

Analiza kosztów wytwarzania w korytarzach elastyczności operacyjnej

Marek Dudek*

Streszczenie: Opracowanie prezentuje propozycję sposobu wyznaczania kosztów i granic tzw. korytarzy niskokosztowej elastyczności, które umożliwiają równoważenie poziomów elastyczności i szczupłości systemu wytwarzania. Precyzyjne zdefiniowanie granic korytarzy pozwala na elastyczne dopasowanie się działań operacyjnych do strategii elastyczności a tym samym, zredukuję koszty jej utrzymywania. Do weryfikacji zaproponowanych formuł wykorzystano modelowanie symulacyjne, za pomocą którego, na podstawie danych z obiektu badań, określono możliwe do wygenerowania oszczędności. Wykorzystanie modelowania symulacyjnego do przewidywania granic niskokosztowych korytarzy elastyczności pozwoli na utrzymywanie parametrów elastyczności operacyjnej systemu w granicach najniższych możliwych kosztów.

Słowa kluczowe: korytarze elastyczności operacyjnej wytwarzania, niskokosztowa elastyczność

Wprowadzenie

Współczesne wytwarzanie główny nacisk kładzie na elastyczne dopasowywanie się do klientów oraz do ich unikalnych potrzeb. Jego istotą jest zarówno szybkość reagowania na nowe możliwości rynkowe, jak również koszty i jakość wyrobów finalnych, które klienci są skłonni nabywać (Gunasekaran, 2002, s. 1358). Istotne zatem jest umiejętne równoważenie poziomu elastyczności i kosztów jej utrzymywania w bieżącej działalności, czyli uzyskanie niskokosztowej elastyczności (elastyczności po jak najniższym koszcie).

W praktyce gospodarczej bardzo trudno uzyskać zwiększoną elastyczność operacyjną wytwarzania przy jednoczesnym zwiększaniu tzw. szczupłości (redukcji kosztów). Istnieje jednak możliwość określenia przedziału kosztowego, w którym utrzymywanie nadmiarów elastyczności jest ekonomicznie uzasadnione (utrzymywanie kosztów w obszarze korytarza niskokosztowej elastyczności powinno zapewnić zrównoważenie kosztów elastyczności i szczupłości – Dudek, 2016, s. 49).

Problemem natury organizacyjnej jest zdefiniowanie granic poszczególnych korytarzy jak i zdefiniowanie najlepszej formuły ewaluacji kosztu elastyczności operacyjnej (np. Bauernhansl, 2012, s. 365–366; Milberg, 2008, s. 417–424).

* dr inż. Marek Dudek, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie, Wydział Zarządzania, mdudek@zarz.agh.edu.pl.

1. Elastyczność operacyjna wytwarzania

Elastyczność wytwarzania, najczęściej rozpatrywana w ujęciu ekonomicznym i operacyjnym (De Toni, 2005, s. 526), jest kategorią złożoną, wielowymiarową i dlatego może być definiowana w różny sposób a tym samym, różnie interpretowana. Znane w literaturze próby klasyfikacji elastyczności wytwarzania, zarówno w rozumieniu jej jako atrybutu, cechy, funkcji (np. Beach, 2000, s. 46; Browne, 1984, s. 114; Sethi, 1990, s. 297; Kasiewicz, 2009, s. 26), nie wprowadzają jednolitego jej uporządkowania a tym samym utrudniają jednoznaczną klasyfikację. Analiza różnorodnych definicji wskazuje, iż elastyczność wytwarzania jako komponent elastyczności przedsiębiorstwa (Sushil, 2001, s. 56) może być rozumiana jako zdolność do reakcji na zmiany (wewnętrzne i zewnętrzne), która sprowadza się do celowego i ekonomicznego utrzymywania przede wszystkim rezerw określonych zasobów (nadmiernych zasobów względem bieżących potrzeb) w celu ich użycia w nadarzającym się momencie (np. wystąpienia okazji). Elastyczność wytwarzania także oznacza zdolność do reagowania na zmiany w obrębie zdefiniowanego scenariusza lub predefiniowanej reakcji na przewidywalne zmiany. Oznacza to, iż elastyczność związana jest z przewidywalnymi zmianami zarówno wewnętrznymi jak i zewnętrznymi (ale w obszarze zdefiniowanej struktury), więc uzasadnione jest przypisanie jej z założenia do poziomów operacyjnych systemu (Löffler, 2012, s. 168), dla których względna stabilność warunków funkcjonowania jest cechą pożądaną. Elastyczność wytwarzania jest więc zdolnością do reakcji (McFarlane, 1998, s. 2) na występującą niepewność w taki sposób, aby umożliwić utrzymanie lub zwiększenie parametrów systemu w obszarze terminów i kosztów funkcjonowania. Przyjmując najbardziej ogólny podział zmienności wytwarzania na (Wiendahl, 2007, s. 787): zwinność, transformacyjność, elastyczność, rekonfigurowalność i przezbrajalność, elastyczność dotyczy poziomu operacyjnego (poziomu segmentu/modułu i mniej skomplikowanych jego części).

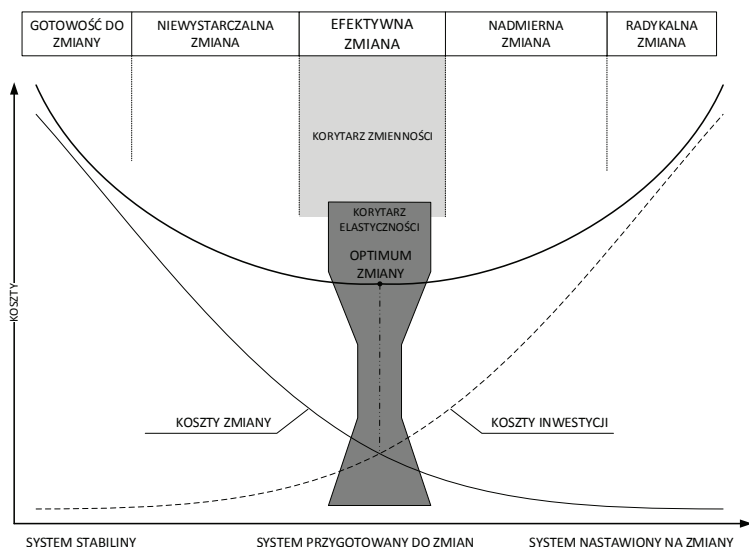
Elastyczność ze względu na swój operacyjny charakter jest mierzalna a formuły jej obliczania oraz niezbędny jej poziom przedstawiono w licznych opracowaniach (np. Buzacott, 1986, s. 890–905; Beach 2000, s. 41–57; Giachetti, 2003, s. 47–62; Niewiadomski, 2013, s. 45–58). Analiza formuł jej obliczania wskazuje na dużą ich różnorodność, która wynika z przyjętych definicji elastyczności. Jednym z podstawowych mierników elastyczności może być jej koszt.

Funkcjonujące w literaturze pojęcie tzw. niskokosztowej elastyczności (Dudek, 2013, s. 23), oznaczające najniższy z możliwych koszt równoważenia poziomu elastyczności i szczupłości systemu, osiągnięte jest poprzez odpowiednie dopasowanie i połączenie elementów tworzących zorganizowanie systemu. Szczupłość w wytwarzaniu oznacza wyeliminowanie wszystkich niepotrzebnych działań i pozostawienie tylko tych, które stanowią istotę działalności przedsiębiorstwa. Punktem wyjścia do osiągnięcia szczupłości jest umiejętność dostrzegania marnotrawstwa. W procesach doskonalenia marnotrawstwo jest wyceniane a jego redukcja powoduje zmniejszenie kosztów funkcjonowania całego systemu.

Zasadniczym problemem w procesie równoważenia jest to, że zarówno elastyczność jak i szczupłość wytwarzania wzajemnie się wykluczają (to co jest szczupłe nie może być elastyczne i na odwrót). Równoczesna chęć maksymalizacji poziomu elastyczności i szczupłości powoduje konflikt „*interesów elementów systemu*”, który to redukować można podnosząc poziom zmienności całego systemu wytwarzania. Przyjmując założenie o możliwości równoważenia poziomów szczupłości i elastyczności możliwe jest określenie korytarzy elastyczności, a tym samym minimalizację kosztów elastyczności operacyjnej dla całego systemu.

2. Korytarze elastyczności operacyjnej wytwarzania

W zależności od zakresu dopuszczalnych zmian systemy wytwarzania funkcjonują w korytarzach zmienności, w tym w korytarzach elastyczności (rys. 1).

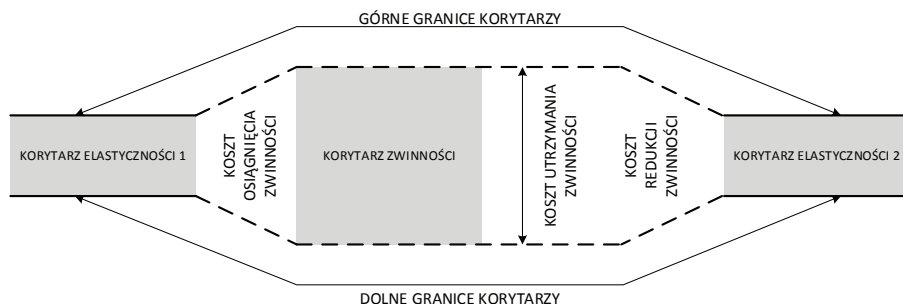


Rysunek 1. Ogólny model kosztu zmienności systemu wytwarzania

Źródło: opracowanie własne na podstawie Bauernhansl (2012).

W praktyce spotyka się nieustanne rozszerzanie i kurczenie się korytarzy zmienności (w przypadku braku wystarczającej zmienności lub jej nadmiaru w systemie). Ma to związek przede wszystkim z nieporównywalnie większymi kosztami utrzymywania systemu w korytarzu zmienności wyższej klasy (np. zwinności) w stosunku do kosztów utrzymywania korytarzy np. elastyczności. Z reguły im wyższa klasa zmienności systemu tym wyższe koszty jej utrzymywania (trudniej także szacować koszty utrzymywania zmienności

systemu, gdyż zwrot z inwestycji jest trudny do oszacowania i nie zawsze dokładny – Wiendahl, 2004, s. 33). Ze względu na koszty zmienności (osiągania i utrzymywania) najkorzystniejsze jest utrzymywanie systemu w obszarze niskokosztowej elastyczności, pamiętając, że wyższy poziom zmienności systemu pozwala opuścić ten predefiniowany „korytarz zmian” (Schuh, 2012, s. 413).



Rysunek 2. Korytarze zmienności

Źródło: opracowanie własne na podstawie Bauernhansl (2012).

Przyjmując operacyjny charakter elastyczności wytwarzania oraz uwzględniając zakresy i charakter występujących zmian w systemie możliwe jest zdefiniowanie tzw. korytarzy elastyczności (korytarz wskazuje zakres możliwych zmian w kolejnych odcinkach czasu). W związku z powyższym elastyczność operacyjna wytwarzania, oznaczająca zdolność do reagowania na zmiany w obrębie zdefiniowanego scenariusza ale bez zmiany struktury systemu, może być określona za pomocą przedziałów tworzących górną i dolną granicę korytarza (rys. 2). Na poziomie operacyjnym, jakakolwiek zmiana wykraczająca poza granice obszaru elastyczności (celowa lub czasami nieplanowana) związana jest z dodatkowymi kosztami funkcjonowania systemu wytwarzania, dlatego też istotne jest precyzyjne szacowanie tychże granic.

3. Koszt elastyczności operacyjnej wytwarzania

Przyjmując założenie, iż na elastyczność operacyjną wytwarzania mają wpływ (Koste, 1999, s. 87; Tolio, 2007, s. 27):

- elastyczność zasobów (ściśle związana z występującymi w systemie wytwarzania zasobami, przede wszystkim materialnymi, ich możliwością zmiany/wymiany jak i ich nadmiarowością),
- elastyczność procesów (ściśle związana z możliwością zmiany przebiegów procesów wytwarzania w obrębie istniejącej struktury i utożsamiana z możliwością realizacji

różnych konfiguracji procesów w zależności od bieżących potrzeb i pośrednio także z elastycznością operacji realizowanych na poszczególnych zasobach),

- elastyczność planowania i sterowania (ściśle związana z możliwościami konfiguracji alternatywnych planów produkcji w obrębie zdefiniowanej grupy asortymentowej oraz z możliwościami bieżącego reagowania w przypadku odchyłeń od planu wynikających z zakłóceń w przepływie),

można określić formułę wyznaczania kosztu elastyczności operacyjnej wytwarzania KE_s ¹.

$$KE_s = \left\{ \sum_{j=1}^J Z_s + \sum_{i=1}^I O_s + \sum_{n=1}^N P_s \right\},$$

gdzie:

Z_s – koszt zaangażowanego zasobu dla danego scenariusza s ,

j – zasób $\{1, \dots, J\}$,

O_s – koszt procesu dla danego scenariusza s ,

i – proces $\{1, \dots, I\}$,

P_s – koszt powstania, realizacji i ewentualnej modyfikacji planu produkcji dla danego scenariusza s ,

n – plan produkcji $\{1, \dots, N\}$.

Wybór najkorzystniejszego wariantu (scenariusza) opisany jest funkcją kryterium²:

$$\min \sum_{s=1}^S \frac{KE_s \times P_s}{(1+r)^{f_s-1}},$$

gdzie:

s – scenariusz $\{1, \dots, S\}$,

KE_s – koszt elastyczności systemu według scenariusza s ,

P_s – prawdopodobieństwo realizacji scenariusza s ,

r – stopa dyskontowa,

f – faza realizacji scenariusza s .

Rozpiętość korytarza wynika z przyjętej strategii elastyczności (dopasowanej, z nadmiarem lub nieograniczonej) i wartości tzw. optimum zmiany. Optimum zmiany w przypadku elastyczności operacyjnej wytwarzania może być wyznaczone przy wykorzystaniu formuły niskokosztowej elastyczności systemu KE_s , równoważące koszty elastyczności i szczupłości wytwarzania – dla przyszłych wariantów scenariuszy lub zestawiając poniesione koszty elastyczności i wybierając ich wartość minimalną KE_{min} gwarantującą realizację zamówienia – dla zrealizowanego w przeszłości scenariusza.

¹ Zmodyfikowano formułę wyznaczania kosztu elastyczności zaproponowaną przez: Tolio (2007), s. 27.

² Zmodyfikowano formułę wyznaczania kosztu elastyczności zaproponowaną przez: Tolio (2007), s. 27.

Przyjmując formułę wyznaczania elastyczności operacyjnej wytwarzania jako sumę kosztów:

- zasobów niezbędnych do bieżącej realizacji zadań jak i ich nadmiarowości,
- procesów rzeczywistych oraz ich alternatywnych (wirtualnych) przebiegów (koszty możliwych do uwzględnienia operacji) oraz
- przygotowania planów i bieżącego sterowania przepływem wraz z ich ewentualnymi modyfikacjami,

można wyznaczyć formułę kosztów szczupłości wytwarzania dla danego scenariusza. Koszty szczupłości zatem to suma kosztów eliminacji poszczególnych kategorii strat (Czerska, 2009, s. 57):

- nadprodukcji (koszty utrzymania i eksploatacji powierzchni, utrzymania zapasów, zamrożenia gotówki itp.),
- zapasów (koszty utrzymania i eksploatacji powierzchni, gromadzenia zapasów, zamrożenia gotówki itp.),
- wad i braków (koszty materiałów, poprawek, pracy itp.),
- zbędnych ruchów (koszty pracy, eksploatacji narzędzi itp.),
- przeprocesowania (koszty pracy, eksploatacji hali i urządzeń itp.),
- oczekiwania (koszty pracy, utrzymania i eksploatacji powierzchni oraz środków transportu itp.),
- transportu (koszty pracy, utrzymania i eksploatacji powierzchni oraz środków transportu itp.),

i mogą być wyznaczone według formuły:

$$KS_S = \left\{ \sum_{j=1}^J N_s + \sum_{c=1}^C S_s + \sum_{x=1}^X B_s + \sum_{g=1}^G R_s + \sum_{m=1}^M D_s + \sum_{e=1}^E W_s + \sum_{h=1}^H T_s \right\},$$

gdzie:

- N_S – koszt nadprodukcji dla danego scenariusza s ,
- j – zasoby $\{1, \dots, J\}$,
- S_S – koszt zapasów dla danego scenariusza s ,
- c – zapasy $\{1, \dots, C\}$,
- B_S – koszt braków i wad dla danego scenariusza s ,
- x – braki $\{1, \dots, X\}$,
- R_S – koszt realizacji zabiegów/operacji elementarnych dla danego scenariusza s ,
- g – operacje elementarne $\{1, \dots, G\}$,
- D_S – koszt przeprocesowania dla danego scenariusza s ,
- m – zbędne procesy $\{1, \dots, M\}$,
- W_S – koszt oczekiwania s ,
- e – oczekiwanie $\{1, \dots, E\}$,
- T_S – koszt transportu dla danego scenariusza s ,
- h – transport $\{1, \dots, H\}$.

Wybór wariantu najkorzystniejszego opisany jest funkcją kryterium:

$$\min \sum_{s=1}^S \frac{KS_s \times P_s}{(1+r)^{f_s-1}},$$

gdzie:

- s – scenariusz $\{1, \dots, S\}$,
- KS_s – koszt szczupłości systemu według scenariusza s ,
- P_s – prawdopodobieństwo realizacji scenariusza s ,
- r – stopa dyskontowa,
- f – faza realizacji scenariusza s .

W praktyce wszystkie niezbędne dane daje się łatwo pozyskać lub oszacować pod warunkiem wykorzystania odpowiedniego rachunku kosztów. Dedykowanym rachunkiem do określania niskokosztowej elastyczności mogą być między innymi: rachunek kosztów działań, rachunek kosztów celów, rachunek cyklu życia, rachunek kosztów cech i charakterystyk.

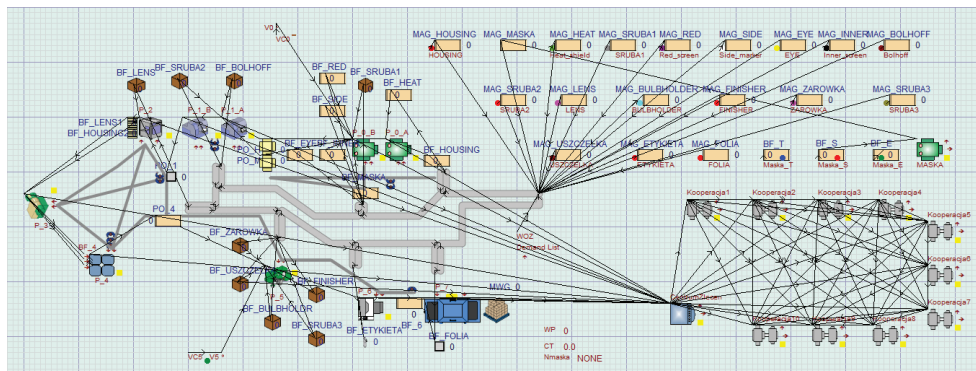
4. Praktyczne wyznaczanie korytarza elastyczności operacyjnej wytwarzania

Weryfikację zaproponowanego sposobu wyznaczania korytarza elastyczności przeprowadzono na podstawie obiektu badań działającego w przemyśle motoryzacyjnym, dla którego dedykowaną formą zorganizowania jest linia U-kształtna. Obiekt badań realizuje zmienne pod względem planu asortymentowo-ilościowego zamówienia, przyjmowane na 14 dni przed końcową datą ich realizacji. Ze względu na cykl realizacji dostaw podstawowych komponentów oraz zmienność zamówień, obiekt badań musi posiadać elastyczność operacyjną wytwarzania (szybko reagować na zmiany parametrów zamówień). Realizuje to poprzez utrzymywanie nadmiernych zasobów względem harmonogramów wzorcowych oraz częstą modyfikację planów produkcji a także przebiegu procesów. Generuje to dodatkowe koszty, które rozliczane są po zakończeniu realizacji danych zamówień. Taka praktyka powoduje niejednokrotnie realizację zleceń ze stratą. Przyjmując założenie, że istnieje możliwość określenia przedziału kosztowego (korytarza), w którym utrzymywanie nadmiarów elastyczności operacyjnej jest ekonomicznie uzasadnione, stworzono model symulacyjny obszaru wytwarzania w obiekcie badań (rys. 3).

Zwalidowany model odwzorowuje parametry realizacji zamówień w zależności od przyjętego scenariusza „s”. Teoretyczne korytarze elastyczności operacyjnej wytwarzania określono w oparciu o następujące założenia:

- istnieje możliwość wyznaczenia optymalnej kombinacji zasobów wykorzystywanych do realizacji koszyka zamówień w określonym przedziale czasu, gwarantującej niskokosztową elastyczność (KES_s – zestandaryzowane $KE_s = KS_s$),
- istnieje możliwość konfiguracji zasobów ze względu na przyjęty scenariusz,

- granice: górna K_{gS} i dolna K_{dS} korytarzy elastyczności wyznaczone są poprzez zwiększenie i zmniejszenie wartości niskokosztowej elastyczności K_{oS} o 10%³.



Rysunek 3. Model systemu wytwarzania

Źródło: opracowanie własne.

Celem wyznaczenia wartości granic korytarzy elastyczności posłużono się danymi:

- historycznymi, celem sprawdzenia zależności pomiędzy poniesionym kosztem rzeczywistym a kosztem modelowym danego scenariusza,
- prognostycznymi, celem oszacowania możliwych do wystąpienia kosztów w przypadku wykorzystania formuły niskokosztowej elastyczności (ze względu na okres prognozy 14 dni pominięto dyskontowanie strumieni).

Celem wykorzystania danych historycznych było zestawienie poniesionych kosztów rzeczywistych elastyczności operacyjnej z kosztami modelowymi, wskazującymi najniższy możliwy koszt utrzymania elastyczności gwarantującej realizację zamówień. Uzyskana w ten sposób różnica (wartość rzeczywista K_r pomniejszona o wartość modelową) wskazuje na potencjał redukcji kosztów w przypadku utrzymywania systemu wytwarzania w zdefiniowanym korytarzu elastyczności. Z kolei celem wykorzystania danych prognostycznych było zbudowanie przyszłych korytarzy elastyczności, w ramach których będzie istniała możliwość elastycznego dopasowania poziomu możliwych do wykorzystania zasobów do najbardziej prawdopodobnych scenariuszy. Prawdopodobieństwo wystąpienia danego scenariusza oszacowano na podstawie zakresu zmienności parametrów wejściowych wyznaczonych z danych historycznych za okres 1 roku, w tym:

- zmianę liczby zamawianych sztuk – przedziały co 5% zmienności (od 0 do $\pm 30\%$),

³ Wartość 10% jest wartością umowną a w modelu wynika z przyjmowanych w praktyce założeń związanych z kalkulacją kosztu idealnego wytworzenia w systemach produkcji w klasie światowej (Dudek, 2014, s. 30), będącej jednym ze sposobów osiągania doskonałości operacyjnej wytwarzania i oznaczającej możliwie najkorzystniejszy sposób zorganizowania wszystkich aktywności wytwórczych.

- zmianę struktury asortymentowej – różne konfiguracje możliwych do realizacji planów (od 0 do $\pm 50\%$ zmiany standardowego dziennego planu asortymentowego).

Do oszacowania kosztu zasobów wykorzystano między innymi koszty: pracowników, materiałów i ich zapasów, maszyn i urządzeń, środków transportu, powierzchni wytworzenia, powierzchnia magazynowania, mediów. Do oszacowania kosztu procesów wykorzystano koszty pracowników zaangażowanych w zmiany oraz koszty użycia alternatywnych maszyn i urządzeń. Do oszacowania kosztu planowania i sterowania wykorzystano między innymi koszty pracowników zaangażowanych w zmiany, koszty przebrojenia i koszty zmiany narzędzi sterowania.

Dla przyszłych scenariuszy do oszacowania kosztu niskokosztowej elastyczności (KES_S), ze względu na możliwość zaangażowania różnorodnych zasobów jak i różnorodnych operacji do realizacji tego samego planu, stworzono alternatywne plany realizacji. Alternatywne plany powstawały w wyniku stopniowego ograniczania zasobów (w pierwszej kolejności najbardziej kosztochłonnych) oraz stopniowego ograniczania strat (w pierwszej kolejności najbardziej kosztochłonnych). Dla każdego planu określono koszt: zużytych zasobów oraz generowanych strat (w modelu optymalizowano równolegle dwie funkcje kryterium: minimalizacji kosztu generowanych strat oraz minimalizacji kosztu utrzymywania zasobów). W wyniku kolejnych działań na modelu symulacyjnym otrzymano:

- plan zorganizowania przebiegu procesów o maksymalnej elastyczności (brak ograniczeń zasobów – plan teoretyczny),
- plan zorganizowania przebiegu procesów o maksymalnej szczupłości (brak jakichkolwiek strat – plan teoretyczny),
- plany zorganizowania przebiegu procesów skonfigurowane z różnych kombinacji dostępności zasobów (elastyczności) i generowanych strat w procesach (szczupłości) – wygenerowano 10 planów tworząc w ten sposób poziomy elastyczności i szczupłości a do dalszych badań wybrano ten, który gwarantuje niskokosztową elastyczność.

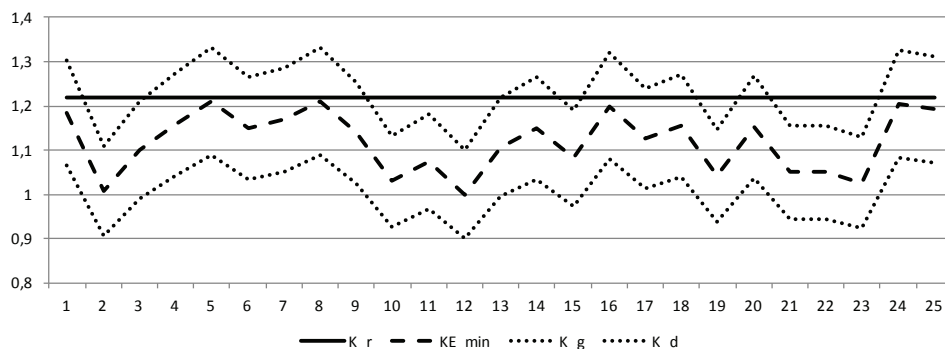
5. Praktyczne wyznaczanie kosztów elastyczności operacyjnej w korytarzach

Celem wyznaczenia kosztów i granic korytarzy elastyczności dla danych historycznych przeprowadzono symulację warunków funkcjonowania obiektu badań. Wykorzystano dane za okres 25 dni roboczych (1 miesiąc planistyczny) w postaci:

- dziennych wielkości produkcji odpowiadających dziennemu koszykowi zamówień,
- dziennego wykorzystania zasobów i ich kosztów,
- dziennego kosztu utrzymywania zasobów będących w gotowości do eksploatacji w przypadku zmiany dziennego koszyka zamówień.

Dla każdego dnia wyznaczono optymalną ilość niezbędnych do wykorzystania zasobów, ich koszty oraz zestawiono je z rzeczywście poniesionymi kosztami K_r zasobów (stałymi dla kolejnych 25 dni). Określono także wartość minimalnej elastyczności KE_{min} , od wartości której określono rozmiar korytarza elastyczności. Ze względu na poufność danych

przyjęto, iż minimalna wartość kosztu elastyczności operacyjnej uzyskana w badaniach modelowych (dla 12 dnia) wynosi 1. Wartości pozostałych kosztów odniesiono względem wartości kosztu minimalnej elastyczności. Otrzymane wyniki wskaźnikowo zestawiono na rysunku 4.



Rysunek 4. Wskaźnikowe ujęcie kosztów działań historycznych

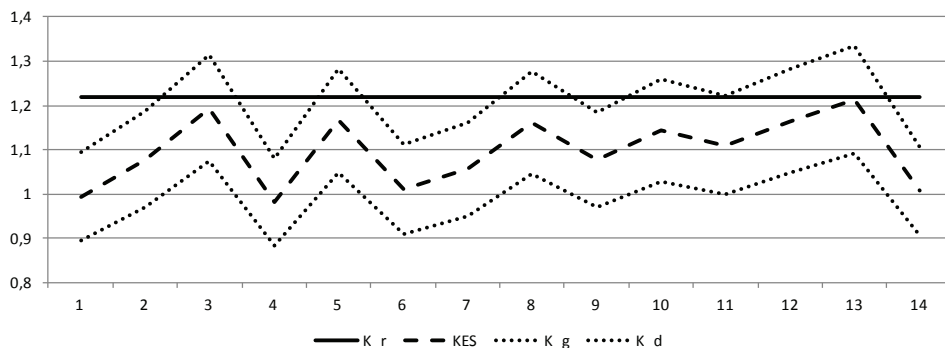
Źródło: opracowanie własne.

Jak wynika z analizy danych historycznych poniesiony rzeczywisty koszt utrzymania elastyczności operacyjnej był wyższy od kosztu minimalnego gwarantującego realizację koszyka dziennych zamówień. Różnica ta wynika ze świadomej strategii utrzymywania nadmiaru elastyczności. Uśredniona różnica wskaźnikowa pomiędzy rzeczywistym kosztem (1,22) a kosztem modelowym (minimalnym – 1,11) wyniosła 10%. Hipotetyczna zamiana strategii ze strategii nadmiaru elastyczności na strategię elastyczności dopasowanej przyniosłaby skumulowane oszczędności w wysokości 13 386 zł w skali jednego miesiąca. Istnieje zatem uzasadniona potrzeba lepszego dopasowania strategii nadmiaru elastyczności do rzeczywistego jej wykorzystania.

Celem wyznaczenia kosztów i granic korytarza elastyczności dla danych prognostycznych przeprowadzono symulację warunków funkcjonowania obiektu badań. Wykorzystano prognozy na okres kolejnych 14 dni roboczych w postaci:

- dziennych wielkości produkcji odpowiadających dziennemu koszykowi zamówień,
- dziennego wykorzystania zasobów i ich kosztów,
- dziennego kosztu utrzymywania zasobów będących w gotowości do eksploatacji w przypadku zmiany dziennego koszyka zamówień.

Dla każdego dnia wyznaczono optymalną ilość niezbędnych do wykorzystania zasobów, ich koszty oraz zestawiono je z rzeczywiście poniesionymi kosztami K_r zasobów w przeszłości (stałymi dla kolejnych 14 dni). Określono także wartość niskokosztowej elastyczności KES , od wartości której, określono rozmiar korytarza elastyczności. Otrzymane wyniki zestawiono na rysunku 5.

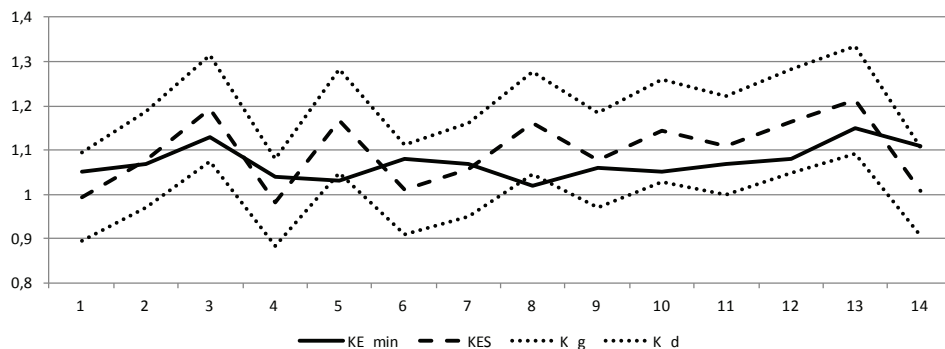


Rysunek 5. Wskaźnikowe ujęcie kosztów działań prognostycznych

Źródło: opracowanie własne.

Jak wynika z analizy danych prognostycznych poniesiony rzeczywisty koszt utrzymania elastyczności operacyjnej będzie wyższy od kosztu niskokosztowej elastyczności a uśredniona różnica wskaźnikowa pomiędzy rzeczywistym kosztem (1,22) a kosztem modelowym (niskokosztowej elastyczności – 1,13) będzie wyniosła 9%. Hipotetyczna zamiana strategii ze strategii nadmiaru elastyczności na strategię niskokosztowej elastyczności przyniosłaby skumulowane oszczędności w wysokości 7742 zł w skali 14 dni. Istnieje zatem uzasadniona potrzeba lepszego dopasowania strategii nadmiaru elastyczności do przewidywanego jej wykorzystania polegająca na utrzymywaniu nadmiaru elastyczności w granicach ustalonego korytarza. Hipotetyczne utrzymywanie kosztów rzeczywistych w granicach korytarza przyniosłoby oszczędności w wysokości 830 zł.

Celem analizy zasadności takiego podejścia zamodelowane koszty niskokosztowej elastyczności oraz granice korytarza w okresie 14 dni skonfrontowano z minimalnymi kosztami poniesionymi dla tego okresu a wyznaczonymi po upływie tych 14 dni (znając parametry rzeczywistych zleceń produkcyjnych). Wyniki symulacji przedstawiono na rysunku 6.



Rysunek 6. Wskaźnikowe ujęcie kosztów

Źródło: opracowanie własne.

Jak wynika z analizy danych koszty uśredniony koszt minimalny KE_{min} był niższy od kosztu niskokosztowej elastyczności KES a uśredniona różnica wskaźnikowa wynosiła 3%. Hipotetyczna zamiana strategii ze strategii niskokosztowej elastyczności na strategię dopasowanej elastyczności przyniosłaby skumulowane oszczędności w wysokości 1572 zł w skali 14 dni.

Uwagi końcowe

Przeprowadzone eksperymenty symulacyjne wykazały, iż zasadne jest elastyczne dopasowywanie się (choć w praktyce gospodarczej bardzo trudne) do poziomu aktualnie niezbędnej elastyczności. Strategia stałego nadmiaru elastyczności operacyjnej, stosowana w obiekcie badań, wygenerowała najwyższe koszty jej utrzymywania. Wiązała się ona przede wszystkim z utrzymywaniem nadmiernych względem bieżącego zużycia zasobów (ok 10%). Modelowe wyznaczenie przedziału zmienności elastyczności (korytarza) pozwoliło na zredukowanie nadmiaru utrzymywanej elastyczności o ok. 9%. Uzasadnione ekonomicznie jest zatem ciągle dopasowywanie się poziomu elastyczności operacyjnej do bieżących potrzeb i utrzymywanie jej w granicach wyznaczonego korytarza niskokosztowej elastyczności. Przeprowadzone badania wykazały także, iż:

- a) istnieje możliwość wyznaczania kosztu nadmiaru elastyczności;
- b) istnieje możliwość szacowania kosztów elastyczności operacyjnej w przyszłości w oparciu o korytarz niskokosztowej elastyczności;
- c) w analizowanym przypadku możliwe było inne zaplanowanie przebiegów procesów, które redukowało łączny koszt realizacji tego planu o 10% oraz skróciło czas realizacji koszyka zamówień o 2%;
- d) procentowe udziały poszczególnych składowych kosztów (w obiekcie badań) w kosztach całkowitych elastyczności operacyjnej wytwarzania stanowiły: nadmiarowe utrzymywanie zasobów w gotowości – 85%, zmiana procesów – 9%, planowanie i sterowanie przepływem – 6%. W całkowitych kosztach szczupłości procentowy udział stanowiły: zapasy – 86%, transport – 5%, nadprodukcja – 3%, oczekiwanie – 3%, przetwarzanie – 1%, wady i braki – 1%, zbędne ruchy – 1%;
- e) dysponując danymi historycznymi można symulować możliwe do wystąpienia w przyszłości plany przebiegu procesów i je analizować, wybierając w ten sposób najkorzystniejszy (optymalny) punkt równowagi lub mieszczący się w korytarzu niskokosztowej elastyczności. Wybór planu przebiegu z planów mieszczących się w korytarzu zagwarantuje możliwie najniższy równoważenia elastyczności i szczupłości systemu;
- f) przeprowadzone eksperymenty symulacyjne wykazały, iż istnieje możliwość bieżącego określania niskokosztowych korytarzy elastyczności pod warunkiem łatwego pozyskania danych szczegółowych z rachunku kosztów.

Literatura

- Bauernhansl, J., Mandel, J., Diermann, S. (2012). *Evaluating changeability corridors for sustainable business resilience*. Procedia CIRP, vol. 3.
- Beach, R., Muhlemann, A.P., Price, D.H.R., Paterson, A., Sharp, J.A. (2000). A review of manufacturing flexibility. *European Journal of Operational Research*, 1 (122).
- Browne, J., Dubois, D., Rathmill, K., Sethi, S.P., Stecke, K.E. (1984). Classification of flexible manufacturing systems. *The FMS Magazine*, 2 (2).
- Buzacott, J.A., Yao, D.D. (1986). Flexible manufacturing systems: a review of analytical models. *Management Science*, 7 (32).
- Czerska, J. (2009). *Doskonalenie strumienia wartości*. Warszawa: Difin.
- De Toni, A., Tonchia, S. (2005). Definitions and linkages between operational and strategic flexibilities. *Omega. The International Journal of Management Science*, 6 (33).
- Dudek, M. (2016). *Projektowanie szczyplych systemów wytwarzania*. Warszawa: Difin.
- Dudek, M., Kardela, J. (2014). Filar analizy kosztów w systemach produkcji klasy światowej. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego*, 804, *Finanse, Rynki Finansowe, Ubezpieczenia*.
- Giachetti, R.E., Martinez, L.D., Sáenz, O.A., Chen, Ch-S. (2003). Analysis of the structural measures of flexibility and agility using a measurement theoretical framework. *International Journal of Production Economics*, 1 (86).
- Gunasekaran, A., Yusuf, Y.Y. (2002). Agile manufacturing: a taxonomy of strategic and technological imperatives. *International Journal of Production Resources*, 6 (40).
- Kasiewicz, S. (2009). *Elastyczność przedsiębiorstwa w koncepcjach zarządzania zasobowego*. W: S. Kasiewicz, J. rmińska, W. Rogowski, W. Urban (red.), *Metody osiągania elastyczności przedsiębiorstw*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza SGH.
- Koste, L.L., Malhotra, M.K. (1999). A theoretical framework for analyzing the dimensions of manufacturing flexibility. *Journal of Operations Management*, 1 (18).
- Löffler, C., Westkämper, E., Unger, K. (2012). *Changeability in structure planning of automotive manufacturing*. Procedia CIRP, vol. 3.
- Marlok, E.K., Chang, D.J. (2004). Measuring capacity flexibility of a transportation system. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 6 (38).
- McFarlane, D. (1998). *Modular distributed manufacturing systems and the implications for integrated control*. London: Proceedings of IEE Colloquium on Choosing the Right Control Structure.
- Milberg, J., Möller, N. (2008). Valuation of changeable production systems. *Production Engineering Research and Development*, 2 (4).
- Niewiadomski, P. (2013). Praktyczny wymiar elastyczności produktowej zakładu wytwórczego. *Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej*, 59.
- Schuh, G., Potente, T., Fuchs, S., Hausberg, C. (2012). *Methodology for the assessment of changeability of production systems based on ERP data*. Procedia CIRP, vol. 3.
- Sethi, A.K., Sethi, S.P. (1990). Flexibility in manufacturing: a survey. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 2 (4).
- Sushil, A. (2012). Enterprise flexibility. *Global Journal of Flexible Systems Management*, 2 (4).
- Tolio, T., Terkaj, W., Valente, A. (2007). *Focused flexibility and production system evolution*. Toronto: Proceedings of the 2nd International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2007).
- Wiendahl, H.P., ElMaraghy, H.A., Nyhuis, P., Zäh, M.F., Wiendahl, H.H., Duffie, N., Brieke, M. (2007). Changeable manufacturing – classification, design and operation. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2 (56).
- Wiendahl, H.P., Heger, C.L. (2004). Justifying changeability. A methodical approach to achieving cost effectiveness. *Journal for Manufacturing Science and Production*, 1–2 (6).

THE ANALYSIS OF THE MANUFACTURING COSTS IN THE CORRIDOR OF OPERATIONAL FLEXIBILITY

Abstract: The study puts forward a proposal for the method of determining costs and boundaries the so-called corridors of low-cost flexibility, which enable to balance the manufacturing system flexibility and leanness levels. Precisely definition of corridor boundaries allow to flexible adapts of operational activities to the flexibility strategy, thereby reduce all costs its maintenance to the minimum. For this purpose, simulation

modeling was used, whereby, based on data from the object of examination, the savings were determined, which are capable of being generated in the case of conducting operational activities in a defined flexibility corridor.

Keywords: corridors of the manufacturing operational flexibility, low-cost flexibility

Cytowanie

Dudek, M. (2017). Analiza kosztów wytwarzania w korytarzach elastyczności operacyjnej. *Finanse, Rynki Finansowe, Ubezpieczenia*, 5 (89/1), 31–44. DOI: 10.18276/frfu.2017.89/1-02.