

## OCENA RYZYKA W SYSTEMACH PRODUKCYJNYCH O RÓWNOLEGŁEJ STRUKTURZE NIEZAWODNOŚCIOWEJ

### EVALUATION OF THE RISK IN PRODUCTION SYSTEMS WITH A PARALLEL RELIABILITY STRUCTURE

System produkcyjny zdefiniowano zgodnie z teorią systemów, natomiast ryzyko jako synonim zawodności. Takie podejście umożliwiło dekompozycję systemu produkcyjnego na obszary oraz na wyznaczenie struktury niezawodnościowej systemu produkcyjnego. Artykuł prezentuje metodę wyznaczania ryzyka dla systemu produkcyjnego o strukturze równoległej. Metoda wyznaczania ryzyka dla produkcyjnej struktury równoległej została zweryfikowana w przedsiębiorstwie produkującym ramy wózków wagonów, tramwajów i lokomotyw.

**Słowa kluczowe:** ryzyko, system produkcyjny, niezawodność, struktura niezawodnościowa.

The production system was defined in accordance with systems theory, while the risk was treated as a synonym of unreliability. This approach allowed decomposing the production system into several areas and determining the reliability structure of the production system. This paper presents a method of determining the risk for a production system with a parallel structure. The method of determining the risk for a parallel structure of production was verified in a production company, which manufactures bogie frames for railway cars, trams and railway engines.

**Keywords:** risk, production system, reliability, reliability structure.

#### 1. Wprowadzenie

Najważniejszym zadaniem zarządzania produkcją jest kształtowanie zjawisk zachodzących w procesie produkcyjnym zgodnie z zakładanymi celami przedsiębiorstwa i przy uwzględnieniu wszelkich warunków i okoliczności realnych procesów produkcyjnych. Podjęcie decyzji odnośnie systemu produkcyjnego, z uwagi na jego złożoność, wymaga analizy dużej liczby danych. Złożoność ta, integracja systemu z otoczeniem oraz zakłócenia występujące stale w systemie produkcyjnym utrudniają, a często wręcz uniemożliwiają decydentowi, bezpośrednią identyfikację związków przyczynowo-skutkowych zachodzących w systemie. Podejmowanie decyzji na podstawie jedynie intuicji jest często zawodne i obciążone dużym ryzykiem, dlatego powinno zostać poprzedzone analizą systemu produkcyjnego oraz oceną ryzyka związanego z jej podjęciem.

Wieloznaczność pojęcia oraz brak sprecyzowanej jasno definicji spowodowały, iż w literaturze spotkać można różne podejścia do tematu ryzyka. Najbardziej rozpowszechnionymi podejściami są: podejście niemieckie i amerykańskie. Pierwsze traktuje ryzyko jako „niebezpieczeństwo nie zrealizowania założonego celu przy podejmowaniu decyzji” [17]. Jego rozszerzeniem jest podejście amerykańskie, traktujące ryzyko nie tylko w kategorii możliwości poniesienia straty, ale również osiągnięcia zysku [8, 12, 18]. Oba podejścia zaprezentowano na rysunku 1.

Mimo iż obecnie ryzyko działalności gospodarczej jest równie wysokie na rynku produkcyjnym, usługowym i finansowym, to widoczne są znaczne

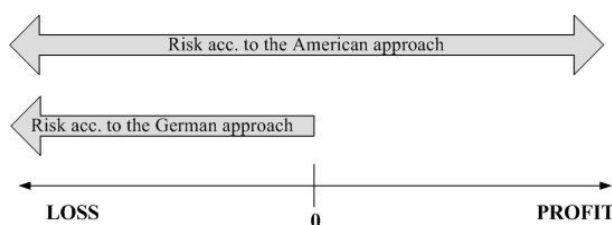
#### 1. Introduction

The most important task of production management is to shape the phenomena occurring in a production process in accordance with the assumed goals of the company, taking into account all conditions and circumstances of real production processes. Decisions regarding a production system require analysing a large number of data, due to its complexity. Complexity, integration with the environment, and disturbances occurring constantly in a production system hinder, and often even prevent a decision-maker from identifying directly the cause-and-effect relationships occurring in the system. Decisions based only on intuition are often unreliable and burdened with a high risk, and therefore they should be preceded by an analysis of the production system and evaluation of the risk related to making a decision.

Ambiguity of the concept and the lack of clearly specified definition resulted in different approaches to the subject of risk in the literature. The most widespread approaches include the German approach and the American approach. The German approach treats risk as “the danger of failing to achieve the assumed goals when making a decision” [17]. The American approach is an extension of the German approach and treats risk not only in terms of a possibility of suffering a loss but

also in terms of making a profit [8, 12, 18]. Both approaches are presented in Fig. 1.

Despite the fact that the risk of business activity is currently equally high in the production, services and financial markets, considerable differences in the number of literature items, training courses and scientific



Rys. 1. Koncepcja ryzyka według podejścia amerykańskiego i niemieckiego

Fig. 1. The concept of risk according to American and German approaches

różnice w liczbie pozycji literaturowych, szkoleń i konferencji naukowych z tego zakresu. Sytuacja ta przekłada się w prosty sposób na liczbę metod planowania, analizy i oceny ryzyka na niekorzyść sfery produkcyjnej, w której planowanie i ocena ryzyka jest niedoceniana i bardzo słabo rozwinięta. Dostępnych jest wiele pozycji w literaturze z zakresu zarządzania, analizy i oceny ryzyka kredytowego, ubezpieczeniowego, handlowego, informatycznego i innych, natomiast zauważalny jest brak opracowań literaturowych dla przedsiębiorstw i procesów produkcyjnych.

Rozwiązaniem tych problemów może być przedstawienie systemu produkcyjnego w ujęciu teorii systemów i zastosowanie w ocenie ryzyka ogólnej teorii niezawodności. Aby analiza systemu i ocena ryzyka mogła być przeprowadzona szybko oraz bez ingerencji w realizację i przebieg procesu produkcyjnego, niezbędnym wydaje się budowa modeli symulacyjnych.

## 2. Definicja, dekompozycja i parametry systemów produkcyjnych

Mianem procesu produkcyjnego określa się „*uporządkowany zbiór działań (operacji, czynności) mających na celu wykonanie produktu (wyrobu lub usługi)*” [7]. Proces produkcyjny przebiega w środowisku systemu produkcyjnego, czyli przedsiębiorstwa. System produkcyjny to „*układ wzajemnie powiązanych ze sobą zasobów materialnych, energetycznych, kadrowych, kapitałowych i informacyjnych. Jest on celowo zaprojektowany i zorganizowany tak, by zaspokajać potrzeby klientów*” [7]. System produkcyjny nie może istnieć bez otoczenia, z którego pochodzą zasoby i w którym generowane są zyski niezbędne do dalszego funkcjonowania. Otoczenie to zmienia się i oddziałuje na system produkcyjny, i odwrotnie.

Proponowane w literaturze modele systemów są różnie definiowane przez poszczególnych autorów jednak najczęściej w modelu systemu występują następujące składowe:

- wejścia [WE] które w systemie produkcyjnym stanowią wszystkie czynniki produkcji,
- wyjścia [WY] które stanowią wszystkie elementy wychodzące z systemu,
- przebiegający w nim proces transformacji [T], w wyniku którego następuje przekształcenie, elementów wejścia w elementy wyjścia, czyli w wyroby.
- funkcja (cel) albo zadanie stanowiące podstawę jego istnienia,
- otoczenie mające istotny wpływ na system,
- zasilanie, czyli sprzężenia materialne, energetyczne i informacyjne,
- zakłócenia które działają na każdy element systemu. Są one najczęściej nieznanymi wejściami do systemu o nieznanym wartościach [10]. Z uwagi na ich nieprzewidywalny charakter mają charakter losowy. Wielkość wpływu zakłóceń na stopień „spełnienia wymagań” postawionych systemowi będzie oznaczało stopień zawodności systemu.
- proces zarządzania systemem.

Jednym z podstawowych problemów w analizie systemów produkcyjnych jest ich odpowiednia dekompozycja na elementy składowe. Sposób dekompozycji powinien zależeć od celu stawianego analizie systemu produkcyjnego. W tym celu można się posłużyć strukturą produkcyjną z uwagi na jej uniwersalny charakter, możliwość adaptacji jej do różnorodnych dekompozycji procesu oraz całościowe ujęcie procesu produkcyjnego.

Na specyfikę procesu produkcyjnego, oprócz wymienionych elementów, wpływ mają poszczególne parametry. W lite-

conferences in this scope are noticeable. This situation directly translates into the number of available methods of planning, analysing, and evaluating the risk to disadvantage of the production sphere, where risk planning and evaluation methods are underestimated and very poorly developed. There are many available items in the literature concerning management, analyses and evaluation of the credit, insurance, trade, and IT risk, while the lack of literature items for production companies and processes is noticeable.

Presenting the production system in terms of the systems theory and applying the general reliability theory in risk evaluation may provide a solution to these problems. In order to perform a system analysis and risk evaluation in a quick manner and without interfering in the execution and course of a production process, it seems necessary to build simulation models.

## 2. Definition, decomposition and parameters of production systems

Production process is defined as “*an ordered set of actions (operations, activities) that aim at making products (goods or a service)*” [7]. A production process runs in the environment of a production system, i.e. an enterprise. A production system can be defined as “*a system of interconnected material, power, personnel, capital and information resources, which is intentionally designed and organized to satisfy customer needs*” [7]. A production system cannot exist without its environment, from which it draws resources and in which profits necessary for further operation are generated. This environment is changing and affects the production system, and *vice versa*.

The system models proposed in the literature are defined differently by individual authors, however, a system model consists generally of the following components:

- inputs [IN], which include all production factors in a production system,
- outputs [OUT], which include all elements leaving the system,
- the process of transformation [T] occurring in the system, in a result of which input elements are transformed into output elements, i.e. products.
- function (purpose) or the task providing a basis for its existence,
- the environment, which substantially affect the system,
- supply, i.e. material, power and information couplings,
- disturbances affecting each element of the system. Generally they are unknown inputs to the system with unknown values [10]. Considering their unforeseeable nature, they have a random character. The extent to which disturbances affect the degree of fulfilment of the requirements for the system will mean the system unreliability level.
- system management process.

One of the basic problems in the analysis of production systems is their adequate decomposition into components. A manner of decomposition should depend on the goal of an analysis of a production system. For that purpose, a production structure can be used, because of its universal nature, the possibility of adapting it to various process decompositions, and comprehensive depiction of the production process.

Production process specificity is affected, apart from the aforementioned elements, also by individual parameters. There are many different measures available in the literature, which

raturze istnieje szereg różnych miar służących do oceny funkcjonowania systemów produkcyjnych. Jednak obecnie, niemal powszechnie, w krajach wysoko rozwiniętych przemysłowo za jedno z podstawowych kryteriów oceny funkcjonowania systemów produkcyjnych uważa się produktywność [7]. Produktywność systemu produkcyjnego określa stosunek wektorów wyjścia do wektorów wejścia, tzn. stosunek wyników działań produkcyjnych do zużytych na ten cel nakładów.

### 3. niezawodność i ryzyko jako cecha systemu produkcyjnego

Zagadnienia niezawodności to tradycyjnie problemy związane z funkcjonowaniem obiektów technicznych i termin ten bardzo rzadko odnosi się do systemów gospodarczych lub ekonomicznych. Natomiast w literaturze ekonomicznej występuje szerokie zainteresowanie ryzykiem. Ponieważ w myśl teorii systemów system może odnosić się zarówno do obiektów technicznych jak i ekonomicznych lub gospodarczych, to wydaje się zasadnym przeniesienie na grunt ekonomii ogólnej teorii niezawodności oraz zastosowanie jej w planowaniu i ocenie ryzyka.

Jedną z definicji niezawodności obiektów [1, 11 13, 14, 15] definiuje niezawodność jako „*zdolność obiektu do utrzymania się w stanie umożliwiającej wypełnienie wymaganych funkcji w danych warunkach i w danym przedziale czasu, przy założeniu, że są dostarczone wymagane środki zewnętrzne*”. Jednak teoria niezawodności rozpatruje stany 0/1, to jest działania czy też braku działania. Takie podejście odnosi się do obiektów technicznych, jednak nie nadaje się do opisu obiektów biotechnicznych czy też systemów eksploatacyjnych, a więc i systemów produkcyjnych. Fakty te doprowadziły do powstania tzw. „ogólnej teorii niezawodności”.

Ogólna teoria niezawodności inaczej jak teoria klasyczna definiuje niezawodność obiektu. „Obiektem niezawodnym jest taki obiekt, który działa zgodnie z intencjami użytkownika, natomiast obiektem zawodnym dla użytkownika jest każdy obiekt, który funkcjonuje (działa) niezgodnie z intencjami użytkownika” [11]. Specyfika dzisiejszych systemów produkcyjnych, a w szczególności ich złożoność, pozwala je traktować jako systemy eksploatacyjne i wówczas niezawodność jest jedną z ich cech mierzonych poprzez stopień realizacji wyznaczonych wskaźników, parametrów i charakterystyk. Wobec powyższego niezawodność systemów produkcyjnych można wyznaczać w bardzo elastyczny sposób, przyjmując, w zależności od potrzeb analizy, za „działanie zgodne z intencjami użytkownika” wielkość dowolnego wskaźnika, którym proces według „użytkownika” powinien się charakteryzować. Do najczęściej analizowanych wskaźników procesu produkcyjnego należą [7]: czas trwania procesu ( $t$ ), wydajność ( $W$ ), produktywność ( $P$ ).

Przeniesienie ogólnej teorii niezawodności na grunt systemów produkcyjnych może się odbyć poprzez potraktowanie zawodności ( $Z$ ) - przeciwieństwa niezawodności - jako synonimu ryzyka ( $R$ ) [1]:

$$R = Z \quad (1)$$

Tak zinterpretowane ryzyko (zawodność) systemu (np. produkcyjnego) będzie prawdopodobieństwem tego, że system nie będzie spełniał funkcji, dla których został zaprojektowany lub będzie oznaczać prawdopodobieństwo wystąpienia strat w tym systemie. Dla takiej interpretacji powinno być prawdziwe równanie:

$$N + Z = 1 \quad (2)$$

can be used for evaluating the functioning of production systems. However, at present, in highly developed countries, productivity is almost generally considered to be one of the basic criteria for evaluating the functioning of production systems [7]. Productivity of a production system is determined as the ratio of output vectors to input vectors, i.e. the ratio of the results of production activities to the outlays incurred for that purpose.

### 3. Reliability and risk as features of a production system

The questions of reliability traditionally concern problems connected with functioning of technical objects, and this term is very rarely used in relation to economic systems. On the other hand, in the economics literature, there is a considerable interest in the subject of risk. Since, according to the systems theory, the term “system” can refer both to technical and economic objects, it seems to be justified to transpose the general reliability theory to the sphere of economics and its use in risk planning and evaluation.

One of the definitions of object reliability [1, 11 13, 14, 15] defines the reliability as “*the ability of an object to remain in a state, which enables performing required functions under given conditions and within a specified time interval, under the assumption that the required external resources are supplied*”. However, the reliability theory considers 0/1 states, i.e. operation or non-operation. This approach relates to technical objects, but is not suitable for describing bio-technical objects or operation systems, and thus also production systems. These facts gave rise to so called “general reliability theory”.

The general reliability theory defines reliability of an object differently from the classical theory. “A reliable object is an object, which functions in accordance with user’s intentions, while an unreliable object is each object, which functions inconsistently with user’s intentions” [11]. Specificity of today’s production systems and, in particular, their complexity, allows treating them as operation systems, and then the reliability is one of their features measured by the extent of realization of determined indicators, parameters and characteristics. In the face of the above, reliability of production systems can be determined in a very flexible way, assuming that a value of any indicator characterizing the process according to the user constitutes “functioning consistent with user’s intentions”, depending on the needs of an analysis. The most frequently analysed indicators of a production process include [7]: duration ( $t$ ), efficiency ( $W$ ) and productivity ( $P$ ).

Transposition of the general reliability theory to the sphere of production systems can take place by treating unreliability ( $Z$ ) – the opposite of reliability – as a synonym of risk ( $R$ ) [1]:

$$R = Z \quad (1)$$

So interpreted risk (unreliability) of a system (e.g. production system) will constitute the probability that the system will not perform the functions, for which it has been designed, or the probability of losses occurring in the system. For this interpretation, the following equation should be true:

$$N + Z = 1 \quad (2)$$

Równanie to oznacza, że prawdopodobieństwo tego, że system jest w stanie niezawodności lub zawodności wynosi 1. Wobec powyższego prawdziwe jest również:

$$N + R = 1 \text{ a stąd} \quad (3)$$

$$R = 1 - N \quad (4)$$

Analiza i ocena ryzyka pozwoli więc na określenie niezawodności funkcjonowania systemu i odwrotnie. Podejście niezawodnościowe w planowaniu i ocenie ryzyka, pomimo że daje więcej możliwości, to nie lokalizuje czynników ryzyka w systemie. Rozwiązaniem tego może być analiza struktury systemu produkcyjnego w kontekście jego struktury niezawodnościowej.

#### 4. Struktura niezawodnościowa systemów

Na zawodność (ryzyko) lub na niezawodność systemu wpływa również jego struktura, określająca związek stanu niezawodności systemu ze stanem niezawodności jego obiektów [1]. Analiza struktury niezawodnościowej systemu powinna być poprzedzona podziałem systemu na poszczególne części składowe – dekompozycją systemu, odzwierciedlającą powiązania logiczne w systemie tak, aby poszczególne jego części były niezależne statystycznie i możliwie jak największe. W niniejszym artykule zostanie zaprezentowana jedynie częściowo struktura równoległa z nadmiarami i tzw. produkcyjna struktura równoległa. Struktury szeregowe zostały opisane m.in. w pracach [3, 4].

##### 4.1. Struktura równoległa z nadmiarami

Według teorii klasycznej, niezawodność systemu o strukturze równoległej charakteryzuje się tym, że system jest w stanie zdadności, jeżeli co najmniej jeden z jego obiektów jest w stanie zdadności [1], co oznacza, że do funkcjonowania systemu o strukturze równoległej wystarcza poprawne funkcjonowanie jednego jego elementu. Niezawodność takiego układu wzrasta przy zwiększaniu liczby obiektów równoległe sprzężonych.

W praktyce produkcyjnej występują struktury równoległe, jednak charakter procesu produkcyjnego nie pozwala na taką interpretację struktury niezawodnościowej. Klasyczna teoria niezawodności rozpatruje stany 0/1 urządzeń technicznych. Oznacza to, że system produkcyjny byłby uznany za niezawodny, jeśli choćby jeden element funkcjonowałby poprawnie. W systemach produkcyjnych taka sytuacja występuje jedynie w tzw. systemach z rezerwą, czyli z nadmiarem elementów funkcjonujących w systemie. W rzeczywistości systemy z rezerwą występuje bardzo rzadko, gdyż nadmiar elementów (np. maszyn, pracowników, środków transportu, itd.) oznacza niewykorzystane zasoby, co pociąga za sobą wzrost kosztów. Przykład produkcyjnej struktury równoległej z nadmiarami na poziomie komórki produkcyjnej przedstawia rysunek 2b.

Niezawodność systemu ( $N_s$ ) przedstawionego na rysunku 2a będzie określana wzorem [14]:

$$N_s = 1 - [(1 - N_1)(1 - N_2)...(1 - N_n)] \quad (5)$$

gdzie  $N_1, N_2, N_n$  - niezawodność poszczególnych obiektów/podsystemów systemu.

Ryzyko całkowite systemu o strukturze równoległej z nadmiarami ( $R_c^{SRN}$ ) można wyznaczyć na podstawie wzorów (4) oraz (5):

$$R_c^{SRN} = R_1 R_2 \dots R_n = \prod_{i=1}^n R_i \quad (6)$$

This equation means that the probability that the system is in the state of reliability or unreliability is 1. In the face of the above, the following equations are also true:

$$N + R = 1 \text{ a stąd} \quad (3)$$

$$R = 1 - N \quad (4)$$

Analysis and evaluation of risk will allow determining reliability of system functioning and vice versa. Despite the fact that the reliability approach in risk planning and evaluation offers more possibilities, it does not locate the risk factors in the system. Analysing the structure of a production system in the context of its reliability structure may provide a solution to this problem.

#### 4. Reliability structure of systems

The structure of the system, which determines the relation between the state of reliability of the system and the state of reliability of its objects [1], also affects the unreliability or reliability of the system. The analysis of the reliability structure of a system should be preceded by dividing the system into individual components – the system decomposition, which should reflect the logical connections in the system in such a way that its individual parts are statistically independent and possibly the biggest. In this paper, a parallel structure with surpluses and so-called parallel structure of production will be presented only partially. Serial structures have been described, inter alia, in [3, 4].

##### 4.1. Parallel structure with redundancies

According to the classical theory, the definition of the reliability of a system with a parallel structure says that the system is fit for operation, if at least one of its objects is fit for operation [1], which means that correct functioning of one element of the system is sufficient for functioning of the system with parallel structure. Reliability of such an arrangement grows along with an increase in the number of the objects coupled in parallel.

In the production practice, there occur parallel structures, however the nature of a production process does not allow for such interpretation of the reliable structure. The classical theory of reliability considers 0/1 states of technical equipment. This means that a production system would be recognized as reliable, if at least one element functioned correctly. In production systems, such a situation occurs only in so-called redundant systems, i.e. with a surplus of elements functioning in the system. In reality, redundant systems occur very rarely, because surplus of elements (e.g. machines, workers, means of transport, etc.) means unused resources, which results in increased costs. Fig. 2b shows an example of a parallel structure with redundancies at the level of a production cell.

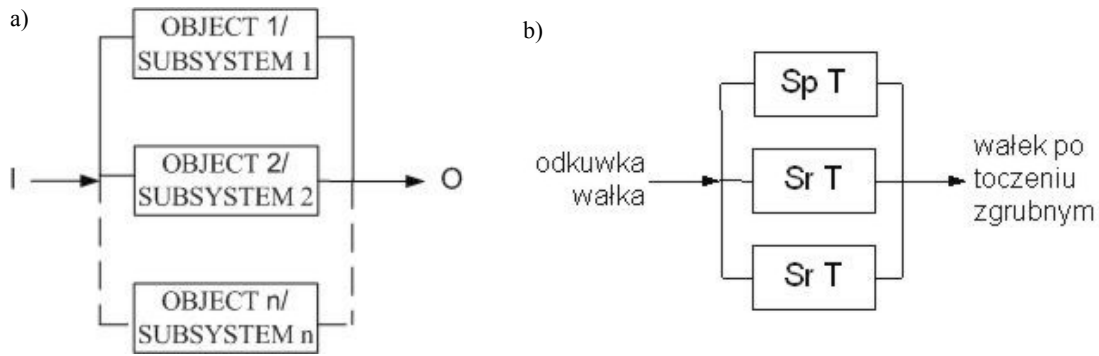
Reliability of the system ( $N_s$ ) presented in Fig. 2a will be determined by the formula [14]:

$$N_s = 1 - [(1 - N_1)(1 - N_2)...(1 - N_n)] \quad (5)$$

where  $N_1, N_2, N_n$  - reliability of individual objects/subsystems of the system.

The total risk of a system with a parallel structure with redundancies ( $R_c^{SRN}$ ) can be determined with the formulas (4) and (5):

$$R_c^{SRN} = R_1 R_2 \dots R_n = \prod_{i=1}^n R_i \quad (6)$$



Rys. 2. a) Schemat systemu z n obiektami/ podsystemami połączonymi równolegle; b) Przykład szeregowej struktury niezawodnościowej z nadmiarami systemu produkcyjnego: Sp T – stanowisko pracujące tokarka, Sr T – stanowisko rezerwowe tokarka

Fig. 2. a) Flow chart presenting a system with n objects/subsystems connected in parallel; b) An example of serial reliability structure with redundancies: Sp T – operating workstation - lathe, Sr T – redundant workstation - lathe

gdzie  $R_1, R_2, R_n$  - ryzyko występujące w poszczególnych obiektach/ podsystemach systemu.

Poszczególne ryzyka  $R_i$  dla systemu o strukturze równoległej z nadmiarami i  $n$  obszarach będą wynosić:

$$R_1 = \frac{S_1}{W_{teoret}} \quad (7)$$

$$R_2 = \frac{S_2}{W_{teoret}} \quad (8)$$

$$R_n = \frac{S_n}{W_{teoret}} \quad (9)$$

gdzie  $S_i$  – oznacza stratę w  $i$ -tym obszarze spowodowaną wystąpieniem czynnika ryzyka  $r_i$ .  $W_{teoret}$  – maksymalna wartość wybranego wskaźnika teoretycznie możliwa do osiągnięcia (np. teoretyczna wydajność maszyny).

Straty  $S_i$  w poszczególnych obszarach zależą od strat czasów ( $\Delta t_i$ ) spowodowanych wydłużeniem czasu trwania procesu produkcyjnego z uwagi na występujące w tych obszarach czynniki ryzyka. Inaczej mówiąc system produkcyjny zrealizuje postawiony cel, lecz będzie potrzebował na jego realizację więcej czasu. Wówczas straty na celu mierzalnym systemu produkcyjnego będą przedstawiać się następująco:

$$S_1 = W_{teoret} \frac{\Delta t_1}{T} \quad (10)$$

$$S_2 = W_{teoret} \frac{\Delta t_2}{T} \quad (11)$$

$$S_n = W_{teoret} \frac{\Delta t_n}{T} \quad (12)$$

gdzie  $T$  – założony okres reprezentatywny.

Zatem **ryzyko całkowite**  $R_C^{SRN}$  dla systemu o  $n$  obszarach i strukturze równoległej z nadmiarami będzie wynosić:

$$R_C^{SRN} = \frac{\Delta t_1}{T} \frac{\Delta t_2}{T} \dots \frac{\Delta t_n}{T} \quad (13)$$

Ponieważ, jak wspomniano wcześniej, systemy produkcyjne z rezerwą w praktyce produkcyjnej występują niezmiernie rzadko, to w niniejszej pracy proponuje się inny sposób inter-

where  $R_1, R_2, R_n$  - the risk occurring in individual objects/subsystems of the system.

Individual risks  $R_i$  for a system with a parallel structure with redundancies and  $n$  areas will be:

$$R_1 = \frac{S_1}{W_{teoret}} \quad (7)$$

$$R_2 = \frac{S_2}{W_{teoret}} \quad (8)$$

$$R_n = \frac{S_n}{W_{teoret}} \quad (9)$$

where  $S_i$  – means a loss at the area  $i$  caused by occurrence of the risk factor  $r_i$ .  $W_{teoret}$  – maximum value a selected indicator, which can be attained in theory (for example, theoretical capacity of a machine).

Losses  $S_i$  in individual areas depend on time losses ( $\Delta t_i$ ) caused by extension of the duration of the production process resulting from the risk factors occurring in these areas. In other words, a production system will realize the defined goal, but it will need more time to realize it. Then, the losses on a measurable goal of a production system will be as follows:

$$S_1 = W_{teoret} \frac{\Delta t_1}{T} \quad (10)$$

$$S_2 = W_{teoret} \frac{\Delta t_2}{T} \quad (11)$$

$$S_n = W_{teoret} \frac{\Delta t_n}{T} \quad (12)$$

where  $T$  – assumed representative period,

So, the **total risk**  $R_C^{SRN}$  for a system with  $n$  areas and a parallel structure with redundancies will be:

$$R_C^{SRN} = \frac{\Delta t_1}{T} \frac{\Delta t_2}{T} \dots \frac{\Delta t_n}{T} \quad (13)$$

Because, as it was mentioned earlier, production systems with redundancy occur in the production practice very rarely, a different way of interpreting and determining the risk for so-

pretacji i określania ryzyka dla tzw. **produkcyjnych struktur równoległych**.

4.2. Produkcyjna struktura równoległa

Dla struktury  $n$ -elementowej systemu produkcyjnego przedstawionego na rysunku 2a, ryzyko zawodności jednego elementu  $R_i$  powinno zwiększyć ryzyko całkowite  $R_C^{PSR}$  układu o wartość  $R_i$ . Zatem ryzyko całkowite powinno być sumą ryzyk poszczególnych elementów układu:

$$R_C^{PSR} = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \sum_{i=1}^n R_i \quad (14)$$

gdzie  $R_1, R_2, R_n$  - ryzyko występujące w poszczególnych obiektach/ podsystemach systemu. Jeżeli  $\sum R_i > 1$  to wówczas  $R_1 = R_i / R_C^{PSR}, R_2 = R_j / R_C^{PSR}, R_n = R_n / R_C^{PSR}$ .

Przyjmując te same oznaczenia, co wcześniej, poszczególne ryzyka  $R_i$  dla  $n$  obszarów, w zależności od wielkości strat  $S_i$  poniesionych w tych obszarach, będą wynosić:

$$R_1 = \frac{S_1}{W_{teoret}} \quad (15)$$

$$R_2 = \frac{S_2}{W_{teoret}} \quad (16)$$

$$R_n = \frac{S_n}{W_{teoret}} \quad (17)$$

W przypadku, gdy wyróżnione obszary różnią się między sobą, istnieje konieczność, przy tego typu strukturze, wyznaczenia maksymalnej wartości wskaźnika możliwego do uzyskania w analizowanym systemie technicznym -  $W_{teoret}$  dla każdego z obszarów. Wyznaczając wartości  $W_{teoret}$  dla każdego z wyróżnionych  $n$  obszarów, poszczególne straty  $S_i$  w tych obszarach, zależnie od strat czasów powodowanych występowaniem czynnikami ryzyka w poszczególnych obszarach, będą wynosić:

$$S_1 = W_{teoret}^1 \frac{\Delta t_1}{T} \quad (18)$$

$$S_2 = W_{teoret}^2 \frac{\Delta t_2}{T} \quad (19)$$

$$S_n = W_{teoret}^n \frac{\Delta t_n}{T} \quad (20)$$

gdzie:  $W_{teoret}$  - oznacza wartość teoretyczną wskaźnika w poszczególnych obszarach zdekomponowanego systemu.

Zatem **ryzyko całkowite**  $R_C^{PSR}$  dla systemu o  $n$  obszarach i produkcyjnej strukturze równoległej będzie wynosić:

$$R_C^{PSR} = \frac{W_{teoret}^1 \Delta t_1 + W_{teoret}^2 \Delta t_2 + \dots + W_{teoret}^n \Delta t_n}{W_{teoret} T} \quad (21)$$

W przypadku, gdy wyróżnione obszary systemu są takie same i charakteryzują się tą samą wartością  $W_{teoret}$  czyli:

$$W_{teoret}^1 = W_{teoret}^2 = \dots = W_{teoret}^n = \frac{W_{teoret}}{n} \quad (22)$$

wówczas wzór na ryzyko całkowite takiego układu przyjmie postać:

called **parallel structures of production** was proposed in this study.

4.2. Parallel structure of production

For the  $n$ -element structure of the production system shown in Fig. 2a, the risk of unreliability of one element  $R_i$  should increase the total risk  $R_C^{PSR}$  of the system by the value  $R_i$ . So, the total risk should be the sum of risks of individual system elements:

$$R_C^{PSR} = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \sum_{i=1}^n R_i \quad (14)$$

where  $R_1, R_2, R_n$  - the risk occurring in individual objects/subsystems of the system. If  $\sum R_i > 1$ , then  $R_1 = R_i / R_C^{PSR}, R_2 = R_j / R_C^{PSR}, R_n = R_n / R_C^{PSR}$ .

Using the same designations as before, individual risks  $R_i$  for  $n$  areas, depending on the amount of losses  $S_i$  incurred in these areas, will be as follows:

$$R_1 = \frac{S_1}{W_{teoret}} \quad (15)$$

$$R_2 = \frac{S_2}{W_{teoret}} \quad (16)$$

$$R_n = \frac{S_n}{W_{teoret}} \quad (17)$$

If the areas differ from each other, it is necessary, in case of such a type of structure, to determine the maximum value of the indicator attainable in the analysed technical system -  $W_{teoret}$  for each area. When determining the values of  $W_{teoret}$  for each of the  $n$  examined areas, individual losses  $S_i$  in these areas, depending on the time losses caused by occurrence of risk factors in individual areas, will be as follows:

$$S_1 = W_{teoret}^1 \frac{\Delta t_1}{T} \quad (18)$$

$$S_2 = W_{teoret}^2 \frac{\Delta t_2}{T} \quad (19)$$

$$S_n = W_{teoret}^n \frac{\Delta t_n}{T} \quad (20)$$

where:  $W_{teoret}$  - means theoretical value of an indicator in individual areas of the decomposed system.

So, the total risk  $R_C^{PSR}$  for a system with  $n$  areas and parallel structure of production will be as follows:

$$R_C^{PSR} = \frac{W_{teoret}^1 \Delta t_1 + W_{teoret}^2 \Delta t_2 + \dots + W_{teoret}^n \Delta t_n}{W_{teoret} T} \quad (21)$$

If examined areas of the system are identical and are characterized by the same value of  $W_{teoret}$  that is:

$$W_{teoret}^1 = W_{teoret}^2 = \dots = W_{teoret}^n = \frac{W_{teoret}}{n} \quad (22)$$

then the formula for the total risk of such a system will take the following form:

$$R_C^{PSR} = \frac{1}{nT} \sum_{i=1}^n \Delta t_i \quad (23)$$

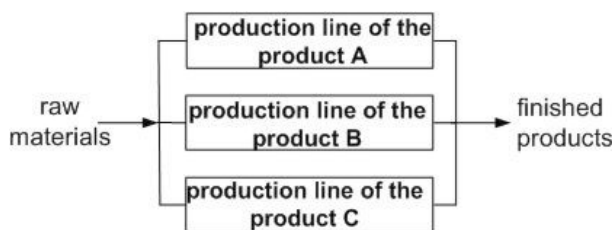
Przykładem produkcyjnej struktury równoległej może być struktura systemu produkcyjnego przedstawiona na rysunku 3.

Wzór na ryzyko dla systemu z rysunku 3, zgodnie ze wzorem (14) będzie następujący:

$$R_C^{PSR} = R_{lpwA} + R_{lpwB} + R_{lpwC} = \sum_1^3 R_{lpwi} \quad (24)$$

gdzie  $lpwA$ ,  $lpwB$ ,  $lpwC$  - poszczególne linie produkcyjne wyrobu.

W niniejszym artykule zostanie zaprezentowany przykład wyznaczenia wielkości ryzyka dla produkcyjnej struktury równoległej. Przykłady wyznaczenia ryzyka dla struktur szeregowych można spotkać m.in. w pracach [3, 4].



Rys. 3. Przykład produkcyjnej struktury równoległej

Fig. 3. An example of the parallel structure of production

$$R_C^{PSR} = \frac{1}{nT} \sum_{i=1}^n \Delta t_i \quad (23)$$

An example of the parallel structure of production can be the structure of the production system presented in Fig. 3.

In accordance with the formula (14), the formula for the risk of the system from Fig. 3, will be as follows:

$$R_C^{PSR} = R_{lpwA} + R_{lpwB} + R_{lpwC} = \sum_1^3 R_{lpwi} \quad (24)$$

where  $lpwA$ ,  $lpwB$ ,  $lpwC$  - individual production lines of a product.

An example of determining the value of risk for a parallel structure of production will be presented in this paper. Examples of determining the risk for a serial structure can be found, inter alia, in [3, 4].

## 5. Przykład wyznaczenia wielkości ryzyka dla systemu produkcyjnego o produkcyjnej strukturze równoległej

Za przykład do wyznaczenia wielkości ryzyka dla produkcyjnej struktury równoległej, posłużył trzeci etap projektu zrealizowanego we wrocławskim oddziale międzynarodowego koncernu. Oddział ten jest trzecim co do wielkości w koncernie i zajmuje się produkcją lokomotyw elektrycznych, wagonów towarowych, wagonów pasażerskich, pociągów regionalnych, tramwajów i wagonów metra.

### 5.1. Warunki realizacji projektu

Z uwagi na dużą ilość zadań wyznaczonych do realizacji całość projektu, podzielono na trzy części. Wyniki części wcześniejszych stanowiły dane wejściowe do części następnych.

Głównym celem projektu była weryfikacja założonych zdolności produkcyjnych. Potrzeba przeprowadzenia weryfikacji spowodowana była zmianą programu i profilu produkcji w związku z programem restrukturyzacji i dostosowania zakładu do wymogów koncernu. Program restrukturyzacji zakładał zwiększenie zdolności produkcyjnych z 400 do 1700 sztuk ram rocznie. Dodatkowo zaplanowano uruchomienie produkcji 7-miu nowych produktów. W sumie produkowanych miało być 11 wyrobów na 10-ciu liniach produkcyjnych. Specyfika produkcji, związana z czasochłonnością przebrojeń, wymagała określenia możliwości zamienności oprzyrządowania dla dodatkowego wyrobu.

Rysunek 4 przedstawia sposób realizacji poszczególnych części projektu, oraz zadania wyznaczone do realizacji w poszczególnych jego częściach.

Z uwagi na potrzebę kompleksowej analizy problemu oraz jego złożoność, w realizacji projektu niezbędne było zastosowanie informatycznych narzędzi do symulacji systemów produkcyjnych. Różna specyfika części projektu oraz mnogość analizowanych w nich zagadnień spowodowały, że do realizacji części 1 i 2 wykorzystano pakiet symulacyjny ProModel 2002, a w części 3 pakiet iGrafx 2003 for Six Sigma.

## 5. Example of determining the value of risk for a production system with a parallel structure of production

The third stage of the project carried out in the Wrocław division of an international corporation served as an example of determining the value of risk for a parallel structure of production. This Division is the third largest division within the corporation and it deals with production of electric locomotives, freight cars and subway cars.

### 5.1. Conditions of project implementation

Considering a large number of tasks assigned for realization, the whole project has been divided into three parts. The results of the previous parts were used as input data for next parts.

The main goal of the project was verification of the assumed production capacities. The need for performing the verification was caused by a change in the production program and profile in connection with a program restructuring and adapting the factory to the requirements of the corporation. The restructuring program assumed an increase in the production capacities from 400 to 1700 pcs of frames a year. Additionally, it was planned to launch production of 7 new products. In total, 11 products were to be manufactured on 10 production lines. Specificity of the production, connected with time-consuming changeovers, required determining the replaceability of tooling for an additional product.

Considering the need of a comprehensive analysis of the problem and its complexity, it was necessary during implementation of the project to use IT tools for simulating the production systems. Different character of project parts and a multitude of problems analysed within these parts caused that ProModel 2002 simulation package was used for implementation of Parts 1 and 2, while for Part 3 - the iGrafx 2003 for Six Sigma package.

Produkcja poszczególnych typów ram odbywa się na wydzielonych liniach produkcyjnych (nawach). W trakcie procesu wyroby lub ich elementy składowe kilkakrotnie wywożone są na zewnątrz hali na operacje zewnętrzne lub do kooperacji. Transport elementów wewnątrz naw odbywa się za pomocą suwnic, a poza nimi za pomocą wózków.

Wejścia do systemu produkcyjnego stanowią m.in. zamówienia klienta, blachy i komponenty dostarczane od dostawców blach i kooperantów, wyjściami są natomiast wyroby gotowe, poddawane kontroli jakości.

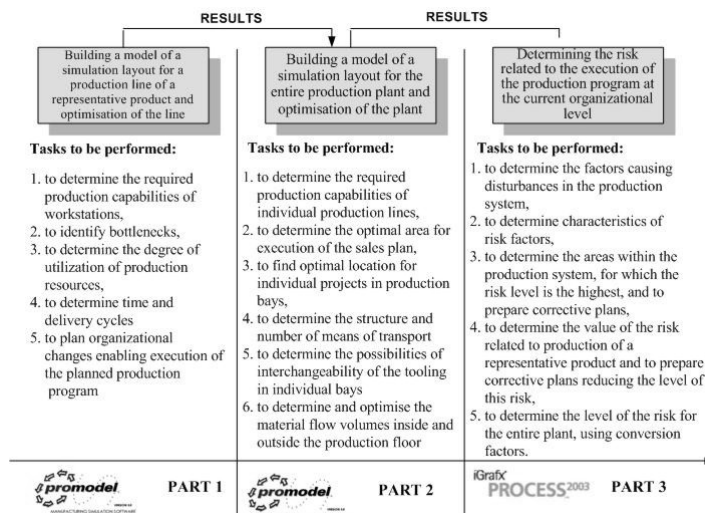
Dużym utrudnieniem była konieczność analizy procesów produkcyjnych 11 różnych wyrobów. W przypadku 7 wyrobów planowanych do uruchomienia, w momencie rozpoczęcia realizacji projektu nie była ich znana technologia. Ponieważ jednak, zarówno technologia, jak i organizacja wszystkich procesów produkcyjnych w zakładzie jest podobna, postanowiono przeprowadzić analizę dla wyrobu reprezentatywnego, a w przypadku pozostałych wyrobów zastosować tzw. współczynniki przeliczeniowe. Współczynniki te określają podobieństwo konstrukcyjno-technologiczne w stosunku do projektu znanego i uważanego za reprezentatywny. Tabela 1 przedstawia założenia planu sprzedaży na 2005 rok, potrzebne wydajności do jego realizacji oraz przyjęte współczynniki przeliczeniowe [5].

Ponieważ wszystkie procesy produkcyjne przedsiębiorstwa przebiegają w sposób analogiczny w stosunku do wyrobu reprezentatywnego, przyjęto, że w pozostałych procesach występują te same czynniki ryzyka.

## 5.2. Sposób wyznaczenia wielkości ryzyka dla systemu produkcyjnego o produkcyjnej strukturze równoległej

Na podstawie wyników symulacji części 2 projektu oraz przyjętych kryteriów optymalizacyjnych, ustalono najkorzystniejsze przypisanie projektów do naw produkcyjnych, pokazane na rysunku 5a). W związku z przyjętym poziomem analizy oraz w celu wyznaczenia wyrobu o największym ryzyku, dekompozycja systemu produkcyjnego całego zakładu powinna zostać przeprowadzona na poszczególne linie produkcyjne. Do funkcjonowania systemu produkcyjnego całego zakładu nie jest konieczne funkcjonowanie wszystkich jego obszarów. Nie można jednak poprawnego funkcjonowania jednego obszaru uznać za poprawne funkcjonowanie całego systemu. Ryzyko zawodności jednego z obszarów powinno przekładać się na wzrost ryzyka zawodności całego systemu, dokładnie o wartość ryzyka w tym obszarze. Dlatego ustalono, że struktura niezawodnościowa całego zakładu będzie **produkcyjną strukturą równoległą** i przedstawiono ją na rysunku 5b).

W związku z tym, że ustalając cel dla systemu produkcyjnego, należy brać pod uwagę nie ilości wynikające z planu



Rys. 4. Części projektu oraz zadania wyznaczone do realizacji

Fig. 4. Parts of the project and tasks assigned for execution

Production of individual types of frames takes place in separated production lines (bays). In the course of the process, products or their components are several times taken away from the production building for external operations or to cooperating partners. Transport of elements inside the bays takes place with the use of overhead cranes and industrial trucks.

Inputs to the production system include, among other things, customer's orders, metal sheets, and components delivered by suppliers of metal sheets and cooperating partners,

whereas inputs include finished products submitted to quality control.

The necessity of analysing production processes of 11 different products was a considerable difficulty. In case of 7 new products planned for production, the technology of their production was not known at the beginning of project implementation. However, as both the production technology and organization of all production processes in the plant are similar, it was decided to perform the analysis for a representative product and to apply so called conversion factors in relation to other products. These factors determine the constructional and technological similarity in relation to the design, which is known and is deemed to be representative. Table 1 presents assumptions for the sales plan for 2005, production capacities necessary for its execution, and accepted conversion factors [5].

As all production processes in the company are similar to the process of the representative product, it has been assumed that the same risk factors occur also in other processes.

## 5.2. A method of determining the value of risk for a production system with a parallel structure of production

Basing on the results obtained from the simulation of Part 2 of the project and the accepted optimisation criteria, the most favourable assignment of projects to production bays was determined (shown in Fig. 5a). In connection with the accepted level of the analysis, and for the purpose of determining the product with the highest risk, the production system of the entire plant should be decomposed into individual production lines. For functioning of the production system in the whole plant, functioning of all its areas is not a necessary condition. However, correct functioning of one area cannot be regarded as correct functioning of the whole system. The risk of unreliability of one area should translate into an increase in the risk of unreliability of the whole system, exactly by the value of the risk in this area. Therefore, it has been established that the reliability structure of the whole plant will be a **parallel structure of production** (presented in Fig. 5b).

So, when setting a goal for a production system, there should be considered the theoretically attainable production capa-



Tab. 1. Założony plan sprzedaży oraz przyjęta technologia [5]  
 Tab. 1. The established sales plan and accepted production technology [5]

Lp. Item	Nazwy projektów Project name	Ilości Quantity	Wydajność [szt./tydz.] Production capacity [pcs/week]	Współczynniki przeliczeniowe Conversion factors
<b>Ramy lokomotywowe / Locomotive frames</b>		<b>300</b>		
1	Projekt BR 185	100	2,6	1,7 x wyrób reprezentatywny 1.7 x representative product
2	Projekt Blue Tiger	50	1,3	1,9 x wyrób reprezentatywny 1.9 x representative product
3	Projekt ICE	150	3,8	1,6 x wyrób reprezentatywny 1.6 x representative product
<b>Ramy regionalne / Frames - regional</b>		<b>900</b>		
1	Projekt MD 523	400	10	wyrób reprezentatywny the representative product
2	Projekt Goerlitz	300	7,6	1,4 x wyrób reprezentatywny 1.4 x representative product
3	Projekt BR 481	200	5,1	1,2 x wyrób reprezentatywny 1.2 x representative product
<b>Ramy tramwajowe / Tram frames</b>		<b>300</b>		
1	Projekt Cityrunner	100	2,6	1,1 x wyrób reprezentatywny 1.1 x representative product
2	Tramwaj 1	100	2,6	1,1 x wyrób reprezentatywny 1.1 x representative product
3	Tramwaj 2	100	2,6	1,1 x wyrób reprezentatywny 1.1 x representative product
<b>Mml komponenty belki + czopy Mml components: beams + pivots</b>		<b>200</b>		
1	Planowany 1	100	10	0,4 x wyrób reprezentatywny 0.4 x representative product
2	Planowany 2	100	10	0,4 x wyrób reprezentatywny 0.4 x representative product
		<b>Σ 1700</b>		

sprzedaży lecz wartości wydajności teoretycznie możliwe do osiągnięcia. Dla systemów produkcyjnych wartość teoretyczna ograniczona jest jedynie możliwościami technologicznymi [6,16]. Dlatego, biorąc pod uwagę jedynie czasy technologiczne i transportu, przy założeniu pełnej niezawodności systemu, dostępności zasobów i 100% obciążenia linii produkcyjnych, za cel ( $W_{teoret}$ ) przyjęto teoretycznie możliwą do osiągnięcia wydajność dla poszczególnych linii i przedstawiono ją w tabeli 2.

W celu wyznaczenia wielkości, częstotliwości pojawiania się oraz podstawowych charakterystyk poszczególnych czynników ryzyka w okresie trzech miesięcy (styczeń – marzec) przeprowadzono bezpośrednią obserwację i pomiar czasów technologicznych procesu produkcyjnego. Ponieważ czynniki ryzyka mają charakter losowy, a okres przeprowadzanych obserwacji dostarczył reprezentatywnego zbioru danych, przyjęto ten okres za reprezentatywny dla wyznaczenia charakterystyk czynników ryzyka [10]. Roczny fundusz czasu pracy dla zakładu wynosi 46 tygodni, dla  $T=3$  miesiące = 12 tygodni.

Tabela 3 przedstawia dane potrzebne do wyznaczenia ryzyka całkowitego  $R_C^{PSR}$  całego zakładu.

Korzystając ze wzorów (18) do (20) wyznaczono wielkości strat w poszczególnych obszarach, będących odpowiednikami wyrobów. Znając wielkości strat na podstawie wzorów (15) do (17) można wyznaczyć ryzyka dla wyróżnionych obszarów. Otrzymane w ten sposób wielkości strat i ryzyka zbiorczo przedstawia tabela 4.

Poziomy ryzyka dla poszczególnych wyrobów przedstawiono na rysunku 6.

city, and not the quantities resulting from the sales plan. For production systems, the theoretical value is limited only by technological capabilities [6,16].

Therefore, taking into account only the times of production and transport, under the assumption that the system is fully reliable, resources are fully available, and the load of production lines is 100%, the theoretically attainable production capacity ( $W_{teoret}$ ) for individual lines was set as the goal and was presented in table 2.

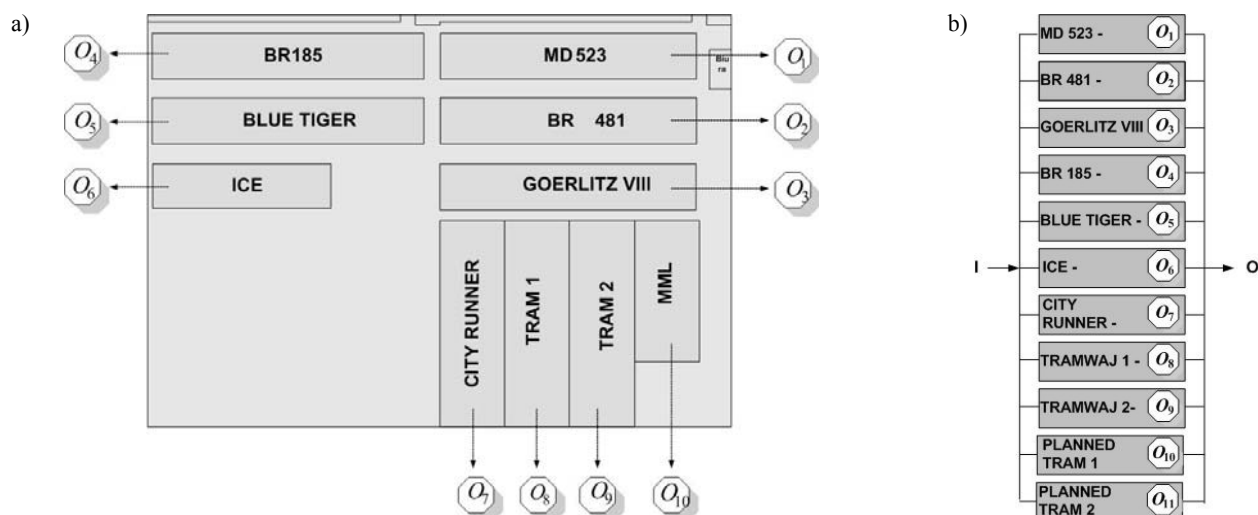
In order to determine the values and basic characteristics of individual risk factors and frequencies of their appearance in the period of three months (January-March), a direct observations and measurements of production times were performed.

Since risk factors are of random nature and the period of observations provided a representative set of data, this period was accepted as representative for determining characteristics of risk factors [10]. The annual pool of working time for the plant is 46 weeks, for  $T=3$  months = 12 weeks.

Table 3 presents the data needed for determining the total risk  $R_C^{PSR}$  of the whole plant.

Using the formulas (18) to (20), values of losses in individual areas, which are equivalent to products, were determined. Knowing the value of losses from the formulas (15) to (17), the risks for the examined areas can be determined. The values of losses and risks obtained in this way are shown collectively in Table 4.

The levels of risk for individual products are presented in Fig. 6.



Rys. 5a) Oznaczenia przyjęte dla obszarów systemu produkcyjnego całego zakładu, b) przyjęta produkcyjna struktura równoległa dla analizowanego zakładu

Fig. 5a) Designations accepted for areas of the production system of the whole plant, b) parallel structure of production assumed for the analysed plant

Tab. 2. Wydajność teoretyczna dla poszczególnych linii produkcyjnych – wartości celów  
Tab. 2. Theoretical capacity for individual production lines – values of goals

NAZWY PROJEKTÓW / PROJECT NAME	$W_{teoret} / rok$	$W_{teoret} / year$	$W_{teoret} / T$
Projekt BR 185		133	35
Projekt Blue Tiger		66	17
Projekt ICE		199	52
Projekt MD 523		530	138
Projekt Goerlitz VIII		398	104
Projekt BR 481		265	69
Projekt Cityrunner		133	35
Tramwaj 1		133	35
Tramwaj 2		133	35
Planowany 1		133	35
Planowany 2		133	35
$\Sigma$		2253	588

Tab. 3. Dane potrzebne w metodzie  
Tab. 3. Data required in the method

NAZWY PROJEKTÓW PROJECT NAME	$R_i$	Współcz. przelicz. Conversion factor	$W_{teoret} / 12tygodni$ $W_{teoret}^f / 12weeks$	$\Delta t_i$ , uwzględniająca współczynnik przeliczeniowy i planowane do produkcji liczby sztuk $\Delta t_i$ , taking into account the conversion factor and the quantity planned for production
Projekt BR 185	$R_4$	1,7	35	5,17
Projekt Blue Tiger	$R_5$	1,9	17	2,81
Projekt ICE	$R_6$	1,6	52	7,23
Projekt MD 523	$R_1$	1	138	12
Projekt Goerlitz VIII	$R_3$	1,4	104	12,66
Projekt BR 481	$R_2$	1,2	69	7,20
Projekt Cityrunner	$R_7$	1,1	35	3,35
Tramwaj 1	$R_8$	1,1	35	3,35
Tramwaj 2	$R_9$	1,1	35	3,35
Planowany 1	$R_0$	0,4	35	1,22
Planowany 2	$R_1$	0,4	35	1,22
$\Sigma$			588	

Tab. 4. Wielkości strat oraz ryzyka dla poszczególnych wyrobów  
 Tab. 4. Values of losses and risks for individual products

Nazwy projektów Project name	Oznaczenia obszarów Area designation	Straty [szt./12 tyg.] Losses [pcs/12 weeks]	Ryzyka Risks
Projekt BR 185	O <sub>4</sub>	10,61	0,018
Projekt Blue Tiger	O <sub>5</sub>	2,92	0,005
Projekt ICE	O <sub>6</sub>	22,35	0,038
Projekt MD 523	O <sub>1</sub>	99,1	0,168
Projekt Goerlitz	O <sub>3</sub>	78,23	0,133
Projekt BR 481	O <sub>2</sub>	29,73	0,051
Projekt Cityrunner	O <sub>7</sub>	6,86	0,012
Tramwaj 1	O <sub>8</sub>	6,86	0,012
Tramwaj 2	O <sub>9</sub>	6,86	0,012
Planowany 1	O <sub>10</sub>	2,5	0,004
Planowany 2	O <sub>11</sub>	2,5	0,004

Jak wynika z tabeli 4 oraz rysunku 6, największe ryzyko występuje w procesie produkcji wyrobu MD 523 oraz Goerlitz VIII. Spowodowane jest to założoną ilością produkcji tych wyrobów – ich produkcja stanowi 41% zaplanowanej wielkości produkcji. W kontekście całego zakładu ryzyko wyrobu reprezentatywnego zmienia się z 0,73 do 0,14. Spowodowane jest to zmianą wartości celu. Obecnie cel wyrobu reprezentatywnego rozpatrywany jest w kontekście części celu całego zakładu.

Przy obliczaniu ryzyka całkowitego dla całego zakładu  $R_C^{PSR}$  należy posłużyć się wzorem (21) lub (23). Wówczas ryzyko całkowite wynosi:

$$R_C^{PSR} = R_1 + R_2 + \dots + R_{11} = \sum_{i=1}^n R_i = 0,46 \quad (25)$$

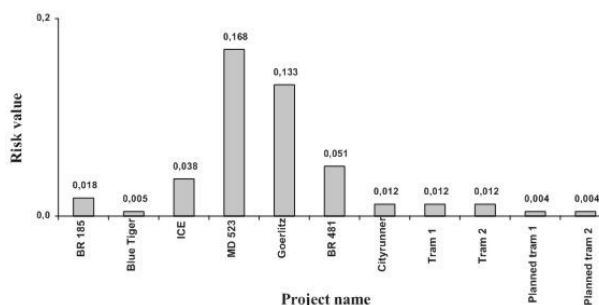
lub

$$R_C^{PSR} = \frac{W_{teoret}^1 \Delta t_1 + W_{teoret}^2 \Delta t_2 + \dots + W_{teoret}^{11} \Delta t_{11}}{W_{teoret} T} = 0,46 \quad (26)$$

Poziom ryzyka zakładu w stosunku do ryzyka wyrobu reprezentatywnego obniżył się. Spowodowane jest to specyfiką struktury niezawodnościowej opisywanej oraz wolnymi mocami produkcyjnymi na niektórych projektach, które powodują niwelację poziomu ryzyka.

Ponieważ procesy produkcyjne poszczególnych wyrobów są analogiczne w stosunku do wyrobu reprezentatywnego, to również poziomy ryzyka poszczególnych obszarów (etapów) systemu produkcyjnego powinny być analogiczne. Rysunek 7 przedstawia ryzyka poszczególnych projektów oraz poziomy ryzyka dla obszarów systemu produkcyjnego.

Wyniki przedstawione na rysunku pokazują, iż tak jak w przypadku wyrobu reprezentatywnego, największe ryzyko występuje w obszarze kontroli jakości, produkcji oraz kooperacji.



Rys. 6. Wielkości ryzyk poszczególnych wyrobów

Fig. 6. Value of risk for individual products

As it appears from Table 4 and Fig. 6, the highest risk occurs in the production process of MD 523 and Goerlitz VIII products. This is caused by the production volume assumed for these products – their production constitutes 41% of the planned production volume. In the context of the whole plant, the risk of the representative product varies from 0.73 to 0.14. This is caused by a change in the value of the goal. At present, the goal for the representative product is considered as a part of the goal for the whole plant.

When calculating the total risk for the whole plant  $R_C^{PSR}$ , the formula (21) or (23) should be used. Then the total risk will be:

$$R_C^{PSR} = R_1 + R_2 + \dots + R_{11} = \sum_{i=1}^n R_i = 0,46 \quad (25)$$

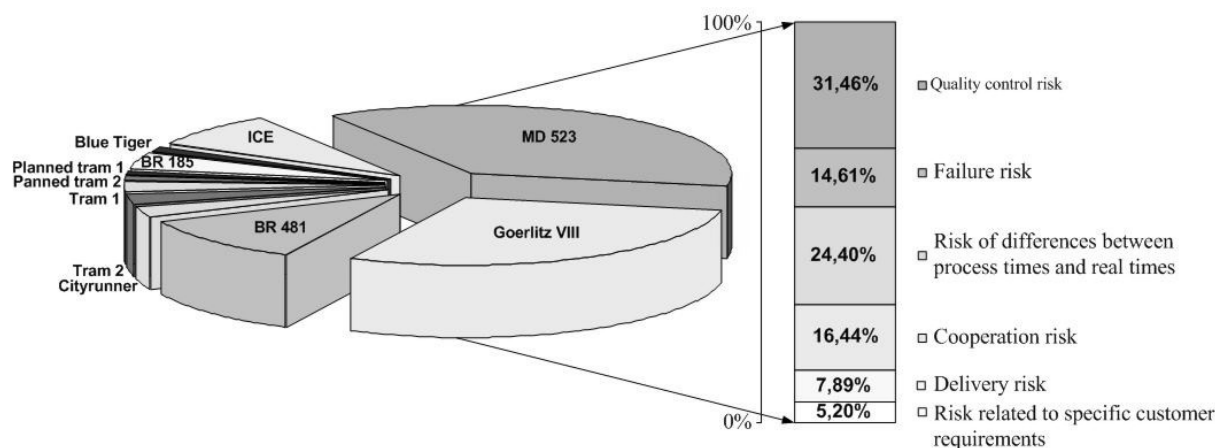
or

$$R_C^{PSR} = \frac{W_{teoret}^1 \Delta t_1 + W_{teoret}^2 \Delta t_2 + \dots + W_{teoret}^{11} \Delta t_{11}}{W_{teoret} T} = 0,46 \quad (26)$$

The level of the risk of the entire plant in relation to the risk of the representative product decreased. This is caused by specificity of the reliability structure and by free production capacities at certain projects, which result in lowering the risk level.

Because production processes of individual products are similar to the process of the representative product, also the risk levels of individual areas (stages) of the production system should be similar. Fig. 7 presents the risks of individual projects and the risk levels for areas of the production system.

The results presented in the diagram show that, as in the case of the representative product, the highest risk occurs in the quality control, production and cooperation areas.



Rys. 7. Procentowy udział ryzyka w rozbiściu na obszary systemu produkcyjnego

Fig. 7. Percentage share of the risk in a breakdown into areas of the production system

## 6. References

1. Bizon – Górecka J. Inżynieria niezawodności i ryzyka w zarządzaniu przedsiębiorstwem. Bydgoszcz: Oficyna Wydawnicza Ośrodka Postępu Organizacyjnego, 2001.
2. Bubnicki Z. Podstawy informatycznych systemów zarządzania. Wrocław: Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, 1993.
3. Chlebus E, Burduk A. Modelling and variant simulation in risk evaluation of starting-up production programme. Germany: 1st International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production, 2005.
4. Chlebus E, Burduk A. Application of modelling and variant simulation in analysis, design and risk estimation of manufacturing system. Advances in manufacturing technology. UK: Second International Conference on Manufacturing Research ICMR2004 incorporating the Twentieth National Conference on Manufacturing Research, 2004.
5. Chlebus E, Burduk A, Kowalski A, Chlebus T. Analiza i optymalizacja parku maszynowego ramy wózka wagonu towarowego typu MD 523 w przedsiębiorstwie Bombardier Transportation (Zakład Wózków Wrocław). Wrocław: Raporty Instytutu Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej, 2004.
6. Cichosz Piotr. Economic aspects of cutting with diamond-coated wire. Archives of Civil and Mechanical Engineering 2008; 4: 5-14.
7. Durlik I. Inżynieria zarządzania. Strategia i projektowanie systemów produkcyjnych. Część I. Warszawa: Agencja Wydawnicza Placet, 1995.
8. Erich A. Ryzyko gospodarcze - Encyklopedia organizacji i zarządzania. Warszawa: PWE, 1981.
9. Kiliński A. Ogólna teoria niezawodności. Warszawa: WNT, 1971.
10. Kobyliński L. System and risk approach to ship safety, with special emphasis of stability. Archives of Civil and Mechanical Engineering 2007; 4: 97-106.
11. Mięgdalski J. i Zespół. Inżynieria Niezawodności. Warszawa: Wydawnictwo ZETOM, 1992.
12. Nahotko S. Ryzyko ekonomiczne w działalności gospodarczej. Bydgoszcz: Oficyna Wydawnicza Ośrodka Postępu Organizacyjnego, 1997.
13. Nowakowski T. Metodyka prognozowania niezawodności obiektów mechanicznych. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Monografie nr 28, 1999.
14. PN-1078. Techniki analizy niezawodności. Metoda schematów blokowych niezawodności.
15. PN-80/N-0400. Niezawodność w technice. Terminologia.
16. Rusiński E, Harnatkiewicz P, Bobyr M, Yakhno B. Caterpillar Drive Shaft Damage Causes Analysis, Archives of Civil and Mechanical Engineering 2008; 3: 117-130.
17. Stachowicz F. Estimation of hole-flange ability for deep drawing steel sheets. Archives of Civil and Mechanical Engineering 2008; 2: 167-172.
18. Wilimowska Z, Wilimowski M. Sztuka zarządzania finansami. Bydgoszcz: Oficyna Wydawnicza Ośrodka Postępu Organizacyjnego Sp. z o.o., 2001.

**Dr inż. Anna BURDUK**

**Prof. dr hab. inż. Edward CHLEBUS**

Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji

Politechnika Wrocławska

Ul. Łukasiewicza 5, 50-371 Wrocław, Polska

e-mail: Anna.Burduk@pwr.wroc.pl; Edward.Chlebus@pwr.wroc.pl