DEPENDABILITY ISSUES IN DESIGNING WAREHOUSE FACILITIES AND THEIR FUNCTIONAL AREAS

ZAGADNIENIA NIEZAWODNOŚCI W PROJEKTOWANIU MAGAZYNÓW I ICH OBSZARÓW FUNKCJONALNYCH MAGAZYNÓW

Konrad Lewczuk

Warsaw University of Technology

e-mail: kle@wt.pw.edu.pl

Abstract: The dependability of warehouse facility results from dependability and reliability of its functional areas and effects on the reliability of entire supply chain. The elements of dependability of warehouse facilities should be taken into account at the design stage, but this is difficult because of the complexity of these systems and the variability of qualitative and quantitative structure of material flows at the inputs and outputs. Currently used procedures in warehouse designing include the dependability as criteria to assess the solutions in simplistic terms. The paper presents attempts to systematize basic research issues related to the dependability of warehouses as elements of supply chains on one hand, and technical systems on the other. This will allow specifying reliability measures possible to determine in relation to typical parameters of warehouse facility. This will lead to generalization of the model assessing the reliability of the warehousing processes.

Keywords: dependability, warehouse designing, warehousing process

Streszczenie: Niezawodność obiektu magazynowego wynika z niezawodności jego obszarów funkcjonalnych i wpływa na niezawodność całego łańcucha dostaw. Aspekty niezawodnościowe pracy magazynu powinny być uwzględniane na etapie projektu, jednakże jest to trudne ze względu na złożoność tych systemów oraz zmienność struktury jakościowej i ilościowej strumieni materiałów na wejściach. Aktualnie stosowane procedury projektowania obiektów magazynowych uwzględniają klasyczne miary niezawodności jako kryterium oceny rozwiązania jedynie w dużym uproszczeniu. W artykule podjęto próbę usystematyzowania podstawowych zagadnień badawczych związanych z niezawodnością magazynów będących elementami łańcuchów dostaw, a jednocześnie obiektami technicznymi. Na tej podstawie możliwe będzie wyspecyfikowanie miar niezawodności możliwych do określenia w oparciu o typowe parametry obiektu magazynowego. Pozwoli to na uogólnienie modelu do oceny niezawodności procesu magazynowego.

Słowa kluczowe: niezawodność, projektowanie magazynów, proces magazynowy.

DEPENDABILITY ISSUES IN DESIGNING WAREHOUSE FACILITIES AND THEIR FUNCTIONAL AREAS

1. Warehouse as an object of dependability studies

Warehouse is an element of supply chain that buffers, distributes and transforms physically material flows. Warehousing process is performed by equipment and people within specific space and under specific organization. The warehouse is then a technical system characterized by performance, efficiency and dependability (reliability). Dependability of a warehouse refers to the possible meeting the customers' expectations generally described by 7 *Rights* rule (right: product, quantity, condition, location, time, customer and price). The warehouse servicing ability defined as reliable transformation of material flows entering the warehouse into material flows on exit in pursuance of customers' orders and maintaining preferred time, quality and cost of implementation, influence the reliability of the supply chain [6].

Warehouses, regardless of the type and role consist of certain types of functional areas pursuing consequent phases of the material handling process. A large majority of warehouses uses standard types of areas corresponding to the phases of warehousing process [5]. The areas can be considered as "warehouses within the warehouse" and separately investigated in terms of their performance, efficiency and dependability (reliability). Studying the dependability of particular areas making up the serial or series-parallel system under their specific roles in the process allows reducing the complexity of the warehouse as a technical system.

The issues of warehouse dependability, in view of performed logistics tasks, has gained importance due to the changes in market models which took place over last years and the perception of logistics as a critical factor ensuring the availability of goods for final customer. Progress in electronic commerce and increasing diversity of products led to significant changes in the models of material flow in logistics systems. Especially systems targeted for final goods distribution experienced a shortening order realization time. Few-day ordering cycles have been shortened to one-day or even few-hours cycles. Such a change has tightened working conditions and forced warehouses to increase their functional reliability and flexibility while reducing costs. This, in turn, requires a new approach to dependability issues.

Requirements imposed on warehouse facilities trigger changes in warehousing processes and supply strategies. The focus was switched from maintaining large reserves of materials to the ability of quick response to clients' orders throughout whole supply chain. The most significant role is played by picking and shipping systems directly responsible for the execution of client orders, information systems determining material flows ([17]) and telematics systems of various types to enhance the security of tasks realization ([18], [19]).

The new requirements and work patterns of picking areas change the work patterns in other functional areas involved in the realization phase (*pushing site* – picking, packaging, sorting, consolidation, identification, control and loading areas) and in the preparatory phase (*pulling site* – reserves, receipt, unloading and control areas) – Figure . 1.

Fig. 1. Basic warehousing process.

The functional areas responsible for the consequent phases of the warehousing processes are designed at the same time, but with different methods and evaluation criteria, so the dependability of these areas should be also considered separately.

2. Dependability of logistics and warehousing systems

Warehousing facilities, according to commonly used definitions, are flow-through logistics systems working under specified structure of inputs and outputs. Dependability of logistics systems is the subject of research, but most of the studies relates to the reliability of the supply chain (e.g. [6], [8]), and base on analyses of existing solutions. The studies exceptionally go deeper to the level of technical solutions of supply chains components as determinants of the entire system reliability (eg. [7], [10], [12] and [21]).

Nowakowski T. in a comprehensive study on the dependability of logistics systems ([15]) concludes that currently there is no clear definition of logistics system dependability. He states generally that the dependability of such a system comes down to securing the timely and undisturbed delivery process in order to meet end-customer needs by supply chain which is not interrupted by possible unreliability of primary vendor. Therefore, the definition of logistics dependability can be done in many ways.

The classical approach to the dependability bases on the hierarchy of its features, in which the dependability of technical system can be expressed probabilistically by its *availability* which consists of *reliability* and *maintainability*, and deterministically by *credibility*, which consists of the *integrity* and *security* [3].

Availability means the ability of an object to stay able to perform its functions. In case of the logistics system it means the ability to timely starting and carrying out ordered logistics tasks. Reliability is understood as the ability of an object to operate without failure, and maintainability is the ability of an object to keep or restore a state in which it can perform its functions.

In case of the logistics system, both of these features may relate only to specific technical solutions and their use is not practically justified for the whole logistics system. Other features like credibility which is the system's ability to recognize and signal its state, the integrity which is the ability to function in any environment, and security which is the ability to prevent improper actions or system access are determined features describing the collective properties of the system and may be relevant only in the phase of operation ([3], [15]).

Dependability in relation to logistics systems should be considered differently than for technical systems. Understanding the concept refers to [16]:

- Reliability of the task realization in time – comparable to the technical system maintainability.
- Availability, which for technical and logistical system are equally perceived.
- Maintainability and reparability are not formulated for logistics system.
- In general, all measures of logistics system dependability assessment are formulated as coefficients – structural indicators (no other characteristics are used despite the fact that evaluated processes are random).

The dependability of warehousing facility as an element of supply chain can be considered from two different points of view. The warehouse can be recognized as:

- *Buffer in supply chain responsible for stock keeping (material management)* – managing inventories resulting from sales plans and ordering strategies. The basic information for that point of view is stock of specific items, trade features and monetary values.
- *Technical system implementing warehousing processes (warehouse management)* – the warehouse as a technical system of specified productivity expressed in material volumes per time and given capacity. It is a point of view of technology designer (like in [5], [9], [11] or [12]). The basic information for that point of view are aggregated volumes of material flows and structure of logistic units – without going into business and trade features of the assortment.

The first approach is the starting point of the second one; however, it is difficult to include it in the design phase. Therefore material management data must be firstly processed into a form useful for designing process. The second presented approach has been undertaken in the paper.

3. Dependability measures for warehousing facility

Measuring the dependability of the warehouse requires some absolute measures. As stated above, the availability of the logistics system can be used to denominate its dependability.

Availability of warehousing facility like logistics system availability is defined by setting relations between its reliability, maintainability and logistics supportability. Availability of a warehouse is then its ability to timely undertake and successfully complete logistics tasks (converting input material flows into output material flows according to client order), conditioned by the accessibility of necessary resources like handling equipment, means of steering and control and buffering capacity ([14] by Logistics Management Institute).

The availability of the warehouse is affected by factors related to tasks execution and the basic characteristics and parameters of the system (see [14]):

- Information about the course of primary process (production or consumption expressed by orders structure) decides about the subsequent operation and reliability states in which the warehousing facility can be and about the transitions principles between these states.
- The work organization affecting the basic parameters of the system such as: supplies preparedness, equipment accessibility, efficiency of handling processes carried out in the following functional areas, scheduling, performance measuring, information flow reliability.
- Operation resources: infrastructure, personnel, storage and handling equipment.

Warehouses primarily support core processes driving the supply chains: consumption and/or production which trigger all other activities. The ability to support these processes (*supportability*) is achieved through proper organization of material and information flow and infrastructure usage. The supportability is measurable characteristic and predictable to some extent ([15]).

Dependability of warehousing system is commonly referred to the customer satisfaction of delivered services which can be defined in many ways. Therefore, dependability of the warehouse can be measured by key performance indicators (KPI) used in logistics controlling, or by technological measures formulated for different functional areas at the design stage. Commonly used KPIs for warehouses (including technological performance and material management) are widely available (eg. [4], [20]). Technological measures are given in publications touching designing and organization of storage systems (eg. [2], [5], [11], [12], [13]).

Basic categories of warehouse availability measures, developed on the basis of the logistics system availability measures given in [14], include:

A. The measures of lack of capacity to perform logistics tasks:

1. Receiving availability, determined by:
 - a) time (punctuality) and number of taken deliveries,
 - b) structure of free storage locations.
2. Shipment availability, determined by:
 - a) number of orders lost (at given time),
 - b) time (punctuality) and the number of completed shipments,
 - c) stock levels.
3. Accuracy of receiving, determined by:
 - a) number and structure of errors in receiving.
4. Accuracy of shipment, determined by:
 - a) number and structure of errors in executed orders,
 - b) number and structure of returns,
 - c) number and structure of complementary shipments.
5. Inventory and space accessibility rate, determined by:
 - a) access (retrieval) time for materials necessary for order realization,
 - b) accessibility of storage space.

B. Flexibility of logistic support

1. For existing logistics network.
2. For networks with new elements.

C. Dependability (reliability)

1. Reliability of deliveries to the warehouse.
2. Reliability of shipments from the warehouse.
3. Reliability of logistics infrastructure, including information systems, staff and equipment.

D. Response time

1. Stock replenishment cycle
 - a) time of suppliers response on an order for materials,
 - b) time to remove the damage from the system,
 - c) time of administrative operations.
2. Order execution cycle:
 - a) time of response on client order.

The *measures of lack of capacity to perform logistics tasks* determine the part of time (or volume share of orders), in which the warehouse can't provide the services immediately, ie. to pursue shipping materials to customers.

Flexibility of logistic support was originally defined as the time required to achieve 20% growth of production (turnover). In case of warehouse facility it can be defined as the time necessary to achieve the required servicing ability under unplanned change in the logistics network structure, both on the supply and shipments sides. Changes of the network structure on the supply side are related to contracting new suppliers when current are inefficient or lost. This causes the current difficulties in handling customers' orders.

Dependability (reliability) of warehouse facility primarily concerns the reliability of infrastructure, storage and handling equipment, storage capacity and staff.

The response rate of the logistics system defines the time it takes to execute completely customer order, starting from triggering delivery of materials, through the picking, up to the shipping ordered units.

4. Dependability model of warehouse facility for the assessment of customer satisfaction

Dependable logistics system implements tasks in a way set out by 7 *Rights* definition ([15]). This definition also fits to the warehouse, however; it should be more specific and tailored to the technical specifics of the warehouse as a buffering and transforming element. With the reference to the previously mentioned measures it is possible to determine the overall dependability model of warehouse facility on the base of the history of warehousing operations.

One of the best tools for warehouse dependability assessment is OTIFEF (*On-Time, In-Full, Error-Free*) indicator. It names the proportion of completed tasks that fully satisfied customer. All warehouses are flow-through systems for which the boundary conditions are determined by deliveries structure on one side and structure of shipments resulting from customer orders on the other.

Satisfying customers' needs by correctly prepared dispatches (priority, the realization phase – Fig. 1) must go hand in hand with the correct service of suppliers (preparatory phase – Fig. 1). These are the bases for $OTIFE_{sup}$ indicator for supply delivery (preparatory) side and $OTIFE_{shp}$ for customer orders shipment (realization) side. Both indicators are defined by a set of attributes (parameters) determining the work quality. The attributes are expressed as the ratio of the number of specified tasks completed correctly to the total number of completed tasks. The exemplary attribute for the shipping side is the number of order lines executed immediately and without error to the total number of executed lines. The set of attributes observed to evaluate the preparatory phase is described as $a \in A_{sup}$, while a set of attributes observed to evaluate the realization phase (execution of client orders) is described as $b \in B_{shp}$. The proper execution of the tasks described by a specific attribute is expressed as a probability:

$$P_a = \frac{N_a^*}{N_a} \text{ and } P_b = \frac{N_b^*}{N_b} : \quad (1)$$

where:

N_a^*, N_b^* – number of correctly executed tasks described by attribute a or b .

N_a, N_b – number of all executed tasks described by attribute a or b .

Under the assumption that all tested attributes are statistically independent and equally important, one can set the synthetical measure of warehouse operation quality (dependability):

$$R_d = \prod_{a \in A_{sup}} P_a \prod_{b \in B_{shp}} P_b \quad (2)$$

The dependability of a warehouse processes is usually more sensitive for some attributes than for other. Therefore, the non-negative weights describe each attribute (compare [15]): $\mathbf{w}_{sup} = [w_a : a \in A_{sup}]$ and $\mathbf{w}_{shp} = [w_b : b \in B_{shp}]$, where

$\sum_{a \in A_{sup}} w_a + \sum_{b \in B_{shp}} w_b = 1$. Then, the synthetic indicator of warehouse operation quality

will be:

$$R_M = \sum_{a \in A_{sup}} w_a P_a + \sum_{b \in B_{shp}} w_b P_b \quad (3)$$

The main difficulty with the use of presented model results from necessity of investigating historical records of facility operation. Such data, in most cases, are not available for the new object, and in case of existing systems describe the past states of the system, not those resulting from future system operation.

5. Dependability and reliability in designing warehouse facility

5.1 Sources of errors reducing warehouse dependability

Logistics and warehousing system dependability base on customer satisfaction assessment. Desired services quality is set by 7R definition of logistics. All attributes in the definition are subjected to the interferences (errors) of dual character: *internal* or *external* for designed system. Internal interferences can be classified as those resulting from: human mistakes, shortage of performance of installed technologies, mismatch of resources to tasks, lack of buffering and storage capacity and random accidents disturbing normal course of warehouse processes. External interferences for a warehouse result solely from random reasons related to changes in the structure of client orders and changes in the supply structure. The nature and structure of these changes is not analysed in warehouse designing, but is the subject of supply chain planning (Fig. 2).

Fig. 2. Classification of sources of errors and difficulties reducing warehouse dependability.

5.2 Investigation of errors in warehousing process at the design stage

Human mistakes lead to inefficiency and noticeable wastes. Subject related studies (eg. [3], [14], [16]) show clear evidence of necessity of historical data analyse to set measurable dependability and reliability indicators relating to the number and types of mistakes and errors. Analyses are done to set the qualitative and quantitative structure of errors and show the ways to improve it.

Mistakes have the cause in imperfection of human as part of the supply chain and are impossible to avoid and difficult to estimate. Specified handling technologies and organization methods (like shifting from manual to automated systems, implementation of integrated information systems or organizational techniques) allow reducing the number of mistakes or can change the structure of mistake-related errors in warehouse processes.

The number of errors is estimated in relation to the volume and type of performed tasks, technology and organization. If N_a^*, N_b^* values (defined above) are set at design stage, then must be based on statistical surveys or expert evaluation. For that purpose the indicator methods like FMECA (*Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis*) or RPN (*Risk Priority Number*) can be used to assess N_a^*, N_b^* values and compare design alternatives [15].

The typical method to deal with human-mistake errors is technological *oversizing* with taking into account expected number and structure of the quality errors.

5.3 The irregularities in material flow – daily flow accumulations

Problems with proper warehouse operation and disturbances in supply chain can result from insufficient productivity of warehouse functional areas engaged in particular phases of handling and storage process. The shortage results from lack of handling and storage abilities, mismatch of installed technological potential and random irregularities in material flow [23].

Daily or weekly (short-term) peaks in material flows and structural changes of input and output flows are largely eliminated in operating conditions by providing necessary redundancy and oversize of servicing potential). The oversize is expressed by coefficient of daily material flow accumulation on entrance or exit:

$$\varphi = \frac{\lambda_{rel}}{\lambda_{avg}} \quad (4)$$

where:

λ_{rel} – reliable material flow intensity,

λ_{avg} – average material flow intensity in given time period.

The coefficients of daily material flow accumulation are for setting reliable (conclusive) flow volumes on warehouse entrance and exit. Coefficients are determined through the expert assessment supported by cases analysis, historical data mining or are requested by investor. Accumulation coefficients set expected flow volumes covering most of typical daily peaks in supplies and shipments. This lead to necessary technological oversize touching consequently following functional areas engaged in material flow. Higher accumulation coefficients overcome most of operational difficulties related to the randomness of material flow intensity while the lower ones result in cheaper but less reliable system. This is why the reliability of logistics solutions is always considered together with capital expenditures and operational costs (see [1]). Accumulation coefficients don't cover emergency flows and long-term trends in supply chain.

5.4 Long-term trends of material flow structure in supply chain

Long-term changes in the structure of material flows result from seasonal changes of customer orders or deliveries, and from long-term changes of market conditions. Seasonal changes can be treated under some conditions like short-term changes, as it was discussed in point 5.3.

Another way to deal with them is periodical shifting of work organization (eg. number of FTEs/day), on-demand productivity adjustment by increasing employment and number of handling devices, and changing the function and work patterns of specific warehouse areas.

Dynamics of material flow changes resulting from market trends will eventually lead to mismatch of warehousing technology, storage capacity and logistic tasks. Long-term changes can be either *predictable* (requiring planned possibility of expansion and increase of productivity – especially in case of seasonality), or *unpredictable* (requiring flexible solutions of a certain adaptability).

Flexibility and adaptability result from technological versatility of solutions and designed technological redundancy (oversize). Redundancy can be twofold: *already installed* (additional enclosed spaces, redundant devices and surpassing performance) and *potential* (expansion areas provided in the project, modularity, possibility of combining new systems with existing, universalism).

While human mistakes and disparity between warehousing technology and needs are virtually impossible to take into account at the design stage (except oversizing), then the technological constraints and flexibility can be (to some extent) taken into account at this stage.

6. Warehouse dependability in terms of functional areas reliability

6.1. Warehouse functional areas

Analysis of warehouses constructions shows that more than 95% of commercial buildings consist of the same types of functional areas [5]:

- a) *Receiving area*, unloading, identification and control, labelling, addressing and changing the type of units by packaging or forming.
- b) *Storage (reserve) area*, (long-term) depositing of materials to feed shipping and order-picking areas.
- c) *Order-picking area*, constructing non-uniform shipping units in line with customer orders.
- d) *Sorting and consolidation area*, forming and merging units, consolidation of shipments for different transport relations, recipients and time windows.
- e) *VAS area*, services increasing the value of products, typically the final stage of production process differentiating final products on client request.
- f) *Shipping area*, functions similar to receiving areas.
- g) *Inter-department buffering areas*, eg. between production department and warehouse facility.
- h) *Internal transport system*, communication between functional areas and material handling within the areas.

Internal transport systems are crucial for performance and reliability of warehouse processes. The internal transport (including people and equipment) is actually a component of every functional area listed. It can be therefore considered as a whole (as a functional area), or fragmentarily in relation to the specific area in which it operates.

The variety and number of types of warehouse functional areas is unlimited. Furthermore, there are other areas meeting specific functions for specific logistics process. However, the above-mentioned areas in the majority of cases will define the reliability of the object.

Each of the main types of functional areas can be described by *technological parameters* defined at the *design* stage allowing determining their reliability:

- a) Receiving (and shipment) area:
 - loading performance given as number of lines, handled units or vehicles,
 - performance of identification and control processes,
 - performance of forming and repacking processes,
 - performance of additional processes realized in the receiving areas,
 - capacity of buffering areas (limiting all other processes),
 - capacity of processes transferring units to the next functional areas.
- b) Storage areas:
 - daily and hourly performance of put-away and retrieval processes,
 - storage capacity (limiting all other processes).
- c) Order-picking areas:
 - performance of order-picking process given as number of order lines, ordered or handled units per unit of time,
 - buffering capacity given as number of offered skus and disposed stocks.
- d) Sorting and consolidation areas:
 - performance of consolidation and sorting processes,
 - buffering capacity of the areas
- e) VAS areas:
 - performance of VAS process in relations to specified requirements.
- f) Internal transport system:
 - determined in relation to specific areas, transport systems and functions.

All presented performance parameters result from:

- process realization time (labour consumption),
 - number of engaged processors (equipment and operators),
 - disposed time for task realization,
- and are derived from these parameters.

6.2. Reliability of warehouse functional areas

Storage areas can be considered reliable if at (predictable) peak rush hours:

- a) Receiving areas:
 - incoming vehicles are serviced at fixed time windows,
 - putting loading units to the reserve areas (and other areas) is not delayed by control and forming processes at the entrance area,
 - after the working day input buffers stay empty (excluding the bodies placed there accordance with the requirements of the warehouse process)¹,
 - number and structure of errors are consistent with thresholds.

¹ Emptying the entry and exit areas is connected to the performance of material handling system.

- b) Storage areas:
 - putting and retrieving units from reserve area doesn't delay processes in other areas – especially order-picking,
 - storage capacity is enough to maintain the continuity of material flows,
 - number and structure of errors are consistent with thresholds.
- c) Order-picking areas:
 - picking given set of orders can be started in required time,
 - replenishment doesn't critically disturb order-picking,
 - picking given set of orders can be finished in required time (accordingly with shipment time window),
 - the buffering capacity of the area is enough to maintain the continuity of material flows,
 - number and structure of errors are consistent with thresholds.
- d) Sorting and consolidation area,
 - consolidation and sorting can be finished in required time (accordingly with shipment time window),
 - number and structure of errors are consistent with thresholds.
- e) VAS areas
 - the reliability of VAS processes is consistent with specific requirements,
 - number and structure of errors are consistent with thresholds.
- f) Shipment areas:
 - outgoing vehicles are dispatched at fixed time windows,
 - after the working day output buffers stay empty (excluding the bodies placed there accordance with the requirements of the warehouse process),
 - number and structure of errors are consistent with thresholds.
- g) Internal transport systems (material handling systems).
 - determined in relation to specific areas.

Assuming that the warehouse is a logistics system consisting of specific functional areas linked by material and information flows in a series-parallel structure, one can assume that the reliability of the entire facility is a function of the reliability of its functional areas. The dependability, as it was defined above, is then more complicated feature to be estimated. It includes not only the technical performance of equipment and processes, but the human factor that is predictable only partially.

7. Literature

- [1] Ambroziak T., Lewczuk K., Miara poziomu dopasowania kanału dystrybucji do strumienia materiałów. *Prace Naukowe PW Transport* z. 69 str.: 17-28, OWPW Warszawa 2009 r.
- [2] Ambroziak T., Pyza D., Jacyna-Golda I.: Production companies service with the use of warehouses, CLC 2013: Carpathian Logistics Congress, Congress Proceedings / Feliks Jerzy (red.), ss. 434-439. 2014, TANGER Ltd., Ostrava.
- [3] Bukowski L., Bezpieczeństwo i niezawodność systemów logistycznych, Materiały konferencyjne: VI Konferencja Logistyki Stosowanej TLM. Prace Wydziału Zarządzania Politechniki Częstochowskiej – Seminaria i Konferencje, SK 7, Zakopane 2002.

- [4] <http://keyperformanceindicators.info/warehouse-kpi/> (grudzień 2015)
- [5] Jacyna M., Lewczuk K., Kłodawski M., Technical and organizational conditions of designing warehouses with different functional structures. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, Institute of Aviation (Aeronautics) BK, Vol. 22, No. 3, str. 49-58, Warszawa 2015.
- [6] Jacyna-Gółda I., Decision-making model for supporting supply chain efficiency evaluation, *Archives of Transport*, Vol. 33, Iss. 1, ss. 17-31, 2015.
- [7] Jacyna-Gółda I., Lewczuk K., Szczepański E., Murawski J.: Computer Aided Implementation of Logistics Processes – Selected Aspects, w: *Tools of Transport Telematics / Mikulski Jerzy (red.)*, ss. 1-14, 2015, Springer.
- [8] Jacyna-Gółda I., Santarek K., Wasiak M.: Location of warehouse facilities in the logistics network, w: *CLC 2013: Carpathian Logistics Congress, Congress Proceedings / Feliks Jerzy (red.)*, 2014, ss. 1-11, TANGER Ltd., Ostrava.
- [9] Karkula M., Selected aspects of simulation modelling of internal transport processes performed at logistics facilities. *The Archives of Transport*, Volume 30, Issue 2, str. 43-56, 2014.
- [10] Kłodawski M., Jacyna-Gółda I.: Work safety in order picking processes, w: *19th International Conference Transport Means 2015. Proceedings / Kersys Robertas (red.)*, ss. 310-316. 2015, Publishing House "Technologija".
- [11] Lewczuk K. Organizacja procesu magazynowego a efektywność wykorzystania zasobów pracy. *Logistyka* 4/2011, str. 563-570.
- [12] Lewczuk K., Ambroziak T., Warehousing process scheduling in warehouse efficiency and reliability assessment. *Proceeding of 19th International Scientific Conference. Transport Means 2015*. Kaunas University of Technology, Lithuania, October 22-23, 2015, str. 17 – 26.
- [13] Lewczuk K., Żak J., Kłodawski M., Model of dynamic allocation of resources to the tasks of warehousing process. *Materiały konferencyjne*, str. 542-548, III Carpathian Logistics Congress, 9-11 grudnia 2013, Kraków, Polska.
- [14] Nowakowski T., Werbińska S., Zagadnienie oceny gotowości systemu logistycznego, *Logistyka* 5/2007.
- [15] Nowakowski T., Niezawodność systemów logistycznych. Roz.: 4. Koncepcje niezawodności systemu, 6. Modele niezawodności elementu logistycznego. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław 2011.
- [16] Nowakowski T., Problemy niezawodności funkcjonowania systemów logistycznych, *Inżyniera Maszyn* 9(1) 2004.
- [17] Rosiński A., Modelowanie procesu eksploatacji systemów telematiki transportu, 2015, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*.
- [18] Siergiejczyk M., Rosiński A., Optimisation of transport telematics electronic systems operational process, w: *Polish Journal of Environmental Studies*, vol. 5A, nr 20, 2011, ss. 138-141.
- [19] Siergiejczyk M., Rosiński A., Safety analysis of telematic systems, w: *New Results in Dependability and Computer Systems. Proceedings of the 8th International Conference on Dependability and Complex Systems DepCoS-RELCOMEX, Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 224, ss. 135-148, 2013, Springer.

- [20] Supply Chain Operations Reference (SCOR®) model. Overview - Version 10.0, 2010 Supply Chain Council
- [21] Szczepański E., Jacyna-Golda I., Murawski J., Genetic algorithms based approach for transshipment hub location in urban areas. *The Archives of Transport*, Volume 31, Issue 3, str. 73-83, 2014.
- [22] Wasiak M., Optimization of a Potential of Logistics System. Materiały konferencyjne: 21st International Conference on Systems Engineering (ICSEng), pp. 446-450, 2011, Las Vegas.
- [23] Wasiak M., Optymalizacja potencjału podsystemu obsługi transportowo-magazynowej przedsiębiorstwa, *Logistyka* 6/2014, ss. 10893 – 10904.

Work performed partly within the statutory tasks of Warsaw University of Technology Faculty of Transport and partly with dean's grants for young scientists and doctoral students.

Praca realizowana częściowo w ramach pracy statutowej Politechniki Warszawskiej i częściowo ze środków finansowych na granty dziekańskie dla młodych naukowców i uczestników studiów doktoranckich.

Konrad Lewczuk, PhD. Eng. – researcher and lecturer (assistant professor) at the Faculty of Transport, Warsaw University of Technology in the Department of Logistics and Transport Systems. Areas of interest: optimization and rationalization of logistics processes, modelling, designing of logistics facilities, warehousing and internal transport control.

ZAGADNIENIA NIEZAWODNOŚCI W PROJEKTOWANIU MAGAZYNÓW I ICH OBSZARÓW FUNKCJONALNYCH MAGAZYNÓW

1. Magazyn jako przedmiot badań niezawodnościowych

Magazyn jest elementem buforującym, rozdzielającym i przekształcającym strumień materiałów ze względu na postać w łańcuchu dostaw. Proces magazynowy realizowany jest przez urządzenia oraz pracowników w określonej przestrzeni i przy zadanej organizacji, jest to więc pewien system techniczny charakteryzujący się wydajnością, efektywnością i niezawodnością. Niezawodność magazynu odnosi się do stopnia spełnienia oczekiwań klientów, ogólnie opisanych przez zasadę *7 Rights* (właściwe: produkt, ilość, stan, miejsce, czas, klient, cena). Od zdolności obsługowych magazynu i jakości pracy, tj. niezawodnego przekształcania strumienia materiałów wejściowych w wyjściowe, zgodnie z zamówieniami klientów oraz przy zachowaniu odpowiedniego czasu, jakości i kosztu realizacji, zależy niezawodność całego łańcucha dostaw [6].

Magazyny, niezależnie od rodzaju i roli, składają się z określonych typów obszarów funkcjonalnych realizujących kolejne fazy procesu magazynowego. Znaczna większość magazynów wykorzystuje standardowe typy obszarów odpowiadające fazom procesu magazynowego [5]. Obszary te można traktować jako „magazyny w magazynie” i oddzielnie rozważać ich wydajność, efektywność oraz niezawodność. Badanie niezawodności poszczególnych obszarów, tworzących układ szeregowy lub szeregowo-równoległy, w funkcji ich specyficznych zadań w procesie magazynowym pozwala na zmniejszenie złożoności systemu technicznego jakim jest magazyn.

Zagadnienie niezawodności magazynów w funkcji realizowanych zadań logistycznych zyskało duże znaczenie w związku ze zmianą modeli rynkowych, która miała miejsce w ciągu ostatnich kilkunastu lat i sposobu postrzegania logistyki jako czynnika krytycznego zapewniającego dostępność towarów dla klientów finalnych. Postęp w dziedzinie handlu elektronicznego i wzrost różnorodności asortymentowej doprowadziły do znacznych zmian w modelach przepływu materiałów w systemach logistycznych. Zwłaszcza systemy ukierunkowane na dystrybucję dóbr finalnych doświadczyły skrócenia przeciętnego czasu realizacji zlecenia. Nastąpiło przejście z cykli kilkudniowych do jednodniowych i kilkugodzinnych. Taka zmiana zaostrzyła warunki pracy magazynów wymuszając zwiększanie ich niezawodności funkcjonalnej oraz związanej z nią elastyczności przy jednoczesnym zmniejszaniu kosztów. To z kolei wymaga nowego podejścia do zagadnień niezawodności.

Wymagania nakładane na magazyny powodują zmiany w procesach magazynowych oraz strategiach dostaw. Punkt ciężkości przeniesiony został z konieczności utrzymywania dużych rezerw materiałowych na możliwość szybkiego reagowania na polecenie wydania z magazynu w całym łańcuchu dostaw.

Najważniejszą rolę odgrywają w tym układy komisjonowania i wysyłki, które są bezpośrednio odpowiedzialne za realizację zleceń klientów, systemy informacyjne, które warunkują przepływy materiałowe ([17]) oraz systemy telematyczne różnych typów zwiększające bezpieczeństwo realizacji zadań ([18], [19]). Nowe wymogi i wzory pracy obszarów komisjonowania zmieniają zaś wzory pracy pozostałych obszarów zaangażowanych w fazie realizacji (*push* – obszary pakowania, sortowania, konsolidacji, identyfikacji i kontroli, załadunku) oraz fазie przygotowawczej (*pull* – obszary rezerw, przyjęcia, wyładunku i kontroli) – rys. 1.

Rys. 1. Podstawowy proces magazynowy.

Szeregowo zorganizowane obszary magazynowe, odpowiedzialne za kolejne fazy procesu magazynowego, projektowane są jednocześnie, ale z wykorzystaniem innych metod i wskaźników oceny, tak więc i niezawodność tych obszarów powinna być rozważana oddzielnie.

2. Niezawodność systemu logistycznego i systemu magazynowego

Obiekty magazynowe, w myśl powszechnie stosowanych definicji, są przepływowymi systemami logistycznymi o określonej strukturze wejść i wyjść. Niezawodność systemów logistycznych jest przedmiotem badań, jednakże większość z nich odnosi się do niezawodności łańcuchów dostaw (np. [6], [8]) i opiera się na analizie istniejących rozwiązań. Względna rzadkością jest schodzenie do poziomu rozwiązań technicznych elementów łańcuchów dostaw, jako determinant niezawodności całego systemu (np. [7], [10], [12] lub [21]).

Nowakowski T., w obszernym opracowaniu na temat niezawodności systemów logistycznych ([15]) konkluduje, że aktualnie nie istnieje jednoznaczna definicja niezawodności systemu logistycznego. Stwierdza ogólnie, że niezawodność takiego systemu sprowadza się do zabezpieczenia terminowego i niezakłóconego procesu dostawy w celu zaspokojenia zapotrzebowania klienta końcowego przez łańcuch dostaw, w którym proces przepływu materiałów niezakłócony jest możliwą zawodnością dostawcy początkowego. Z tego względu definiowanie niezawodności rozwiązań logistycznych może nastąpić na wiele sposobów.

W klasycznym ujęciu zagadnień niezawodności wyróżnia się hierarchię cech niezawodnościowych, w której niezawodność systemu technicznego może być wyrażona w kategoriach probabilistycznych przez *gotowość*, na którą składają się *nieuszkodzalność* i *obsługiwalność* oraz w kategoriach deterministycznych przez *wiarygodność*, na którą składają się *integralność* i *zabezpieczenie* [3].

Gotowość oznacza zdolność obiektu do utrzymania się w stanie umożliwiającym realizację jego funkcji, a w przypadku systemu logistycznego zdolność do terminowego podejmowania i realizacji zadań logistycznych. Nieuszkodzalność jest rozumiana jako zdolność obiektu do działania nieprzerwanego uszkodzeniem, zaś obsługiwalność jest to zdolność obiektu do utrzymania się lub odtworzenia stanu, w którym może wypełniać określone funkcje. W przypadku systemu logistycznego obie te cechy mogą odnosić się jedynie do konkretnych rozwiązań technicznych, a ich stosowanie nie ma praktycznego uzasadnienia w przypadku całego systemu logistycznego. Pozostałe cechy, takie jak wiarygodność będąca zdolnością systemu do rozpoznania i sygnalizowania swojego stanu, integralność będąca zdolnością do prawidłowego działania w dowolnych warunkach otoczenia i zabezpieczenie będące zdolnością do zapobiegania nieprawidłowym działaniom lub dostępowi do systemu są cechami zdeterminowanymi opisującymi zbiorowe właściwości systemu i mogą być istotne dopiero w fazie pracy systemu ([3], [15]).

Niezawodność w odniesieniu do systemów logistycznych należy rozpatrywać inaczej niż w odniesieniu do systemów technicznych. Rozumienie pojęcia niezawodności w logistyce odnosi się do [16]:

- Niezawodność realizacji zadania w czasie – porównywalne do nieuszkodzalności systemu technicznego.
- Gotowości, która dla systemu technicznego i logistycznego mają podobne znaczenie.
- Obsługiwalności i naprawialności, które nie są formułowane w odniesieniu do systemu logistycznego.
- Na ogół wszystkie miary oceny niezawodności systemu logistycznego mają charakter współczynników – wskaźników strukturalnych (nie korzysta się z innych charakterystyk, mimo że oceniane procesy są losowe).

Obiekt magazynowy, jako element łańcucha dostaw, pod względem niezawodności może być ponadto rozpatrywany z dwóch różnych punktów widzenia, jako:

- *Bufor w łańcuchu dostaw odpowiedzialny za gospodarkę materiałową*, tj. przechowywanie określonej wielkości zapasów wynikających z planów sprzedaży i strategii zamawiania. W tym przypadku istotne są poziomy zapasu konkretnych pozycji asortymentu, ich cechy handlowe i wartość pieniężna.
- *System techniczny realizujący procesy magazynowe* – magazyn jako system techniczny o określonej wydajności wyrażonej w jednostkach przepływu w czasie oraz określonej pojemności. Jest to punkt widzenia projektanta technologii magazynowania (por. [5], [9], [11], [12]). Istotne są zagregowane wielkości przepływów materiałowych i struktura jednostek logistycznych – bez wnikania w zależności biznesowe i handlową strukturę asortymentu.

Pierwsze podejście jest punktem wyjścia dla drugiego podejścia, jednakże na etapie projektowania jest trudne do uwzględnienia, stąd też dane o gospodarce magazynowej są przetwarzane do postaci użytecznej w procesie projektowym. Drugie zaprezentowane podejście zostało podjęte w artykule.

3. Miary niezawodności obiektu magazynowego

Pomiar niezawodności magazynu, wymaga określenia bezwzględnych miar jego niezawodności. Jak przedstawiono wyżej gotowość systemu logistycznego może być wykorzystana do definiowania jego niezawodności.

Gotowość obiektu magazynowego, jako systemu logistycznego, definiowana jest poprzez określenie relacji między jego nieuszkodzalnością, podatnością obsługową i zdolnością do wsparcia logistycznego. Gotowość magazynu jest zdolnością do terminowego podejmowania i pomyślnej realizacji zadań logistycznych (przekształcania strumieni materiałów wchodzących w strumienie materiałów wychodzących, zgodnie z zamówieniami klientów), warunkowaną przez dostępność niezbędnych zasobów, tj. urządzeń i środków transportu wewnętrznego, środków kontrolno-pomiarowych i zdolności buforowania ([14] za *Logistics Management Institute*).

Na gotowość magazynu mają wpływ czynniki związane z realizacją zadań oraz podstawowymi charakterystykami i parametrami tego systemu (na podstawie [14]):

- Informacja o przebiegu procesu podstawowego (produkcja lub konsumpcja, wyrażona przez strukturę poleceń wydania materiałów z magazynu) decyduje o kolejnych stanach eksploatacji i niezawodności w jakich może znajdować się magazyn i zasadach przejścia pomiędzy tymi stanami.
- Organizacja pracy magazynu wpływająca na podstawowe parametry tego systemu takie jak: poziom gotowości dostaw, dyspozycyjność wyposażenia, efektywność procesów magazynowych realizowanych w kolejnych obszarach magazynowych, harmonogramowanie zadań, zdolność dokonywania pomiarów charakterystyk wydajności, niezawodność w przepływie informacji.
- Zasoby pracy w magazynie: infrastruktura, pracownicy, wyposażenie magazynowe, środki transportu wewnętrznego.

Magazyn przede wszystkim, ma wspierać procesy podstawowe, tj. konsumpcję i/lub produkcję. Zdolność wsparcia tych procesów (*supportability*) osiągana jest przez właściwą organizację procesów logistycznych i infrastruktury do zapewnienia na odpowiednim poziomie obsługi procesów podstawowych przy określonych wymaganiach. Jednocześnie zdolność wsparcia jest mierzalną i pewnym zakresie przewidywalną charakterystyką ([15]).

Niezawodność systemu magazynowego jest zwykle odnoszona do stopnia zadowolenia klienta z realizacji usług, które może być definiowane na wielu płaszczyznach. Niezawodność magazynu może być więc mierzona w odniesieniu do sformułowanych na potrzeby controllingu logistycznego KPI (*key performance indicators*), lub w odniesieniu do miar technologicznych formułowanych na etapie projektowania obszarów funkcjonalnych.

Zestawy typowych KPI dla magazynów (włączając wydajność technologiczną oraz miary dla gospodarki materiałowej) są dostępne w źródłach (np. [4], [20]). Miary technologiczne formułowane są w pracach dotyczących projektowania i organizacji systemów magazynowych (np. [2], [5], [11], [12], [13]).

Podstawowe kategorie miar gotowości systemu magazynowego, opracowane na podstawie przedstawionych w [14] miar gotowości systemu logistycznego obejmują:

A. Miary braku zdolności obiektu magazynowego do realizacji zadań:

1. Gotowość do realizacji przyjęcia, określana na podstawie:
 - a) czasu (terminowości) i liczby dostaw przyjmowanych,
 - b) obserwacji wolnych miejsc składowania.
2. Gotowość do realizacji wysyłki, określana na podstawie:
 - a) liczby zamówień utraconych (w określonym czasie),
 - b) czasu (terminowość) i liczby zrealizowanych wysyłek,
 - c) obserwacji stanu zapasów.
3. Dokładność realizacji przyjęcia, określana na podstawie:
 - a) liczby i struktury błędów w przyjęciu.
4. Dokładność realizacji wysyłki, określana na podstawie:
 - a) liczby i struktury błędów w zrealizowanych zleceniach,
 - b) liczby i struktury zwrotów,
 - c) liczby i struktury wysyłek uzupełniających.
5. Wskaźnik dostępności zapasów i przestrzeni, określane na podstawie:
 - a) czasu dostępu (lub pozyskania) materiałów do realizacji zleceń,
 - b) dostępności wolnych przestrzeni składowania.

B. Elastyczność wsparcia logistycznego:

1. Dla istniejącej sieci logistycznej.
2. Dla sieci z nowymi elementami.

C. Niezawodność:

1. Niezawodność dostaw do magazynu.
2. Niezawodność wysyłki z magazynu.
3. Niezawodność infrastruktury logistycznej, w tym systemów informacyjnych, urządzeń i personelu.

D. Czas odpowiedzi:

1. Cykl uzupełnienia zasobów:
 - a) Czas reakcji na zamówienie na materiały złożone u dostawców.
 - b) Cykl usunięcia uszkodzenia z systemu.
 - c) Czas operacji administracyjnych.
2. Cykl realizacji zlecenia:
 - a) Czas reakcji na zamówienie klienta.

Miary *braku zdolności obiektu magazynowego do realizacji zadań* określają udział czasu (lub udział ilościowy zleceń), w którym nie może on niezwłocznie świadczyć usługi, tj. realizować wysyłki materiałów dla klientów.

Elastyczność wsparcia logistycznego, definiowana pierwotnie jako czas niezbędny do osiągnięcia wzrostu produkcji (obrotu) o 20%, w przypadku magazynu może być definiowany jako czas niezbędny do osiągnięcia wymaganego poziomu zdolności obsługowych magazynu w warunkach nieplanowanej zmiany w strukturze sieci logistycznej, zarówno po stronie dostaw jak i po stronie wysyłek. Zmiany w strukturze sieci po stronie dostaw dotyczą poszukiwania nowych dostawców w przypadku niewydolności obecnych dostawców lub nieprzewidzianej utraty dostawców powodującej bieżące trudności w obsłudze zleceń klientów.

Niezawodność obiektu magazynowego dotyczy przede wszystkim niezawodności infrastruktury i wyposażenia magazynowego, dysponowanej pojemności oraz pracy ludzi.

Wskaźnik odpowiedzi systemu logistycznego definiuje czas jaki jest potrzebny na kompletne zrealizowanie zlecenia klienta, poczynając od organizacji dostawy materiałów, przez realizację aż do wysyłki materiałów.

4. Model niezawodności obiektu magazynowego

4.1. Model niezawodności w odniesieniu do oceny satysfakcji klienta

Niezawodność systemu logistycznego oznacza poprawną realizację zadań określonych w definicji 7 *Rights* (za [15]). W odniesieniu do obiektu magazynowego definicja ta także pozostaje w mocy, jednakże należy ją uszczegółowić i dopasować do specyfiki magazynu jako elementu buforującego i przekształcającego strumienie materiałów. Odnosząc się do przedstawionych wcześniej miar możliwe jest określenie ogólnego modelu niezawodności obiektu magazynowego w odniesieniu do historii wyników jego działalności.

Jedną z najlepszych form oceny niezawodności magazynu jest wskaźnik OTIFEF (*On-time, In-full, Error-free*) określający udział zadań zrealizowanych w sposób całkowicie satysfakcjonujący klienta. W odniesieniu do magazynu, jako systemu przepływowego, dla którego warunki brzegowe pracy są określane poprzez strukturę dostaw i wysyłek wynikającą ze zleceń klientów, należałoby odnieść się do obu „stron” tego obiektu. Zaspokojenie potrzeb klientów w drodze realizacji wysyłki (jako priorytet, faza realizacji – rys. 1) musi iść w parze z poprawną obsługą dostawców (faza przygotowawcza – rys. 1). Na tej podstawie możliwe jest sformułowanie wskaźnika $OTIFEF_{sup}$ obsługi dostaw oraz wskaźnika $OTIFEF_{shp}$ obsługi zleceń klientów. Oba wskaźniki są definiowane przez zestaw parametrów (cech) określających jakość realizacji zadań logistycznych, wyrażonych jako stosunek liczby zadań określonego typu zrealizowanych poprawnie, do całkowitej liczby zadań. Cecha przykładowa dla procesu wysyłki to liczba linii zleceń zrealizowanych natychmiastowo i bezbłędnie. Zbiór cech badanych w celu oceny procesów obsługi dostaw opisano jako $a \in A_{sup}$, a zbiór cech opisujących realizację zleceń klientów opisano jako $b \in B_{shp}$.

Prawidłowe wykonanie zadania opisanego określoną cechą wyraża się jako prawdopodobieństwo:

$$P_a = \frac{N_a^*}{N_a} \text{ oraz } P_b = \frac{N_b^*}{N_b} : \quad (1)$$

gdzie:

N_a^*, N_b^* – liczba poprawnie zrealizowanych zadań opisujących cechę a lub cechę b .

N_a, N_b – liczba wszystkich zadań opisujących cechę a lub cechę b .

Przy założeniu, że wszystkie badane cechy są statystycznie niezależne i waga każdego z nich jest identyczna, miara syntetyczna określająca jakość (niezawodność) pracy magazynu ma postać:

$$R_d = \prod_{a \in A_{sup}} P_a \prod_{b \in B_{shp}} P_b \quad (2)$$

Przy ocenie niezawodności magazynu pewne cechy mogą mieć większe znaczenie niż inne. Stąd też należy wprowadzić nieujemne wagi dla poszczególnych cech dane wektorami (za [15]): $\mathbf{w}_{sup} = [w_a : a \in A_{sup}]$ oraz $\mathbf{w}_{shp} = [w_b : b \in B_{shp}]$, przy czym $\sum_{a \in A_{sup}} w_a + \sum_{b \in B_{shp}} w_b = 1$, wtedy miernik syntetyczny jakości pracy magazynu przyjmie postać:

$$R_M = \sum_{a \in A_{sup}} w_a P_a + \sum_{b \in B_{shp}} w_b P_b \quad (3)$$

Podstawowa trudność związana z wykorzystaniem przedstawionego modelu ogólnego wynika z konieczności badania danych historycznych opisujących pracę tego obiektu. Dane takie, w większości przypadków, nie są dostępne na etapie projektowania nowego obiektu, a w przypadku systemów istniejących opisują one stan przeszły systemu, nie zaś przyszły – utworzony w drodze projektowania.

5. Niezawodność na etapie projektowania magazynu

Źródła błędów zmniejszających niezawodność magazynu

Przedstawione wyżej zagadnienie niezawodności systemów logistycznych, a w węższym zakresie systemów magazynowych, opiera się na ocenie poziomu satysfakcji klienta definiowanej jako sposób wypełnienia wymogów definicji logistyki w ujęciu 7R. Większość z wymienionych w tej definicji przymiotów dobrze zrealizowanej obsługi logistycznej podlega możliwości zaistnienia zakłóceń (błędów), przy czym zakłócenia te mogą być dwójakiego charakteru: *wewnętrzne* lub *zewnętrzne* względem projektowanego systemu. Zakłócenia wewnętrzne można sklasyfikować jako te będące efektem pomyłki człowieka, błędy będące wynikiem obiektywnego niedostatku wydajności, niedopasowania zasobów do realizacji zadań, niedostatku możliwości buforowych i składowania oraz wypadków losowych zakłócających prawidłowy bieg procesów magazynowych.

Zakłócenia zewnętrzne, z punktu widzenia magazynu, wynikają wyłącznie z przyczyn losowych związanych ze zmianami w strukturze zleceń klientów oraz zmianami w strukturze dostaw. Charakter i zakres tych zmian nie jest analizowany na poziomie magazynu lecz jest przedmiotem planowania łańcucha dostaw (rys. 2).

Ocena struktury błędów w procesie magazynowym na etapie projektowania

Prowadzone badania (np. [3], [14], [16]) wskazują jednoznacznie na konieczność analizy określonej próby danych historycznych z działalności obiektu pod kątem nieprawidłowości w realizacji zadań do wyznaczenia mierzalnych wskaźników niezawodności odnoszących się do liczby i typów popełnianych błędów. Popełniane błędy mają przyczyny w niedoskonałości człowieka jako elementu łańcucha dostaw i są niemożliwe do uniknięcia oraz trudne do szacowania.

Wybrane technologie magazynowe oraz sposoby organizacji pracy (np. przejście z rozwiązań ręcznych na automatyczne, wdrażanie zintegrowanych systemów informacyjnych, techniki organizacyjne) pozwalają na zmniejszenie liczby pomyłek lub zmianę struktury pomyłek przy realizacji procesów magazynowych.

Rys. 2. Klasyfikacja źródeł błędów i utrudnień zmniejszających niezawodność magazynu.

Liczba pomyłek jest szacowana w odniesieniu do liczby i typu realizowanych zadań i w funkcji stosowanej technologii i organizacji. Jeżeli wyznaczanie wartości N_a^* , N_b^* (definiowane wyżej) odbywa się na etapie projektowania, to jest ono oparte o badania statystyczne lub ocenę ekspercką danej technologii realizacji zadań magazynowych. Możliwe jest w takim przypadku stosowanie metod wskaźnikowych takich jak FMECA (*Failure mode, effects, and criticality analysis*) czy też RPN (*Risk Priority Number*), które pozwalają na przybliżanie tych wartości i porównywanie wariantów projektowych obiektów [15].

Podstawowym sposobem radzenia sobie z przewidywanymi błędami jest *przewymiarowanie* uwzględniające przyjętą na etapie projektowym liczbę i strukturę jakościową błędów.

Uwzględnienie losowości strumienia materiałów – spiętrzeń dobowych

Problemy w realizacji zadań magazynowych mogą wynikać z braku wydajności (produktywności) obszarów magazynowych. Niedostatek ten może być spowodowany brakiem potencjału obsługowego ([23]), a raczej niedopasowaniem potencjału do losowych spiętrzeń w przepływie materiałów.

Dobowa lub tygodniowa (krótkookresowa) zmienność struktury i wielkości strumieni materiałów na wejściu i na wyjściu z magazynu w warunkach operacyjnych w znacznym stopniu rugowana jest przez dobowe współczynniki spiętrzeń (zapewniające konieczną nadmiarowość technologiczną). Współczynnik spiętrzeń definiowany jest jako:

$$\varphi = \frac{\lambda_{rel}}{\lambda_{avg}} \quad (4)$$

gdzie:

λ_{rel} – miarodajna wartość natężenia strumienia materiałów,

λ_{avg} – średnie natężenie strumienia materiałów w określonym czasie.

Wartość miarodajna natężenia strumienia materiałów jest określana na podstawie wiedzy eksperckiej na bazie analizy przebiegu procesów podobnych lub wcześniejszych lub jest dana przez inwestora obiektu magazynowego. Jest to wartość określająca spodziewane obciążenie obiektu odpowiednio na wejściu i wyjściu i uwzględnia przewidywalne piki w przepływach materiałowych. Stosowanie współczynnika spiętrzeń opisującego odpowiednio proces dostaw i proces wysyłki pozwala na uwzględnienie naddatku wydajnościowego przy projektowaniu kolejnych obszarów magazynowych, a tym samym zniwelowania w pewnym stopniu trudności operacyjnych wynikających ze zmienności (losowości) przepływu materiałów.

Współczynniki spiętrzeń nie uwzględniają sytuacji nadzwyczajnych oraz długoterminowych trendów zmian w łańcuchu dostaw. Naturalną konsekwencją przewymiarowania systemu magazynowego jest wzrost kosztów utrzymania, z tego względu niezawodność rozwiązań logistycznych zawsze musi być rozpatrywana w funkcji kosztów realizacji procesów logistycznych (por. [1]).

Uwzględnienie długoterminowych zmian w strukturze strumieni materiałów

Długoterminowe zmiany struktury przepływów materiałowych w łańcuchach dostaw wynikają z: sezonowej zmiany struktury zleceń klientów i dostaw oraz długoterminowych zmian wynikających ze zmian rynkowych. Zmiany sezonowe mogą być traktowane jak omówione wyżej zmiany krótkoterminowe. Innym sposobem radzenia sobie z nimi jest okresowa zmiana organizacji pracy (np. dobowy czas pracy) oraz okresowe dostosowanie wydajności do potrzeb przez zwiększanie zatrudnienia i liczby urządzeń, a także zmianę funkcji określonych obszarów pracy.

Dynamika zmian powodowanych trendami rynkowymi będzie z czasem powodowała niedopasowanie technologii magazynowych i dysponowanych pojemności do zadań logistycznych. Długoterminowe zmiany mogą mieć charakter przewidywalny, wymagający istnienia możliwości rozbudowy obiektu i zwiększenia jego wydajności (sezonowość), lub charakter nieprzewidywalny, wymagający rozwiązań elastycznych o określonej możliwości adaptacji.

Elastyczność i możliwość adaptacji wynikają z kolei z uniwersalności technologicznej oraz z przewidzianej w projekcie nadmiarowości. Nadmiarowość taka z kolei może być dwojaka: praktycznie zainstalowana (obudowane przestrzenie, nadmiarowe urządzenia i nadmiarowa wydajność technologiczna) oraz potencjalna (przewidziane w projekcie przestrzenie na rozbudowę, modułowość, możliwość łączenia nowych systemów z istniejącymi). O ile błędy ludzkie oraz następująca rozbieżność pomiędzy dysponowaną technologią a potrzebami są praktycznie niemożliwe do uwzględnienia na etapie projektowania poza naddatkami wydajnościowymi, to ograniczenia technologiczne i elastyczność mogą być w pewnym stopniu uwzględniane na tym etapie.

6. Niezawodność magazynu w świetle niezawodności obszarów funkcjonalnych

6.1. Obszary magazynowe

Analiza konstrukcji magazynowych wskazuje, że ponad 95% obiektów komercyjnych składa się z tych samych typów obszarów funkcjonalnych [5]:

- a) *Obszary przyjęcia*, rozładunek, identyfikacja, kontrola, znakowanie i adresowanie jednostek, a także nadanie im odpowiedniej formy logistycznej (przepakowanie, przeformowanie).
- b) *Obszary rezerw*, składowanie długoterminowe materiałów zasilających obszary wyjścia i obszary kompletacji.
- c) *Obszary kompletacji i komisjonowania*, konstruowanie jednostek wysyłkowych zgodnie ze zleceniami klientów.
- d) *Obszary sortowania i konsolidacji*, formowanie jednostek wysyłkowych i konsolidacja porcji wysyłkowych zgodnie z kierunkami, klientami i czasem wysyłki.
- e) *Obszary VAS*, usługi zwiększające wartość materiałów (ostatnia faza procesu produkcyjnego, głównie różnicowanie produktu).
- f) *Obszary wysyłki*, funkcje odwrotne do obszarów przyjęcia.
- g) *Obszary styku systemów*, np. pomiędzy produkcją, a magazynem.
- h) *Systemy transportu wewnętrznego*, komunikacja między obszarami oraz obsługa tych obszarów.

Systemy transportu wewnętrznego mają kluczowy wpływ na wydajność, i co za tym idzie niezawodność, procesów magazynowych. System transportu wewnętrznego (obejmujący ludzi oraz urządzenia) jest faktycznie składową każdego wymienionego obszaru funkcjonalnego. Sposób ujęcia tego zagadnienia zależy od konkretnej potrzeby.

System transportu wewnętrznego może być więc rozpatrywany całościowo, jako obszar funkcjonalny, bądź fragmentarycznie w odniesieniu do konkretnego obszaru w którym realizuje zadania.

Liczba możliwych odmian i typów obszarów funkcjonalnych magazynów jest nieograniczona. Ponadto istnieją inne rodzaje obszarów spełniające funkcje specyficzne dla konkretnego procesu logistycznego, jednakże to wymienione wyżej obszary będą w znakomitej większości przypadków definiowały niezawodność obiektu.

Dla każdego z podstawowych typów obszarów funkcjonalnych można wyróżnić *parametry technologiczne*, definiowalne na etapie *projektowania*, pozwalające na określenie ich niezawodności:

- a) Obszary przyjęcia (i wysyłki):
 - wydajność przeładunkowa, wyrażona w liczbie linii, jednostek lub pojazdów,
 - wydajność procesów kontroli i identyfikacji,
 - wydajność procesów formowania i przepakowywania,
 - wydajność procesów dodatkowych realizowanych w obszarach przyjęcia,
 - pojemność obszarów buforowych (ograniczająca możliwość realizacji pozostałych procesów),
 - wydajność procesów wprowadzania jednostek (przemieszczania do innych obszarów, zależna od sprawności systemu transportu wewnętrznego).
- b) Obszary rezerw:
 - wydajność procesów wprowadzania i wyprowadzania jednostek w ujęciu dobowym i godzinowym,
 - pojemność (ograniczająca możliwość realizacji pozostałych procesów).
- c) Obszary kompletacji i komisjonowania:
 - wydajność procesu kompletacji określona w liczbie linii, zleceń lub jednostek w jednostce czasu,
 - pojemność obszaru określona liczbą oferowanych asortymentów oraz liczbą jednostek (wpływająca na pracochłonność procesów uzupełniania).
- d) Obszary sortowania i konsolidacji:
 - wydajność procesu konsolidacji i sortowania,
 - pojemność obszaru konsolidacji i sortowania.
- e) Obszary VAS:
 - wydajność procesu VAS w odniesieniu do wymogów specyficznych.
- f) Systemy transportu wewnętrznego:
 - Określane w odniesieniu do konkretnych obszarów.

Wszystkie wymienione parametry wydajnościowe wynikają z:

- czasu realizacji określonego procesu (pracochłonność),
- liczby procesorów (urządzeń, pracowników) realizujących,
- czasu dysponowanego realizacji zadania.

i z tych parametrów są wyprowadzane.

6.2. Niezawodność obszarów magazynowych

Obszary magazynowe można uznać za niezawodne, jeżeli w godzinach szczytowych natężenia w przepływach materiałów (przewidywalnych):

a) Obszary przyjęcia:

- pojazdy przychodzące są obsługiwane w ustalonych oknach czasowych,
- wprowadzanie jednostek do obszarów rezerw (i innych obszarów) nie jest opóźnione przez procesy kontroli i formowania jednostek w obszarze wejścia,
- bufory wejściowe, po zakończeniu dnia roboczego, są opróżnione (wyłączając jednostki pozostające w nich zgodnie z wymogami procesu magazynowego)²,
- liczba i struktura popełnianych błędów są zgodne z przyjętymi progami.

b) Obszary rezerw:

- wprowadzanie i wyprowadzanie jednostek do i z obszaru rezerw nie opóźnia realizacji procesów w innych obszarach, szczególnie kompletacji,
- pojemność obszaru jest wystarczająca do podtrzymania ciągłości przepływu materiałów,
- liczba i struktura popełnianych błędów są zgodne z przyjętymi progami.

c) Obszary kompletacji i komisjonowania:

- proces kompletacji danego zbioru zleceń może zostać uruchomiony w wymaganym czasie,
- proces uzupełniania miejsc oferowania nie zakłóca kompletacji,
- proces kompletacji danego zbioru zleceń może zakończyć się w wymaganym czasie (okno czasowe wysyłki),
- pojemność obszaru jest wystarczająca do podtrzymania ciągłości procesu,
- liczba i struktura popełnianych błędów są zgodne z przyjętymi progami.

d) Obszary sortowania i konsolidacji:

- konsolidacja i sortowanie mogą się zakończyć w wymaganym czasie (okno czasowe wysyłki),
- liczba i struktura popełnianych błędów są zgodne z przyjętymi progami.

e) Obszary VAS:

- niezawodność procesu VAS jest zgodna z wymogami specyficznymi,
- liczba i struktura popełnianych błędów są zgodne z przyjętymi progami.

f) Obszary wysyłki:

- pojazdy wychodzące są obsługiwane w ustalonych oknach czasowych,
- bufory wyjściowe, po zakończeniu dnia roboczego, są opróżnione (wyłączając jednostki pozostające w nich zgodnie z wymogami procesu magazynowego),
- liczba i struktura popełnianych błędów są zgodne z przyjętymi progami.

g) Systemy transportu wewnętrznego:

- Określane w odniesieniu do konkretnych obszarów.

Przy założeniu, że magazyn jest systemem logistycznym składającym się z określonych obszarów funkcjonalnych połączonych przepływem materiałów i związanych z nimi informacji w strukturę szeregowo-równoległą, można stwierdzić, że niezawodność całego obiektu będzie funkcją niezawodności jego obszarów.

² Opróżnianie obszarów wejścia i wyjścia wiąże się z wydajnością systemu transportu wewnętrznego.

7. Literatura

- [1] Ambroziak T., Lewczuk K., Miara poziomu dopasowania kanału dystrybucji do strumienia materiałów. *Prace Naukowe PW Transport z. 69 str.: 17-28*, OWPW Warszawa 2009 r.
- [2] Ambroziak T., Pyza D., Jacyna-Gółda I.: Production companies service with the use of warehouses, CLC 2013: Carpathian Logistics Congress, Congress Proceedings / Feliks Jerzy (red.), ss. 434-439. 2014, TANGER Ltd., Ostrava.
- [3] Bukowski L., Bezpieczeństwo i niezawodność systemów logistycznych, Materiały konferencyjne: VI Konferencja Logistyki Stosowanej TLM. Prace Wydziału Zarządzania Politechniki Częstochowskiej – Seminaria i Konferencje, SK 7, Zakopane 2002.
- [4] <http://keyperformanceindicators.info/warehouse-kpi/> (grudzień 2015)
- [5] Jacyna M., Lewczuk K., Kłodawski M., Technical and organizational conditions of designing warehouses with different functional structures. *Journal of KONES Powertrain and Transport, Institute of Aviation (Aeronautics) BK, Vol. 22, No. 3, str. 49-58*, Warszawa 2015.
- [6] Jacyna-Gółda I., Decision-making model for supporting supply chain efficiency evaluation, *Archives of Transport, Vol. 33, Iss. 1, ss. 17-31*, 2015.
- [7] Jacyna-Gółda I., Lewczuk K., Szczepański E., Murawski J.: Computer Aided Implementation of Logistics Processes – Selected Aspects, w: *Tools of Transport Telematics / Mikulski Jerzy (red.), ss. 1-14*, 2015, Springer.
- [8] Jacyna-Gółda I., Santarek K., Wasiak M.: Location of warehouse facilities in the logistics network, w: CLC 2013: Carpathian Logistics Congress, Congress Proceedings / Feliks Jerzy (red.), 2014, ss. 1-11, TANGER Ltd., Ostrava.
- [9] Karkula M., Selected aspects of simulation modelling of internal transport processes performed at logistics facilities. *The Archives of Transport, Volume 30, Issue 2, str. 43-56*, 2014.
- [10] Kłodawski M., Jacyna-Gółda I.: Work safety in order picking processes, w: *19th International Conference Transport Means 2015. Proceedings / Kersys Robertas (red.), ss. 310-316*. 2015, Publishing House "Technologija".
- [11] Lewczuk K. Organizacja procesu magazynowego a efektywność wykorzystania zasobów pracy. *Logistyka 4/2011*, str. 563-570.
- [12] Lewczuk K., Ambroziak T., Warehousing process scheduling in warehouse efficiency and reliability assessment. *Proceeding of 19th International Scientific Conference. Transport Means 2015. Kaunas University of Technology, Lithuania, October 22-23, 2015*, str. 17 – 26.
- [13] Lewczuk K., Żak J., Kłodawski M., Model of dynamic allocation of resources to the tasks of warehousing process. *Materiały konferencyjne*, str. 542-548, III Carpathian Logistics Congress, 9-11 grudnia 2013, Kraków, Polska.

- [14] Nowakowski T., Werbińska S., Zagadnienie oceny gotowości systemu logistycznego, *Logistyka* 5/2007.
- [15] Nowakowski T., Niezawodność systemów logistycznych. Roz.: 4. Koncepcje niezawodności systemu, 6. Modele niezawodności elementu logistycznego. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2011.
- [16] Nowakowski T., Problemy niezawodności funkcjonowania systemów logistycznych, *Inżyniera Maszyn* 9(1) 2004.
- [17] Rosiński A., Modelowanie procesu eksploatacji systemów telematiki transportu, 2015, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- [18] Siergiejczyk M., Rosiński A., Optimisation of transport telematics electronic systems operational process, w: *Polish Journal of Environmental Studies*, vol. 5A, nr 20, 2011, ss. 138-141.
- [19] Siergiejczyk M., Rosiński A., Safety analysis of telematic systems, w: *New Results in Dependability and Computer Systems. Proceedings of the 8th International Conference on Dependability and Complex Systems DepCoS-RELCOMEX, Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 224, ss. 135-148, 2013, Springer.
- [20] Supply Chain Operations Reference (SCOR®) model. Overview - Version 10.0, 2010 Supply Chain Council.
- [21] Szczepański E., Jacyna-Golda I., Murawski J., Genetic algorithms based approach for transshipment hub location in urban areas. *The Archives of Transport*, Volume 31, Issue 3, str. 73-83, 2014.
- [22] Wasiak M., Optimization of a Potential of Logistics System. Materiały konferencyjne: 21st International Conference on Systems Engineering (ICSEng), pp. 446-450, 2011, Las Vegas.
- [23] Wasiak M., Optymalizacja potencjału podsystemu obsługi transportowo-magazynowej przedsiębiorstwa, *Logistyka* 6/2014, ss. 10893 – 10904.

Praca realizowana częściowo w ramach pracy statutowej Politechniki Warszawskiej i częściowo ze środków finansowych na granty dziekańskie dla młodych naukowców i uczestników studiów doktoranckich.

Dr inż. Konrad Lewczuk – pracownik naukowo-dydaktyczny (adiunkt) na Wydziale Transportu Politechniki Warszawskiej w Zakładzie Logistyki i Systemów Transportowych. Obszary zainteresowania: optymalizacja i racjonalizacja procesów logistycznych, modelowanie, projektowanie obiektów logistycznych, magazynowanie i sterowanie w transporcie wewnętrznym.