} / C) \cdot P(C) + \\ & + P(H_{2out} / A \cap B \cap C) \cdot P(A \cap B \cap C) + P(H_{2out} / A \cap B) \cdot P(A \cap B) + \\ & + P(H_{2out} / A \cap C) \cdot P(A \cap C) + P(H_{2out} / B \cap C) \cdot P(B \cap C) \end{aligned} \quad (15)$$

Duża zdolność radzenia sobie ze spiętrzeniami w przepływie materiałów wymaga utrzymywania znaczącego technologicznego potencjału w gotowości – a więc redundancję. Możliwość obsługi jedynie mniejszych spiętrzeń w przepływie materiałów generuje mniejsze koszty, jednakże ograniczy również gotowość magazynu do terminowego świadczenia usług. Nadmiarowość technologiczna wynikająca z przewidywanych spiętrzeń ma przełożenie na wybrane wskaźniki techniczne i organizacyjne pracy systemu.

6. Struktura błędów jakościowych i dostępność materiałów

Jak wskazano w rozdziale 4. syntetyczna miara niezawodności magazynu *OTIFEF* opiera się na trzech składowych. Pierwsza z nich (*On-time*) została omówiona w rozdziale 5. Pozostałe dwie należą do kategorii czynników trudnomierzalnych i wymagają analizy danych.

Struktura błędów jakościowych popełnianych z winy pracowników (składowa *Error-free*) może zostać jedynie oszacowana na podstawie analizy danych historycznych pracy magazynu lub z wykorzystaniem metod takich jak FMCEA (za [33]). Analiza danych historycznych umożliwia wyznaczenie rozkładów prawdopodobieństwa zaistnienia błędów jakościowych przy określonej konfiguracji technologiczno-organizacyjnej magazynu oraz zadanym obciążeniu pracą. Oczywiście, istnieją technologie i rozwiązania, które sprzyjają minimalizacji liczby popełnianych błędów – zwłaszcza technologie automatyczne i ścisła kontrola realizacji procesu magazynowego przez system informacyjny, np. WMS. Niestety, efekt wdrożenia takich technologii może być określony dopiero na podstawie analizy ich pracy.

Na potrzeby badań przeprowadzono analizę struktury błędów procesu kompletacji materiałów sztukowych w rzeczywistym obiekcie magazynowym. Analiza obejmowała okres 10 miesięcy, w czasie którego zrealizowano 138 930 linii zleceń (Tabela 3).

Tabela 3. Struktura błędów w procesie kompletacji w magazynie firmy X.

Parameter	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct
No of picked lines	31 360	18 722	12 095	16 802	11 991	9 988	11 489	7 119	7 939	11 425
Number of errors	54	26	48	43	23	47	13	38	26	30
- quality errors	28	16	32	29	16	32	11	25	15	20
- quantitative errors	26	10	16	14	7	15	2	13	11	10

Źródło: opracowanie własne.

Analiza wykazała, że rozkład prawdopodobieństwa poprawnej realizacji linii można przybliżyć rozkładem Weibulla. Oszacowano wartość oczekiwaną prawdopodobieństwa bezbłędnej realizacji linii zlecenia pod względem jakościowym wynoszącą 0,9972656 oraz pod względem ilościowym wynoszącą 0,9984898. Prawdopodobieństwo bezbłędnej realizacji linii zlecenia wynosiło 0,9957417. Tak określone prawdopodobieństwa mogą zostać wykorzystane do wyznaczania miernika $OTIFEF_{out}$. Należy przy tym zauważyć, że dane te nie obejmują błędów, które zostały wychwycone przed wysłaniem materiałów do klientów.

Ostatnia składowa miernika – *In-full* jest funkcją dostępność wolnego miejsca do składowania jednostek dostarczanych lub dostępność określonych w zamówieniach materiałów do wydania. Wynika ona z mechanizmów planowania zaopatrzenia i dystrybucji w całym łańcuchu dostaw, cech produktów oraz pojemności obszarów składowania magazynu. Dodatkowo produkty w większości rodzajów biznesów można podzielić na szybko i wolnorotujące. W typowych sytuacjach materiały szybko rotujące są z dużym prawdopodobieństwem dostępne natychmiastowo (*make-to-stock*), podczas gdy produkty wolnorotujące mogą nie być dostępne w chwili złożenia zamówienia (*make-to-order*). Na tej podstawie możliwe jest więc określenie prawdopodobieństw realizacji dyspozycji „in-full”.

7. Wybrane wskaźniki techniczne i organizacyjne nadmiarowości systemu magazynowego

7.1. Elementy struktury niezawodnościowej systemu magazynowego

Podstawowe kryteria oceny jakości magazynu jako elementu łańcucha dostaw powinny obejmować miary techniczne (produktywność, wydajność), ekonomiczne (koszty i nakłady) i jakościowe (liczba i struktura błędów) przydatne do określania niezawodności w funkcji nadmiarowości. Wszystkie elementy łańcucha dostaw muszą spełniać odrębne oczekiwania dotyczące wydajności. Oznacza to, że elementy w łańcuchu mogą być traktowane jako system niezawodności całej serii. Zawodność jednego lub więcej elementów przekłada się na zawodność całego łańcucha dostaw. I odwrotnie, niezawodność poszczególnych elementów łańcucha dostaw sprawia, że może on spełnić oczekiwania dotyczące wydajności na wszystkich rynkach w swoim otoczeniu.

Stąd, zakładając że badany łańcuch ma strukturę szeregową oraz znając:

- zbiór numerów ogni w łańcucha dostaw $V = \{v : v = \overline{1, V}\}$
 - zbiór połączeń między elementami $L = \{(v, v') : v, v' \in V \wedge (v, v') \in V \times V \wedge v \neq v'\}$
 - wskaźnik niezawodności v -tego ogniwa łańcucha dostaw: $nl(v)$;
 - wskaźnik niezawodności połączenia między ogniwami (v, v') łańcucha dostaw: $nl(v, v')$,
- niezawodność w sensie strukturalnym dla całego łańcucha może być wyznaczona następująco:

$$WNS = \prod_{(v, v') \in L} nl(v, v') \cdot \prod_{v \in V} nl(v) \quad (16)$$

Natomiast uwzględniając ciągi transportowo-magazynowe realizowane w łańcuchach dostaw, tj. przy założeniu że są zdefiniowane następujące dane:

- zbiór początków relacji przemieszczania dóbr materialnych w łańcuchu dostaw \mathbf{A} ,
- zbiór końców relacji przemieszczania dóbr materialnych w łańcuchu dostaw \mathbf{B} ,
- zbiór numerów marszrut, które mogą łączyć węzły początkowe z końcowymi: $\mathbf{E}(a,b)$,
 $a \in \mathbf{A}$, $b \in \mathbf{B}$
- zbiór numerów węzłów dla wszystkich marszrut: $\mathbf{EW}(a,b,e)$, $a \in \mathbf{A}$, $b \in \mathbf{B}$, $e \in \mathbf{E}(a,b)$
- zbiór łuków tworzących w relacji (a,b) e -tą marszrutę: $\mathbf{EL}(a,b,e)$, $a \in \mathbf{A}$, $b \in \mathbf{B}$,
 $e \in \mathbf{E}(a,b)$.

niezawodność łańcucha dostaw w sensie ciągów transportowo-magazynowych można zdefiniować w sposób następujący:

$$WNC = \prod_{a \in \mathbf{A}} \prod_{b \in \mathbf{B}} \left[\sum_{e \in \mathbf{E}(a,b)} \left(\prod_{(v,v') \in \mathbf{EL}(a,b,e)} nl(v,v') \cdot \prod_{v \in \mathbf{EW}(a,b,e)} nv(v) \right) \right] \quad (17)$$

Dzięki przypisaniu zasobów o największej niezawodności lub większej liczby zasobów do realizacji odpowiednich ciągów technologicznych zwiększa się skuteczność realizacji zadań logistycznych w całej sieci dostaw.

7.2. Wybrane miary nadmiarowości systemu magazynowego w aspekcie niezawodności realizacji zadań

Zakłada się, że w danym łańcuchu dostaw funkcjonuje M magazynów. Zbiór numerów magazynów ma postać $\mathbf{M} = \{m : m = \overline{1, M}\}$. Każdy magazyn dysponuje zbiorem zasobów pracy (urządzenia lub pracownicy). Pojedynczy typ zasobu dla m -tego magazynu będzie oznaczony symbolem r , wówczas zbiór $\mathbf{R}(m)$ ma postać:

$$\forall m \in \mathbf{M} \quad \mathbf{R}(m) = \{r : r = 1, 2, \dots, R(m)\}$$

Przyjęto, że proces magazynowy składa się z kolejno numerowanych przekształceń strumieni materiałów $i, j \in \mathbf{I}(m)$ realizowanych przez zasoby $r \in \mathbf{R}(m)$. Jeżeli $\alpha(r, m, i) = 1$ wtedy zasób r -tego typu przypisany jest do realizacji i -tego zadania w m -tym magazynie. Dobowa pracochłonność ze względu na pracę zasobu r -tego typu jest sumą iloczynów liczby cykli zadania i -tego $\lambda(m, i)$ i czasu wykonania jednego powtórzenia $t(r, m, i)$ przez zasób r -ty:

$$\forall m \in \mathbf{M} \quad \forall r \in \mathbf{R}(m) \quad \Psi(r, m) = \sum_{i \in \mathbf{I}(m)} \alpha(r, m, i) \cdot \lambda(m, i) \cdot t(r, m, i) \quad (18)$$

przy czym: $\forall m \in \mathbf{M} \quad \forall i \in \mathbf{I}(m) \quad \lambda(m, i) = \lambda^{av}(m, i) \cdot \varphi_{in}(m)$ lub $\lambda(m, i) = \lambda^{av}(m, i) \cdot \varphi_{out}(m)$ (19)

w zależności od tego czy i -te zadanie dotyczy obsługi dostaw (*in*) czy obsługi wysyłek (*out*).

Każdy zasób ma określony koszt godziny pracy $k(r, m)$. Wyważenie pracochłonności $\Psi(r, m)$ kosztem pracy pozwala na uzyskanie pracochłonności normalizowanej, która może być dodawana dla wszystkich typów urządzeń:

$$\forall m \in \mathbf{M} \quad \Psi(m) = \sum_{u \in \mathbf{R}(m)} \frac{\Psi(r, m) \cdot k(r, m)}{\min\{k(r, m) : r \in \mathbf{R}(m)\}} \quad (20)$$

Liczba $n(r, m)$ zasobów r -tego typu jest znana. Możliwe jest więc wyznaczenie normalizowanej liczby zasobów, która będzie definiowała nadmiarowość technologiczną magazynu w porównaniu z innymi wariantami tego samego systemu:

$$\forall m \in \mathbf{M} \quad \bar{n}(m) = \sum_{r \in \mathbf{R}(m)} \frac{\alpha(r, m, i) n(r, m) k(r, m)}{\min \{k(r, m) : r \in \mathbf{R}(m)\}} \quad (21)$$

Każde zadanie ma przydzielony czas dysponowany realizacji $td(i, m)$ wynikający z harmonogramu pracy magazynu. Zadania mogą być realizowane jednocześnie, co powoduje nakładanie się zadań w pewnych okresach i spiętrzenia pracy.

Wskaźnik wykorzystania dysponowanego czasu pracy

Zatem, nadmiarowość technologiczna systemu magazynowego determinująca jego niezawodność może być wyrażona przez wskaźnik wykorzystania dysponowanego czasu pracy zasobów technicznych r -tego typu:

$$\forall m \in \mathbf{M} \quad \theta(r, m) = \frac{\sum_{i \in \mathbf{I}(m)} \Psi(r, m)}{n(r, m) \varphi(r, m) t_{day}(m)} \quad (22)$$

gdzie:

$t_{day}(m)$ – dobowy czas pracy m -tego magazynu,

$\varphi(r, m)$ – współczynnik wykorzystania czasu pracy przez zasoby r -te w m -tym magazynie.

Wskaźnik ten stanowi iloraz pracochłonności oraz całkowitego czasu dysponowanego brutto przez zasoby określonego typu. Sterowanie czasem dysponowanym realizacji zadań jest obok przydziału zasobów podstawowym narzędziem organizacyjnym zwiększania wydajności magazynu wykorzystywanym do obsługi nadzwyczajnych spiętrzeń strumieni materiałowych.

Kosztowy wskaźnik organizacyjny

Potencjalną nadmiarowość techniczną systemu magazynowego można także wyrazić w kategoriach kosztowych, m.in. przez kosztowy wskaźnik organizacyjny do oceny stopnia wykorzystania zainstalowanych urządzeń:

$$\forall m \in \mathbf{M} \quad \theta_{oz}^K(m) = \frac{K^{Ro}(m)}{K_T^R(m) + K_S^R(m) + K_L^R(m)} \quad (23)$$

gdzie:

$K^{Ro}(m)$ – roczne koszty operacyjne (bezpośrednie koszty pracy ludzi i urządzeń) [zł/rok],

$K_T^R(m)$ – całkowite roczne koszty utrzymania środków transportu i urządzeń [zł/rok], uwzględniające dodatkowo amortyzację, serwis oraz oprocentowanie kapitału,

$K_S^R(m)$ – całkowite roczne koszty utrzymania środków sterowania [zł/rok],

$K_L^R(m)$ – całkowite roczne koszty pracy ludzkiej [zł/rok].

Najlepsza możliwa wartość tego wskaźnika, tj. 1, oznacza, że wszystkie zasoby wykorzystywane są w 100% w ciągu doby roboczej. Mniejsze wartości oznaczają istnienie potencjału technologicznego, który może zostać uruchomiony poprzez odpowiednie działania organizacyjne. Najczęściej potencjał ten jest niewykorzystany ze względu na określony przydział zasobów do zadań oraz organizację pracy sprzyjającą istnieniu spiętrzeń pracy angażujących wszystkie zasoby, które nie są wykorzystywane w pozostałym czasie.

Wskaźnik organizacyjny wyrażony przez pracochłonność sprowadzoną

Wskaźnik organizacyjny wyrażony przez pracochłonność sprowadzoną realizacji procesu można zapisać w następujący sposób:

$$\forall m \in \mathbf{M} \quad \theta_{oz}^\Psi(m) = \sum_{r \in \mathbf{R}(m)} \frac{\Psi(r, m) \cdot k(r, m)}{\sum_{r' \in \mathbf{R}(m)} k(r', m) t_{dob}(m) \max_{\tau \in \mathbf{T}} \{\Psi(r, m, \tau)\}} \quad (24)$$

gdzie: $\max_{\tau \in T} \{\Psi(r, m, \tau)\}$ jest maksymalną chwilową wartością pracochłonności dla r -tego typu zasobu wynikająca ze spiętrzeń pracy w τ -tym momencie w czasie 24 godzin [r.h/h],

Maksymalna chwilowa pracochłonność procesu $\max_{\tau \in T} \{\Psi(r, m, \tau)\}$ ze względu na pracę zasobów r -tego typu jest rozumiana jako maksymalna suma pracochłonności kolejnych i -tych zadań wykonywanych równolegle przypadająca w τ -tym odcinku czasu. Rozkład realizacji zadań w ciągu doby wynika z harmonogramu realizacji procesu magazynowego (organizacji).

8. Przykład określania wybranych miar nadmiarowości do oceny niezawodności magazynu

Badaniu poddano magazyn realizujący proces składający się z 14 zadań. Potencjalne spiętrzenia w dostawach i wysyłce zadane są przez współczynnik spiętrzeń. Zainstalowany potencjał był badany pod względem efektywności i wydajności dla współczynników spiętrzeń na wejściu φ_{in} i na wyjściu φ_{out} odpowiednio 1,1; 1,3 i 1,5. Magazyn dysponuje zasobami przedstawionymi w tab. 4.

Tabela 4. Zestawienie typów urządzeń (u) i kategorii pracy ludzkiej (c) w magazynie.

Typ	Opis	Liczba	Koszt godziny pracy [zł/h] – netto w przypadku ludzi	Stopień wykorzystania czasu pracy
$u1$	Wózek paletowy unoszący elektryczny	3	4,00	0,8
$u2$	Wózek paletowy czołowy podnośnikowy	14	7,00	0,9
$u3$	Wózek do komisjonowania horyzontalnego	9	9,00	0,9
$u4$	Wózek wysokiego składowania (reach truck)	8	12,00	0,9
$c1$	Operator $u1, u2$ + praca ręczna	zmienna	13,00	0,8
$c2$	Pracownik komisjonowania i kontroli		16,00	0,8
$c3$	Operator $u2$ i $u3$		20,00	0,8

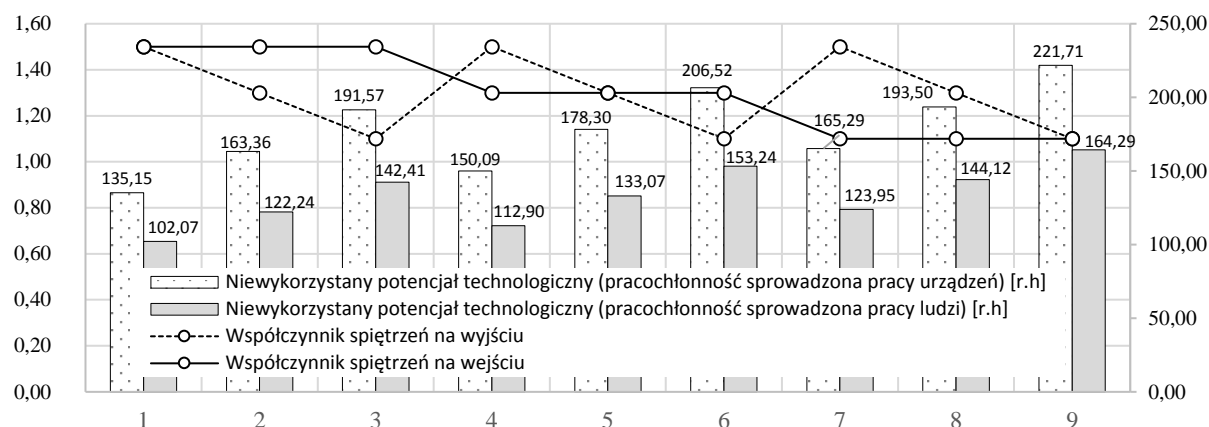
Magazyn pracuje na 1 zmianę roboczą przez 290 dni w roku. Nie występują sezonowe zmiany w przepływach materiałowych. Średnia wielkość dobowych przeładunków na wejściu: 300 jednostek paletowych. Średnia liczba wydań: 455 (w tym jednostki kompletowanie i jednorodne). Pracochłonność zadań procesu wynika z technologii i geometrii budynku. Powierzchnia i pojemność obiektu są stałe. Przeanalizowano wydajność i koszty magazynu dla ustalonego harmonogramu procesu magazynowego oraz bez harmonogramu (tzn. przy przydzieleniu do realizacji każdego z zadań całego dobowego czasu pracy) w celu ukazania potencjalnej rezerwy organizacyjnej.

Wyniki wydajności pracy magazynu w przypadku zastosowania harmonogramu do organizacji pracy przedstawiono w tab. 5. Pracochłonność sprowadzona procesu wyrażająca ogólną wielkość pracy do wykonania odniesioną do kosztów pracy została wykorzystana do oceny nadmiaru technologicznego magazynu. Niewykorzystany potencjał technologiczny w wariancie 1 (najwyższe możliwe do obsłużenia na poziomie α spiętrzenia) wynika z konstrukcji harmonogramu pracy, na którym zadania mogą być wykonywane tylko w pewnych odcinkach dobowego czasu pracy.

Tabela 5. Parametry techniczne pracy magazynu – z harmonogramem.

Parametr	Wariant								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
φ_{in}	1,5	1,5	1,5	1,3	1,3	1,3	1,1	1,1	1,1
φ_{out}	1,5	1,3	1,1	1,5	1,3	1,1	1,5	1,3	1,1
Maksymalne natężenie pracochłonności sprowadzonej									
ze względu na pracę urządzeń [r.h]	57,50	52,48	47,46	54,89	49,87	44,84	52,23	47,20	42,18
ze względu na pracę ludzi [r.h]	41,95	38,32	34,69	40,01	36,39	32,76	38,03	34,40	30,78
Pracochłonność sprowadzona									
ze względu na pracę urządzeń [r.h]	324,88	296,67	268,46	309,94	281,73	253,52	294,74	266,53	238,32
ze względu na pracę ludzi [r.h]	233,55	213,38	193,21	222,72	202,55	182,38	211,67	191,50	171,33
Wskaźnik organizacyjny #1 – efektywność wykorzystania zainstalowanego potencjału									
ze względu na pracę urządzeń:	0,706	0,707	0,707	0,706	0,706	0,707	0,705	0,706	0,706
ze względu na pracę ludzi:	0,696	0,696	0,696	0,696	0,696	0,696	0,696	0,696	0,696
Wskaźnik organizacyjny #2 – niewykorzystany potencjał technologiczny (pracochłonność sprowadzona)									
ze względu na pracę urządzeń [r.h]	135,15	163,36	191,57	150,09	178,30	206,52	165,29	193,50	221,71
ze względu na pracę ludzi [r.h]	102,07	122,24	142,41	112,90	133,07	153,24	123,95	144,12	164,29
Wskaźnik organizacyjny #2 – niewykorzystany potencjał technologiczny (pracochłonność sprowadzona)									
ze względu na pracę urządzeń	29,4%	35,5%	41,6%	32,6%	38,8%	44,9%	35,9%	42,1%	48,2%
ze względu na pracę ludzi	30,4%	36,4%	42,4%	33,6%	39,6%	45,7%	36,9%	42,9%	49,0%

Poziom niewykorzystany potencjał technologiczny i funkcjonalnego (nadmiarowości) przedstawiono na Rys. 3.



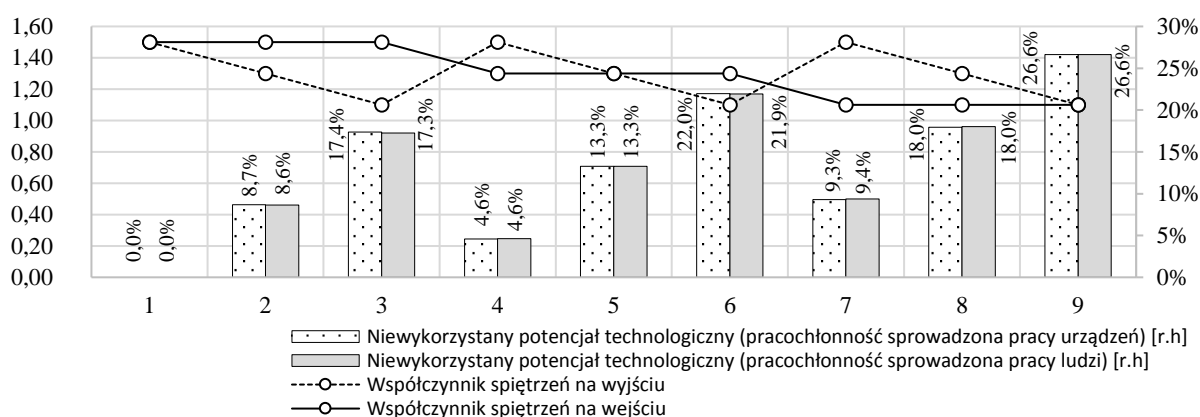
Rysunek 3. Niewykorzystany potencjał technologiczny – z harmonogramem.

W tab. 6. przedstawiono wyniki wydajnościowe pracy magazynu w przypadku braku harmonogramu (wszystkie zadania są wykonywane równomiernie przez cały dobowy czas pracy – nie występują żadne spiętrzenia, a zasoby wykorzystane są w 100%). Wartości pracochłonności rzeczywistej i sprowadzonej procesu są takie same jak w przypadku zastosowania harmonogramu.

Na rys. 4 przedstawiono naddatek technologiczny dla procesu bez harmonogramu. W wariantach 1 pracochłonność sprowadzona rozłożona jest równomiernie w całym dobowym czasie pracy, stąd brak (0%) naddatku technologicznego i organizacyjnego. W kolejnych wariantach nadmiarowość technologiczna wynika z nadmiarowych zasobów, a nie występuje nadmiarowość funkcjonalna.

Tabela 6. Parametry techniczne pracy magazynu – bez harmonogramu.

Parametr	Wariant								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
φ_{in}	1,5	1,5	1,5	1,3	1,3	1,3	1,1	1,1	1,1
φ_{out}	1,5	1,3	1,1	1,5	1,3	1,1	1,5	1,3	1,1
Maksymalne natężenie pracochłonności sprowadzonej									
ze względu na pracę urządzeń [r.h]	40,61	37,08	33,56	38,74	35,22	31,69	36,84	33,32	29,79
ze względu na pracę ludzi [r.h]	29,19	26,67	24,15	27,84	25,32	22,80	26,46	23,94	21,42
Wskaźnik organizacyjny #2 – niewykorzystany potencjał technologiczny wyrażony pracochłonnością sprowadzoną względem rozwiązania bazowego (wariant 1)									
ze względu na pracę urządzeń [r.h]	0,0%	8,7%	17,4%	4,6%	13,3%	22,0%	9,3%	18,0%	26,6%
ze względu na pracę ludzi [r.h]	0,0%	8,6%	17,3%	4,6%	13,3%	21,9%	9,4%	18,0%	26,6%

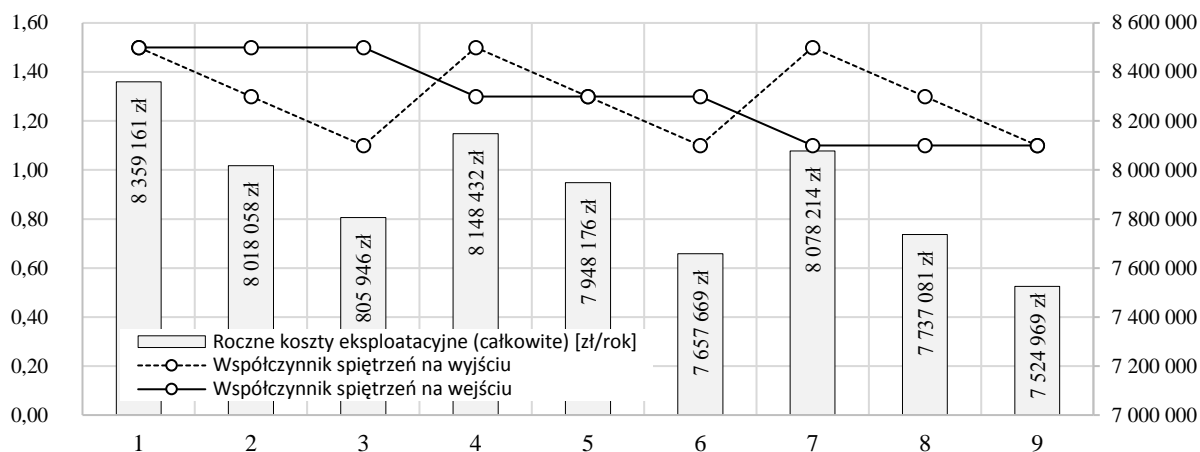


Rysunek 4. Niewykorzystany potencjał technologiczny – bez harmonogramu.

W tab. 7. i na rys. 5. zestawiono koszty procesów magazynowych. Roczne koszty eksploatacyjne uwzględniają wszystkie koszty związane z realizacją procesów magazynowych i utrzymaniem infrastruktury magazynowej. Wszystkie inne wskaźniki niezawodności i techniczne muszą odnosić się do kosztów eksploatacyjnych jako ostatecznego wskaźnika opłacalności.

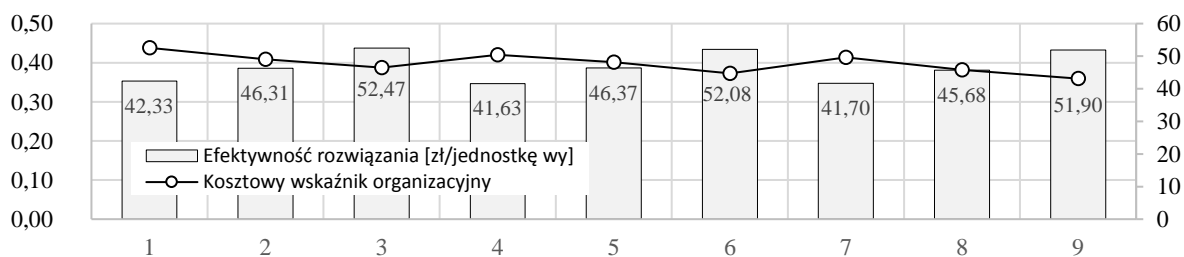
Tabela 7. Zestawienie wartości parametrów kosztowych do oceny efektywności magazynu – z harmonogramem.

Parametr	Wariant								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
φ_{in}	1,5	1,5	1,5	1,3	1,3	1,3	1,1	1,1	1,1
φ_{out}	1,5	1,3	1,1	1,5	1,3	1,1	1,5	1,3	1,1
Roczny koszt operacyjny pracy									
ludzi [mln zł/rok]	2,780	2,476	2,300	2,589	2,425	2,171	2,538	2,234	2,058
urządzeń [mln zł/rok]	0,420	0,384	0,347	0,401	0,365	0,328	0,382	0,345	0,308
Roczne koszty eksploatacyjne									
urządzeń [mln zł/rok]	4,928	4,891	4,854	4,908	4,872	4,835	4,889	4,852	4,816
magazynu (całkowite) [mln zł/rok]	8,360	8,019	7,806	8,149	7,949	7,658	8,079	7,738	7,525
Kosztowy wskaźnik organizacyjny	0,44	0,41	0,39	0,42	0,40	0,37	0,41	0,38	0,36
Efektywność rozwiązania [zł/jednostkę wychodzącą]	42,33	46,31	52,47	41,63	46,37	52,08	41,70	45,68	51,90



Rysunek 5. Wartość rocznego kosztu eksploatacyjnego dla kolejnych współczynników spiętrzeń.

Na rys. 6. przedstawiono koszt realizacji jednego zlecenia klienta w zależności od wielkości możliwych do obsłużenia spiętrzeń materiałowych. Przedstawiono także wartość wskaźnika organizacyjnego.



Rysunek 6. Efektywność rozwiązań w kolejnych wariantach.

W tab. 8. zestawiono wartości nadmiarowości technologicznej odniesionej do czasu dysponowanego.

Tabela 8. Nadmiarowość technologiczna określona czasem dysponowanym urządzeń – z harmonogramem.

Parametr	Wariant								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
φ_{in}	1,5	1,5	1,5	1,3	1,3	1,3	1,1	1,1	1,1
φ_{out}	1,5	1,3	1,1	1,5	1,3	1,1	1,5	1,3	1,1
Liczba zatrudnionych ogółem	46	41	38	43	40	36	42	37	34
Obliczeniowa liczba urządzeń [sztuk]									
u_1	2,27	2,00	1,73	2,24	1,97	1,70	2,21	1,94	1,67
u_2	13,06	12,09	11,11	12,29	11,32	10,35	11,51	10,54	9,57
u_3	8,93	7,86	6,79	8,82	7,75	6,68	8,70	7,63	6,56
u_4	7,58	7,08	6,59	7,06	6,56	6,07	6,54	6,05	5,55
Obliczeniowa liczba pracowników [osób]									
c_1	19,33	17,68	16,03	18,40	16,76	15,11	17,46	15,81	14,17
c_2	16,25	14,60	12,94	15,76	14,11	12,45	15,24	13,59	11,94
c_3	8,52	7,97	7,41	7,94	7,39	6,83	7,36	6,80	6,25
Nadadek wydajności wyrażony sprowadzoną liczbą									
ze względu na urządzenia:	0%	7%	17%	3%	14%	19%	9%	16%	26%
ze względu na pracowników:	0%	11%	17%	7%	13%	22%	9%	20%	26%
Wskaźnik wykorzystania dysponowanego czasu pracy urządzenia:									
u_1	0,567	0,499	0,431	0,559	0,492	0,424	0,552	0,484	0,416

Parametr	Wariant								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
u_2	0,660	0,613	0,565	0,620	0,572	0,525	0,579	0,531	0,484
u_3	0,682	0,600	0,519	0,674	0,592	0,511	0,664	0,583	0,501
u_4	0,739	0,689	0,639	0,691	0,641	0,590	0,642	0,592	0,542

W przypadku braku harmonogramu, a tym samym spiętrzeń, omawiany proces może zostać zrealizowany przez te same zasoby (urządzenia) przy zastosowaniu współczynnika spiętrzeń na wejściu $\varphi^{we} = 2,98$ przy $\varphi^{wy} = 1,1$, a w sytuacji przeciwnej przy $\varphi^{we} = 1,1$ oraz $\varphi^{wy} = 2,32$. Widoczna w ten sposób rezerwa (wyjściowe wartości $\varphi^{we} = \varphi^{wy} = 1,1$) jest znacząca. Nie może ona oczywiście zostać wykorzystana w całości ze względu na ograniczenia technologiczne procesu magazynowego, które będą wymuszały stosowanie harmonogramu, jednak wskazuje na potencjalną nadmiarowość funkcjonalną możliwą do uruchomienia w określonych warunkach.

9. Podsumowanie

Magazyny mają wpływ na jakość usług realizowanych przez łańcuchy dostaw. W przypadku systemów logistycznych jakość może być wiązana z zagadnieniami niezawodności, jednak sama niezawodność nie może być definiowana i badana tak jak w przypadku systemów technicznych. Niezawodność magazynu wpływa na jego zdolność do zapewnienia ciągłości procesów podstawowych: produkcji i konsumpcji. Zdolność ta może być wyrażona przez różnorodne charakterystyki.

Niezawodność realizacji procesów magazynowych może być podnoszona nie tylko przez działania organizacyjne ale również modyfikacje techniczne wprowadzające niezbędną nadmiarowość, która pozwala na niwelowanie niekorzystnych zjawisk związanych ze spiętrzeniami w przepływie materiałów i błędami w realizacji procesów. Działania organizacyjne mają na ogół na celu zwiększenie stopnia wykorzystania czasu pracy przez zasoby oraz zmniejszanie spiętrzeń materiałowych przez rozkładanie ich na dłuższy czas pracy, natomiast modyfikacje techniczne służą zwiększeniu wydajności.

Oba rodzaje działań mają na celu zwiększenie prawdopodobieństwa poprawnej realizacji usługi logistycznej przez magazyn – a co za tym idzie przez cały łańcuch dostaw, danego wskaźnikiem *OTIFEF*. Proponowana w artykule konstrukcja wskaźnika *OTIFEF*, jest oparta o prawdopodobieństwa uzyskania trzech podstawowych przymiotów dobrze zrealizowanej usługi logistycznej. Dzięki temu jest uniwersalna i umożliwia syntetyczne ujęcie zagadnienia niezawodności magazynu odniesionego do jakości jego pracy. Wskazano, że ze względu na złożoność zjawisk w łańcuchach dostaw i losowość w strukturze i wielkości przepływów materiałowych, zwiększenie tych prawdopodobieństw możliwe jest głównie przez uwzględnianie na etapie projektu racjonalnej nadmiarowości.

Nadmiarowość wyrażana może być przez proponowane miary techniczne i ekonomiczne, które określają ramy struktury niezawodnościowej systemu magazynowego. Powinna ona być podstawą oceny niezawodności magazynów i łańcuchów dostaw, jednakże faktycznej oceny można dokonać dopiero analizując dane historyczne o przebiegu procesów.

Proponowane w artykule metody mają charakter aplikacyjny. Zostały one wypracowane jako elementy projektu SIMMAG 3D.

Acknowledgement: The research work supported by the National Center for Research and Development, in the frame of PBS 3 project "System for modeling and 3D visualization of storage facilities" (SIMMAG3D).

Literatura

1. Baghalian A, Rezapour S, Farahani R Z. Robust supply chain network design with service level against disruptions and demand uncertainties: A real-life case. *European Journal of Operational Research* 2013; 227(1): 199–215.
2. Barnes E, Dai J, Deng S, Down D, Goh M, Lau H C, Sharafali M. On the Strategy of Shupply Hubs for Cost Reduction and Responsiveness. White Paper, The Logistics Institute – Asia Pacific. National University of Singapore, 2003.
3. Bramel J, Simchi-Levi D. *The Logic of Logistics: Theory, Algorithms and Applications for Logistics Management*. New York: Springer-Verlag, 1997.
4. Bukowski L. System of systems dependability – Theoretical models and applications examples. *Reliability Engineering & System Safety* 2016; 151: 76–92.
5. Bukowski L A. Zapewnienie ciągłości dostaw w zmiennym i niepewnym otoczeniu. Dąbrowa Górnicza: WSB, 2016.
6. Bukowski L, Feliks J. A unified model of systems dependability and process continuity for complex supply chains. *Safety and Reliability: Methodology and Applications / Nowakowski T. [et al.] (ed.). CRC Press Taylor & Francis Group, 2015: 2395-2403.*
7. Chung S H, Chan H K, Chan F T S. A modified genetic algorithm for maximizing handling reliability and recyclability of distribution centers. *Expert Systems with Applications* 2013; 40(18): 7588–7595.
8. Daganzo C F. *Logistics Systems Analysis*. New York: Springer Verlag, 1996.
9. Grigoroudis E, Siskos Y. A survey of customer satisfaction barometers: Some results from the transportation-communications sector. *European Journal of Operational Research* 2004; 152: 334–353.
10. Haj Shirmohammadi A. *Programming maintenance and repair. Technical management in industry, 8th edition*. Esfahan: Ghazal Publishers, 2002.
11. Jacyna-Golda I. Evaluation of operational reliability of the supply chain in terms of the control and management of logistics processes. *Safety and Reliability: Methodology and Applications / Nowakowski T. [et al.] (ed.). CRC Press Taylor & Francis Group, 2015: 549-558.*
12. Juściński S, Piekarski W. An analysis of a supply process of spare parts for agricultural tractors and machines based on logistic services outsourcing. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2009; 2(42): 63–70.
13. Lewczuk K, Ambroziak T, Warehousing process scheduling in warehouse efficiency and reliability assessment. *Proceedings of the 19th International Scientific Conference on Transport Means*. Kaunas Univ Technol, Kaunas, 2015: 17–26.
14. Lewczuk K. Dependability issues in designing warehouse facilities and their functional areas. *Journal of KONBiN* 2016; 2(38): 201–228.
15. Neo H Y, Xie M, Tsui K L. Service quality analysis: case study of a 3PL company. *International Journal of Logistics Systems and Management* 2004; 1(1): 64–80.
16. Nowakowki T, Werbińska S. Zagadnienie oceny gotowości systemu logistycznego, *Logistyka* 2007; 5.
17. Nowakowski T. Analysis of possibilities of logistics systems reliability assessment. *Safety and Reliability for managing risk* 2006; 3. Leiden: Taylor and Francis, 2006.
18. Nowakowski T. Models of uncertainty of operation and maintenance information. *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn* 2000; 35(2): 143–150.

19. Nowakowski T. Niezawodność systemów logistycznych. Wrocław: OWPW, 2011.
20. Nowakowski T. Reliability model of combined transportation system. Probabilistic Safety Assessment and Management. Spitzer C, Schmocker U, Dang V N (ed.). London: Springer, 2004.
21. Peng P, Snyder L V, Lim A, Liu Z L, Reliable logistics networks design with facility disruptions. Transportation Research Part B-Methodological 2011; 45(8) Special Issue: 1190–1211.
22. Quigley J, Walls L. Trading reliability targets within a supply chain using Shapley's value. Reliability Engineering & System Safety 2007; 92(10): 1448–1457.
23. Rizzi A, Zamboni R. Efficiency improvement in manual warehouses through ERP systems implementation and redesign of the logistics processes. Logistics Information Management 1999; 12(5): 367 – 377.
24. Rutkowski K. Logistyka dystrybucji. Warszawa: Wydawnictwa SGH, 2009.
25. Santoso T, Ahmed S, Goetschalck M, Shapiro A. A stochastic programming approach for supply chain network design under uncertainty. European Journal Of Operational Research 2005; 167(1): 96-115.
26. Sawicki P. Wielokryterialna optymalizacja procesów w transporcie. Radom: Wydawnictwo ITE, 2013.
27. Seidler J A. Fundamental concepts of intelligent info system theory, Information Systems Architecture and Technology ISAT '94. Proceedings of 16th Scientific School. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1994.
28. Sohn S Y, Choi I S, Fuzzy QFD for supply chain management with reliability consideration. Reliability Engineering & System Safety 2001; 72(3): 327–334.
29. Starowicz W. Jakość przewozów w miejskim transporcie zbiorowym. Kraków: Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2008.
30. Świdorski A. Modelowanie oceny jakości usług transportowych. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport 2011; 81.
31. Wasiak M. Simulation model of logistic system. Archives of Transport 2009; 21(3-4): 189-206.
32. Werbińska-Wojciechowska S. The availability model of logistic support system with time redundancy. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 2007; 3(35): 23–29.
33. Werbińska-Wojciechowska S. Time resource problem in logistics systems dependability modelling. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 2013; 15(4): 427–433.
34. Zamojski W. Teoria i technika niezawodności. Wrocław, 1976.