

# NIEZAWODNOŚĆ W STRUKTURZE STEROWANIA REALIZACJĄ PROJEKTÓW PRODUKCYJNYCH

Iwona ŁAPUŃKA, Katarzyna MAREK-KOŁODZIEJ, Piotr WITTBRODT

**Streszczenie:** Fundamentem współczesnych przedsiębiorstw oferujących klientom skrojone na miarę produkty i usługi jest wyróżnianie w systemie produkcyjnym rutynowych procesów oraz zadań, a także jednorazowych zleceń/projektów. Tego typu systemy produkcyjne, utożsamiane z produkcją dyskretną, charakteryzują się rosnącą złożonością problemów decyzyjnych w strukturze sterowania oraz znaczną podatnością na zakłócenia. Częstość występowania zakłóceń uzależniona jest od poziomu niezawodności systemu produkcyjnego, wpływu otoczenia i nieprzewidywanych czynników losowych. Artykuł wskazuje na potrzebę adaptacji teorii niezawodności do systemu sterowania procesami produkcyjnymi podczas realizacji zleceń typu projekt. Prowadzone badania mają na celu opracowanie wielowymiarowej koncepcji niezawodności dla dynamicznej struktury sterowania realizacją projektów produkcyjnych.

**Słowa kluczowe:** niezawodność, system produkcyjny, zlecenie typu projekt, zakłócenia, sterowanie realizacją projektu, *project dashboard*.

## 1. Wprowadzenie

We współczesnej bardzo konkurencyjnej gospodarce wolnorynkowej, kształtowanej prawami podaży i popytu, przedsiębiorstwa produkcyjne muszą ciągle dążyć do stosowania ulepszonych metod zarządzania produkcją. Głównym powodem jest nacisk na ograniczanie kosztów produkcji przy jednoczesnym wzroście wydajności systemu produkcyjnego. Ciągłych zmian doskonalących wymagają trzy podstawowe aspekty aktywności biznesowej: jakość, koszt i dostawa. Wiąże się to z ujęciem projektowym zleceń produkcyjnych, realizowanych w oparciu o „żelazny trójkąt” celów projektu (czas-koszt-jakość). Transformacja tradycyjnego podejścia do wariantowania, planowania i zarządzania zleceniami na podejście projektowe ma szczególne znaczenie w przypadku produkcji elastycznej (produkcja jednostkowa lub na zlecenie, krótkie serie produkcyjne, duża rotacja wyrobów, zmienne wymagania klientów, minimalizacja czasu między koncepcją produktu a jego wytworzeniem). Prawidłowa organizacja i dalej, sterowanie przepływem produkcji stanowi kluczowy warunek terminowego przekazania klientowi produktu o wymaganej jakości. Jednocześnie rośnie też stopień złożoności zagadnień planowania i ich powiązania z resztą systemu przygotowania produkcji.

Większość zleceń otrzymywanych przez przedsiębiorstwa stanowią indywidualne i jednorazowe procesy produkcyjne, które wymagają szczegółowej analizy, organizacji, jak również doboru właściwych metod zarządzania. Dlatego też traktowane są często jako projekty produkcyjne, zgodnie z klasyczną definicją PMI sformułowaną w PMBOK Guide [1]. Według [2] projekt oznacza sekwencję niepowtarzalnych, złożonych i związanych ze sobą zadań o różnym charakterze, mających wspólny cel, przeznaczonych do wykonania w określonym terminie, przy założonym budżecie, zgodnie z przyjętymi wymaganiami.

Celem realizacji każdego projektu jest osiągnięcie oczekiwanych rezultatów (parametrów), zmierzając jednocześnie w kierunku zaspokojenia potrzeby klienta-zleceniodawcy.

Znaczenie tak pojętych form realizacji procesów produkcyjnych w pracy dynamicznych organizacji i konieczność stosowania szczególnych metod zarządzania akcentuje się współcześnie pojęciem „zarządzanie przez projekty”. Obecnie wymogi efektywnego zarządzania projektami koncentrują się wokół: (1) wysokiego poziomu komunikowania się, (2) elastyczności i szybkiego reagowania, (3) szybkiego podejmowania decyzji, (4) rozwiązywania nieustrukturyzowanych problemów, (5) efektywnego planowania i sterowania w warunkach niepewności, (6) ustalenia najważniejszych etapów w realizacji projektu (cele cząstkowe). W przypadku przedsiębiorstw produkcyjnych oznacza to dosyć często wypracowanie zupełnie nowego podejścia, polegającego na stosowaniu metod typowych dla zarządzania projektami w organizacjach o przewadze działań operacyjnych i powtarzalnych. Produkcja dyskretna, rozumiana jako produkcja wyróżniających się jednostek wyrobów na zlecenie klienta i zgodnie z jego specyfikacją wymagań, utożsamiana jest coraz częściej z terminem „zlecenie typu projekt” [3]. Zmiana sposobu prowadzenia biznesu, wyróżnianie w systemie produkcyjnym zadań o charakterze rutynowym oraz zadań o charakterze unikalnym, tzw. projektów jest obecnie koniecznością.

## **2. Znaczenie projektów w specyficie dyskretnych procesów produkcyjnych**

Analizy prowadzone w ramach niniejszego opracowania obejmują zakres planowania ograniczony do produkcji jednostkowej lub małoseryjnej, głównie na zlecenie warunkujące uwzględnienie zmiennych wymagań klientów, a także złożoność i długoterminowość realizacji procesu produkcyjnego. Przyjęte w artykule określenie „projekt produkcyjny” lub „zlecenie typu projekt” rozumiane jest jako niepowtarzalny (realizowany jednorazowo) złożony proces produkcyjny zawarty w skończonym przedziale czasu – z wyróżnionym początkiem i końcem, realizowany zespołowo (wielopodmiotowo) w sposób względnie niezależny od powtarzalnej działalności przedsiębiorstwa (jednak w ramach określonego systemu produkcyjnego) za pomocą specjalnych metod oraz technik. Z kolei, zgodnie z definicją [4], proces produkcyjny traktowany jest jako zorganizowany zespół działań koordynujących przebiegi strumieni materiałów, informacji i energii podczas realizacji procesu technologicznego. W ramach klasyfikacji przemysłowych procesów wytwórczych ze względu na ciągłość oraz przebieg w czasie wyróżnia się procesy dyskretne i ciągłe.

Procesy dyskretne będące elastycznymi kompleksami operacji uwarunkowanymi logicznie w czasie i w przestrzeni, o zmiennej strukturze przystosowanej do charakterystyki ilościowo-jakościowej wytwarzanych wyrobów [5] traktowane są obecnie jako technologie wytwarzania, w których dominują nieciągłe przepływy energii i materiałów, a zmienne stanu są wielowartościowymi funkcjami czasu. Szacuje się iż, około 80% produktów jest wytwarzanych przy zastosowaniu procesów dyskretnych.

Kolejność podejmowania decyzji o tym co, gdzie, kiedy, ile i jak produkować wpływa zasadniczo na sposób działania systemu sterowania produkcją. Jeżeli najpierw rozstrzyga się gdzie, tzn. w jakich komórkach organizacyjnych będzie odbywać się produkcja, a dopiero w dalszej kolejności podejmuje się decyzje co, jak, kiedy i ile poszczególne komórki mają wytworzyć to sterowanie produkcją jest zazwyczaj zorientowane obciążeniowo (ang. *capacity-oriented production control*). Podejście to jest charakterystyczne dla produkcji powtarzalnej, masowej czy wielkoseryjnej. Jeżeli natomiast najpierw podejmowane są decyzje o tym co, jak, kiedy i ile wyprodukować, a dopiero później dokonywany jest przydział komórek produkcyjnych do zleceń produkcyjnych, to wprowadza

się materiałowo zorientowane sterowanie produkcją (ang. *material-oriented production control*) [6]. Sterowanie produkcją zorientowane materiałowo jest charakterystyczne dla produkcji średnioseryjnej, krótkoseryjnej i jednostkowej (por. tab. 1).

Tab. 1. Wyróżnienie zlecenia typu projekt w systemie sterowania produkcją

Typ produkcji	Materiałowo zorientowane sterowanie		Obciążeniowo zorientowane sterowanie		
	jednostkowa	małoseryjna	seryjna	masowa	ciągła
Wielkość produkcji	pojedyncze egzemplarze	mała	średnia	bardzo wysoka	ciągły strumień
Zmienność produktu	każdy produkt inny	znacząca	rzadka	mała	żadna
Częstość zmian produktu	ciągła	częsta	sporadyczna	żadna	żadna
Wyposażenie jednostkowe	uniwersalne	uniwersalne	trochę wyspecjalizowane	specjalistyczne	specjalistyczne
Liczba operatorów	duża	duża	mniejsza	mała	mała
Poziom kwalifikacji	wysoki	wysoki	średni	niski	niski
Koszty kapitału	niskie	niskie	średnie	wysokie	bardzo wysokie
Koszty jednostkowe	wysokie	wysokie	średnie	niskie	niskie

**zlecenie typu projekt**

Źródło: opracowanie własne na podst. [4]

Systemy wytwarzania dyskretnego charakteryzują się bardzo dużą liczbą zmiennych opisujących stan systemu, do których należą m.in. informacje o maszynach, produktach wytwarzanych, materiałach, operacjach, itp. Problemy decyzyjne występujące w systemach sterowania produkcją dyskretną mogą być zatem bardzo złożone pod względem rozmiaru, jak również charakteru wzajemnych powiązań. Sterowanie zleceniami typu projekt, zwłaszcza w rozumieniu środowiska wieloprojektowego, nadaje tego typu zagadnieniom nowego charakteru i zdecydowanie uwypukla jego wielopoziomą oraz wielowarstwową strukturę. Podejmowane decyzje zmieniają swój charakter w zależności od poziomu:

- na poziomie najwyższym mają charakter globalnych decyzji ekonomicznych, strategicznych, inwestycyjnych i asortymentowych opartych o prognozy rynku, cen i surowców,
- na poziomie niższym decyzje dotyczą rzeczowego planowania, harmonogramowania i sterowania produkcją (w tym zleceniami typu projekt),
- na jeszcze niższym poziomie zachodzi sterowanie procesami, urządzeniami i aparatami technicznymi.

Determinantami właściwego sterowania realizacją projektów są m.in.: (1) ustanowienie środków do sterowania projektem, (2) współpraca z wykonawcami i podwykonawcami, (3) monitorowanie projektu i raportowanie jego statusu, (4) analiza ryzyka harmonogramu projektu SRA (ang. *Schedule Risk Analysis*), (5) analiza wartości wypracowanej EVM (ang. *Earned Value Method*) oraz (6) zasady modyfikowania planów w trakcie ich realizacji.

W realizacji zleceń produkcyjnych zgodnie z podejściem projektowym upatruje się następujących korzyści: (1) ograniczenie czasu realizacji działań, (2) ograniczenie kosztów, (3) ograniczenie zasobów materialnych i ludzkich niezbędnych do realizacji, (4) zakończenie całego przedsięwzięcia i poszczególnych jego etapów w zaplanowanych terminach, (5) stały nadzór nad realizacją zlecenia, (6) ograniczenie niepewności związanej z realizacją kolejnych etapów, (7) zmniejszenie kosztów jednostkowych (zarówno stałych, jak i zmiennych) [7].

### 3. niezawodność obiektu technicznego i człowieka

Niezawodność obiektu technicznego w sensie normatywnym to własność określona przez prawdopodobieństwo spełnienia wymagań. Często rozumiana jako prawdopodobieństwo sukcesu, tj. spełnienia przez obiekt danego wymagania lub jako prawdopodobieństwo tego, że w okresie  $(0, t)$  zmiany określonych własności obiektu nie przekroczą przyjętych granic w założonych warunkach istnienia obiektu [8]. Zatem miarą niezawodności jest prawdopodobieństwo bezusterkowej pracy określonego obiektu w przyjętych warunkach eksploatacji oraz w danym czasie użytkowania. Niezawodność może być wyznaczana dla obiektów technicznych znajdujących się na różnym poziomie złożoności: części, podzespołów, zespołów, mechanizmów, układów, całych urządzeń lub systemów. Na każdym z tych poziomów mogą być stosowane te same charakterystyki niezawodności, powiązane ze sobą określonymi zależnościami (struktury szeregowo, równoległe, szeregowo-równoległe oraz równoległo-szeregowo) [9, 10].

W określaniu niezawodności obiektów technicznych stosuje się metody badawcze pozwalające na uzyskiwanie i przetwarzanie informacji o takich własnościach obiektów technicznych, jakie ujawniają się w procesie ich użytkowania i świadczą o ich przydatności w realizacji zadań, dla których zostały one skonstruowane i wyprodukowane. W teorii niezawodności korzysta się w szerokim zakresie z modeli matematycznych – głównie probabilistycznych. Do najczęściej stosowanych w opisie niezawodności maszyn i urządzeń zalicza się modele matematyczne prostych obiektów technicznych z podziałem na: (1) obiekty nieodnawialne, (2) obiekty złożone, (3) obiekty odnawialne, (4) obiekty złożone odnawialne.

Z kolei w wyniku analizy niezawodności układu człowiek-obiekt techniczny przyjęto, że niezawodność człowieka definiowana jest jako zdolność do spełniania wymagań z minimalnym prawdopodobieństwem popełnienia błędu w określonych warunkach i założonym czasie. Dość często utożsamia się tę cechę z odpornością na zakłócenia występujące w toku pracy [11]. Wśród wielu proponowanych przez badaczy klasyfikacji błędów popełnianych przez człowieka, podział na błędy systematyczne i przypadkowe wydaje się najbardziej właściwy. Podejście probabilistyczne (opis prawdopodobieństwa wystąpienia błędu) jest typowe dla badań niezawodności człowieka w związku z analizą ryzyka, a błąd człowieka jest traktowany podobnie jak usterka lub zakłócenie w funkcjonowaniu maszyny. Liczba błędów człowieka i maszyny jest punktem wyjścia obliczenia współczynnika niezawodności całego układu. Dla tzw. błędów operatorskich można wyróżnić rodzaje błędów czynności, które w dalszych badaniach ze względu na zbieżność z podejściem projektowym stanowić będą szczególnie obszar analiz [12]:

- brak prawidłowej czynności po pojawieniu się sygnału,
- czynność spóźniona,
- czynność wykonana w porę, lecz nie dokończona lub wykonana zamiast innej,
- czynność zbyteczna, wynikająca z chaotycznej aktywności,

- czynność przedwczesna,
- czynność spontaniczna, bez sygnału z zewnątrz, zamiast powstrzymania się od aktywności, przedwczesne włączenie się do działania,
- czynność przeciwstawna do czynności pożądanej lub niedokładna.

Zbieranie danych o błędach jest podstawą budowania miar niezawodności człowieka. Celem tego działania jest przewidywanie niezawodności układu/systemu, w którym człowiek pełni określoną rolę. Pośród długiej listy mechanizmów powstawania błędów w pracy człowieka na szczególną uwagę zasługuje mechanizm podejmowania decyzji. Według autorów publikacji [13] twórców teorii detekcji sygnałów, zachowanie się operatora można opisać matematycznie. W teorii tej operator popełnia dwa główne typy błędów, tj. niewykrycie (nieostrzeżenie obiektu) lub fałszywy alarm (wykrycie sygnału, który nie pojawił się). Człowieka traktuje się tutaj jako ułomny detektor sygnałów. Dotychczas w badaniach nad niezawodnością człowieka próbowano stosować wskaźniki opracowane w dziedzinie nauk technicznych oparte na teorii prawdopodobieństwa, w tym celu wymagana jest znajomość odpowiednich wielkości charakteryzujących pracę człowieka, takich jak: (1) średni czas między dwoma uchybieniami (błędami) w pracy, (2) ogólna liczba błędów popełnionych w danym odcinku czasu, (3) procent poprawnie wykonanych zadań w danym odcinku czasu. Głównymi wskaźnikami ilościowymi niezawodności człowieka są: wskaźnik bezbłędności, gotowości, restytucji oraz aktualności (adekwatności czasowej działania operatora) [14]. Określając niezawodność człowieka na danym stanowisku pracy należy uwzględnić te wskaźniki, które mają największy wpływ na osiągnięcie celu postawionego przed operatorem.

Specyficzną właściwością człowieka jako części składowej systemu jest z jednej strony możliwość popełniania błędów, z drugiej zaś strony zdolność uczenia się, zdobywania doświadczenia i dochodzenia do wprawy. Niewątpliwie pożądaną właściwością obiektu technicznego jest możliwość bezbłędnej, powtarzalnie wykonywanej pracy, gwarantującej jednocześnie określoną stabilność, niemniej jednak bez wykazywania przy tym zdolności do czynności samosterowniczych (uczenia się). Właściwości człowieka, jak i obiektów technicznych jako elementów systemu w różny sposób wpływają na jego niezawodność. W praktyce przemysłowej do tej pory zdecydowanie łatwiej koryguje się właściwości obiektów technicznych niż ludzi [11].

#### **4. Podatność na zakłócenia jako jeden z aspektów niezawodności**

Zdeterminowane cechy niezawodności, jako zbiorowej właściwości systemu, opisywane są z reguły poprzez: wiarygodność, integralność i zdolność do zabezpieczenia [15]. Wiarygodność określa zdolność systemu do rozpoznania i sygnalizowania stanu systemu oraz zapobiegania pojawienia się nieprawidłowego wymuszenia lub nieautoryzowanego dostępu. Integralność oznacza zdolność do prawidłowego działania (wykonywania zadań) w dowolnych warunkach otoczenia. Zabezpieczalność (ang. *security*) dotyczy zdolności zapobiegania nieprawidłowym oddziaływaniom lub niedozwolonemu dostępowi do systemu.

Podobny sposób rozumienia pojęcia niezawodności systemów w odniesieniu do realizacji zadań logistycznych zaprezentowano w pracy [16], przeciwstawiając niezawodności podatność na zakłócenia (ang. *vulnerability*). System podatny na zakłócenia charakteryzuje się niskim stopniem realizacji zadań, co można wyrazić poprzez brak zdolności do obsługi, brak dostępności i zmienność w pewnych okolicznościach ze względu na brak zabezpieczeń, niski poziom wytrzymałości i elastyczności. Z kolei system niepodatny na zakłócenia charakteryzuje się wysokim stopniem realizacji zadań, czego wynikiem może być właściwa

zdolność do obsługi, dostępność, niezmiennosc w kazdych warunkach, co umozliwia odpowiedni poziom zabezpieczen w razie uszkodzenia, duza wytrzymalosc (trwalosc) i elastycznosc.

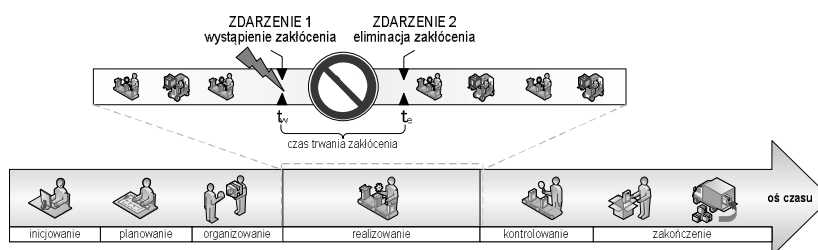
Zaklucenie definiowane jest jako naruszenie ustalonego porzadku, biegu spraw, dezorganizacja. Termin pochodzi od czasownika „zaklucac – powodowac zaklucenia, przeszkadzac w pracy, funkcjonowaniu czegoś”. Zakluceniem przebiegu zlecenia typu projekt okreslono wystapienie przeszkody w fazie realizacji projektu produkcyjnego, dezaktualizujacej jego plan pierwotny (wzorzec). W pracy [17] rozrozniono dwie grupy zaklucen: (1) zaklucenia zwiazane z systemem produkcyjnym oraz (2) zaklucenia zwiazane z otoczeniem. Przyjecie jedynie takiej klasyfikacji nie moze stanowic podstawy do wyznaczania odpowiednich reakcji na skutek pojawienia sie zaklucenia w procesie realizacji projektu. Z punktu widzenia osoby koordynujacej wykonawstwo projektu istotny jest skutek, jaki spowodowalo wystapienie danego zaklucenia w procesie, a nie samo zaklucenie. I tak, np. wydłużenie czasu wykonania kazdej niekrytycznej czynnosci bez skutkow ubocznych dla realizacji projektu w wyznaczonym terminie jest mozliwe jedynie do granicy zapasu czasu przewidzianego dla danej czynnosci. Natomiast przekroczenie tej granicy lub niedotrzymanie terminow wykonania czynnosci krytycznych spowoduje z pewnoscia deregulacje harmonogramu, a takze mozliwosc dezaktualizacji planu zasobow, powodujac przy tym naruszenie planu nakladow i kosztow.

Przedmiotem analiz jest system produkcyjny typu *job-shop* (system gniazdowy) dla srodowiska wieloprojektowego. W systemie produkcyjnym dla kazdego zadania jest dane przyporzadkowanie maszyn operacjom oraz wymagana kolejnosc operacji w zadaniu. W ujeciu projektowym dane będzie natomiast przyporzadkowanie maszyn (stanowisk produkcyjnych) czynnosciom oraz ustalona sekwencja czynnosci w projekcie. Zgodnie z nazewnictwem stosowanym w podejsciu projektowym, czynnoscia okresla sie wykonywanie danej pracy przez uklad czlowiek-obiekt techniczny. Porzadek prac wykonywanych przez poszczegolne układy okreslony przez ograniczenia technologiczne. Kazda czynnosc ma okreslony czas wykonania. W czasie tym zawiera sie czas potrzebny do przygotowania stanowiska do wykonania danej czynnosci, jak rowniez przywrócenia go do stanu poprzedniego, tzw. czas przygotowawczo-zakończeniowy oraz czas transportu miedzystanowiskowego. Obliczanie czasu realizacji calego zlecenia w dokladny sposob zostalo przedstawione m.in. w pracy [18].

Podstawa prowadzonych badan dotyczacych wplywu zaklucen na przebieg zlecenia typu projekt w systemie produkcyjnym jest, oprócz klasyfikacji zaklucen, model przebiegu realizacji projektu. W modelu tym uwzględniono strukture systemu produkcyjnego, obejmujaca stanowiska produkcyjne oraz projekty produkcyjne przewidziane do realizacji w systemie. W modelu okreslono rowniez reprezentacje przebiegu produkcji oraz sposob zapisu wzorcowego planu w postaci harmonogramu oraz skladowych: planu nakladow, zasobow i kosztow. Podstawa generowania wariantow planu stanowia metody planowania sieciowego. Skupiono sie glownie na nich ze wzgledu na ich uzyteczny charakter, a takze latwosc implementacji. Rozwazana byla koncepcja zastosowania innych metod i technik, takich jak np. sieci Petriego czy porownywalnego do nich w przypadku znacznej liczby problemow algorytmu KMR (Karpa-Millera-Rosenberga). Rezygnacja z tych metod ma swoje uzasadnienie w uprzedzeniu rozwanego problemu – chodzi przeciez o szybka reakcje na zaklucenie, a takowa jest mozliwa wóczas, gdy korzystamy z danych uprzednio wprowadzonych do systemu i opracowanych wstepnie z wykorzystaniem okreslonej metody. W praktyce przemyslowej powszechnymi metodami, ktore wykorzystuje sie w celu

dynamicznego uzyskiwania alternatywnych planów zleceń typu projekt są metody planowania sieciowego lub harmonogramowanie z wykorzystaniem reguł priorytetu.

Uwzględnienie zakłóceń w trakcie modyfikacji planu realizacji projektu wymaga zidentyfikowania istotnych jego parametrów. Każde zakłócenie umiejscowione jest zarówno w przestrzeni, jak i w czasie, a przy tym określone zostaje poprzez dwa zdarzenia: wystąpienie zakłócenia oraz eliminację zakłócenia (rys. 1). Obydwa zdarzenia mogą mieć wpływ na przebieg realizacji projektu.



Rys. 1. Opis zakłócenia

Źródło: opracowanie własne na podst. [19]

Klasyfikację zakłóceń  $Z_k$  wraz z wpływem na składowe planu głównego przedstawiono w pracy [20]. Momenty  $t_w$  i  $t_e$  to odpowiednio chwila wystąpienia zdarzenia dezaktualizującego i moment eliminacji tego zdarzenia, zaś różnica  $t_e - t_w$  to całkowity czas trwania zakłócenia.

## 5. Potrzeba adaptacji teorii niezawodności do nowych obiektów i systemów

Teoria niezawodności jest dyscypliną, której paradygmaty opierają się na dwóch dziedzinach matematyki: teorii prawdopodobieństwa i statystyce matematycznej [21]. Wspólną cechą niezawodności człowieka i niezawodności innych obiektów jest konieczność określenia pewnych wymagań (oczekiwań). Istotną różnicą między pojęciem niezawodności człowieka, a niezawodnością innych obiektów jest możliwość interakcji między nadawcą i odbiorcą wymagań, tj. możliwość wymiany informacji o stanach samego obiektu, człowieka, jak również otoczenia. Pojęcie niezawodności jest uważane we współczesnej nauce za jedno z ważniejszych ze względu na jego własności integrujące, które pozwalają na dokonanie syntezy wiedzy dotyczącej różnych obiektów, zarówno technicznych, jak i biologicznych [11]. Pozwala dokonać analogii i generować nowe hipotezy badawcze w odpowiedzi na ciągle pojawiające się nowe problemy praktyczne, wymagające poszukiwań w obszarze zagadnień teoretycznych.

Gruntowną analizę stanu nauki o niezawodności przeprowadził Igor A. Ushakov [22], który do przyszłościowych kierunków rozwoju tej dziedziny, obok „klasycznych” zagadnień sterowania jakością i niezawodnością w produkcji masowej oraz problemów modelowania struktury lub utrzymania obiektów zaliczył [23]:

- analizę efektywności i zdolności do poprawnego funkcjonowania obiektów związaną z możliwością występowania uszkodzeń częściowych, nieprowadzących do przejścia obiektu w stan niezdatności, a tylko do ograniczenia jego wydajności,
- modelowanie odporności obiektu na nieprzewidywalne oddziaływania (ang. *survivability*) wynikające np. z błędów wewnętrznych systemu, wpływu

otoczenia lub niepożądanych działań człowieka; zasadniczo generuje przeciwny kierunek analizy i prezentuje badania podatności na uszkodzenia/zakłócenia (ang. *vulnerability*),

- problemy modelowania, badania i zarządzania bezpieczeństwem w aspekcie występowania skutków uszkodzeń obiektu dla człowieka i otoczenia naturalnego (ang. *safety*) oraz zabezpieczenia przed nieupoważnionym dostępem do oddziaływania na obiekt (ang. *security*),
- niezawodność oprogramowania (ang. *software reliability*) ze względu na problemy ze zdefiniowaniem podstawowych dla „klasycznej” teorii niezawodności założeń dotyczących: stochastycznej natury uszkodzeń, zależności uszkodzeń od czasu i niezależności występowania uszkodzeń.

Nowe wyzwania wiążą się z analizą i oceną niezawodności, np.: jednostkowych (unikatowych) obiektów lub systemów o wyjątkowo dużej nieuszkodzalności, systemów o zasięgu globalnym, sieci informacyjnych lub komunikacyjnych, systemów rozwijających się, systemów dostawy części wymiennych, systemów z rezerwą czasową, szacowania przyszłych kosztów eksploatacji i wyznaczania okresu gwarancji, modelowania systemów o ciągłej strukturze niezawodności i systemów wielostanowych, prowadzenia badań przyspieszonych niezawodności czy syntezy danych z badań eksploatacyjnych [24].

## **6. Nowoczesne systemy sterowania i zarządzania przedsiębiorstwami produkcyjnymi**

Sterowanie procesami w czasie rzeczywistym podczas realizacji złożonych zleceń typu projekt generuje pewnego rodzaju pomost między człowiekiem, a maszynami i urządzeniami technologicznymi, zdefiniowany ich wzajemną współzależnością. Problematyka niezawodności człowieka stała się integralną częścią ogólnej teorii niezawodności systemów, a jej retoryka we współczesnej nauce wyraża się ciągłym poszukiwaniem nowych punktów styku.

Zagadnienie niezawodności w systemach sterowania realizacją projektów produkcyjnych wymaga m.in. zmiany podejścia do sposobu definiowania systemu. Dotychczas w badaniach niezawodności systemów technicznych dominowało podejście w sensie rzeczowym – system techniczny jest tworzony przez zbiór elementów technicznych przeznaczonych do wykonania określonego zadania. Zadania stojące przed systemem sterowania realizacją projektów produkcyjnych są jednak bardziej złożone. Ocena jakości i niezawodności wykonania zlecenia typu projekt jest określona poziomem spełnienia kilku kryteriów, w tym spełnienia wymagań klienta. Wobec tego bardziej adekwatne do analizowanego problemu wydaje się podejście w sensie zadaniowym. Ocena stopnia poprawności wykonania poszczególnych zadań pozwala wówczas na ocenę jakości i niezawodności także całego systemu sterowania procesami w realizacji projektu.

Nowoczesne, kompleksowe systemy sterowania i zarządzania przedsiębiorstwami produkcyjnymi mają strukturę wielopoziomową i wielowarstwową, co ma na celu podniesienie sprawności procesów decyzyjnych. Struktura fizyczna organizacji zbudowana z coraz mniejszych jednostek kolejno zagnieżdżających się w jednostkach wyższego poziomu, ma odbicie w hierarchicznej strukturze poziomów decyzyjnych. Każdy element decyzyjny danego poziomu dostrzega tylko wybrane elementy poziomu bezpośrednio niższego i do tych elementów kierowane są od niego decyzje sterujące. Na każdym poziomie pojawia się więc problem sprawnego zarządzania tylko przynależnymi elementami poziomu niższego, zgodnie z opracowaną wcześniej strategią. Decyzje sterujące idące do poziomu niższego będą zależę od założonego horyzontu planowania na poziomie decyzyjnym,

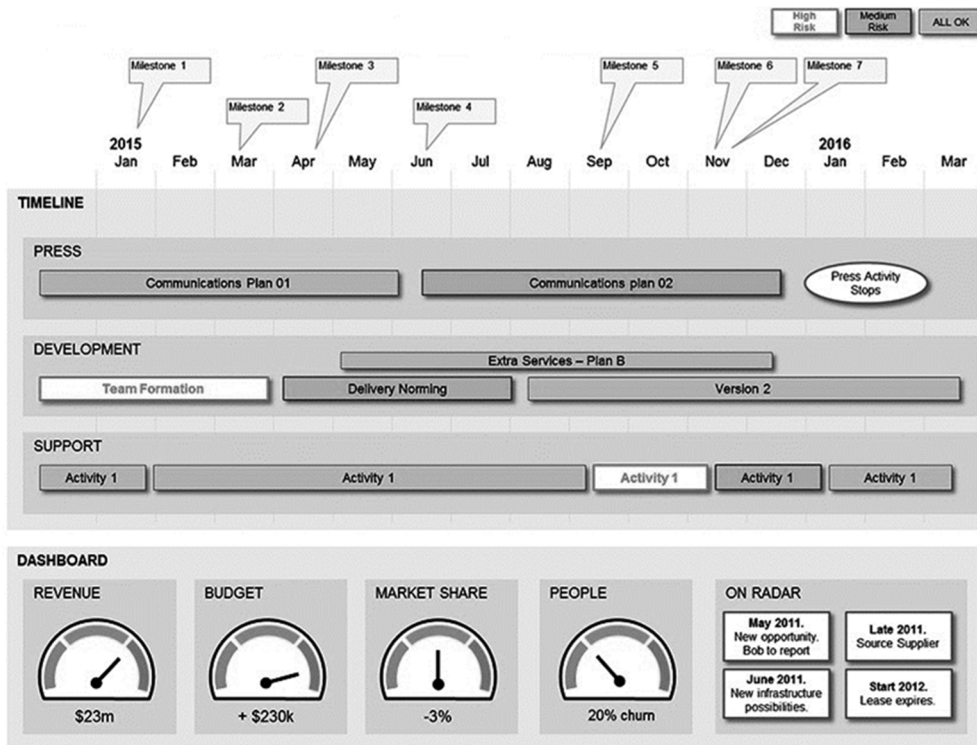


zapotrzebowania na produkcję w tym horyzoncie, zdolności przerobowych elementów poziomu niższego, możliwości pozyskania energii użytkowej, surowców, wiedzy i obsady inżynierskiej. Dla wszystkich poziomów powinien obowiązywać podobny wskaźnik oceny jakości funkcjonowania danego poziomu. Powinna nim być maksymalizacja zysku z realizacji zlecenia produkcyjnego uzyskiwana na danym poziomie i w ramach rozważanego horyzontu czasowego, z uwzględnieniem określonych dla danego poziomu odniesień (np. zasoby, normy, technologie). Kolejne niższe poziomy charakteryzują się coraz bardziej skracającym się horyzontem planowania (sterowania), dokładniejszymi modelami, na których opiera się wybór strategii, zwiększoną częstotliwością zakłóceń, a stąd zwiększoną częstotliwością interwencji (sterowania) [25].

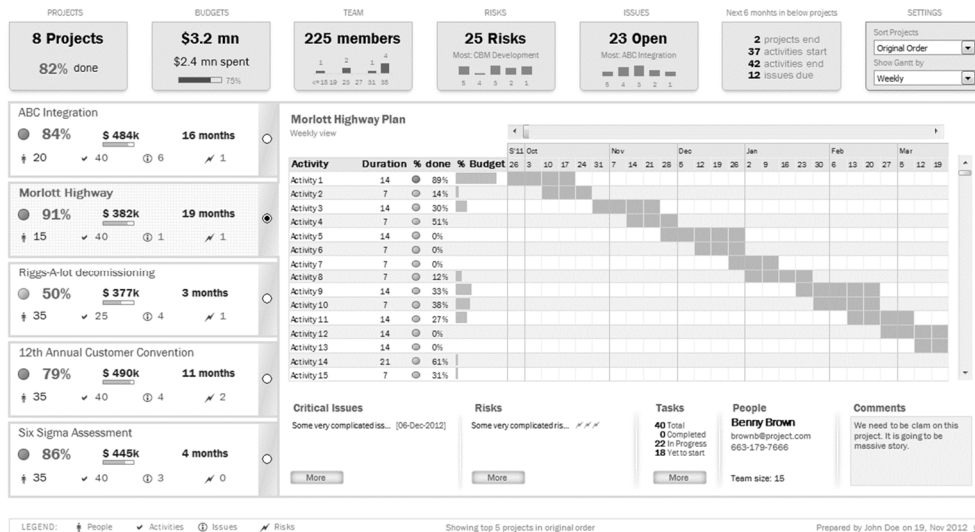
Im niższy poziom, tym łatwiej poddaje się automatyzacji, a więc procesowi eliminowania człowieka (operatora) na rzecz inteligentnych urządzeń komputerowych i sterowników logicznych. Na poziomach wyższych narzędzia komputerowe są zaangażowane głównie dla wspomagania podejmowanych decyzji. W takiej strukturze utrzymany jest ograniczony do jednego poziomu przepływ decyzji w kierunku góra-dół (ang. *top-down*) i jednopozomowy kierunek przekazywania informacji zwrotnej o realizacji zadań z dołu do góry (ang. *bottom-up*). Ta zwrotna informacja powinna mieć postać najpierw sygnałów pomiarowych, na wyższym poziomie raportów okresowych, a potem sprawozdań podsumowujących.

Sygnały pomiarowe stanowią rodzaj słabych sygnałów, zwanych również wskaźnikami wczesnego ostrzegania, (ang. *weak signals, faint signals, early warnings, early indicators, early symptoms*) w działaniach korygujących podejmowanych podczas realizacji projektu [26]. Stanowią one mogą cenne źródło informacji o potencjalnych zmianach, co jest szczególnie istotne w pracy elastycznych systemów produkcyjnych i dynamicznych organizacji. Konieczne jest ciągłe monitorowanie symptomów zmian, bowiem z czasem może pojawić się coraz więcej sygnałów potwierdzających daną zmianę w otoczeniu przedsiębiorstwa, czy też w ramach samego projektu. Monitorowanie tego typu wskaźników może pozwolić na wczesne wychwycenie sytuacji kryzysowej (np. wystąpienia określonego zakłócenia), bądź niebezpieczeństwa pojawienia się takiej sytuacji. Należy zauważyć, że wskaźniki wczesnego ostrzegania mogą być związane z konkretnymi ryzykami lub też z obszarami, w których należy spodziewać się wystąpienia pewnych problemów. Słabe sygnały są pozyskiwane, gromadzone i przetwarzane przez systemy wczesnego ostrzegania (ang. *early warning systems*). Systemy te zabezpieczają informacyjnie procesy planowania i kontroli poprzez dostarczanie informacji redukujących niepewność sytuacji decyzyjnych, a przez to umożliwiają podejmowanie bardziej racjonalnych decyzji podczas realizacji zleceń typu projekt.

W ostatnim czasie zauważa się wzmożone zainteresowanie badaczy zastosowaniem koncepcji słabych sygnałów w sterowaniu realizacją projektów [27, 28, 29]. W pracy [28] przedstawiono klasyfikację słabych sygnałów zidentyfikowanych w projektach budowlanych na podstawie badań ankietowych przeprowadzonych wśród menedżerów projektów. Wzrasta popularność zestawów (tablic) wskaźników w formie *project dashboard*, umożliwiających śledzenie bieżącej realizacji projektu w celu szybkiego wdrożenia działań korygujących [30]. *Project dashboard* to rodzaj dynamicznego raportu, którego głównym elementem są wskaźniki graficzne. Mogą one sygnalizować aktualny status realizacji projektu, poziom ryzyka, czy zużycia buforów (tolerancji) wbudowanych w strukturę sterowania projektem, jak również dostarczać wskaźników wydajności KPI (ang. *Key Performance Indicators*). Przykładowy szablon przedstawiono na rysunku 2. Szablony *project dashboard* mogą również przyjmować formę zestawień najważniejszych informacji o projektach znajdujących się w portfelu projektów (rys. 3).



Rys. 2. Szablon *project dashboard* z mapą projektu i zestawem wskaźników KPI  
 Źródło: [https://business-docs.co.uk]



Rys. 3. Szablon *project dashboard* dla portfela projektów  
 Źródło: [http://chandoo.org]

## 7. Wnioski i kierunki dalszych badań

Integralną cechą współczesnej gospodarki rynkowej jest jej elastyczność i zmienność. Warunki turbulentnego i hiperkonkurencyjnego otoczenia powodują, że większość przedsiębiorstw zmuszona jest podejmować specyficzne zlecenia, napotykając równie często na poważne problemy z ich właściwą realizacją. Opracowanie wielowymiarowej koncepcji niezawodności dla dynamicznej struktury sterowania realizacją projektów produkcyjnych i jej implementacja w komputerowym systemie wczesnego ostrzegania mogą w istotny sposób przyczynić się do wzrostu skuteczności i efektywności zarządzania projektami produkcyjnymi. Systemy wczesnego ostrzegania stanowią specyficzny rodzaj systemów informacyjnych danego przedsiębiorstwa, których celem głównym jest ukierunkowanie realizowanych procesów w przedsiębiorstwie w stronę percepcji i interpretacji słabych sygnałów [31].

Przeciwstawiając niezawodności podatność na zakłócenia przyjęto, iż niezawodność w systemie sterowania realizacją projektów produkcyjnych oznacza wysoki stopień realizacji zadań, co można wyrazić poprzez zdolność do obsługi, dostępność, dużą wytrzymałość (trwałość, stabilność), wymaganą elastyczność oraz niezmiennosc w każdych warunkach, osiągalną dzięki odpowiednim zabezpieczeniom na skutek wystąpienia potencjalnych zakłóceń w systemie.

W ramach struktury wielopoziomowego systemu sterowania zakłada się integrację informatycznych systemów zarządzania klasy ERP z systemami MES (ang. *Manufacturing Execution Systems*). Funkcjonalność MES, oprócz planowania i harmonogramowania produkcji APS (ang. *Advanced Planning and Scheduling*) będzie obejmowała również zarządzanie zakresem i przebiegiem projektu, raportowanie z produkcji, dostarczanie wskaźników wydajności KPI, zarządzanie zmianami (zakłóceniami), śledzenie stanów zamówień i produktów cząstkowych, zarządzanie zasobami (zarówno materiałowymi, jak i ludzkimi). Uzupełnienie tej struktury stanowiąc będą szablony *project dashboard* z zestawem wskaźników i graficzną prezentacją postępów w realizacji, tzw. mapą projektu (ang. *roadmap*). Wraz z zastosowaniem metody wartości wypracowanej (EVM) oraz metody analizy ryzyka harmonogramu projektu (SRA) wykorzystane zostaną alternatywne metody umożliwiające śledzenie projektu, tj. „góra-dół” w przypadku metody SRA oraz „dół-góra” dla EVM. Uzyskane na tej podstawie informacje stanowiąc będą rodzaj słabych sygnałów w działaniach korygujących podejmowanych podczas realizacji projektu oraz dostarczą wiedzę na temat zużycia buforów (tolerancji) wbudowanych w strukturę wielopoziomowego systemu sterowania projektem.

Dualizm w zakresie analizy dotyczący badania podatności na zakłócenia oraz modelowania odporności systemu na nieprzewidywalne oddziaływania wynikające np. z błędów wewnętrznych systemu, niepożądanych działań człowieka, czy też wpływu otoczenia stanowi komplementarne podejście w sterowaniu realizacją projektów produkcyjnych i wyznacza kierunek dalszych badań.

### Literatura

1. PMI Standards Committee: A guide to the project management body of knowledge. 5<sup>th</sup> edition. PMI, Newtown Square, PA, USA, 2013.
2. Wysocki R.K.: Efektywne zarządzanie projektami. Tradycyjne, zwinne, ekstremalne. Wydawnictwo Onepress-Helion, Gliwice, 2013.

3. Pisz I., Łapuńska I.: The idea of operationalization of the conceptual model of project driven orders for small and medium-sized enterprises in condition of uncertainty. [w:] Knosala R. (red.), *Innowacje w Zarządzaniu i Inżynierii Produkcji*, Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole, 2012, 297-308.
4. Wróblewski K.J.: *Podstawy sterowania przepływem produkcji*. WNT, Warszawa, 1993.
5. Durlik I.: *Inżynieria zarządzania. Strategia i projektowanie systemów produkcyjnych*. Placet, Warszawa, 1995.
6. Sitek P.: Problem reprezentacji dopuszczalnej w algorytmie genetycznym optymalizacji konfiguracji wariantów produkcyjnych (AGOKWP). *Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej, Elektryka*, 37, 2000, 101-108.
7. Kasperek M.: *Zarządzanie projektem*. Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach, Katowice, 2011.
8. Kiliński A.: Definicje opisowo-analityczne i wartościująco-normatywne podstawowych pojęć teorii niezawodności. *Prakseologia*, 38, 1971.
9. Migdalski J.: *Inżynieria niezawodności. Poradnik*. Wydawnictwo Akademii Techniczno-Rolniczej, Bydgoszcz, 1992.
10. Słowiński B.: *Podstawy badań i oceny niezawodności obiektów technicznych*. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, 2002.
11. Ignac-Nowicka J., Gembalska-Kwiecień A.: *Niezawodność człowieka i niezawodność techniczna w procesie pracy układu człowiek-maszyna*. [w:] Milewska E., Żabińska I. (red.), *Systemy wspomaganie w inżynierii produkcji. Inżynieria systemów technicznych*, Wydawnictwo PA NOVA, Gliwice, 2014, 65-75.
12. Rouse W.B., Rouse S.H.: Analysis and classification of human errors. *Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 13 (4), 1983, 539-549.
13. Swets J.A., Tanner W.P., Birdsall T.G.: Decision processes in perception. *Psychological Review*, 68, 1961, 301-340.
14. Ratajczyk Z.: *Niezawodność człowieka w pracy. Studium psychologiczne*. PWN, Warszawa, 1988.
15. Bukowski L.: *Bezpieczeństwo i niezawodność systemów logistycznych*, Materiały VI Konferencji Logistyki Stosowanej „Total Logistic Management”. Prace Wydziału Zarządzania Politechniki Częstochowskiej, Seria Seminaria i Konferencje, 7, Zakopane, 2002.
16. Maternowska M.: *Ryzyko a niezawodność. Znaczenie poziomu zabezpieczenia czyli jaką wartość ma pewność i niepewność*. Materiały X Konferencji Logistyki Stosowanej „Total Logistic Management”, Zakopane, 2006.
17. Santarek K., Strzelczak S.: *Elastyczne systemy produkcyjne*. WNT, Warszawa, 1989.
18. Matuszek J.: *Inżynieria produkcji*. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Filia w Bielsku-Białej, Bielsko-Biała, 2000.
19. Kalinowski K.: *Sterowanie przebiegiem produkcji w warunkach zakłóceń wspomaganie systemem eksperckim. Praca doktorska*. Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, Gliwice, 2002.
20. Łapuńska I.: *Metoda planowania produkcji zespołów maszyn w warunkach zakłóceń*. Rozprawa doktorska. Wydział Budowy Maszyn i Informatyki Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej, Bielsko-Biała, 2010.
21. Wilson A., Limnios N., Keller-McNulty S., Armijo Y. (eds.): *Modern statistical and mathematical methods in reliability*. Series on Quality, Reliability and Engineering Statistics, vol. 10, World Scientific, New Jersey – London, 2005.

22. Ushakov I.: Reliability: past, present, future. *Reliability: Theory & Applications*, 1, 2006, 10-16.
23. Ushakov I.: Reliability theory: history and current state in bibliographies. *Reliability: Theory & Applications*, 1 (24), 2012, 8-35.
24. Nowakowski T.: *Niezawodność systemów logistycznych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2011.
25. Klemiato M., Augustyn J., Duda J.T., Sterna K.: INSTEPRO: Zintegrowany system sterowania produkcją (1). *Pomiary Automatyka Robotyka*, 4, 2011, 70-75.
26. Pisz I., Łapuńska I.: Systemy wczesnego ostrzegania w realizacji projektów. [w:] Stroińska E., Sułkowski Ł. (red.), *Determinanty zarządzania projektami i procesami w organizacji, Przedsiębiorczość i Zarządzanie*, Tom XVI, Zeszyt 5, Część II, 2015, 55-66.
27. Vanhoucke M.: On the dynamic use of project performance and schedule risk information during project tracking. *Omega*, 39, 2011, 416-426.
28. Nikander I.O., Eloranta E.: Project management by early warnings. *International Journal of Project Management*, 19, 2001, 385-399.
29. Prywata M.: *Zarządzanie ryzykiem w małych projektach*. PARP, Warszawa, 2010.
30. Kerzner H.R.: *Project management metrics, KPIs, and dashboards: a guide to measuring and monitoring project performance*. John Wiley & Sons, New Jersey, Hoboken, 2013.
31. Nalepka A., Bąk J.: Implikacje praktyczne koncepcji słabych sygnałów dla zarządzania strategicznego. [w:] Mikuła B. (red.), *Historia i perspektywy nauk o zarządzaniu*, Fundacja Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie, Kraków, 2012, 113-122.

Dr inż. Iwona ŁAPUŃKA  
 Mgr inż. Katarzyna MAREK-KOŁODZIEJ  
 Dr inż. Piotr WITTBRODT  
 Instytut Innowacyjności Procesów i Produktów  
 Politechnika Opolska  
 45-370 Opole, ul. Ozimska 75  
 tel.: (+48 77) 449 88 45  
 e-mail: i.lapunka@po.opole.pl  
       k.marek-kolodziej@po.opole.pl  
       p.wittbrodt@po.opole.pl