

Iłona JACYNA-GOŁDA  
Konrad LEWCZUK

## 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

*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.*

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

*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.*

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

#### 1. Introduction

A key feature of any technical system, including logistics system, is work quality influencing user satisfaction. The quality of logistics services may be considered in relation to the time of delivery, security, dependability etc. in relation to costs [9, 11]). The quality of a logistic system services can be considered using dependability issues, but applying classic measures of dependability is impeded for logistics systems due to their complexity and necessary process-based approach to research.

Supply chain is a specific case of a logistics system. According to the serial structure of supply chain its quality, especially in technical

matters, depends on quality of individual components [5]. These components – facilities and subsystems – perform processes of material transport, buffering and transformation.

Transport subsystems in supply chain determine efficiency and duration of material movement. They can be also a source of delays, damages and loss of materials. Warehouses buffer and transform materials as well as hold and deploy stock. Thus, warehouses determine accessibility of materials for clients and time of response for order. They are also places where the smallest possible pieces of materials in supply chain are touched (handled and transformed), so warehouses are potential sources of qualitative and quantitative errors. Warehouse processes are affected by the risk of damage to materials. Storage

(\*) Tekst artykułu w polskiej wersji językowej dostępny w elektronicznym wydaniu kwartalnika na stronie [www.ein.org.pl](http://www.ein.org.pl)

process lowers value of materials and generates costs of maintaining inventory. These negative factors must be investigated and eliminated in order to improve the quality of services provided throughout the supply chain.

Therefore, warehousing seems to be important for the quality of services in the supply chain due to the broad spectrum of possible adverse events and errors caused by warehouses and identified by final customer. In case of transport subsystem shortcomings of performance can be quickly counteracted by using additional means of transport. In case of warehouses storage and handling capacity often cannot be achieved through simple organizational methods. In that case performance affects the timeliness and this, in turn, determines the quality.

Irregularities in logistics services result from errors of supply and distribution planning (not considered in this paper), technical deficiencies and inadequate organization. Hence we come up to the question as to the way that warehouses should operate, and in particular which technical means should they be fitted with to allow the undisturbed progress of warehousing processes in accordance with customer expectation? One of the elementary methods of enhancing dependability of systems is *redundancy*. Redundancy is understood as the application of a larger number of elements as compared to what is necessary or generally accepted. Those elements may comprise additional devices, people, space or information to be assured in case of damage or lack of efficiency of a system.

In the paper the authors have proposed a certain approach to warehouses services quality included in dependability categories. On that base they have discussed possibility of warehouse dependability improvement based on technological and organisational redundancy. In this context they have presented the research oriented at the dependability of logistic systems, particularly taking into account technical solutions in implementation of warehouse processes and supply chains. An important element of the presented approach is model presented in 5. point to determine selected characteristics of warehouse dependability in relation to material flow pile-ups. Additionally, authors propose factors of technical and organisational redundancy included into dependability structure of the warehouse.

## 2. Warehouse and supply chain dependability issues

In accordance with standards PN-82/N-04001 and PN-93/N-50191, dependability of a system (technical facility) is generally defined as a set of features that describe the readiness of the facility as well as reliability, maintainability and assuring maintenance support that affect it. According to Nowakowski [19, 20], when defining the dependability of a logistic system, the following should be taken into account:

- dependability of this system is understood only as a measure of task implementation over time, which may be compared to the reliability of technical system,
- no equivalent of maintainability or reliability of technical system has been formulated for logistics systems,
- all measures have the nature of coefficients, as a rule structure indicators; no other characteristics have been made use of, even though processes subject to assessment may also be random ones.

In other place Nowakowski [19] defines the dependability of logistics system through its availability. In a classic form function of availability of recoverable object describes the probability of its proper functioning in a specific moment of time [34]. Warehouse *availability* describes its ability of timely undertaking and successful performance of tasks arising from supply chain. It depend on the availability of resources, i.e. people, devices and means of internal transport, available time, control and measuring devices and buffering capability ([16], as per *Logistics Management Institute*). Dependability of the warehouse is a function of availability to handle supplies (unloading, receiving

and put- away in the reserve area) as well as shipment (retrieving, replenishment, picking, sorting, consolidation, loading). The level of logistic services executed by the warehouse may be considered to be sufficient, and consequently the availability of the warehouse satisfactory, if at the fixed level of costs:

- number and structure of qualitative errors are at an acceptable level,
- services are provided on time, in accordance with the contract concluded with the customer,
- acceleration or cancellation of customer orders is possible in specific conditions,
- the facility is capable of handling pile-ups in material flows on time, without an adverse consequence for the remaining participants of the supply chain,
- the warehouse may, within preset limits, respond to changes in the goods structure or change in the structure in customer orders without increasing the number of occurring errors and maintaining the required timeliness.

Dependability is no easily measurable factor considered in designing logistic systems [10, 18]. In supply networks the issues of dependability are most frequently limited to the supply process. In this respect Nowakowski [19, 20] indicates that dependability in the operation of supply chains may indicate: timely task execution, complete implementation of an order and receipt or release of undamaged goods. A measure of functioning dependability of the system are disturbances and reduction of its performance [10, 18]. In this context the analysis comprises the flexibility of the system, i.e. the ability to adapt and to deploy changes in the operating scope and possibilities of increasing the operation area.

Numerous studies related to problems of dependability in supply chains [1-3, 8], take into account issues related to reducing system efficiency and changes in the loading of transport routes within the network [24, 27]. Sohn and Choi [28] analyse issues related to managing a supply chain in relation to the reliability of subsequent stages – logistic processes, including warehouse processes. They emphasise the need to include reliability issues already at the stage of designing. Bukowski and Feliks [6] search for a unified concept to evaluate dependability of complex supply chain. Baghalian et al. [1] present a mathematical model of the forming of broad assortment supply chains, which takes into account uncertainty on the demand and supply side. This uncertainty translates into material flow pile-ups on warehouse entrance and exit.

Quite interesting research of the impact exerted by the seasonality on the dependability level in transport services of spare parts was presented by Juściński and Piekarski [12]. The authors have set out the value of seasonal indices for the given period and analysed the distribution of their changes in the aspect of anticipated demand for spare parts for machines.

Issues of strategic management of the supply chain and planning of infallible warehouses functioning in regular conditions, as well as in conditions of unforeseen disturbances, have been subject of analyses performed by numerous authors [21, 25]. Peng et al. [21] presented a model for minimising the cost of logistic tasks implementation with concurrent minimising of the risk that the performance of those tasks would be discontinued. Neo et al. [15] analyse the impact of lack of warehouse technical efficiency on selected criteria of quality assessment of its operation. Furthermore, they point to the accuracy of information order-picking processes and timely execution of deliveries as crucial quality indicators.

Rizzi and Zamboni [23] regard logistic processes in manual warehouse of finished goods using ERP system to improve the productivity of the warehouse. The authors have pointed to the fact that the deployment of an integrated IT system is not guarantee for rationalising warehouse operation.

Werbińska-Wojciechowska [33] presents a model of maintaining technical systems on the example of logistic systems using the concept of time delays. Author points to the effectiveness of the devised model on the example of internal transport devices. In other work Werbińska-Wojciechowska [32] discusses the integration of the system executing the task with the supportive system like the logistics system.

Quality of services has considerable importance as it comes to dependability and is rather significantly highlighted by certain authors [26, 29, 30]. The authors perceive quality as a level at which customer requirements are met by services providers. For example in the study [26] as the Author describes the multidimensional nature of the quality, he states that the quality assessment should concern the dependability of operation of transport means and human resources, IT resources, infrastructure, technical equipping, and rules of system organisation. On the other hand, Chung and others [7] take up the issue of work quality and the dependability of warehouses in relation to the specialisation of the supply chain and the consequent possibility of re-using package resources. The authors propose the use of genetic algorithms as a tool for effective planning of dependability.

The crucial feature of dependability of supply chain and warehouse is the determination of the whole system faultless probability. This is difficult for complex structures like logistic systems, in the case of which classical damage causing lack of fitness of use is not applicable. Often warehouse processes are significant source of errors. In this context the appropriate number and selection of technical means has a particular significance. For this reason, it is necessary to specify selected technological and organisational measures for the selection of technical means to secure the implementation of warehouse processes. The selection must take into consideration the diversity of orders obtained from clients, and the irregularity of supplies.

On the basis of the performed review of literature an assumption may be made that there is a research gap on the impact of redundancy on dependability and the operating cost of the warehouse system, especially as regards technical solutions that may be allowed for use during designing of warehouse systems – when the precise progress of processes described by the history of order implementation and supply handling is not available.

### 3. Technological and organizational redundancy versus warehouse dependability

Review of literature and observations made in practice indicate that the *lack of dependability* of the warehouse process is connected with the following:

- human errors that generate repair tasks (additional labour, cost and delay), cause inconsistency of stock and reduce the quality of services in the supply chain,
- unforeseen pile-ups in the flow of materials causing lack of handling of current supplies and shipments,
- seasonal and long-term changes in the structure of supplies and shipments, which cause an insufficiency in performance and lack of technological suitability for the tasks,
- unreliability of mechanical equipment and facilities – especially the key elements of storage systems, such as AS/RS,
- warehouse and enterprise information systems errors (mismatching), poor quality planning.

Errors in warehouse process may be of two types: of *internal* or *external* nature in relation to the system. The first type of errors most frequently are an effect of human errors, an objective shortage of efficiency (productivity), mismatching of the technology and the tasks, shortage of buffering capacity and storage, and random events. External ones, from the viewpoint of the warehouse, arise exclusively from random causes connected with changes in changes to the supply

structure. The nature and scope of those changes is not reviewed at the warehouse level but is subject of planning of the supply chain (Fig. 1).

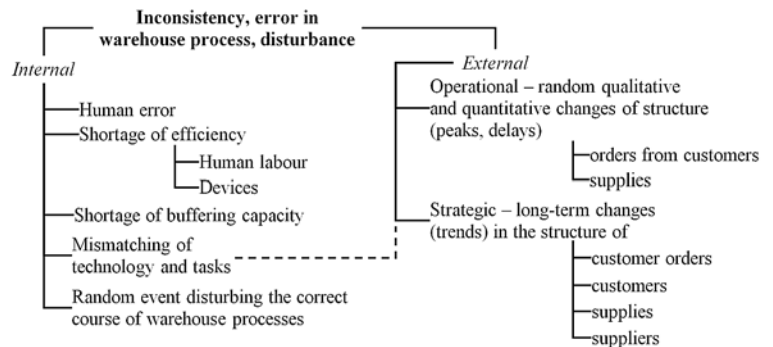


Fig. 1. Classification of sources of errors and hindrances that limit the warehouse dependability. Source: [14]

The conducted research [4, 16, 17] clearly points to a necessity of carrying out an analysis of a sample of historical data with view to dependability to set out measurable indicators related to the number and types of possible errors. On that base warehouse technologies and methods of work organisation are selected to reduce the number or change the structure of errors in the implementation of warehouse processes.

Problems in implementation of warehouse processes, such as the lack of punctuality, may be a result of the absence of handling potential or lack of suitability of the potential to random pile-ups in material flows [31]. A negative influence of random peaks in daily material flows on its uninterrupted operation is flattened by daily pile-up coefficients expressing technological redundancy allowed for in the designing stage. The coefficients increase average daily volumes to set reliable (nominal) material volumes covering the majority of daily flow peaks (section 5). The application of pile-up coefficients that describe processes of supplies and shipments enables taking into account the efficiency overcapacity in planning of warehouse processes, and consequently enhancing the dependability of the facility.

The pile-up coefficients do not take into account extraordinary situations or long-term trends in the supply chain that arise from the seasonal change in the structure of flows and supplies, and long-term changes on the market. The basic way of coping with them is the periodical change in work organisation and adaptation of efficiency. Long-term changes tend to reduce the availability to providing services and require the adoption of flexible solutions offering the given possibility of adaptation which, in turn, are connected with the technological universality and with the anticipated redundancy (installed in practice and potential one).

Typical methods of eliminating the above mentioned issues are as follows:

- *technological redundancy* enhancing the dependability of the system, including
  - increasing the capacity of functional areas (specially storage),
  - increasing number of people and equipment,
  - using equipment more efficient than actually required.
- *technological universalism (flexibility)*,
- *organisational changes* that extend the available time of work and which allow a reduction of the required volume of resources,
- *adoption of integrated management systems (WMS)* to eliminate out-of-system activities,
- *adoption of motivation programmes* of the employees.

A review of the following aspects allows the presumption that planning of a warehouse facility requires taking into account redundancy of the following nature:

- *Functional* (flexibility, universalism), i.e. possibilities of functional reconfiguring of the system to allow its adaptation to the nature of implemented logistic tasks.
- *Technological* (oversizing), i.e. an overcapacity in efficiency as compared to needs.

Redundancy always has to be confronted with the effectiveness of the warehouse and whole supply chain. Oversizing to exceed actual needs causes a high unit cost of tasks, while universalism may cause a drop in competitiveness. The adequacy of that cost arises from market conditions.

Organisational methods aimed at increasing the dependability of a warehouse are based on the following:

- rational allotment of resources for needs of warehouse tasks in time,
- determination of available time for task implementation during the day,
- selection of universal devices which may be moved between tasks,
- adoption of methods directing the flow of materials to and from the given location to reduce the work intensity of the process, in the function of costs of task implementation and availability of resources.

The dependability of the warehouse may be periodically enhanced by the adoption of organisational means aimed at increasing the utilisation rate of the working time (e.g. by motivating) or permanently by application of warehouse management systems. Temporary factors that enhance efficiency, and consequently improve the overall dependability of the warehouse in the supply chain include the possibility of extending the daily working time. Long-term increase in performance by extending the daily working time requires employing additional people.

Functional redundancy is also contained in schedule of warehouse process that describes work pile-ups. Planning the process in a way that increases the available time of task implementation concurrently maintaining the same state of resources would allow enhancing the system potential [13].

Both technological and functional redundancy are indispensable for proper realization of warehouse processes. Certain aspects of technological and functional redundancy may be taken into consideration in the project phase, as was outlined below.

#### 4. Synthetic warehouse dependability measure

Warehouse dependability can be related to the basic features of properly realized logistics service defined by 7R rule [19], which means *transforming entering material flows (from suppliers) into materials for clients according to orders, within agreed time, with adequate quality and costs*. Quality of warehouse services is sufficient, and consequently its dependability is satisfactory, when number and structure of qualitative errors is admissible by client, services are provided on time and warehouse is capable of handling predictable and non-predictable pile-ups in material flows. Then, it is possible to determine overall dependability measure *OTIFEF* (*On-Time, In-Full, Error-Free*) of warehouse on the base of warehousing operations history [14, 19]. *OTIFEF* measure is basically the ratio of tasks (services) completed in a way fully satisfying customers (model) to the number of all ordered tasks.

Boundary conditions of warehouse operation are determined by structure of deliveries on one side and structure of shipments resulting from customer orders on the other. Customer satisfaction must go hand in hand with correct servicing of suppliers. Thus, *OTIFE-*

*F<sub>in</sub>* describes quality of servicing suppliers (feeding warehouse) and *OTIFEF<sub>out</sub>* describes quality of shipments (emptying warehouse) [14]. Both measures are defined by a set of parameters determining quality of work, but generally can be composed as follows:

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

where:

- $P_{OTin}(m)$  – probability of handling all (daily) supplies on-time in  $m$ -th warehouse,
- $P_{IFin}(m)$  – probability of handling all (daily) supplies in-full in  $m$ -th warehouse,
- $P_{EFin}(m)$  – probability of handling all (daily) supplies with no errors in  $m$ -th warehouse.

A similar function is formulated for shipments:

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

where:

- $P_{OTout}(m)$  – probability of handling all (daily) shipments on-time in  $m$ -th warehouse,
- $P_{IFout}(m)$  – probability of handling all (daily) shipments in-full in  $m$ -th warehouse,
- $P_{EFout}(m)$  – probability of handling all (daily) shipments with no errors in  $m$ -th warehouse.

For the purpose of research, probabilities are considered as independent. This can result in underestimation of warehouse dependability expressed by formulas (1) or (2), but is acceptable when functions are used for comparing technical and organizational variants.

Probabilities of handling all shipments and supplies on-time  $P_{OT}$  are directly dependent on technical potential of warehouse. Probabilities of quality error  $P_{EF}$  are related to human factor and random events. Probabilities  $P_{IF}$  of servicing daily supplies and shipments in-full are related to the availability of free storage place and ordered materials on hand, which are dependent on inventory planning strategies and indirectly on storage capacity.

#### 5. Reliable material flow volumes vs punctuality

The fundamental step of designing warehouse is determining reliable (nominal) material flow volumes on entrance (supplies) and on exit (shipments). Reliable material flows constitute the base for counting number of handling equipment, workers and spaces. Installed technical potential must be able to handle all daily supplies and shipments and random pile-ups in material flow volumes.

Volumes of materials entering the warehouse and leaving it can be described by the relevant distribution (example for supplies in Figure 2).

Daily material flow volumes on entrance are described by random variable  $\{\lambda_{in}(m), p(\lambda_{in}(m))\}$  and on exit (shipments) by  $\{\lambda_{out}(m), p(\lambda_{out}(m))\}$ . Flow volumes are expressed by number of handled unified units. Average daily flow volumes are then set as expected values:

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

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

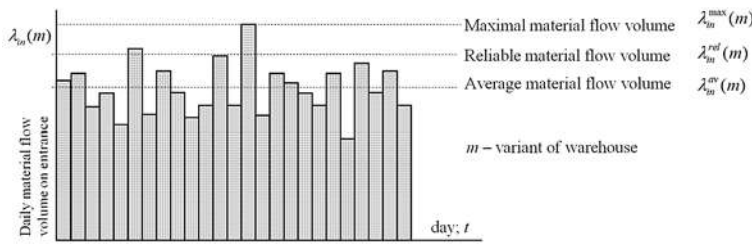


Fig. 2. Distribution of material flow volume on warehouse entrance (supplies). Source: own work

Reliable flow volumes are the expected volumes that must be serviced on-time, even under statistically expected equipment breakdowns and workers' unavailability (necessary redundancy). Finding reliable flow volumes is difficult and depends on type of warehouse, supply chain organization and serviced business.

Random variables  $\{\lambda_{in}(m), p(\lambda_{in}(m))\}$  and  $\{\lambda_{out}(m), p(\lambda_{out}(m))\}$  are characterized by coefficients of variation  $V$ :

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

where  $\mu$  is the mean and  $\sigma$  is the standard deviation.

Coefficients of variation  $V$  are different for different material flow strategies in supply chain, but observations and analyses revealed reference values (Table 1).

Table 1. Exemplary variation coefficients of material flow volumes in warehouse facility.

Type of warehouse	Minimal $V$	...	Maximal $V$
Industry (production) warehouse entries (supplies)	0,03	0,07	0,12
Industry (production) warehouse exit (shipments)	0,02	0,05	0,1
Distribution (retail) warehouse entries (supplies)	0,2	0,35	0,65
Distribution (retail) warehouse exit (shipments)	0,35	0,45	1,12

Source: own research.

The variation coefficient  $V < 0,1$  is considered as irrelevant, which is reflected in the way of setting reliable material flow volumes on entrance and on exit:

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

and

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

where:

$k1_{in/out}(m)$  – variation coefficient determining irrelevancy for particular decision situation,

$k2_{in/out}(m)$  – index representing required warehouse service level.

Low  $V$  means that material flow is not disturbed by random pile-ups and is non-changeable so reliable flow volume is equal to maximal flow volume. This situation is characteristic for warehouses handling high volumes of unified, non-seasonal products (like feeding pro-

duction or cross-docking). High variation coefficient  $V$  means that warehouse experiences high pile-ups in material flows. In many cases pile-ups appear rarely and don't justify installing redundant handling potential. These pile-ups exceeding reliable flow volumes must be serviced by extra potential of three types, which may be combined (Table 2).

Table 2. The possibilities of serving material flow pile-ups exceeding reliable material flows.

Event	Description
A	universal equipment and workers can be moved from other tasks and places in warehouse to handle high pile-ups on entrance or on exit
B	daily work time can be extended (additional FTE) or short-term improvement of work time utilization through motivation methods can be used
C	extra equipment, storage space and human resources can be gained from outside (renting equipment and space, hiring temporary workers)

Source: own research.

Hence values of key importance for warehouse designing are the pile-up coefficients:

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

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

Therefore, warehouse facility can be described by important dependability characteristics:

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

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

It was assumed that  $\alpha_{in}(m) = \alpha_{out}(m) \geq 0,96$  is a typical value, but it depends on the analysed case. Number of workers and equipment and storage capacities are set to meet determined material flow volumes. Assuming certain simplifications and invariability of technology, it can be stated that these numbers are proportional to the daily flow volume.

Concluding formulas (1), (2) and (6), (7) warehouse dependability in terms of punctuality can be considered in aspect of technical redundancy in two ways:

- event  $H_{1in}$  when  $\lambda_{in}(m) \leq \lambda_{in}^{rel}(m)$  – flow volumes on entrance are below the limit, so can be handled on-time in 100%.
- event  $H_{2in}$  when  $\lambda_{in}(m) > \lambda_{in}^{rel}(m)$  – flow volumes on entrance are over the limit, so can't be handled on-time in 100%.
- event  $H_{1out}$  when  $\lambda_{out}(m) \leq \lambda_{out}^{rel}(m)$  – flow volumes on exit are below the limit, so can be handled on-time in 100%.

Table 3. Structure of errors in order-picking process in company 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

Source: own research.

– event  $H_{2out}$  when  $\lambda_{out}(m) > \lambda_{out}^{rel}(m)$  – flow volumes on exit are over the limit, so can't be handled on-time in 100%.

If  $\lambda_{in}^{rel}(m) = \lambda_{in}^{max}(m)$  for  $m$ -th warehouse (formula (6)), then:

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

and similarly if  $\lambda_{out}^{rel}(m) = \lambda_{out}^{max}(m)$  for  $m$ -th warehouse (formula (7)), then:

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

If  $\lambda_{in}^{rel}(m) < \lambda_{in}^{max}(m)$  for  $m$ -th warehouse (formula (6)), then: ways of coping with pile-ups presented in Table 2 are applied:

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

where  $P(A)$ ,  $P(B)$  and  $P(C)$  are appropriate probabilities describing availability of particular solutions in analyzed warehouse at the time of pile-ups.

Similarly, if  $\lambda_{out}^{rel}(m) < \lambda_{out}^{max}(m)$  for  $m$ -th variant of the warehouse (formula (7)), then:

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

The high capacity of pile-ups handling requires maintaining a considerable technological potential in readiness – redundancy. The possibility of handling smaller pile-ups generate lower costs, yet it would also limit the readiness of the warehouse to provide services. Technological redundancy resulting from handleable pile-ups in material flow is reflected in organizational and technical indicators of warehouse system.

## 6. Structure of qualitative errors and availability of materials

As described in section 4, synthetic measure of warehouse dependability  $OTIFEF$  is based on three components. The first component (*On-time*) is discussed in section 5. The other two are difficult to be measured and require data mining.

Structure of qualitative errors made by the employees (component *Error-free*) can be estimated only through analysis of histori-

cal data of warehouse operation or using methods like FMECA (see [33]). Analysis of historical data allows to determine the probability distributions of qualitative errors under specific technological and organizational configuration of warehouse and known workload. Of course, there are technologies and solutions that contribute to minimizing the number of errors – especially automated technologies and strict control of the process by the warehouse information system like WMS. Unfortunately, the effect of the implementation of such technologies can be determined only on the basis of analysis of their work.

An analysis of the structure of errors in order picking process in real warehouse was performed to illustrate the problem. The analysis covered a period of 10 months, during which 138 930 lines of orders was realized (Table 3).

The analysis has revealed that probability distribution of correct execution of the orders can be approximated by Weibull distribution. Estimated expected probability of error-free implementation of single order-line in terms of quality is 0.9972656 and in terms of quantity is 0.9984898. The probability of faultless execution of order-line is then 0.9957417. The probabilities set in that way can be used to determine the  $OTIFEF_{out}$  index. It must be noted that these data do not include errors that were identified before sending materials to customers.

The last component of the measure – *In-full* is a function of the availability of space for storage units incoming to the warehouse and on-hand availability of ordered materials to be released. It results from the supply and distribution planning mechanisms, product features and warehouse storage area capacity. In addition, the products in most types of businesses can be divided into fast and slow-moving. In typical situations, fast moving materials are likely available immediately (make-to-stock), while the slow-moving products may not be available at the time of placing an order (make-to order). It is thus possible to determine the probabilities of execution of orders “in-full”.

## 7. Selected technical and organizational indicators of warehouse system redundancy

### 7.1. Elements of dependability structure of warehousing system

Basic criteria for assessing the quality of a warehouse as an element of the supply chain should comprise technical measures (productivity, performance), economic measures (costs and investment expenditures) and qualitative measures (number and structure of errors). These measures are useful for determining dependability in terms of redundancy. All elements of the supply chain must meet separate expectations as to efficiency. This indicates that elements within the chain may be perceived as the dependability system of the entire series. Lack of reliability of one or more elements is transposed on the lack of reliability of the entire supply chain. And vice versa, dependability of particular elements of the supply chain causes that it may meet expectations related to efficiency on all markets in its surroundings.

Hence, if we assume that the analysed supply chain is of a serial structure and we know:

– set of elements of supply chain  $V = \{v: v = \overline{1, V}\}$ ,

- set of connections between elements  $L = \{(v, v') : v, v' \in V \wedge (v, v') \in V \times V \wedge v \neq v'\}$
- dependability indicator of the  $v$ -th elements of supply chain:  $nl(v)$ ;
- dependability indicator of connection between links  $(v, v')$  of supply chain:  $nl(v, v')$ ,

dependability in the structural sense for the entire chain may be determined as following:

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

Furthermore, taking into account the routes implemented in supply chains, assuming that the following data have been determined:

- set of sources of material flow in supply chain:  $A$ ,
- set of destinations of material flow in supply chain:  $B$ ,
- set of numbers of routes which may join sources with end nodes:  $E(a, b)$ ,  $a \in A$ ,  $b \in B$
- set of numbers of nodes for all routes:  $EW(a, b, e)$ ,  $a \in A$ ,  $b \in B$ ,  $e \in E(a, b)$
- set of edges determining  $e$ -th flow itinerary in supply chain in relation  $(a, b)$ :  $EL(a, b, e)$ ,  $a \in A$ ,  $b \in B$ ,  $e \in E(a, b)$ .

dependability of the supply chain in the sense of transport and warehouse routes may be defined in the following way:

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

Ascribing of highly reliable resources or excessive number of resources to the realization of particular routes in supply chain increases the operability of the entire chain.

### 7.2. Selected technical and organisational measures of redundancy of warehouse system in aspect of task implementation dependability

It was assumed that given supply chain uses  $M$  warehouses. Set of numbers of warehouses is denoted as  $M = \{m : m = \overline{1, M}\}$ . Each warehouse uses a set of resources (equipment and workers). A single type of resource in  $m$ -th warehouse is marked as  $r$ , so the set  $R(m)$  of resources is described as following:

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

It was assumed that the warehouse process consists of sequentially numbered transformations of material flows  $i, j \in I(m)$  implemented by resources  $r \in R(m)$ . If  $\alpha(r, m, i) = 1$  then  $r$ -th type of resource implements  $i$ -th task in  $m$ -th warehouse. The daily work-load of the  $r$ -th type resource is the sum of products of the number of transport operations under  $i$ -th tasks  $\lambda(m, i)$  and the duration of a single reiteration  $t(r, m, i)$  by  $r$ -th resource:

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

$$\text{where: } \forall m \in M \quad \forall i \in I(m) \quad \lambda(m, i) = \lambda^{in}(m, i) \cdot \varphi_m(m) \quad \text{or} \quad \lambda(m, i) = \lambda^{av}(m, i) \cdot \varphi_{out}(m) \quad (19)$$

depending on whether  $i$ -th task is for handling supplies ( $in$ ) or shipments ( $out$ ).

Each type of resource has a specified cost of hourly operation  $k(r, m)$ . Balancing the workload  $\Psi(r, m)$  with the cost of operation allows obtaining standardised workload, which may be added for all types of equipment:

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

The number  $n(r, m)$  of  $r$ -th resources is known. Standardised number of resources may be determined, which is to define the technological redundancy of the warehouse as compared to other variants of the system:

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

Each task has an assigned available implementation time  $td(i, m)$  arising from the daily warehouse operation schedule. The tasks may be implemented concurrently, which as a result leads to overlapping of tasks in certain periods and work piling up.

#### Indicator of available operating time utilization

Consequently, the technological redundancy of a warehouse system that determines its dependability may be expressed by the indicator of available operating time utilization of technical resources of the  $r$ -th type:

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

where:

$t_{dob}(m)$  – daily operating time of the  $m$ -th warehouse,

$\varphi(r, m)$  – operating time utilisation by  $r$ -th resources in  $m$ -th warehouse.

This indicator is a quotient of the work-load and daily operating time appointed to the resources of the given type. Controlling the daily operating time for task implementation is a basic organisational tool oriented at increasing the efficiency of the warehouse and used to handle non-standard pile-ups in material flow.

#### Cost-related organisational index

The potential technical redundancy of the warehouse system may also be expressed in cost categories, among others by the cost-based organisational indicator for assessing the utilisation level of installed devices:

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

where:

$K^{Ro}(m)$  – annual operating costs (direct cost of labour and equipment usage) [PLN/year],

$K_T^R(m)$  – total annual maintenance costs (all costs, including depreciation) [PLN/year],

$K_S^R(m)$  – total annual maintenance costs of control systems [PLN/year],

$K_L^R(m)$  – total annual labour costs [PLN/year].

The optimum value of this indicator – 1, means that all resources are used in 100% during the working day. Lower values point to the

existence of a technological potential, which may be initiated by taking up appropriate organisational means. In most cases this potential is not used due to the defined allotment of resources and work organisation contributing to work pile-ups that involve all resources, which are not used in the remaining time.

*Organisational index expressed by standardised work intensity*

The organisational index expressed by standardised work intensity of process implementation may be described in the following way:

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

where:  $\max_{\tau \in T} \{\Psi(r, m, \tau)\}$  is maximal temporary work intensity for the  $r$ -th type of resource arising from work pile-ups at  $\tau$ -th moment during a 24-hour period [m.h/h],

The maximum temporary work intensity of the process  $\max_{\tau \in T} \{\Psi(r, m, \tau)\}$  with view to operation of  $r$ -type resources is understood as a maximum sum of work intensity of successive  $i$ -th tasks implemented in a parallel way falling for the  $\tau$ -th time interval. The

distribution of task implementation during each 24-hour period arises from the schedule (organisation).

## 8. Example of determining selected redundancy measures for dependability assessment

The research was carried out for a warehouse executing processes composed of 14 tasks. Potential pile-ups in deliveries and shipments are set by the pile-up coefficients. The installed potential was analysed with view of effectiveness and efficiency for pile-up coefficients on entry  $\varphi_{in}$  and at exit  $\varphi_{out}$  as 1.1; 1.3 and 1.5 respectively. The warehouse has at its disposal resources presented in Table 4.

The warehouse is working one shift 290 days a year. There are no seasonal changes in material flows. The average size of daily re-loading operations on entry: 300 pallet units. The average number of release operations: 455 (including consolidated and homogenous units). The workload of successive tasks of the process arise from the technology and geometry of the building. The floor area and the storage capacity remain unchanged. An analysis was performed of the performance and warehouse costs for the defined schedule and without it (allotting the entire daily working time for tasks) to determine the potential organisational reserve.

Results of efficiency of scheduled warehouse operation are presented in Table 5. Standardised work intensity of the process which

Table 4. Listing of types of devices ( $u$ ) and categories of human labour ( $c$ ) in the warehouse.

Type	Description	Q-ty	Cost of an hour of work [PLN/h] - net as regards employees	Utilisation degree of working time
$u1$	Powered lifting pallet truck	3	4.00	0.8
$u2$	Front lifting pallet truck	14	7.00	0.9
$u3$	Horizontal order picking trolley	9	9.00	0.9
$u4$	High reach truck	8	12.00	0.9
$c1$	Operator of $u1, u2$ + manual work	var.	13.00	0.8
$c2$	Employee for picking and control		16.00	0.8
$c3$	Operator of $u2$ and $u3$		20.00	0.8

Table 5. Technical parameters of warehouse operation - with schedule.

Parameter	Variant								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\varphi_{in}$	1.5	1.5	1.5	1.3	1.3	1.3	1.1	1.1	1.1
$\varphi_{out}$	1.5	1.3	1.1	1.5	1.3	1.1	1.5	1.3	1.1
Maximum intensity of standardised work intensity									
with view to operation of devices [m.h]	57.50	52.48	47.46	54.89	49.87	44.84	52.23	47.20	42.18
with view to labour of employees [m.h]	41.95	38.32	34.69	40.01	36.39	32.76	38.03	34.40	30.78
Standardised work intensity									
with view to operation of devices [m.h]	324.88	296.67	268.46	309.94	281.73	253.52	294.74	266.53	238.32
with view to labour of employees [m.h]	233.55	213.38	193.21	222.72	202.55	182.38	211.67	191.50	171.33
Organisational indicator #1 - effectiveness of utilisation of installed potential									
with view to operation of devices:	0.706	0.707	0.707	0.706	0.706	0.707	0.705	0.706	0.706
with view to labour of employees:	0.696	0.696	0.696	0.696	0.696	0.696	0.696	0.696	0.696
Organisational indicator #2 - unutilised technological potential (standardised work intensity)									
with view to operation of devices [m.h]	135.15	163.36	191.57	150.09	178.30	206.52	165.29	193.50	221.71
with view to labour of employees [m.h]	102.07	122.24	142.41	112.90	133.07	153.24	123.95	144.12	164.29
Organisational indicator #2 - unutilised technological potential (standardised work intensity)									
with view to operation of devices	29.4%	35.5%	41.6%	32.6%	38.8%	44.9%	35.9%	42.1%	48.2%
with view to labour of employees	30.4%	36.4%	42.4%	33.6%	39.6%	45.7%	36.9%	42.9%	49.0%



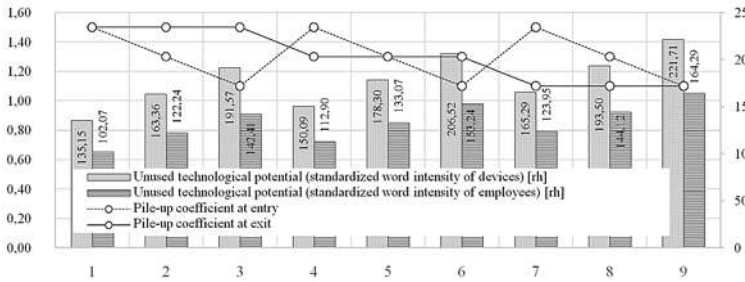


Fig. 3. Unused technological potential – with schedule

Table 6. Technical parameters of warehouse operation – without schedule.

Parameter	Variant								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\varphi_{in}$	1.5	1.5	1.5	1.3	1.3	1.3	1.1	1.1	1.1
$\varphi_{out}$	1.5	1.3	1.1	1.5	1.3	1.1	1.5	1.3	1.1
Maximum intensity of standardised work intensity									
with view to operation of devices [m.h]	40.61	37.08	33.56	38.74	35.22	31.69	36.84	33.32	29.79
with view to human labour [m.h]	29.19	26.67	24.15	27.84	25.32	22.80	26.46	23.94	21.42
Organisational indicator #2 – unused technological potential expressed by standardised work intensity in relation to the baseline solution (variant 1)									
with view to operation of devices [m.h]	0.0%	8.7%	17.4%	4.6%	13.3%	22.0%	9.3%	18.0%	26.6%
with view to human labour [m.h]	0.0%	8.6%	17.3%	4.6%	13.3%	21.9%	9.4%	18.0%	26.6%

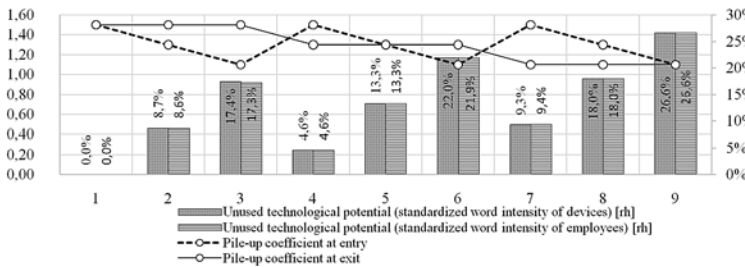


Fig. 4. Unused technological potential – with no schedule.

Table 7. Listing of cost parameters for assessment of warehouse effectiveness – with schedule.

Parameter	Variant								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\varphi_{in}$	1.5	1.5	1.5	1.3	1.3	1.3	1.1	1.1	1.1
$\varphi_{out}$	1.5	1.3	1.1	1.5	1.3	1.1	1.5	1.3	1.1
Annual operational cost of work									
of people [PLN million/year]	2.780	2.476	2.300	2.589	2.425	2.171	2.538	2.234	2.058
of equipment [PLN million/year]	0.420	0.384	0.347	0.401	0.365	0.328	0.382	0.345	0.308
Annual operating costs									
of equipment [PLN million/year]	4.928	4.891	4.854	4.908	4.872	4.835	4.889	4.852	4.816
of warehouse (total) [PLN million/year]	8.360	8.019	7.806	8.149	7.949	7.658	8.079	7.738	7.525
Cost-related organisational indicator	0.44	0.41	0.39	0.42	0.40	0.37	0.41	0.38	0.36
Effectiveness of solution [PLN/released unit]	42.33	46.31	52.47	41.63	46.37	52.08	41.70	45.68	51.90

expresses the general volume of work to be executed in relation to work costs was used for assessment of the technological overcapacity of the warehouse. Unused technological potential in variant 1 (the highest pile-ups at level  $\alpha$  which may be handled) arises from the structure of the work schedule, in which tasks may only be implemented in certain sections of the daily operation time.

The level of unused technical and functional potential (redundancy) was presented on Fig. 3.

Table 6 presents performance results of warehouse operation without schedule (all tasks are executed evenly throughout the entire daily working time – no pile-ups occur, resources are used in 100%). Actual and standardised work intensity are the same as if a schedule is applied.

Fig. 4. presents the technological redundancy for the process without the schedule. In variant 1 standardised work intensity is distributed evenly within the entire daily working time, hence the lack (0%) of technological and organisational overcapacity. In subsequent variants the technological redundancy arises from redundant resources, and no functional redundancy occurs.

Table 7 and Fig. 5. list costs of warehouses processes. Annual operating costs take into account all costs connected with the execution of warehouse processes and maintaining warehouse infrastructure. All other dependability and technical indicators have to refer to operating costs as the ultimate profitability index.

Fig. 6. presents costs of implementation of a single customer order depending on values of material pile-ups that may be handled. Also presented is the value of organisational indicator.

In case of lack of schedule and therefore daily pile-ups, investigated process may be carried out by the same resources (equipment) under pile-up coefficients on entry  $\varphi_{in} = 2,98$  and at exit  $\varphi_{out} = 1,1$  and in the inverse situation under  $\varphi_{in} = 1,1$  and  $\varphi_{out} = 2,32$ . This reserve (initial values of pile-up coefficients  $\varphi_{in} = \varphi_{out} = 1,1$ ) is significant. Naturally it cannot be fully used due to the technological limitations of the process, which will force the schedule, however, it indicates a potential functional redundancy possible to run under certain conditions.

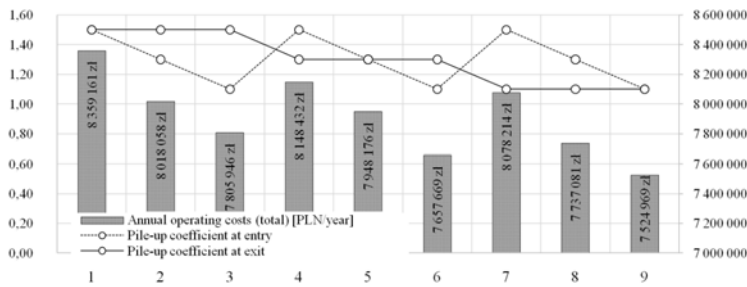


Fig. 5. Value of annual working cost for successive pile-up coefficients

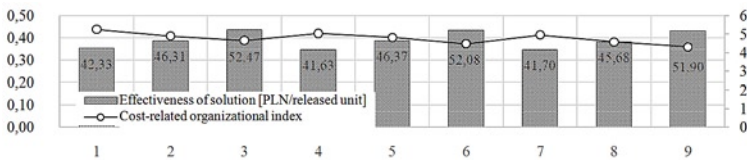


Fig. 6. Effectiveness of solutions in successive variants

Table 8. Technological redundancy determined by available time of equipment – with schedule.

Parameter	Variant								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\varphi^{in}$	1.5	1.5	1.5	1.3	1.3	1.3	1.1	1.1	1.1
$\varphi^{out}$	1.5	1.3	1.1	1.5	1.3	1.1	1.5	1.3	1.1
Total number of employees	46	41	38	43	40	36	42	37	34
Computational number of equipment elements [pieces]									
$u_1$	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
Computational number of employees [persons]									
$c_1$	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
Surplus of performance expressed by standardised number									
with respect to equipment:	0%	7%	17%	3%	14%	19%	9%	16%	26%
with respect to employees:	0%	11%	17%	7%	13%	22%	9%	20%	26%
Utilisation index of available time of device work:									
$u_1$	0.567	0.499	0.431	0.559	0.492	0.424	0.552	0.484	0.416
$u_2$	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

References

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, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.12.017>.
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, <https://doi.org/10.1007/978-1-4684-9309-2>.
4. Bukowski L. System of systems dependability – Theoretical models and applications examples. Reliability Engineering & System Safety 2016; 151: 76–92, <https://doi.org/10.1016/j.res.2015.10.014>.

9. Conclusions

Warehouses influence the quality of services in supply chain. In case of logistics systems quality can be identified with dependability issues, but their dependability cannot be defined and researched like in case technical systems. Dependability of warehouse determines its ability to ensure the continuity of core processes: the production and consumption. This ability can be expressed by a variety of characteristics.

Dependability in the implementation of warehouse processes may be enhanced not only by organisational means, but also technical modifications introducing necessary redundancy to reduce adverse events related to pile-ups in material flows and errors in process realization. Organisational tasks are oriented at increasing the utilisation level of the working time of resources and lowering pile-ups by spreading them over the longer time, while technical modifications are for increasing productivity.

Both actions are intended to increase the probability of correct execution of logistic services by the warehouse, and thus by the entire supply chain. This probability is defined by the OTIFEF index. The construction of OTIFEF index proposed in this paper is based on the probability of the three basic qualities of a well-executed logistics service. Therefore, it is universal and allows synthetic approach to issues of warehouse dependability referred to the quality of its work. It was pointed out that due to the complexity of operations in supply chains and randomness in the structure and size of material flows, these probabilities can be increased mainly by introducing rational redundancy at the designing stage.

Technical redundancy can be expressed by prosed technical and economic measures, which define frames of dependability structure of warehousing system. This structure can be a base of warehouses and supply chains dependability assessment, but the actual assessment can be made only by analysing historical data of processes realization.

Methods proposed in this paper are applicable. They were developed as elements of SIMMAG 3D project.

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).

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, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.07.056>.*
8. Daganzo C F. *Logistics Systems Analysis*. New York: Springer Verlag, 1996, <https://doi.org/10.1007/978-3-662-03196-4>.
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, [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00028-6](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00028-6).*
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. *Eksploracja 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, <https://doi.org/10.1504/IJLSM.2004.005539>.*
16. Nowakowski 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, [https://doi.org/10.1007/978-0-85729-410-4\\_323](https://doi.org/10.1007/978-0-85729-410-4_323).
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): 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, <https://doi.org/10.1016/j.ress.2006.09.019>.*
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, <https://doi.org/10.1108/09576059910295805>.*
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, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.01.046>.*
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, [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(01\)00022-9](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(01)00022-9).*
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. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 2007; 3(35): 23–29.*
33. Werbińska-Wojciechowska S. Time resource problem in logistics systems dependability modelling. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 2013; 15(4): 427–433.*
34. Zamojski W. *Teoria i technika niezawodności*. Wrocław, 1976.

---

**Ilona JACYNA-GOŁDA**

Faculty of Production Engineering  
Warsaw University of Technology  
Narbutta 85, 02-524 Warsaw, Poland

**Konrad LEWCZUK**

Faculty of Transport  
Warsaw University of Technology  
Koszykowa 75, 00-662 Warsaw, Poland

E-mail: [jacyna.golda@gmail.com](mailto:jacyna.golda@gmail.com), [kle@wt.pw.edu.pl](mailto:kle@wt.pw.edu.pl)

---

## **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 podaźowej. 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.

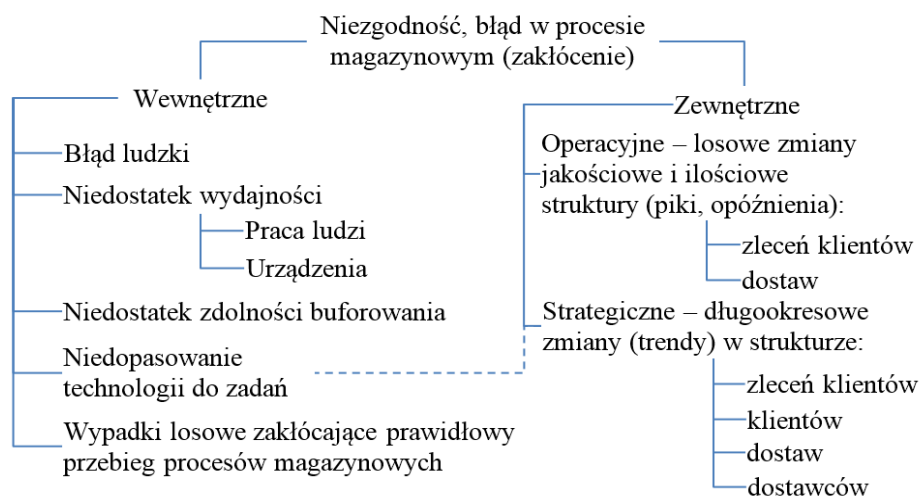
Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury stwierdzono, że występuje luka badawcza dotycząca wpływu nadmiarowości na niezawodność i koszt działania systemu magazynowego, szczególnie w aspekcie rozwiązań technicznych możliwych do uwzględnienia na etapie projektowania – kiedy nie jest znany dokładny 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<sub>in</sub>* opisuje jakość obsługi dostawców (zasilanie magazynu) a *OTIFEF<sub>out</sub>* 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.

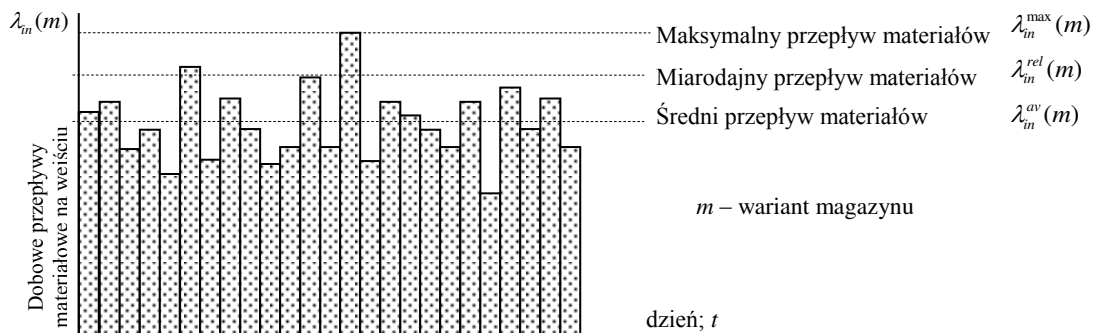
Na potrzeby badań przyjęto, że prawdopodobieństwa są niezależne. Może to skutkować niedoszacowaniem (niezawodności magazynu wyrażonej formułami (1) i (2), ale jest akceptowalne kiedy zależności te wykorzystywane są do porównania wariantów projektowych.

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  $\mu$  jest średnią z próby zaś  $\sigma$  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:

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

oraz

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

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 niezmiennosć 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 ogniw łańcucha dostaw  $V = \{v : v = 1, V\}$
  - 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:

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

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

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

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

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  $M = \{m : m = \overline{1, M}\}$ . Każdy magazyn dysponuje zbiorem zasobów pracy (urządzenia lub pracownicy). Pojedynczy typ zasobu dla  $m$ -tego magazynu będzie oznaczony symbolem  $r$ , wówczas zbiór  $R(m)$  ma postać:

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

Przyjęto, że proces magazynowy składa się z kolejno numerowanych przekształceń strumieni materiałów  $i, j \in I(m)$  realizowanych przez zasoby  $r \in R(m)$ . 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:

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

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

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

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:

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

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  $\tau$ -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  $\tau$ -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  $\varphi_{in}$  i na wyjściu  $\varphi_{out}$  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

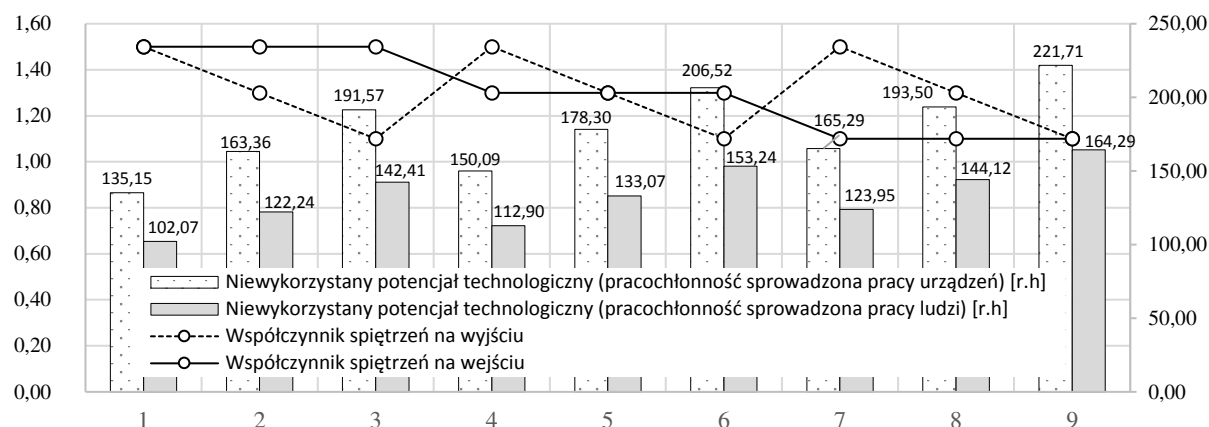
Magazyn pracuje na 1 zmianę roboczą przez 290 dni w roku. Nie występują sezonowe zmiany w przepływach materiałowych. Średnia wielkość dobowych przeładunków na wejściu: 300 jednostek paletowych. Średnia liczba wydań: 455 (w tym jednostki kompletowanie i jednorodne). Pracochłonność zadań procesu wynika 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 naddatku technologicznego magazynu. Niewykorzystany potencjał technologiczny w wariancie 1 (najwyższe możliwe do obsłużenia na poziomie  $\alpha$  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
$\varphi_{in}$	1,5	1,5	1,5	1,3	1,3	1,3	1,1	1,1	1,1
$\varphi_{out}$	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.



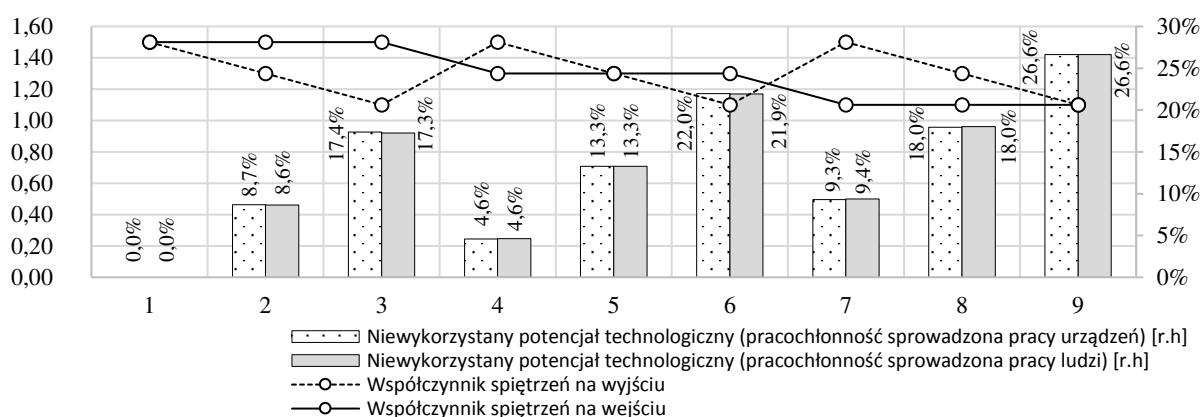
Rysunek 3. Niewykorzystany potencjał technologiczny – z harmonogramem.

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
$\varphi_{in}$	1,5	1,5	1,5	1,3	1,3	1,3	1,1	1,1	1,1
$\varphi_{out}$	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%

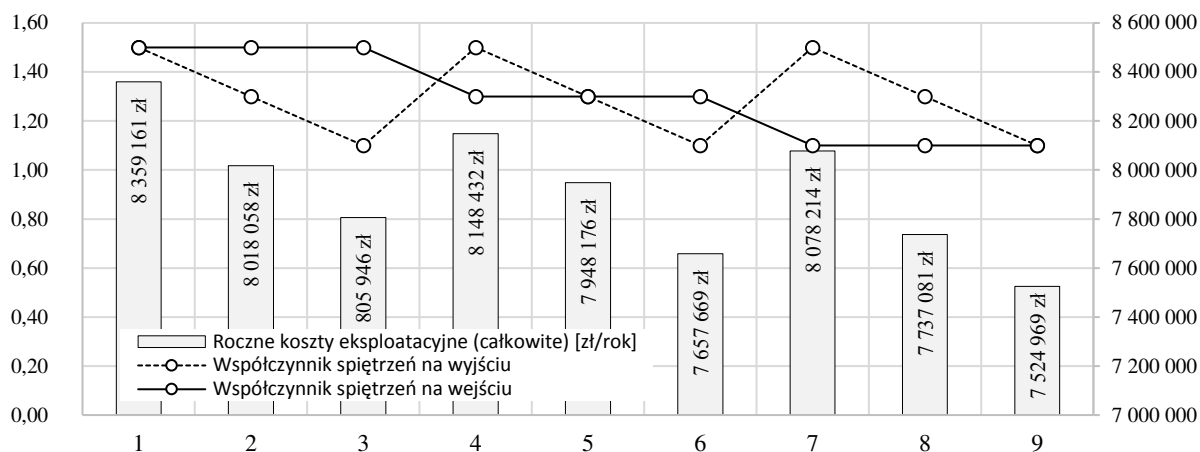


Rysunek 4. Niewykorzystany potencjał technologiczny – bez harmonogramu.

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.

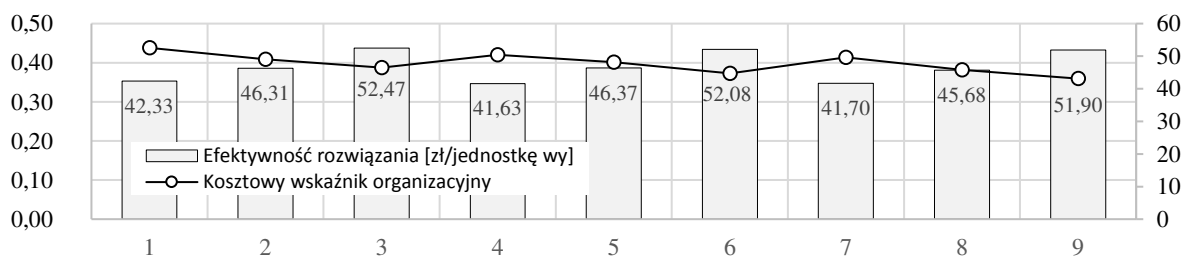
Tabela 7. Zestawienie wartości parametrów kosztowych do oceny efektywności magazynu – z harmonogramem.

Parametr	Wariant								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\varphi_{in}$	1,5	1,5	1,5	1,3	1,3	1,3	1,1	1,1	1,1
$\varphi_{out}$	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
$\varphi_{in}$	1,5	1,5	1,5	1,3	1,3	1,3	1,1	1,1	1,1
$\varphi_{out}$	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. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2007; 3(35): 23–29.
33. Werbińska-Wojciechowska S. Time resource problem in logistics systems dependability modelling. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2013; 15(4): 427–433.
34. Zamojski W. *Teoria i technika niezawodności*. Wrocław, 1976.