

Niezawodnościowe i symulacyjne metody zapewnienia efektywności przedsięwzięć produkcyjnych i transportowych

Stanisław Młynarski*

Streszczenie: W przedstawionej pracy opisano możliwości zastosowania elementów inżynierii do organizacji i strategii racjonalnego gospodarowania oraz efektywnego wykorzystania środków trwałych przedsiębiorstwa w systemach produkcyjnych. Skuteczność strategii użytkowania kapitału trwałego określana jest w aspekcie składu rzeczowego i organizacji składników stanowiących system produkcyjny. Stopień osiągniętej racjonalności ekonomicznej opisany jest probabilistyczną funkcją wykonania zadania produkcyjnego o założonych parametrach ekonomicznych, definiowaną jako funkcja niezawodności systemu. Natomiast struktura organizacyjna użytkowanych składników majątku zastąpiona jest strukturą niezawodnościową i charakterystycznymi dla niej modelami obliczeniowymi. Istotą dla osiągnięcia sukcesu ekonomicznego systemu jest strategia organizacji zbioru elementów dopasowana do modelu struktury niezawodnościowej podporządkowanego maksymalnej efektywności systemu. Wyznaczane wskaźniki techniczne i ekonomiczne generowane są w programie komputerowym do analizy struktur niezawodnościowych metodą symulacyjną Monte Carlo. Efektem jest ujęcie zależności między strukturą niezawodnościową, kosztami a efektami ekonomicznymi systemu. W związku z tym można stwierdzić, że organizacja struktury niezawodnościowej stanowi wiodący czynnik do wyznaczenia zasadniczych wielkości technicznych i ekonomicznych, mających wpływ na efektywność i poprawność funkcjonowania systemu produkcyjnego przedsiębiorstwa.

Słowa kluczowe: majątek trwały, efektywność, niezawodność, symulacja, eksploatacja

Wprowadzenie

Wymagania nowoczesnej gospodarki powodują, iż zaspakajanie potrzeb klientów nie stanowi głównego problemu producentów, natomiast problemem staje się zwiększanie efektywności prowadzonych przedsięwzięć gospodarczych. Problem narasta tym bardziej, im mocniej zaawansowane technicznie są systemy produkcyjne i znalezienie sposobu na dalszą poprawę efektywności wiąże się z zastosowaniem nowych wysublimowanych metod działania w tym kierunku. Przestał być również aktualny pogląd, że wzrost ilościowy jest wystarczający do spełnienia potrzeb użytkowników. Zasadniczym paradygmatem obecnej gospodarki rynkowej stała się jakość i efektywność działania. Kształtuje się koncepcja, w której termin „jakość” definiowany jest pojęciami efektywności i niezawodności jako:

* dr inż. Stanisław Młynarski, Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, Instytut Pojazdów Szynowych, e-mail: mlynarski@mech.pk.edu.pl.

„ogół cech i właściwości obiektu, który decyduje o zdolności tego obiektu do zaspokajania stwierdzonych lub przewidywanych potrzeb” (Adamkiewicz, Hempel, Podsiadło, Śliwiński, 1983, s. 63–70). Kolejnym wymaganiem stawianym przez gospodarkę rynkową jest właśnie niezawodność systemu, czyli zdolność systemu do spełniania zadanych mu funkcji w określonych warunkach eksploatacyjnych i w określonym czasie. Niezawodność systemu jest uzależniona od jego zdolności do poprawnej pracy, trwałości obiektów wchodzących w skład systemu, ich naprawialności, podatności na uszkodzenia itp. Oddziaływanie na niezawodność systemu przez kształtowanie niezawodności poszczególnych elementów składowych systemu i stosowanie różnych strategii odnowy i zabiegów profilaktycznych w eksploatacji było już wielokrotnie opisywane w licznych publikacjach. Natomiast niewiele analiz dotyczy techniczno-ekonomicznej syntezy strukturalnej niezawodności przedsięwzięć gospodarczych, takich jak systemy produkcyjne lub systemy transportowe. Analizy tego rodzaju mogą mieć duże znaczenie dla optymalizacji organizacji procesu produkcyjnego i efektywności finansowania tych przedsięwzięć.

1. Eksploatacja majątku trwałego i efektywność wykorzystania jego składników

Ważnym obszarem w rozważaniach dotyczących efektywności podejmowanych przedsięwzięć inwestycyjnych jest zwiększenie lub modernizacja majątku trwałego przedsiębiorstwa. Czynniki związane z odpowiednią organizacją posiadanego majątku oraz czasem jego wykorzystania stanowią determinującą rolę dla uzyskania wymaganej efektywności przedsięwzięcia. Kwestia sposobu organizacji składników majątku sprowadza się do przygotowania odpowiedniej struktury organizacyjnej osadzonej w zadanych ramach czasu użytkowania składników majątku oraz sformułowaniu adekwatnych modeli obliczeniowych dla potrzeb oceny ekonomicznej efektywności przedsięwzięć inwestycyjnych (Borowiecki, Czaja, Jaki, 1997, s. 74–75).

W następstwie określenia sposobu ujęcia formuły rachunku efektywności inwestycji (roczna lub wieloletnia) konieczne jest rozstrzygnięcie dalszych, merytorycznych zagadnień związanych z wprowadzeniem czynnika struktury i czasu, tj.:

- określenia rodzaju struktury wykorzystania składników majątku opartej na kryterium granicznej wartości efektywności przedsięwzięcia,
- określenia modeli obliczeniowych adekwatnych do wyznaczonych struktur zadaniowych,
- określenia długości okresów realizacji zadań i trwałości eksploatacyjnej ujmowanych w rachunku efektywności,
- zmienności i porównywalności w czasie poszczególnych elementów rachunku,
- uwzględnienia zamrożenia nakładów kapitałowych.

Wszystkie te kwestie znajdują właściwe rozwiązanie w ramach rachunku efektywności inwestycji, poprzez zastosowanie odpowiednich sposobów podejścia i odpowiadających im metod, opisanych również w literaturze (Urbańczyk, 1985; Zarzecki, 1997). Stąd też wykorzystuje się metody normatywne i optymalizacyjne jeśli chodzi o określenie długości okresu obliczeniowego, dyskontowanie i oprocentowanie w zakresie porównywalności w czasie oraz rachunek utraconych korzyści w aspekcie zamrożenia nakładów kapitałowych (Iwin, Niedzielski, 2002, s. 110, 118).

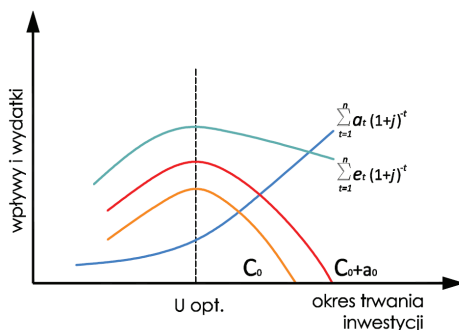
Okres obliczeniowy – jako jeden z istotnych parametrów rachunku efektywności – składa się z dwóch części: okresu realizacji (przygotowawczo–realizacyjnego) i okresu eksploatacji. Związek, jaki występuje pomiędzy tymi dwoma okresami a poziomem efektywności inwestycji, można sformułować jako zależność wprost proporcjonalną efektywności inwestycji względem długości okresu eksploatacji. Związek ten prezentuje również zależność odwrotnie proporcjonalną efektywności inwestycji do długości okresu realizacji. Stąd też pojawia się naturalna dążność, poparta wymiernymi efektami, do skracania okresu realizacji, a wydłużania okresu eksploatacji. Zasadniczą część okresu obliczeniowego przypada na okres eksploatacji majątku trwałego powstałego w wyniku poniesienia nakładów inwestycyjnych. Zasób majątku wykorzystuje się przez okresy długie, a od tego, jak długo ten zasób można i warto wykorzystywać, zależą – sumarycznie ujmując – uzyskiwane efekty.

Przywołane koncepcje ustalania okresu eksploatacji majątku trwałego, zebrane w dwóch zasadniczych grupach, tj. koncepcji normatywnych (np. odwrotności stawki amortyzacyjnej, okresu ekonomicznie pewnej eksploatacji) oraz koncepcji optymalizacyjnych (np. rosnącej różnicy kosztów, malejącej nadwyżki), pozwalają na wyznaczenie wielkości tego istotnego parametru rachunku efektywności inwestycji. Należy jednak pamiętać, że wprowadzenie w sposób właściwy czynnika czasu do rachunku efektywności inwestycji oznacza nie tylko zapewnienie porównywalności nakładów i efektów w czasie, poprzez stosowanie techniki dyskonta i procentu składanego, ale także modyfikacji wyjściowych (statycznych) formuł, ujmujących poszczególne parametry tego rachunku, w tym okres eksploatacji (określany – okres obliczeniowy). Stąd też, nie wchodząc w dalsze szczegółowe rozważania, jeżeli istotą amortyzacji ujmowanej we wszystkich formułach rachunku efektywności inwestycji jest odzwierciedlenie okresu aktualności zasobu majątku trwałego, to w warunkach reprodukcji rozszerzonej wyłącznie suma amortyzacji aktuarialnej i oprocentowania nakładów kapitałowych odpowiada rocznej racie annuitetowej, co oznacza, że w okresie n lat występuje wygospodarowanie nadwyżki pokrywającej całą wielkość wydatkowanego nakładu, zwiększoną o odsetki od wartości zasobu majątku trwałego (Moczarski, 1996, s. 103–104). Zatem oprócz postulatu posługiwania się średnimi ważonymi stawkami odpisu amortyzacyjnego (dla zapewnienia reprezentatywności całego zbioru majątku trwałego), niezbędne jest wykorzystanie do obliczeń stawki amortyzacji aktuarialnej.

Mając na uwadze wcześniejsze spostrzeżenia dotyczące okresu użytkowania majątku trwałego należy stwierdzić, że optymalny okres jego wykorzystania występuje wtedy,

gdy zostanie osiągnięta czasowa granica zysku – tj. moment, w którym koszty związane z eksploatacją majątku trwałego są równe przychodom uzyskanym z jego eksploatacji. Po osiągnięciu czasowej granicy zysku, dalsza eksploatacja majątku trwałego jest dla przedsiębiorstwa nieopłacalna. Do ustalania czasowej granicy zysku przydatna jest metoda wartości kapitału (wartość kapitałowa netto). Ujmuje się w niej sumę wszystkich przepływów finansowych inwestycji rzeczowej na określony moment, a przede wszystkim wpływy i wydatki związane z daną inwestycją.

Majątek trwały jest optymalnie wykorzystywany przez przedsiębiorstwo, gdy granica zwrotu z kapitału jest równa zero, podobnie jak granica zysku, określana w pewnym momencie, jest równa zero. Optymalny okres użytkowania majątku trwałego wyznacza się przez kumulację wartości wpływów (e_t) i wydatków (a_t) oraz wartości zwrotu kapitału (C_0) – por. rysunek 1.



Rysunek 1. Izokwanty optymalnego okresu wykorzystywania majątku trwałego przy wyznaczonej granicy wpływów, wydatków i określonej stopie zwrotu z kapitału

Źródło: Iwin, Niedzielski (2002), s. 116.

Przy wykreślaniu krzywej stopy zwrotu z kapitału, optymalny okres wykorzystania majątku trwałego trwa do momentu $U_{opt.}$. Po osiągnięciu tej wartości majątek nie będzie już wykorzystywany optymalnie. Przy tym poziomie w przedsiębiorstwie występuje jeszcze dodatni wpływ kosztów, ale dalszy ich wzrost spowoduje obniżenie rentowności.

W tym stanie rzeczy przedsiębiorstwo osiąga jeszcze maksymalny poziom stopy zwrotu z kapitału, ponieważ granica zysku sprowadza się do zera.

Określenie czasowej granicy osiągania zysku z eksploatacji majątku trwałego jest niezwykle istotnym elementem jego optymalnego wykorzystania. Znajomość kosztów bezpośrednich, wpływających na wyznaczenie granicy osiągania zysku, pozwala na optymalizację wykorzystania tego majątku. Na wielkość tych kosztów składają się zarówno koszty amortyzacji, jak i koszty eksploatacji. Gdy wartość odpisów amortyzacyjnych w całym okresie wykorzystania majątku trwałego jest stała, to wpływ na optymalny okres wykorzystania

składnika majątku mają głównie koszty eksploatacji (Zarzecki, 1997, s. 118). Taką sytuację obserwuje się wówczas, gdy amortyzację oblicza się w sposób liniowy.

Mając na uwadze optymalne wykorzystanie majątku trwałego, przedsiębiorstwo powinno stale analizować koszty i na tej podstawie dostosowywać wielkość kosztów amortyzacji do możliwości produkcyjnych majątku trwałego oraz do wielkości kosztów jego eksploatacji. W pierwszym okresie wyższe koszty amortyzacji nie mają wpływu na optymalność wykorzystania majątku trwałego, ponieważ koszty związane z jego eksploatacją są wówczas niewielkie, natomiast ich wielkość wzrasta wraz z okresem wykorzystania majątku trwałego, z uwagi na większą uszkodzalność, czyli pogorszenie niezawodności i związane z tym wyższe koszty napraw oraz koszty przerw w pracy. Analiza wielkości generowanych kosztów wskazuje, że podczas intensywnego wykorzystania składników majątku największe koszty powstają na skutek przestoju spowodowanych uszkodzeniami maszyn i niewykonania zadań produkcyjnych. W związku z tym należy poszukiwać i stosować metody poprawy niezawodności systemu produkcyjnego, które charakteryzują niską wrażliwością na pogarszanie się niezawodności pojedynczych maszyn. Zastosowanie metod analizy strukturalnej niezawodności systemu produkcyjnego może w znaczący sposób poprawić jego niezawodność, efektywność i stabilność pracy w warunkach zwiększonej intensywności uszkodzeń elementów systemu.

2. Struktury niezawodnościowe systemu użytkowania i efektywność majątku trwałego

Zapewnienie wymaganej efektywności jest spójne z działaniami poprawnego wykonania zadania gospodarczego. Każde działanie zależy od niezawodności systemu w konfiguracjach odpowiadających procesowi użytkowania składników majątku praktycznie realizujących proces jego pomnażania. Skuteczność procesu gospodarowania składnikami majątku przedsiębiorstwa jest więc funkcją niezawodności procesu użytkowania składników i efektywnością procesu gospodarczego. Funkcja niezawodności w dużej części wynika ze struktury niezawodnościowej. Można więc zauważyć, że system gospodarowania, system użytkowania, system finansowania oraz systemy destrukcji środków produkcji oddziałują na rzeczywisty system eksploatacji majątku trwałego przez odpowiadające im struktury niezawodnościowe (Młynarski, 2014, s. 871–880).

Wynika z tego, że nadrzędną rolę w procesie efektywnego użytkowania majątku trwałego zajmują zagadnienia dotyczące struktur niezawodnościowych systemu gospodarowania, a następnie koszty i niezawodności elementów tych systemów w postaci składników majątku. Trzeba też zauważyć ogromne możliwości, jakie daje aplikacja teorii niezawodności do zagadnień gospodarki majątkiem trwałym. W wyniku zastosowania zaawansowanych metod komputerowych niezawodności jest możliwa symulacja i optymalizacja niezawodności struktur użytkowania składników majątku dla potrzeb maksymalnej efektywności

przedsięwzięcia gospodarczego (Oprzędkiewicz, 1993, 1997; Smalko, 1996). Zastosowanie komputerowych metod do analizy niezawodności w gospodarce składnikami majątku umożliwi optymalizację zamrożonego w środkach trwałych kapitału, szybsze osiągnięcie dużej skuteczności i poprawę efektywności podejmowanych przedsięwzięć.

Zagadnienie poznania struktury niezawodnościowej systemu jest bardzo istotne ze względu na racjonalne oddziaływanie na system gospodarowania składnikami majątku. Zapewnienie planowanej efektywności oraz optymalizacji ekonomicznej systemu wymaga identyfikacji struktury niezawodnościowej oraz jej charakterystycznych właściwości, które w sposób deterministyczny wpływają na ekonomikę i parametry użytkowania technicznych składników majątku. Współczesne systemy produkcyjne i transportowe składają się z bardzo dużej ilości elementów, w związku z czym występuje w rzeczywistości potencjalnie duża liczba struktur.

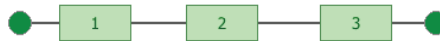
Prostą i łatwo interpretowaną metodą prezentacji struktury niezawodnościowej systemu jest metoda graficzna przedstawiająca zależności niezawodnościowe elementów i systemu w postaci schematu blokowego struktury niezawodnościowej. Wizualizacja tej zależności odpowiada graficznej prezentacji struktury niezawodnościowej systemu. Ponadto wyróżnione są dwa punkty końcowe nazywane węzłami: wejście i wyjście, między którymi odbywa się hipotetyczny przepływ sygnałów.

Podstawowymi połączeniami stosowanymi w blokowym schemacie struktury niezawodnościowej są: połączenie szeregowe odpowiadające strukturze szeregowej, połączenie równoległe, odpowiadające strukturze równoległej oraz połączenie progowe z użyciem funktora $k-z-n$, odpowiadające strukturze typu $k-z-n$.

Schemat blokowy można interpretować jako schemat organizacji zarządzania w systemach gospodarowania odpowiednimi składnikami majątku zapewniającymi wykonanie odpowiednich zadań produkcyjnych lub transportowych między komórkami przedsiębiorstwa: realizacja zadań cząstkowych przez kolejne etapy procesu przetwarzania prowadzona jest do punktów końcowych, kolejne bloki są składnikami systemu, natomiast linie – kanałami lub magistralami przekazującymi zadania. Przy tej interpretacji zdatności lub niezdatności elementu struktury odpowiada działanie procesowe i wykonanie zadania produkcyjnego lub transportowego przez jedną lub więcej komórek albo brak działania procesowego i niewykonanie zadania przez przyporządkowaną komórkę. Zdatności systemu odpowiada wykonanie zadania przynajmniej przez jedną komórkę, natomiast niezdatność jest interpretowana jako brak wykonania zadania. Schemat blokowy może być również interpretowany jako dwuprzylączeniowa sieć przełączająca typu przekaźnikowego złożona z bloków przełączeniowych: blok odpowiadający danemu elementowi systemu jest złączony, gdy element ten jest zdalny, oraz rozłączony, gdy dany element jest uszkodzony. Oczywiście, bloki odpowiadające jednemu elementowi rozłączają i załączają się jednocześnie. Wówczas uszkodzeniu systemu odpowiada brak możliwości przepływu sygnału, natomiast w rzeczywistych

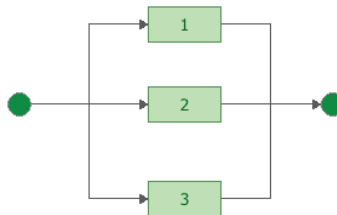
warunkach brak łączności pomiędzy komórkami systemu produkcyjnego od wejścia do wyjścia, zdolności systemu odpowiada istnienie możliwości przepływu sygnału, czyli realizacji funkcji łączności. W literaturze (Oprzędkiewicz, 1993, 1997) opisano struktury systemów maszynowych wytwarzania i eksploatacji maszyn, których konfiguracja może przybierać podobne jak w systemach produkcyjnych formy.

Blokowy schemat struktury niezawodnościowej stosowany jest zazwyczaj do systemów o konstrukcji modułowej, np. mogą mieć zastosowanie do dużych systemów produkcyjnych złożonych z wielu komórek (węzłów) produkcyjnych zawierających odwzorowane i standaryzowane podsystemy wewnętrzne itp. Schematy stosowanych podstawowych struktur niezawodnościowych przedstawiono na rysunkach 2–7.



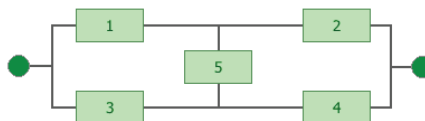
Rysunek 2. Schemat blokowy struktury szeregowej trójelementowej (1, 2, 3 prezentują komórki lub gniazda produkcyjne)

Źródło: opracowanie własne.



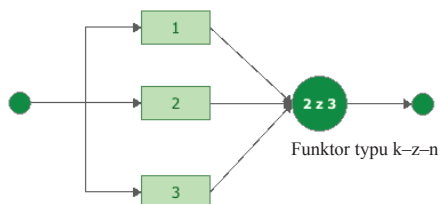
Rysunek 3. Schemat blokowy struktury równoległej trójelementowej (1, 2, 3 prezentują komórki lub gniazda produkcyjne)

Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 4. Równoważne schematy blokowe struktury typu $k-z-n$ dla $k = 2$, $n = 3$ [7]: przy użyciu funktora progowego

Źródło: opracowanie własne.



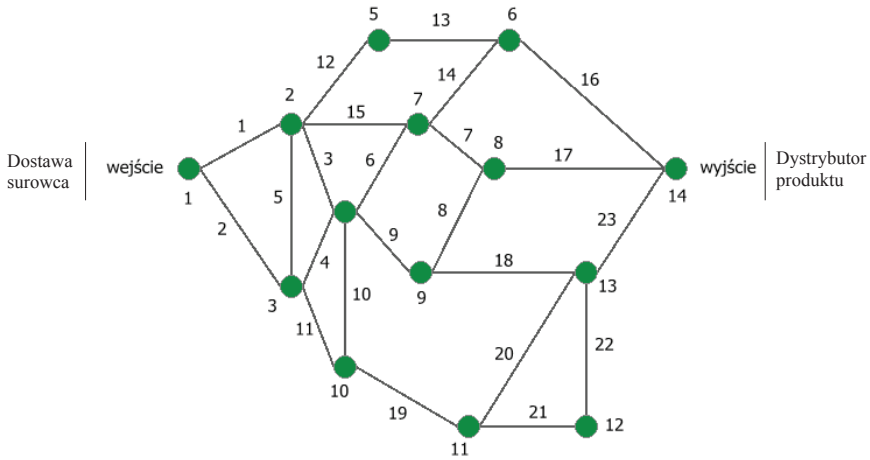
Rysunek 5. Schemat blokowy struktury złożonej (mostkowej)

Źródło do rysunków 2–5: Karpiński, Korczak (1990); Młynarski (2014), s. 871–880.

Jeśli element systemu jest uszkodzony, to odpowiadający mu blok nie może wykonać zadania, czyli jest nie aktywny i nie przepuszcza sygnału. Warunkiem zdatności systemu jest istnienie, zgodnego ze skierowaniem odcinków, przejścia od węzła początkowego do węzła końcowego przez zdatne niezablokowane bloki i węzły.

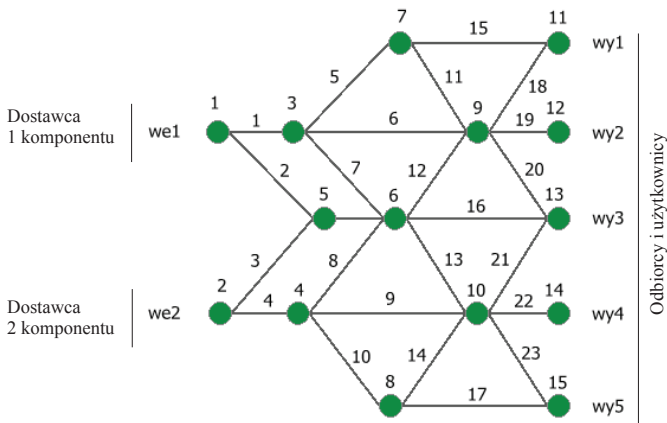
Innym graficznym przedstawieniem struktury systemu jest graf (skierowany lub nieskierowany) z wyróżnionymi dwoma węzłami (wierzchołkami): początkowym (wejście) i końcowym (wyjście). Gałęzie grafu: skierowane (krawędzie) lub nieskierowane (łuki) odpowiadają elementom systemu, natomiast węzły grafu prezentują sposób połączeń elementów. Zakłada się że jednemu elementowi systemu odpowiadała jedna gałąź grafu. W niektórych przypadkach pewnym elementom systemu przyporządkowuje się węzły – otrzymujemy wtedy tzw. graf o zwartych węzłach.

W takim opisie systemu wyróżnione są dwa węzły. Odwzorowanie struktury przy pomocy grafów często stosowane jest w systemach o dużej liczbie elementów i złożonych zależnościach między elementami. Grafy takie nazywane są grafami lub sieciami dwubiegunowymi, które zaprezentowano na rysunku 6, natomiast w literaturze (Oprzędkiewicz, 1993, 1997; Smalko, 1996) opisano systemy w produkcji i transporcie, które mogą mieć rzeczywiste odwzorowanie w postaci struktury przedstawionej na rysunku 6. W systemach produkcyjnych istnieją takie, w których można wyróżnić wiele wejść δ i wyjść τ , wówczas w opisie graficznym występują grafy w postaci sieci wielobiegunowych (rys. 7), których interpretacja niezawodnościowa jest nieco odmienna. Mianowicie, jako warunek zdatności takiego grafu zazwyczaj przyjmuje się istnienie połączenia od każdego węzła początkowego $s \in \delta$ do dowolnego węzła końcowego $t \in \tau$, przy czym pewne węzły grafu, zdarza się, że wszystkie, mogą być zarówno węzłami wejściowymi, jak i wyjściowymi (tzn. $\delta \cap \tau \neq \emptyset$). Jeśli pewien węzeł, np. v , jest zarówno węzłem początkowym, jak i końcowym, to przyjmuje się, że istnieje połączenie z v do v , bez względu na stan gałęzi grafu. Jeśli $\delta = \tau = K$, wówczas K określa sieć węzłów lub terminali, to zdatność takiego grafu oznacza, że istnieje połączenie między każdą parą węzłów $v, w \in K$. W granicznym przypadku, jeśli $\delta = \tau = K$ jest równy zbiorowi wszystkich węzłów grafu, to zdatność grafu odpowiada istnieniu połączenia między każdą parą węzłów grafu.



Rysunek 6. Graf dwubiegunowego systemu sieciowego

Źródło: opracowanie własne na podstawie Karpiński, Korczak (1990).



Rysunek 7. Graf systemu sieciowego wielobiegunowego z dwoma wejściami i pięcioma wyjściami

Źródło: opracowanie własne na podstawie Karpiński, Korczak (1990).

Należy zaznaczyć, że przypadek $\tau = \{s\}$, $\tau = \{t\}$, $s \neq t$, nie jest, w ogólności, równoważny przypadkowi $\tau = \{s, t\}$. Dla pierwszego z nich zdatność jest określona warunkiem istnienia połączenia z s do t , dla drugiego natomiast z s do t oraz z t do s .

Grafowy opis struktury niezawodnościowej jest szczególnie przydatny przy skomplikowanych systemach typu sieciowego, np. sieci kooperantów wykonujących różne komponenty,

sieci logistycznej dystrybucji wyrobów. W systemach produkcyjnych struktury niezawodnościowe cały czas mogą ewoluować. Przyczyną takiego stanu może być zmiana obszaru objętego działaniem albo na przykład zmieniający się rynek zbytu. Oprządkiewicz (1993, 1997) scharakteryzował metody umożliwiające automatyczną identyfikację skomplikowanych struktur systemu. Poprawna identyfikacja struktur rzeczywistych systemów technicznych jest zabiegiem kluczowym do prawidłowej analizy niezawodności i oceny efektywności w pracy systemu.

Prowadząc rozważania nad efektywnością struktur niezawodnościowych takich systemów, jak systemy produkcyjne oraz transportowe, należy wskazać na struktury progowe typu *kzn*. W przypadku gdy system lub układ posiada strukturę typu *kzn* i składa się z jednorodnych i odnawialnych obiektów, wówczas $n-k$ stanowi parametr bezpośrednio wpływający na niezawodność i efektywność systemu.

Oszacowania niezawodności w takim przypadku można dokonać metodami analitycznymi, takimi jak procesy Markowa. Analizie poddawana jest intensywność uszkodzeń obiektów w stanie pracy jako λ , w stanie rezerwy λ_r i intensywność odnowy jako μ . Dla przypadków gdy rezerwa jest rezerwą gorącą (bezpośrednio wykorzystywaną w realizacji zadania), $\lambda_r = \lambda$. Liczba stanów zdatności, w jakich może przebywać układ *kzn* (gdy $\lambda_r = \lambda$), jest zawsze o 1 większa od różnicy między wartościami n i k , czyli o 1 większa od liczby obiektów rezerwowych. Przedstawiony model może być użyteczny dla rzeczywistych systemów w ocenie niezawodności, umożliwiając zapisanie i rozwiązanie równań różniczkowych Kołmogorowa. Warunkiem jest niewielka liczba obiektów rezerwowych.

Szacowanie niezawodności układów składających się z odnawialnych obiektów technicznych stanowiących środki trwałe wykorzystywane do realizacji produkcji prowadzone może być różnymi metodami. W szczególności mogą to być metody, w których wykorzystywane są zależności analityczne albo metody oparte na symulacji komputerowej. W teorii analizy niezawodnościowej mogą być stosowane metody wykorzystujące procesy Markowa w celu opisu zmian stanów technicznych systemu w czasie jego pracy. Metody te, ze względu na konieczność stosowania wielu ograniczeń oraz czasochłonnych i złożonych obliczeń, mają niewielkie praktyczne zastosowanie (Manzini, Regattieri, Pham, Ferrari, 2010; Młynarski, Pilch, Smolnik, Szybka, 2015, s. 1210–1218).

Obecne programy komputerowe wykorzystywane do analizy i oceny niezawodności strukturalnej umożliwiają automatyczną szybką identyfikację struktur na podstawie opisu graficznego. Jednym z przykładów do zastosowania w pracach związanych z analizą i oceną niezawodności złożonych systemów technicznych, w tym produkcyjnych i transportowych, mogą być aplikacje pakietu programowego BlockSim ReliaSoft Corporation przeznaczonego do analizach niezawodności systemów odnawialnych o różnych strukturach niezawodnościowych (Kaczor, Młynarski, Szkoda, 2016, s. 31–39; System Analysis Reference..., 1999–2007). Aplikacja ta może posłużyć do efektywnej analizy niezawodności systemów oraz wyliczenia kosztów eksploatacji zdeterminowanych uszkodzeniami elementów systemu produkcji.

3. Symulacyjna metoda oceny efektywności struktury niezawodnościowej majątku trwałego

W celu oceny efektywności systemu użytkowania składników majątku niezbędne jest wyznaczanie charakterystyk niezawodnościowych tych systemów. W systemach produkcyjnych i transportowych występuje wiele składników majątku, które w wyniku stosowanych procedur organizacyjnych konfigurowane są w układy maszyn realizujących określone funkcje produkcyjne. Dla potrzeb oceny niezawodności systemu układy te przedstawiane są w postaci struktur niezawodnościowych, często występują jako struktury nadmiarowe typu *kzn*. Struktury tego typu charakteryzują się wysoką efektywnością i bezpieczeństwem realizacji zaplanowanych zadań. Przyczynia się do tego możliwość oddziaływania przedsiębiorstwa na strukturę i wskaźniki niezawodności eksploatowanych systemów. Do efektywnego wyznaczania wskaźników niezawodności złożonych układów i systemów odnawialnych stosowane są programy komputerowe i metody symulacyjne. Modele symulacyjne szczególnie przydatne są w celu szacowania niezawodności odnawialnych systemów wieloelementowych o strukturach *kzn* w przypadku gdy obiekty nie są jednorodne, a czasy ich pracy do uszkodzenia opisywane są za pomocą innych niż wykładniczy rozkład prawdopodobieństwa, co przedstawiono w dalszej części opracowania.

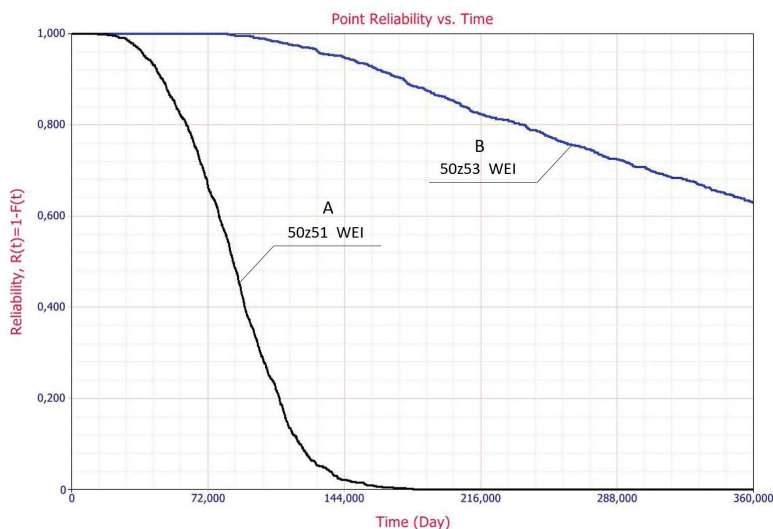
Jednym z często wykorzystywanych jest program BlockSim firmy Reliasoft, bazujący na symulacjach stochastycznych Monte Carlo. Jego główną zaletą jest możliwość stosowania różnych rozkładów prawdopodobieństwa do modelowania niezawodności systemów technicznych.

Metoda symulacji Monte Carlo, wykorzystywana przez pakiet oprogramowania firmy Reliasoft, polega na generowaniu losowych wartości czasu do uszkodzenia dla odpowiedniego rozkładu prawdopodobieństwa każdego z elementów systemu. Środowisko programowe BlockSim wykorzystuje do tego celu generator liczb losowych, oparty na algorytmie Ecuyera i losowaniu Baysa-Durhama (Johnson, 2013; Kaczor, Młynarski, Szkoła, 2016, s. 31–39, Carlo Analysis...).

Aby korzystać z metody symulacyjnej do wyznaczania czasu poprawnej pracy w środowisku BlockSim, konieczne jest wprowadzanie wymaganych danych wejściowych. Należą do nich przede wszystkim czas trwania symulacji wyrażony w przyjętych jednostkach wykonywanej pracy oraz liczba powtórzeń symulacji.

Metoda Monte Carlo jest przydatną techniką obliczania wartości wskaźników niezawodności szczególnie dla obiektów, w których uwzględniane są procesy odnowy uszkodzonych środków produkcji. W procedurze obliczeniowej zastosowano generator liczb pseudolosowych w celu wyznaczenia wartości parametrów eksploatacyjnych potrzebnych do obliczenia wskaźników niezawodności. Wytworzenie z wybranych parametrów eksploatacyjnych tak zwanej pseudorzeczywistości umożliwia symulację funkcjonowania w niej obiektów oraz optymalizację procesu obsługowego dla dowolnie wybranych modeli struktur niezawodnościowych (System Analysis...). Stosowana w programie metoda symulacji

Monte Carlo oraz używany w niej generator liczb losowych umożliwia kompleksową ocenę efektywności systemu wynikającą z różnicy planowanych wyników produkcji i sumy kosztów ustalonych na podstawie symulacji uszkodzeń i napraw obiektu oraz sumy strat wynikających z niewykonanych zadań i umów w zadanym przedziale czasu badanych struktur (Manzini, Regattieri, Pham, Ferrari, 2010). Przykładem mogą być obliczenia wykonane w programie BlockSim dla dwóch struktur niezawodnościowych progowych, w których $k = 50$ elementów (środków produkcji), natomiast dla struktury „A” $n = 51$ elementów, dla „B” $n = 53$ elementy, co oznacza, że w A znajduje się jeden element rezerwowy, zaś w B znajdują się trzy elementy rezerwowe. Symulowane przebiegi charakterystyk niezawodności dla systemów o określonych wcześniej w treści strukturach eksploatowanych przez 1 rok dla przyjętych wartości intensywności uszkodzeń oraz czasów odnowy i modelu rozkładu prawdopodobieństwa Weibulla o parametrach $\beta = 2,5$ i $\eta = 183$ przedstawiono na rysunku 8.



Rysunek 8. Symulacyjne charakterystyki funkcji niezawodności systemu produkcyjnego modelowane rozkładem Weibulla o strukturach niezawodnościowych typu *kzn*, gdzie A(50 z 51) i B(50 z 53)

Źródło: opracowanie własne.

Duże różnice w wartościach funkcji niezawodności porównywanych charakterystyk i gwałtowny spadek wartości wskaźnika dla charakterystyki A skłania do wniosku, że dla zadanej liczności uszkodzeń jeden element rezerwowy jest niewystarczający do zapewnienia wymaganego efektywnego poziomu niezawodności systemu. Wartości funkcji niezawodności wpływają na koszty bezpośrednie wynikające z eksploatacji maszyn lub pojazdów i oddziałują również na skutki finansowe niewykonania zadań (zmniejszenie produkcji i dodatkowe narzuty i kary).

Koszty całkowite, na utrzymanie i przywrócenie zdolności funkcjonalnej oraz koszty usunięcia następstw awarii, można wyliczyć z równania:

$$K_c = K_p \left(1 + \frac{K_b}{K_p} \right) + K_a K_p \quad (1)$$

$$I_u = \frac{K_b}{K_p} \quad (2)$$

I_u – indeks utrzymania zdolności,

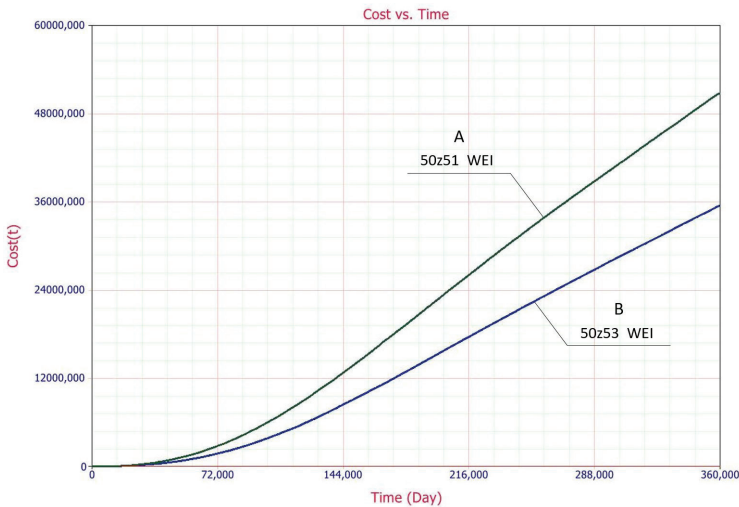
K_c – koszty całkowite,

K_p – koszty działań zapobiegawczych (w tym zapewnienia elementów nadmiarowych),

K_b – koszty bieżących prac naprawczych,

K_a – koszty spowodowane przez awarie (zmniejszenie produkcji, kary wynikające z umów).

Wykorzystanie wyników symulacji niezawodności systemu daje praktyczne możliwości i wystarczająco dokładne wyniki obliczeń kosztów eksploatacji badanych systemów. Wyliczenia kosztów eksploatacji dla systemów technicznych o różnych strukturach niezawodnościowych i przebiegu wskaźników niezawodności przedstawionych na rysunku 8 dokonano w programie BlockSim-9 i przedstawiono na rysunku 9.



Rysunek 9. Charakterystyki sumy kosztów uszkodzeń w eksploatacji systemu produkcyjnego dla struktury A (50 z 51) i B (50 z 53) i statystycznie przyjętych wartości kosztów uszkodzeń

Źródło: opracowanie własne.

Sytuacja prezentowana na rysunku 9 ma charakter dynamiczny i zdeterminowana jest relacjami między różnymi rodzajami kosztów. Relacje te uzależnione są od cech

techniczno-eksploatacyjnych oraz od organizacji i sposobu użytkowania składników majątku zaangażowanych w proces produkcyjny. Kluczowym czynnikiem techniczno-organizacyjnym, który można wpłynąć na niezawodność i efektywność podejmowanych przedsięwzięć produkcyjnych, jest struktura niezawodnościowa systemu. Identyfikacja struktury niezawodnościowej i aplikacja metod organizacyjnych przyczynia się do osiągnięcia wysokiej efektywności systemów produkcyjnych (Manzini, Regattieri, Pham, Ferrari, 2010). Prognozowanie zakresu finansowania oraz ryzyka przedsięwzięć produkcyjnych może być racjonalnie prowadzone z wykorzystaniem metod symulacyjnych do oceny niezawodności systemów oraz określenia kosztów uszkodzeń i skutków powstałych z przestojów maszyn, w tym odszkodowań i kar za niewykonane zadania produkcyjne.

Zapewnienie wysokiej efektywności i racjonalne sterowanie procesem produkcyjnym lub transportowym może być realizowane z wykorzystaniem specjalistycznych programów do symulacji i szacowania kosztów zdeterminowanych niezawodnością i trwałością maszyn oraz systemów technicznych. Prognozowanie finansowania takich przedsięwzięć powinno być realizowane przez łączenie analizy niezawodności i wyliczenia kosztów związanych z symulowanymi uszkodzeniami składników systemów produkcyjnych.

Uwagi końcowe

Pomyślnie rozwiązywanie problemów eksploatacji systemów technicznych, takich jak systemy produkcyjne oraz transportowe, wymaga zastosowania specjalistycznych metod łączących inżynierię niezawodności środków technicznych i ekonomikę przedsiębiorstw funkcjonujących w warunkach gospodarki rynkowej. Racjonalne gospodarowanie majątkiem trwałym, który charakteryzuje się określonymi cechami i właściwościami technicznymi, wymaga analizy efektywności jego wykorzystania, zgodnie z przyjętymi zasadami działalności gospodarczej przedsiębiorstwa. Powszechnie znane i wykorzystywane są metody związane z niezawodnością systemów technicznych dotyczące planowania reśursów, obsług oraz odnów w celu weryfikacji stanu technicznego eksploatowanych środków technicznych i profilaktycznego zapobiegania uszkodzeniom. Wykorzystanie elementów strukturalnej teorii niezawodności w organizacji systemów produkcyjnych wprowadza skuteczny parametr oddziaływania na niezawodność i poprawę efektywności systemów produkcyjnych. Efektywne wykorzystanie analiz niezawodnościowych w rachunku ekonomicznym przedsięwzięć gospodarczych jest możliwe jedynie z zastosowaniem specjalistycznych programów komputerowych do analizy niezawodności, które stanowią kluczowe narzędzie do zmniejszenia ryzyka podejmowanych decyzji i poprawy efektywności prowadzonych przedsięwzięć z udziałem technicznych środków produkcji.

Przedstawione w pracy możliwości wykorzystania struktur niezawodnościowych do poprawy efektywności gospodarowania składnikami majątku przedsiębiorstwa oraz zastosowanie pakietu programowego BlockSim-9 stanowi przykład algorytmu postępowania w optymalizacji omawianych systemów produkcyjnych i transportowych. Kształtowanie

struktury niezawodnościowej systemu i zapewnienie odpowiedniej redundancji odpowiedzialnych elementów w strukturze stanowi jeden z najskuteczniejszych zabiegów zwiększenia niezawodności i poprawy wskaźników ekonomicznych systemu wprowadzanych na etapie planowania i przygotowania inwestycji produkcyjnych.

Literatura

- Adamkiewicz, W., Hempel, L., Podsiadło, A., Śliwiński, R. (1983). *Badania i ocena niezawodności maszyny w systemie transportowym*. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności.
- Borowiecki, R., Czaja, J., Jaki, A. (1997). *Strategia gospodarowania kapitałem w przedsiębiorstwie. Zagadnienia wybrane*. Warszawa–Kraków: TNOiK.
- Iwin, J., Niedzielski, Z. (2002). *Rzeczowy majątek trwały. Amortyzacja i inwestycje rzeczowe w finansach przedsiębiorstw*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Johnson, P.E. (2013). Monte Carlo Analysis in Academic Research. W: T.D. Little (red.), *The Oxford Handbook of Quantitative Methods in Psychology*. Vol. 1.
- Kaczmarek, J., Młynarski, S. (2015). *The Impact of Reliability on the Costs of the Use of Vehicles. Development, innovation and business potential in view of economic changes*. Cracow: Foundation of the Cracow University of Economics.
- Kaczor, G., Młynarski, S., Szkoda, M. (2016). Verification of Safety Integrity Level with the Application of Monte Carlo Simulation and Reliability Block Diagrams. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 41, 31–39.
- Karpiński, J., Korczak, E. (1990). *Metody oceny niezawodności dwustanowych systemów technicznych*. Omnitech Press.
- Manzini, R., Regattieri, A., Pham, H., Ferrari, E. (2010). *Maintenance for Industrial Systems*. London: Springer-Verlag.
- Młynarski, S. (2014). Niezawodność strukturalna w systemach logistycznych ratownictwa. *Logistyka*, 4, 871–880.
- Młynarski, S., Kaczmarek, J. (2015). Efektywność funkcjonowania przedsiębiorstw transportu towarów w ujęciu przyczynowej analizy kreowania wartości. *Logistyka*, 4, 4959–4971.
- Młynarski, S., Pilch, R., Smolnik, M., Szybka, J. (2015). Kształtowanie układów technicznych w aspekcie zapewnienia ich niezawodnego i bezpiecznego funkcjonowania. *Logistyka*, 6, 1210–1218.
- Moczarski, M. (1996). Nowe metody obsługiwanania pojazdów szynowych. *Technika Transportu Szynowego*, 8.
- Oprządkiewicz, J. (1997). *Komputerowa metoda oceny niezawodności systemów technicznych*. Lublin: LTN.
- Oprządkiewicz, J. (1993). *Wspomaganie komputerowe w niezawodności maszyn*. Warszawa: WNT.
- Pilch, R. (2015). A Method for Obtaining the Required System Reliability Level by Applying Preventive Maintenance. *Simulation*, 7 (97), 615–624.
- Smalko, Z. (1996). *Modelowanie eksploatacyjnych systemów transportowych*. Radom: ITE.
- System Analysis Reference. Reliability, Availability & Optimization. BlockSim 7 (1999–2007)*. Tucson (AZ): Reliasoft Corporation.
- Urbańczyk, E. (1985). *Metody analizy ekonomicznej efektywności majątku trwałego w przemyśle*. Szczecin: Politechnika Szczecińska.
- Zamojski, W. (1981). *Niezawodność i eksploatacja systemów*. Wrocław: Politechnika Wroclawska.
- Zarzecki, D. (1997). *Metody oceny efektywności inwestycji. Wybrane zagadnienia*. Szczecin: Interbook.

RELIABILITY AND SIMULATION METHODS TO ENSURE THE EFFECTIVENESS OF PRODUCTION AND TRANSPORT SYSTEMS

Abstract: The presented study describes the application possibility of elements of the reliability engineering in organization and strategy of rational management as well as in efficient utilizing of fixed assets of companies in production systems. The effectiveness of the strategy of fixed capital use is defined in terms of the composition of the material and the organization of the components constituting the production system. Degree of achieved economic rationality is described by a probabilistic function of the production task performance with the assumed economic parameters, defined as a function of the system reliability. However,

the organizational structure of the utilized assets is replaced by the reliability structure and its characteristic analytical models. The essence of the success of the economic system is the strategy of the organization of a set of elements adapted to the reliability structure model subordinated to the maximum system efficiency. Determined technical and economic indicators are generated by a computer program to analyze the reliability structures using Monte-Carlo simulation. The final result is a presentation of the reciprocal relationship between the structure of reliability, costs, and the economic effects of the system. Therefore, it can be stated that the organization of reliability structure is a major factor to determine the size of the basic technical and economic quantities, affecting the efficiency and proper operation of the company production system.

Keywords: fixed assets, efficiency, reliability, simulation, operation

Cytowanie

Młynarski, S. (2017). Niezawodnościowe i symulacyjne metody zapewnienia efektywności przedsięwzięć produkcyjnych i transportowych. *Finanse, Rynki Finansowe, Ubezpieczenia*, 5 (89/1), 103–118. DOI: 10.18276/irfu.2017.89/1-08.