

Zastosowanie architektury korporacyjnej do analizy i optymalizacji sterowania produkcją

Zbigniew Juzoń, Jarosław Wikarek, Paweł Sitek

Politechnika Świętokrzyska, Al. Tysiąclecia P.P. 7, 25-314 Kielce

Streszczenie: Klasyczne podejście do optymalizacji sterowania produkcją sprowadza się zwykle do budowy modeli optymalizacyjnych i decyzyjnych w oparciu o dane pozyskane bezpośrednio z systemu produkcji z tzw. „warstwy technologicznej”. Najczęściej pomija się czynniki ekonomiczne występujące głównie na poziomie tzw. „warstwy biznesowej”, które mają istotny wpływ na procesy funkcjonujące w firmie, w tym również na sam proces produkcji. Niezbędne jest uwzględnienie w procesie budowy szczegółowych modeli optymalizacji produkcji różnych zmiennych czynników występujących również na poziomie „warstwy biznesowej”, tj. ceny usług, ceny surowców, kary umowne, które mogą mieć wpływ na decyzję kierunkową w procesie produkcyjnym, tzn. Czy wszystkie zlecenia zrealizować we własnym systemie produkcyjnym? Czy taniej będzie niektóre zlecenia/części zleceń zrealizować jako outsourcing? Zaproponowanie innego niż dotychczasowego podejścia do optymalizacji procesu produkcyjnego przy wykorzystaniu danych zarówno z warstwy technologicznej, jak i biznesowej może ułatwić: identyfikację obszarów przeznaczonych do optymalizacji/automatyzacji procesów produkcyjnych, budowę szczegółowych modeli matematycznych na potrzeby optymalizacji/automatyzacji procesów produkcyjnych oraz dostosowanie przepływu informacji między poszczególnymi warstwami (technologiczną/biznesową) funkcjonującymi na poziomie przedsiębiorstwa. W artykule przedstawiono zastosowanie architektury korporacyjnej do analizy procesu sterowania produkcją łożysk tocznych w rzeczywistej fabryce oraz do budowy modelu matematycznego optymalizacji i wspomagania decyzji w tym procesie.

Słowa kluczowe: optymalizacja sterowania produkcją, architektura korporacyjna, TOGAF, ArchiMate

1. Wprowadzenie

Sterowanie produkcją to złożone zagadnienie o wielowymiarowym charakterze i wielu interakcjach między poszczególnymi elementami systemu produkcyjnego, jak i otoczeniem [1]. Szczegółowe modele optymalizacji w systemach produkcyjnych charakteryzują się dużą liczbą zmiennych decyzyjnych i ograniczeń, które określają *co, kiedy, gdzie i ile* produkować przy minimalnych kosztach/w minimalnym czasie itp. Wiele zmiennych decyzyjnych ma dyskretny charakter, co dodatkowo komplikuje opracowywane modele. Dlatego wydaje się celowym zastosowanie architektury korporacyjnej wynikającej ze standardu TOGAF [8] (ang. *The Open Group Architecture Framework*) już na etapie audytu przy

analizie funkcjonowania rzeczywistego systemu produkcji przedsiębiorstwa. Pozwala to na identyfikację czynności powtarzalnych oraz wskazanie potencjalnych „wąskich gardeł”. Dodatkowo możliwe jest zaplanowanie kolejności prac na poszczególnych etapach produkcji.

TOGAF stanowi szkielet dla architektury korporacyjnej, który zapewnia kompleksowe podejście do projektowania, planowania, implementacji oraz zarządzania informacyjną architekturą organizacji, łącząc w sobie różne warstwy, w tym technologiczną, biznesową, aplikacyjną itd. Do modelowania architektury korporacyjnej można wykorzystać otwarty i niezależny język modelowania ArchiMate [9], który wspiera opis, analizę i wizualizację w ramach czterech domen architektonicznych (biznes, dane, aplikacje i technologia). W artykule zaproponowano wykorzystanie architektury korporacyjnej do analizy ograniczeń i prawidłowej akwizycji danych niezbędnych do budowy modelu matematycznego optymalizacji i wspomagania decyzji procesu sterowania produkcją łożysk tocznych w rzeczywistej fabryce. Zaproponowane podejście tym różni się od rozwiązań dostępnych na rynku w systemach typu ERP (ang. *Enterprise Resource Planning*) czy APS (ang. *Advanced Planning & Scheduling*), że uwzględnia architekturę korporacyjną, tzn. wzajemne zależności, dane i ograniczenia wielu warstw (technologicznej, biznesowej, aplikacyjnej itd.) w kontekście optymalizacji procesu produkcyjnego.

Autor korespondujący:

Zbigniew Juzoń, zjuzon@tu.kielce.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 08.04.2024 r., przyjęty do druku 04.10.2024 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0

2. Opis problemu

Zachodzi konieczność zidentyfikowania i pogrupowania w systemie produkcyjnym wszystkich elementów mających wpływ na organizację procesu produkcyjnego, które występują zarówno w warstwie technologicznej, jak i innych warstwach. W tym kontekście pojawia się uzasadniona potrzeba opracowania nowych modeli oraz metod podejmowania decyzji, które powinny uwzględniać czynniki niepewne, np. ekonomiczne. W związku z tym konieczne jest rozpatrywanie przedsiębiorstwa jako całości z uwzględnieniem wszystkich powiązań i współzależności między różnymi czynnikami funkcjonującymi na poziomie warstwy technologicznej/warstwy biznesowej, które mają wpływ na wytwarzanie produktów (wyrobów i/lub usług) [2]. Brak wystarczająco dokładnych prognoz dotyczących wielkości zamówień i czasu realizacji zadań może skutkować karami i/lub utratą nowych zamówień w przyszłości.

Z punktu widzenia zarządu tzw. „warstwy biznesowej” jednym z najważniejszych aspektów planowania pracy na poziomie systemu produkcyjnego przedsiębiorstwa produkcyjno-usługowego jest proces negocjacji kontraktu. W procesie tym konieczne jest negocjowanie wielkości produkcji oraz czasu realizacji, akceptowalnych zarówno dla systemu produkcyjnego, jak i klienta [3]. Motywacją do podjęcia badań w tym zakresie były obserwacje, że sterowanie procesami produkcji zwykle bazuje wyłącznie na danych pochodzących z warstwy technologicznej i nie uwzględnia danych występujących na poziomie warstwy biznesowej, które mogą mieć istotny wpływ na obniżenie kosztów i skrócenie czasu produkcji. Stosując architekturę korporacyjną można za pomocą języka ArchiMate opracować diagram punkt widzenia warstw (rys. 1), aby zobaczyć, na którym poziomie organizacji są definiowane ograniczenia oraz wymagania mające wpływ na funkcjonowanie pozostałych warstw w organizacji (warstwę aplikacji i warstwę technologiczną).

Z informacji zawartych na diagramie (rys. 1) wynika, że wymagania zdefiniowane na poziomie warstwy motywacyjnej i biznesowej wywierają wpływ na proces produkcyjny. Konsekwencją diagramu jest uwzględnienie tych informacji w modelu matematycznym, który zostanie opracowany na potrzeby

optymalizacji procesu produkcji. Konieczne jest opracowanie kolejnego diagramu (punkt widzenia usług) z zastosowaniem architektury korporacyjnej, aby określić, czy i gdzie w systemie produkcji występuje „wąskie gardło” w kontekście uzyskania odpowiedzi na pytania:

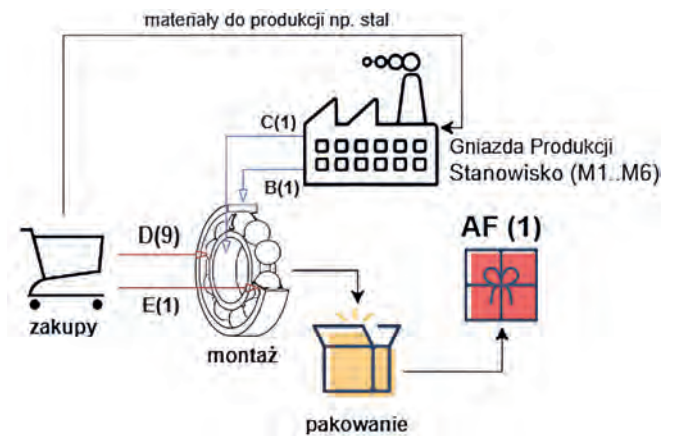
Pytanie 1. Czy wszystkie zlecenia da się zrealizować we własnym systemie produkcyjnym?

Pytanie 2. Jaki jest optymalny/akceptowalny koszt realizacji zleceń produkcyjnych i odpowiadający mu plan produkcji?

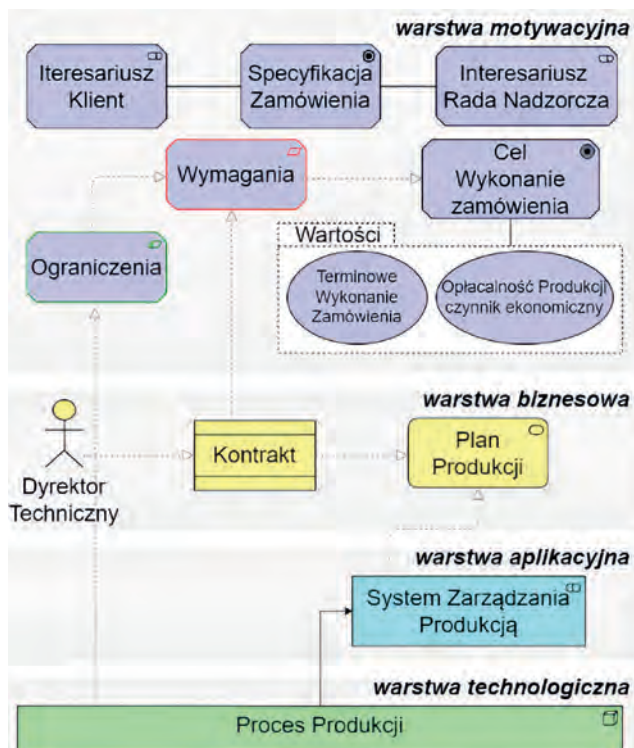
Pytanie 3. Jakie jest obciążenie stanowisk/maszyn dla tego danego planu produkcji?

3. Przykład ilustracyjny – proces produkcji łożysk tocznych

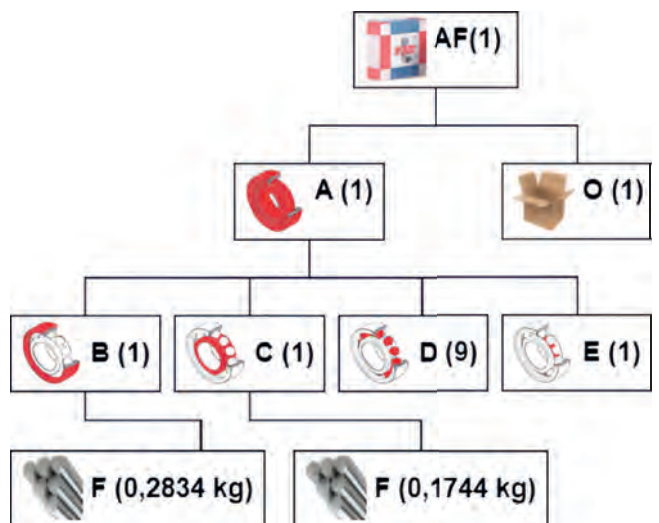
Jako przykład ilustrujący zaproponowane podejście wybrano optymalizację procesu produkcji łożysk tocznych w rzeczywistym zakładzie produkcyjnym. Zakład produkuje m.in. łożyska kulkowe, a proces produkcji jest realizowany w różnych budynkach i halach. Przebieg procesu produkcji został przedstawiony na rys. 2. W fabryce występują alternatywne przebiegi



Rys. 2. Diagram przepływu procesu produkcji: łożysko kulkowe (AF), pierścień zew. (B), pierścień wew. (C), kulki (D), koszyk (E), stal (F), opakowanie (O), gniazdo produkcji/stanowisko (M1–M6)
Fig. 2. Flow diagram of the production process: ball bearing (AF), outer ring (B), inner ring (C), balls (D), cage (E), steel (F), packaging (O), production socket/station (M1–M6)



Rys. 1. Diagram punktów widzenia warstw w organizacji
Fig. 1. Viewpoint diagram of layers in an organization



Rys. 3. Struktura produktu: łożysko kulkowe (AF), pierścień zew. (B), pierścień wew. (C), kulki (D), koszyk (E), stal (F), opakowanie (O)
Fig. 3. Product structure: ball bearing (AF), outer ring (B), inner ring (C), balls (D), basket (E), steel (F), packaging (O)

w ramach procesu obróbki tokarskiej i szlifierskiej, które są realizowane w tych samych budynkach co procesy podstawowe. Jedynie w zakresie obróbki szlifierskiej pierścieni: pierścienie zewnętrzne i wewnętrzne mogą być realizowane w innej hali niż proces podstawowy.

Zestawienie wszystkich komponentów (części, składników, surowców itp.) niezbędnych do wytworzenia jednego łożyska kulkowego przedstawiono na rys. 3.

Kartoteka zapasów, która jest centralnym źródłem informacji o materiałach, towarach handlowych i produktach dla analizowanego przedsiębiorstwa, została zaprezentowana w tab. 1.

Wykaz stanowisk oraz wymaganą wielkość załogi wymagana w procesie produkcji przedstawiono w tab. 2. Stanowi to uzupełnienie informacji zawartych na diagramie przepływu procesu produkcji (rys. 2).

Tab. 1. Kartoteka Zapasów

Tab. 1. Inventory List

(i)	O	s(i)	r(i)	c(i)	m(i)	Typ	l(i)	f(i)	tr(i)
P01	AF	1	1	30	500	P	1	1000	5
P02	A	1	1	30	500	P	0	0	4
P03	O	1	2	20	500	K	0	0	2
P04	B	1	1	20	500	P	0	0	3
P05	C	1	2	10	500	P	0	0	3
P06	D	1	2	10	500	K	0	0	2
P07	E	1	3	10	500	K	0	0	3
P08	F	1	2	10	500	K	0	0	2

Uwaga: (i) – indeks produktu, O – oznaczenie produktu, s(i) – partia produkcyjna, r(i) – czas realizacji, c(i) – koszt magazynowania, m(i) – maksymalny zapas produktu, f(i) – realizowalność produktu fi (jeśli fi = 0 zamówienie na produkt koniecznie trzeba zrealizować, np. jest to komponent wyrobu i, niezrealizowanie go powoduje brak możliwości realizacji produktów nadrzędnych jeśli fi = 1 zamówienia na produkt można nie zrealizować jest to produkt finalny lub możemy go dokupić), l(i) – współczynnik dla i, dla których fi = 0 musi być zero, tr(i) – ten parametr wynika ze struktury wyrobu i parametru r(i).

Tab. 2. Wykaz stanowisk i wymagana wielkość załogi

Tab. 2. List of positions and required crew size

(e)	Nazwa	k(e)	w(z)
01	Stanowisko toczenia 1	1	2
02	Stanowisko szlifowania 1	1	3
03	Stanowisko wyżarzania	1	2
04	Stanowisko obróbki cieplnej i kucie	1	3
05	Stanowisko toczenia 2	1	4
06	Stanowisko szlifowania 2	1	3
07	Montaż	1	4
08	Pakowanie	1	2
09	Zakupy	10	3

Uwaga: (e) – indeks stanowiska, k(e) – ile stanowisko może w okresie produkować produktów, w(z) – wymagana wielkość załogi w procesie produkcji łożyska kulkowego 1000 szt.

4. Analiza procesu produkcyjnego

Podczas audytu w rzeczywistej fabryce łożysk tocznych zostały zidentyfikowane następujące problemy pojawiające się podczas realizacji procesu produkcyjnego:

- zakłócenia w dostawie na czas komponentów do produkcji,
- zła jakość niektórych surowców i komponentów,
- awarie maszyn,
- nieplanowane zmiany zamówień klientów.

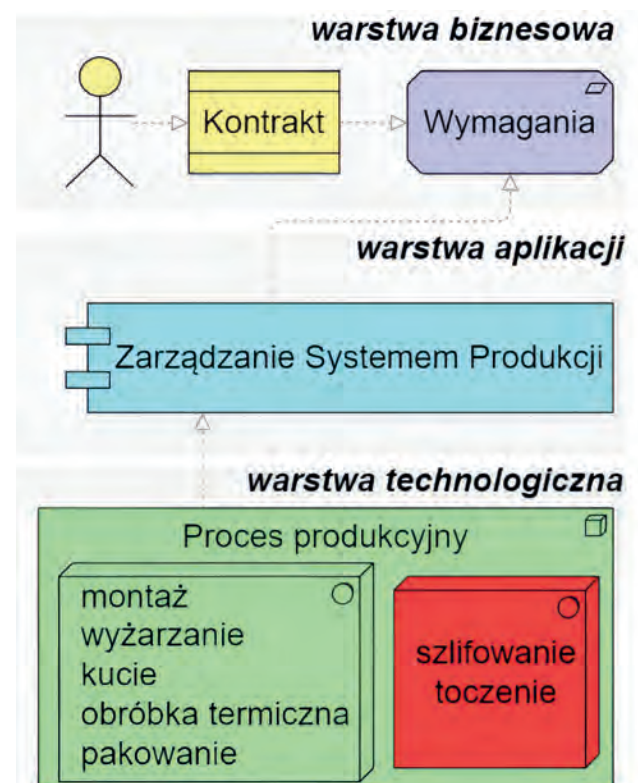
Uwzględniając informacje opisane w Rozdziale 3, zasadne jest przeprowadzenie na poziomie przedsiębiorstwa produkcyjnego analizy wstępnej bez potrzeby prowadzenia na tym etapie złożonych obliczeń. Należy uwzględnić wszystkie informacje zgromadzone w tab. 1-3.

Zastosowanie architektury korporacyjnej daje możliwość opracowania diagramu punkt widzenia usług, który obrazuje analizowany proces w kontekście poszczególnych warstw. Celem tego działania jest ustalenie, czy na poziomie warstwy technologicznej występują „wąskie gardła”.

Tab. 3. Pracochłonność na 1000 szt. łożysk kulkowych

Tab. 3. Labor consumption per 1000 pcs of ball bearings

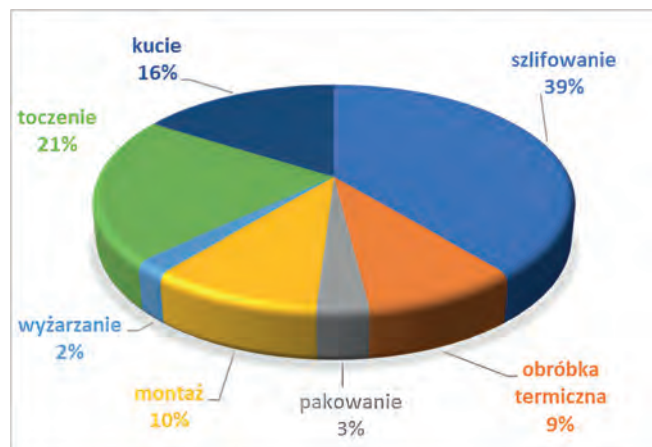
Nazwa procesu	Pracochłonność	Koszt fazy
montaż	14 486 sek.	560 PLN
wyżarzanie	20 469 sek.	130 PLN
toczenie	19 604 sek.	1180 PLN
kucie	12 320 sek.	860 PLN
szlifowanie	10 107 sek.	2150 PLN
obróbka cieplna	8064 sek.	500 PLN
pakowanie	214 sek.	170 PLN



Rys. 4. Diagram – punkt widzenia realizacji usług

Fig. 4. Diagram – point of view of service implementation

Analizując dane zgromadzone podczas audytu (tab. 2 i 3) uzyskano informacje, które z operacji procesu produkcji są najbardziej kosztowne i wymagają dużej pracochłonności. W trakcie kolejnych analiz opracowano za pomocą otwartego i niezależnego języka ArchiMate, przeznaczonego do modelowania architektury korporacyjnej, diagram punkt widzenia reali-



Wykres 1. Koszty produkcji 1000 sztuk
Chart 1. Production costs of 1000 pieces

zacji usług (rys. 4). Biorąc pod uwagę zgromadzone dane oraz diagram punkt widzenia realizacji usług dokonano identyfikacji operacji (szlifowanie, toczenie), które stanowią „wąskie gardło” dla procesu produkcji łożysk tocznych. Aby lepiej zobrazować koszty poszczególnych faz (operacji) opracowano wykres 1, na którym zostały pokazane koszty poszczególnych faz w procesie produkcji łożyska kulkowego.

Stosując architekturę korporacyjną można przeanalizować dane pochodzące z rzeczywistego systemu produkcji, aby ustalić najbardziej kosztowne procesy, czy wskazać „wąskie gardło”, ale też należy ustalić, czy w systemie produkcji istnieją przebiegi alternatywne. Mając to na uwadze niezbędne jest wprowadzenie nowych informacji do diagramu – punkt widzenia realizacji usług na poziomie warstwy technologicznej (rys. 5).

Wstępna analiza przedstawiona na diagramach (rys. 1, 4 i 5), którą przeprowadzono z zastosowaniem architektury korporacyjnej oraz informacji, jakie udało się pozyskać z rzeczywistego systemu produkcji wykazała, że w procesie produkcji:

- najbardziej pracochłonne i kosztowne są dwa procesy – szlifowanie oraz toczenie,
- na poziomie warstwy technologicznej w procesie produkcji łożyska kulkowego występuje „wąskie gardło” – produkcja koszyków łożyskowych,

Tab. 4. Model matematyczny
Tab. 4. Mathematical model

Oznaczenie	Opis
T	horyzont planowania, t – indeks okresu planistycznego $t \in [1, \dots, T]$
I	zbiór produktów, i, j – indeksy produktu $i, j \in I$
E	zbiór wszystkich stanowisk, $e \in E$
r_i	czas potrzebny na jego wykonanie/dostarczenie z zewnątrz/dostarczenie do odbiorcy partii produktu i
s_i	wielkość partii produktu i
z_i	zapas początkowy produktu i
c_i	koszt magazynowania produktu i w jednostce czasu
l_i	koszt zakupu produktu i
m_i	maksymalna dopuszczalna wielkość zapasu produktu i
f_i	realizowalność produktu i (jeśli $f_i = 0$, zamówienie na produkt trzeba koniecznie zrealizować, np. jest to komponent jakiegoś wyrobu i niezrealizowanie go powoduje brak możliwości realizacji produktów nadrzędnych; jeśli $f_i = 1$, zamówienia na produkt można nie zrealizować, jest to produkt finalny lub można go dokupić)
$o_{i,j}$	ile produktu j potrzeba do wykonania wyrobu i , $o_{i,j} = 0$ oznacza, że produkt j nie wchodzi bezpośrednio w skład produktu i
$g_{i,t}$	wielkość zamówienia na produkt i w okresie t
$q_{i,t}$	zysk ze zrealizowania zamówienia na produkt i w okresie t
k_e	każde stanowisko w danym okresie może produkować tylko k_e typów produktów (np. związane z liczbą przebrojeń)
$n_{i,t}$	kara ze niezrealizowanie zamówienia na produkt i w okresie t
$w_{e,i}$	jeśli produkt i może być wykonany na stanowisku e , to $w_{e,i} = 1$, w przeciwnym wypadku $w_{e,i} = 0$
$a_{e,i}$	czas wykonania produktu i na stanowisku e
$d_{e,i}$	koszt wytworzenia produktu i na stanowisku e
$h_{e,t}$	zdolność produkcyjna stanowiska e w okresie t
Zmienne decyzyjne	
$V_{i,t}$	zapas produktu i na końcu okresu t
$X_{i,e,t}$	ile produktu i należy wyprodukować w okresie t na stanowisku e
$Y_{i,t}$	zapotrzebowanie na produkt i na końcu okresu t
$U_{i,e,t}$	jeśli produkt i jest produkowany w okresie t na stanowisku e , to $U_{i,e,t} = 1$, w przeciwnym wypadku $U_{i,e,t} = 0$
$B_{i,t}$	liczba sztuk produktu i , których w okresie t nie da się zrealizować

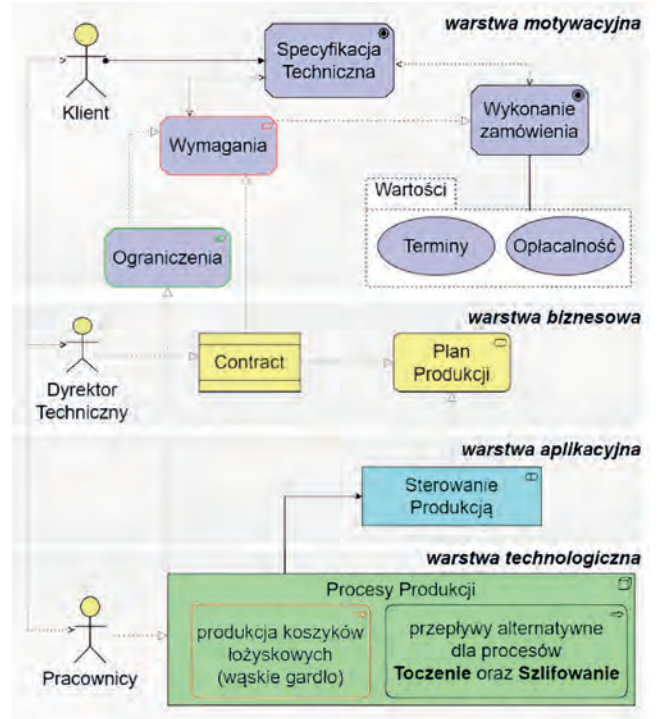
- istnieją przebiegi alternatywne dla dwóch procesów: toczenia i szlifowania.

W trakcie przeprowadzonego audytu stwierdzono, że możliwe i zasadne jest przeprowadzenie optymalizacji procesu produkcji łożysk. Wniosek ten wynika z faktu istnienia alternatywnych przebiegów procesu produkcji oraz zasygnalizowaną przez zarząd potrzebę minimalizacji kosztów.

5. Model matematyczny

Uwzględniając wyniki i konkluzje analizy wstępnej przedstawione w rozdziale 4 uzasadnione jest opracowanie modelu matematycznego, który umożliwi wspomaganie procesów decyzyjnych dotyczących sterowania produkcją łożysk w opisywanej fabryce.

Model został sformułowany w postaci zagadnienia programowania liniowego całkowitoliczbowego [4]. Jako funkcję celu (9) przyjęto maksymalizację zysków z jednoczesną minimalizacją kosztów produkcji, magazynowania, niezrealizowanych zleceń itd. Opracowany model ma ograniczenia (1)–(8), które odnoszą się do zdolności produkcyjnych, zapotrzebowań, bilansu na stanowiskach produkcyjnych itd. Parametry i zmienne decyzyjne modelu przedstawiono w tab. 4.



Rys. 5. Diagram – punkt widzenia warstw
Fig. 5. Diagram – layers point of view

Ograniczenia

Realizacja zapotrzebowań

$$Y_{j,t} = g_{j,t} - f_j \cdot B_{j,t} + \sum_{i \in I} o_{i,j} \cdot s_i \cdot \left(\sum_{e \in E \wedge t+r(i) \leq T} X_{i,e,t+r(i)} \right) \quad \forall i \in I, t \in [1, \dots, T] \quad (1)$$

Bilansowanie zapasów

$$V_{i,t-1} + s_i \cdot \sum_{e \in E} (w_{e,i} \cdot X_{i,e,t}) = Y_{i,t} + V_{i,t} \quad \forall i \in I, t \in [2, \dots, T]; \quad z_i + s_i \cdot \sum_{e \in E} (w_{e,i} \cdot X_{i,e,1}) = Y_{i,1} + V_{i,1} \quad \forall i \in I \quad (2)$$

Zdolność produkcyjna

$$\sum_{i \in I} (s_i \cdot a_{e,i} \cdot X_{i,e,t}) \leq h_{e,t} \quad \forall e \in E, t \in [1, \dots, T] \quad (3)$$

Powiązanie zmiennych X i U (st – duża stała)

$$U_{i,e,t} \leq X_{i,e,t} \quad \forall i \in I, e \in E, t \in [1, \dots, T]; \quad st \cdot U_{i,e,t} \geq X_{i,e,t} \quad \forall i \in I, e \in E, t \in [1, \dots, T] \quad (4)$$

Dopuszczalna liczba produktów

$$\sum_{i \in I} X_{i,e,t} \leq k_e \quad \forall e \in E, t \in [1, \dots, T] \quad (5)$$

Wielkość zapasów

$$V_{i,t} \leq m_i \quad \forall i \in I, t \in [1, \dots, T] \quad (6)$$

Czas cyklu produkcji

$$X_{i,e,t} = 0 \quad \forall i \in I, \forall e \in E, t \in [1, \dots, T] \wedge t \leq tr(i) \quad (7)$$

Binarność i całkowitoliczbowość

$$X_{i,e,t} \in N \quad \forall i \in I, e \in E, t \in [1, \dots, T]; \quad U_{i,e,t} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, e \in E, t \in [1, \dots, T] \quad (8)$$

Funkcja celu – maksymalizacja zysków $\max(-F1-F2+F3-F4-F5)$

$$F1 = \sum_{i \in I} \sum_{t \in [1, \dots, T]} (c_i \cdot V_{i,t}); \quad F2 = \sum_{i \in I} \sum_{t \in [1, \dots, T]} (n_{i,t} \cdot B_{i,t}); \quad F3 = \sum_{i \in I} \sum_{t \in [1, \dots, T]} (q_{i,t} \cdot Y_{i,t}); \quad F4 = \sum_{i \in I} \sum_{t \in [1, \dots, T]} (l_i \cdot B_{i,t}); \quad F5 = \sum_{i \in I} \sum_{e \in E} \sum_{t \in T} (d_{e,i} \cdot X_{i,e,t}) \quad (9)$$

F1 – koszt magazynowania; F2 – koszt nierealizacji zleceń; F3 – zysk ze zlecenia; F4 – koszt zakupu; F5 – koszt produkcji

Innowacyjną cechą zaproponowanego modelu jest modyfikacja jego struktury przez wprowadzenie dodatkowej zmiennej B_{jt} . Zmienna ta określa, czego nie uda się wyprodukować i co może być przedmiotem outsourcingu. Wprowadzenie tej zmiennej decyzyjnej powoduje, że zaproponowany model przy tak określonych ograniczeniach i funkcji celu zawsze będzie miał rozwiązanie. Nie pojawi się sytuacja typu NSF (ang. *No Solution Found*), która w praktyce daje niewielką informację zwrotną typu nie można zrealizować zleceń. Nie wiadomo, co to uniemożliwia, tzn. czego konkretnie nie uda się wyprodukować.

6. Eksperymenty obliczeniowe

Implementacji modelu dokonano w systemie LINGO [10]. Jest to popularne środowisko optymalizacji dla modeli programowania matematycznego. Przeprowadzono eksperymenty obliczeniowe z wykorzystaniem zaproponowanego modelu (tab. 4). Obliczenia wykonano na komputerze o następujących parametrach Processor: Intel(R) Core(TM) i5-7300U CPU @ 2,60 GHz; RAM: 8 GB; OS: Windows 10 Pro z wykorzystaniem pakietu Lindo v.12.0. Wykonane obliczenia pozwoliły uzyskać odpowiedzi na pytania:

P1. Czy wszystkie zlecenia da się zrealizować we własnym systemie produkcyjnym?

P2. Jaki jest optymalny/akceptowalny koszt realizacji zleceń produkcyjnych i odpowiadający mu plan produkcji?

P3. Jakie jest obciążenie stanowisk/maszyn dla tego planu?

Uzyskane odpowiedzi umożliwiają podjęcie decyzji sterowania produkcją (rozdziel zleceń na poszczególne stanowiska, obciążenie maszyn itd.), które zapewnią minimalizację kosztów produkcji. W celu przeprowadzenia eksperymentów obliczeniowych oprócz danych zgromadzonych w tab. 1–3 należy też uwzględnić inne dane pozyskane również z rzeczywistego systemu produkcji, które zgromadzono w tab. 5 i tab. 6. Są to zapotrzebowania w poszczególnych okresach oraz uśredniona wartość zdolności produkcyjnych poszczególnych stanowisk.

Tab. 5. Zapotrzebowanie (w szt.)

Tab. 5. Demand (in pcs)

Produkt	Okres					
	1	2	3	4	5	6
AF	15 632	11 216	8016	15 336	12 216	14 536

Tab. 6. Zdolności produkcyjne w okresie sześciu miesięcy

Tab. 6. Production capacity over a period of six months

Oznaczenie stanowisk	Okres								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
S1..S2	480								

W wyniku przeprowadzonych eksperymentów obliczeniowych z wykorzystaniem modelu matematycznego i danych zawartych w tab. 1–3, 5, 6 uzyskano rozwiązanie, które umożliwiło odpowiedź na pytania P2, P3. Eksperymenty przeprowadzono w dwóch etapach. W pierwszym etapie (rys. 5, tab. 7) znaleziono pierwsze rozwiązanie dopusz-

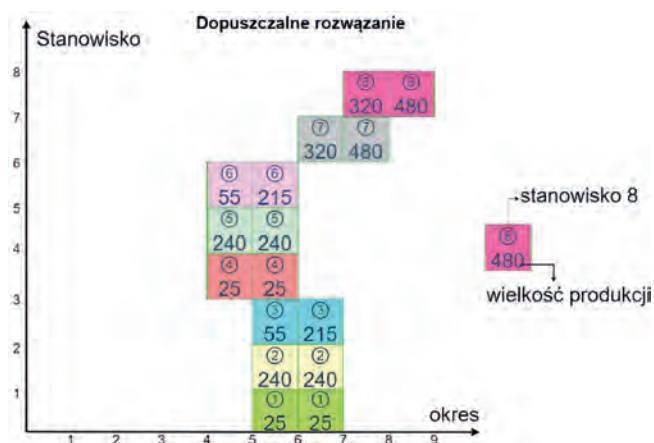
czalne, tzn. rozwiązanie, które spełnia ograniczenia, ale nie optymalizuje kosztów produkcji. Określa ono plan produkcji możliwy do zrealizowania i odpowiadający mu sposób obciążenia maszyn.

Odpowiedź na pytanie P2 jest negatywna, bowiem nie jest to optymalny koszt. Poszukiwane rozwiązania dopuszczalnego jest uzasadnione w przypadkach, kiedy nakład i czas obliczeń jest zbyt duży i nieakceptowalny dla znalezienia rozwiązania optymalnego, a z drugiej strony decydentowi wystarczy informacja, czy da się zrealizować zlecenia i jaki jest koszt realizacji.

W drugim etapie (rys. 6 i tab. 8) znaleziono już rozwiązanie optymalne, które minimalizuje koszty i maksymalizuje zyski. Dla rozpatrywanego przykładu czas optymalizacji w obu przypadkach nie przekraczał kilkudziesięciu sekund. W obu przypadkach uzyskano również odpowiedź na pytanie P1, która brzmi TAK, tzn. da się zrealizować wszystkie zlecenia we własnym systemie produkcyjnym i nie ma potrzeby zlecenia produkcji na zewnątrz.

Rozwiązanie dopuszczalne

P2 – Jaki jest optymalny koszt realizacji zleceń produkcyjnych i odpowiadający mu plan produkcji? Odp: Akceptowalny koszt realizacji zleceń produkcyjnych, które można zaakceptować wynosi 12 080 PLN.



Rys. 5. Plan produkcji, przy koszcie produkcji 12 080 PLN
Fig. 5. Production plan with a production cost of 12 080 PLN

P3 – Jakie jest obciążenie stanowisk dla tego planu?

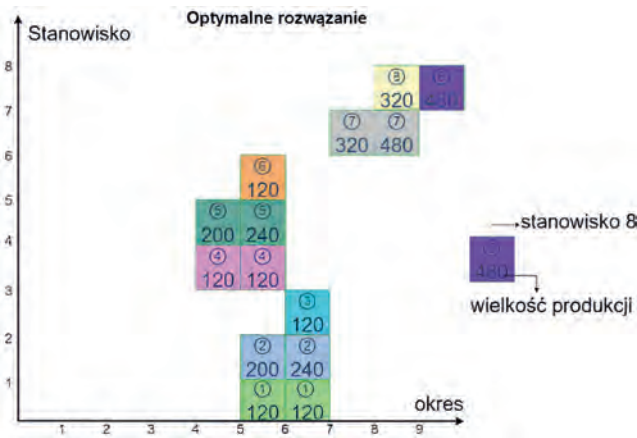
Tab. 7. Akceptowalne obciążenie stanowisk

Tab. 7. Acceptable workstation

Stanowisko	Indeks produktu	Oznaczenie	Liczba sztuk
1	P4	B	50
2	P4	B	480
3	P4	B	270
4	P5	C	50
5	P5	C	480
6	P5	C	270
7	P2	A	800
8	P1	AF	800

Rozwiązanie optymalne

P2 – Jaki jest optymalny (minimalny) koszt realizacji zleceń produkcyjnych i odpowiadający mu plan produkcji?
Odp: Optymalny koszt realizacji zleceń produkcyjnych wynosi: 10 720 PLN.



Rys. 6. Optymalny plan koszt 10 720 PLN

Fig. 6. Optimal production plan production cost 10 720 PLN

P3 – Jakie jest obciążenie stanowisk/maszyn dla tego planu?

Tab. 8. Optymalne obciążenie stanowisk

Tab. 8. Optimal workstation

Stanowisko	Indeks produktu	Oznaczenie	Liczba sztuk
1	P4	B	240
2	P4	B	440
3	P4	B	120
4	P5	C	240
5	P5	C	440
6	P5	C	120
7	P2	A	800
8	P1	AF	800

7. Wnioski

Zastosowanie architektury korporacyjnej na poziomie systemu produkcyjnego umożliwia grupowanie procesów technologicznych i klasyfikację różnych rozwiązań technologicznych. Zaletą takiego działania jest uporządkowanie procesów biznesowych, a co za tym idzie identyfikacja zadań, które można zautomatyzować i optymalizować. Stosując architekturę korporacyjną możemy zgromadzić niezbędną wiedzę do tego, aby na jej podstawie opracować model szczegółowy na potrzeby sterowania i optymalizacji procesu produkcji. Niestety samego procesu tworzenia budowy modelu architektonicznego nie da się zautomatyzować [5]. Dlatego w pierwszej kolejności konieczne jest zbudowanie zestawu dobrych praktyk modelowania architektury korporacyjnej, która sprawdziła się w różnych projektach. Zazwyczaj etapy pracy nad modelami architektonicznymi sprowadzają się do określenia zakresu informacji, na podstawie których będzie bazował przyszły model. Jednakże ważną cechą

tej działalności, związaną z wykorzystaniem elementów architektury korporacyjnej jest możliwość modelowania procesów biznesowych, co ułatwia wdrożenie zarządzania procesowego, a co za tym idzie budowanie modelu matematycznego dla przykładowych procesów produkcji, dystrybucji, transportu [6, 7]. Takie modele mogą być podstawą do wspomagania decyzji w systemie produkcyjnym, w szczególności w zakresie doboru i konfiguracji zasobów, optymalizacji kosztów produkcji, akceptacji lub odrzucenia nowego projektu, itp.

W rozpatrywanym przykładzie ilustracyjnym zastosowanie modelu do optymalizacji sterowania przykładowym procesem produkcji (łożysk kulkowych) umożliwiło redukcję kosztów wytwarzania o około 20 % oraz znalezienie optymalnego planu produkcji. Cenną właściwością modelu jest również informacja zwrotna, ile i z jakiego zlecenia nie uda się wykonać produktów (wartości zmiennej decyzyjnej $B_{j,i}$). W ogólnym przypadku powyższe informacje mogą być podstawą do podzlecenia produkcji na zewnątrz. W przyszłych pracach planowana jest rozbudowa modelu o możliwość uwzględniania dodatkowych zasobów, np. pracowników w procesie planowania produkcji oraz optymalizacji produkcji, jeśli pojawiają się dodatkowe zlecenia w trakcie realizacji określonego planu produkcji.

Bibliografia

- Bartodziej Ch.J., *The Concept Industry 4.0. An Empirical Analysis of Technologies and Applications in Production Logistics*. Springer Gabler, 2017, DOI: 10.1007/978-3-658-16502-4.
- Bartoszewicz G., *Zastosowanie metod zarządzania procesami BPM w celu zwiększenia efektywności złożonych procesów logistycznych 4.0 w systemach ERP 2.0*. [w:] P. Cyplik, M. Adamczak, (red.), *Wybrane problemy współczesnej logistyki w świetle badań naukowych i praktyce biznesowej* 2017, 12–37.
- Sitek P., Wikarek J., *A multi-level approach to ubiquitous modeling and solving constraints in combinatorial optimization problems in production and distribution*, "Applied Intelligence", Vol. 48, 2018, 1344–1367, DOI: 10.1007/s10489-017-1107-9.
- Wolsey L., *Integer Programming*, 2021, John Wiley & Sons, DOI: 10.1002/9781119606475.
- Wikarek J., Sitek P., *A Data-Driven Approach to Constraint Optimization*. "Automation 2019", AISC, Vol. 920, 2020, Springer, DOI: 10.1007/978-3-030-13273-6_14.
- Rahman H.F., Janardhanan M.N., Nielsen P., *An integrated approach for line balancing and AGV scheduling towards smart assembly systems*, „Assembly Automation”, Vol. 40, No. 2, 2020, 219–234, DOI: 10.1108/AA-03-2019-0057.
- Thibbotuwawa A., Bocewicz G., Radzki G., Nielsen P., Banaszak Z., *UAV Mission Planning Resistant to Weather Uncertainty*, "Sensors", Vol. 20, No. 2, 2020, DOI: 10.3390/s20020515.

Inne źródła

- The Open Group Architecture Framework – TOGAF Standard, [https://pubs.opengroup.org/architecture/togaf9-doc/arch/index.html].
- Grupa Otwarta, „Specyfikacja ArchiMate 3.0”. Van Harena
- LINDO Software for Mathematical Optimization. *Integer Programming, Linear Programming, Nonlinear Programming, Stochastic Programming, Global Optimization*, [www.lindo.com].

Applying Enterprise Architecture to Analysis and Optimization of Production Control

Abstract: The classic approach to production control optimization usually comes down to building optimization and decision-making models based on data obtained directly from the production system from the so-called “technological layer”. Most often, economic factors that occur mainly at the level of the so-called „business layer”, which have a significant impact on the processes operating in the company, including the production process itself. In the process of building detailed production optimization models, it is necessary to take into account various variable factors also occurring at the „business layer” level, i.e. prices of services, prices of raw materials, contractual penalties, which may affect the directional decision in the production process, i.e. Should all orders be completed in your own production system? Will it be cheaper to outsource some orders/parts of orders? Proposing a different approach to optimizing the production process than before, using data from both the technological and business layers, may facilitate: identifying areas intended for optimization/automation of production processes, building detailed mathematical models for the purpose of optimizing/automating production processes and adapting information flow between individual layers (technological/business) operating at the enterprise level. The article presents the use of enterprise architecture to analyze the process of controlling the production of rolling bearings in a real factory and to build a mathematical model for optimization and decision support in this process.

Keywords: production control optimization, enterprise architecture, TOGAF, ArchiMate

dr hab. inż. Paweł Sitek, prof. PŚk

sitek@tu.kielce.pl

ORCID: 0000-0001-6108-0241

Profesor nadzwyczajny na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Świętokrzyskiej. Uzyskał tytuł magistra inżyniera na Politechnice Świętokrzyskiej, tytuł doktora na Politechnice Śląskiej oraz tytuł doktora habilitowanego w dziedzinie informatyki na Politechnice Wrocławskiej. Jego badania obejmują badania operacyjne, techniki programowania z ograniczeniami, planowanie i harmonogramowanie produkcji, optymalizację dyskretną, systemy wspomagania decyzji oraz sztuczną inteligencję. Jest autorem i współautorem ponad 170 publikacji, w tym artykułów w międzynarodowych czasopismach (JCR), rozdziałów w książkach i materiałach konferencyjnych. Jest redaktorem i recenzentem wielu międzynarodowych czasopism i konferencji.



dr inż. Jarosław Wikarek

j.wikarek@tu.kielce.pl

ORCID: 0000-0003-4758-1490

Adiunkt na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Świętokrzyskiej. Uzyskał tytuł magistra inżyniera na Politechnice Świętokrzyskiej oraz tytuł doktora na Politechnice Śląskiej. Jego badania obejmują badania operacyjne, techniki programowania z ograniczeniami, planowanie i harmonogramowanie produkcji, optymalizację dyskretną oraz systemy wspomagania decyzji. Jest autorem i współautorem ponad 145 publikacji, w tym artykułów w międzynarodowych czasopismach (w tym na liście JCR), rozdziałów w książkach i materiałach konferencyjnych. Jest recenzentem wielu międzynarodowych czasopism i konferencji.



mgr inż. Zbigniew Juzon

zjuzon@tu.kielce.pl

ORCID: 0000-0003-0712-8261

Ukończył Politechnikę Świętokrzyską w 2000 r. Obecnie jest doktorantem na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki tej uczelni. Jego badania obejmują sztuczną inteligencję, uczenie maszynowe, sieci neuronowe, automatyzację zadań biznesowych, bezpieczeństwo danych, modelowanie prognozowania biznesowego, zarządzanie cyklem życia usług oraz budowę modeli matematycznych.

