

Wyznaczanie kluczowych wskaźników wydajności procesu produkcyjnego – część I: badania teoretyczne

Krzysztof Bartecki

Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Instytut Automatyki, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole

Dariusz Król

Politechnika Wrocławska, Wydział Informatyki i Zarządzania, Katedra Systemów Informatycznych, Wybrzeże S. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

Jan Skowroński

DSR SA, ul. Legnicka 55F, 54-203 Wrocław

Politechnika Wrocławska, Wydział Informatyki i Zarządzania, Katedra Systemów Informatycznych, Wybrzeże S. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

Streszczenie: Kluczowe wskaźniki wydajności są zdefiniowane jako zestaw metryk umożliwiających ocenę różnych aspektów funkcjonowania procesu produkcyjnego. Należą do nich m.in. takie wskaźniki, jak przepustowość linii produkcyjnej, dostępność oraz wydajność maszyn i ich operatorów, czy też jakość wytwarzanych produktów. W pierwszej części artykułu omówiono hierarchiczną, trójpoziomą strukturę wskaźników wydajności, zgodnie z którą wartości wskaźników podstawowych wyznaczane są na podstawie wskaźników bezpośrednich, na które składają się planowane wielkości charakteryzujące proces produkcyjny oraz ich wartości rzeczywiste, zmierzone bezpośrednio na stanowiskach produkcyjnych. Opierając się na wartościach wskaźników podstawowych, wyznaczane są następnie wartości wskaźników złożonych, umożliwiających syntetyczną ocenę efektywności wykorzystania maszyn oraz zasobów ludzkich zaangażowanych w proces produkcyjny. Znajomość wartości tych wskaźników umożliwia analizę bieżącej kondycji procesu produkcyjnego oraz podjęcie ewentualnych działań naprawczych. Wyniki badań przemysłowych, polegających na oryginalnej implementacji przedstawionej metody zostaną omówione w drugiej części artykułu.

Słowa kluczowe: kluczowe wskaźniki wydajności, proces produkcyjny, pomiary, eksploracja danych, straty produkcyjne, ISO 22400

1. Wprowadzenie

Ciągłe monitorowanie procesu produkcyjnego, polegające na rejestrowaniu i gromadzeniu szczegółowych danych dotyczących jego przebiegu jest istotnym elementem strategii zarządzania przedsiębiorstwem produkcyjnym. Zadanie to można realizować zarówno w sposób ręczny, poprzez wypełnianie odpowiednich formularzy lub arkuszy danych, jak i w sposób automatyczny, np. dzięki zastosowaniu systemów komputerowych klasy MES (ang. *Manufacturing Execution Systems*). Zgromadzone dane mogą zostać następnie wykorzystane do poprawy efektyw-

ności wykorzystania zasobów przedsiębiorstwa oraz zwiększenia jego zdolności produkcyjnych, przy zachowaniu wysokiej jakości wytwarzanych produktów [1, 13]. Negatywny wpływ na wydajność procesu mogą mieć np. nieprzewidziane przestoje maszyn i urządzeń, wynikające z pojawiających się defektów i uszkodzeń. Identyfikacja elementów linii produkcyjnych najbardziej podatnych na te przestoje daje możliwość podjęcia odpowiednich działań zaradczych [12]. Również rozpoznanie tzw. wąskich gardeł w procesie produkcyjnym może pozwolić na jego lepsze zaplanowanie [8, 11].

Z tego względu w systemach produkcyjnych monitoruje się oraz gromadzi wiele danych, takich jak np. czas pracy urządzenia, liczba czy też jakość wytworzonych produktów. Jednak posługiwanie się w celu analizy wydajności procesu surowymi pomiarami o zróżnicowanym charakterze, pochodzącymi z wielu stanowisk, może być trudne do koordynacji i ewaluacji. O wiele dogodniejsze jest posługiwanie się wskaźnikami liczbowymi o charakterze syntetycznym, łączącymi w sobie informacje pochodzące z różnych źródeł. W tym celu w nowoczesnych systemach produkcyjnych wykorzystuje się tzw. kluczowe wskaźniki wydajności KPI (ang. *Key Performance Indicators*), zdefinio-

Autor korespondujący:

Krzysztof Bartecki, k.bartecki@po.opole.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 08.01.2018 r., przyjęty do druku 14.09.2018 r.



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

wane jako zestaw metryk (miar), mających na celu umożliwienie oceny funkcjonowania systemu produkcyjnego z punktu widzenia jego wydajności, jakości oraz utrzymania [3–5, 8, 10]. W raportach międzynarodowego standardu ISO 22400 przedstawiono 34 takie wskaźniki [6, 7].

Przedmiotem pierwszej części artykułu, opisującej wstępny etap realizacji projektu PUPMT¹, jest omówienie metodyki wyznaczania oraz analizy wskaźników KPI pod kątem oceny efektywności typowego procesu produkcyjnego. Przedstawiono w nim zarówno wybrane informacje dostępne w literaturze przedmiotu, w tym najważniejsze założenia normy ISO 22400, jak też oryginalne opracowania autorskie. W rozdziale 2. zaprezentowano hierarchiczną strukturę wskaźników KPI oraz wyrażenia matematyczne umożliwiające wyznaczanie ich wartości, a także zaproponowane przez autorów alternatywne metody ich reprezentacji. Rozdział 3. poświęcono omówieniu metody oceny efektywności procesu produkcyjnego z wykorzystaniem omawianych wskaźników, wynikające z doświadczeń autorów w zakresie realizacji projektu PUPMT. Rozdział 4. stanowi podsumowanie pierwszej części artykułu.

Należy podkreślić, że wspomniane narzędzie monitorująco-diaagnostyczne umożliwi nie tylko wyznaczanie wartości wskaźników KPI, ale również identyfikację wybranych czynników mających wpływ na ich wartości. Zagadnienie to, jak również wstępne wyniki badań przemysłowych, polegających na oryginalnej implementacji przedstawionej metody wyznaczania kluczowych wskaźników KPI, zostaną omówione w drugiej części artykułu.

1 Production Unit Performance Management Tool (PUPMT) – opracowanie innowacyjnego narzędzia monitorująco-diaagnostycznego w zakresie selekcji czynników mających istotny wpływ na wskaźnik efektywności wydzielonych jednostek produkcyjnych opierającego się na paradygmatach teorii sterowania w celu optymalizacji procesów produkcyjnych w przemyśle. Nr umowy POIR.01.01.01-00-0687/17-00.

2. Hierarchiczna struktura wskaźników KPI

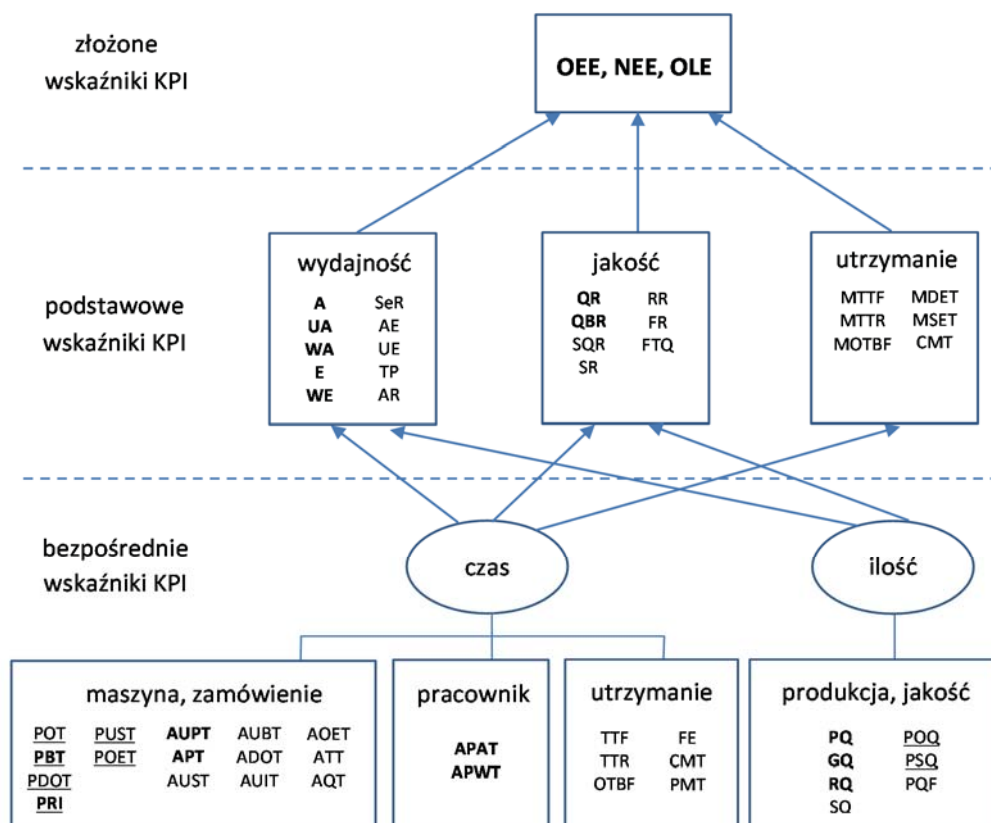
Poszczególne wskaźniki charakteryzujące funkcjonowanie systemu produkcyjnego, będące przedmiotem normy ISO 22400, charakteryzują się hierarchiczną strukturą oraz związanymi z nią wzajemnymi wewnętrznymi powiązaniem. W przedstawionym na rys. 1 schemacie wyróżnić można trzy poziomy wskaźników KPI [6, 7, 10]:

- poziom wskaźników bezpośrednich,
- poziom wskaźników podstawowych,
- poziom wskaźników złożonych.

W kolejnych rozdziałach omówiono, bazując na zapisach wspomnianej wyżej normy ISO, poszczególne poziomy hierarchii wskaźników KPI oraz przedstawiono definicje wybranych wskaźników wraz z formułami umożliwiającymi wyznaczanie ich wartości. Krótko omówiono zachodzące między nimi zależności tożsamościowe, a także zaprezentowano alternatywne metody reprezentacji wskaźników.

2.1. Poziom wskaźników bezpośrednich

Wskaźniki bezpośrednie można podzielić na wielkości planowane, wynikające np. z harmonogramu procesu produkcyjnego, oraz rzeczywiste, czyli zmierzone na stanowisku produkcyjnym. Wskaźniki reprezentujące wielkości planowane oznaczono na rys. 1. podkreśleniem. Inny sposób klasyfikacji tej grupy wskaźników dotyczy podziału na wielkości związane z czasem (np. planowany oraz rzeczywisty czas pracy urządzenia) oraz pomiary ilościowe (np. planowana oraz rzeczywista liczba wytworzonych produktów). Wśród planowanych wielkości związanych z czasem można wymienić m.in. następujące wskaźniki odnoszące się do maszyn:



Rys. 1. Hierarchiczna trójwarstwowa struktura wskaźników KPI (na podstawie [8])

Fig. 1. Hierarchical three-layered KPI structure (based on [8])

- planowany czas pracy POT (ang. *Planned Operation Time*),
- planowany czas zajętości PBT (ang. *Planned Busy Time*),
- planowany czas przestoju PDOT (ang. *Planned Down Time*):

$$POT = PBT + PDOT \quad (1)$$

Z kolei wskaźniki dotyczące zmierzonych czasów to np. następujące wielkości odnoszące się do maszyn:

- rzeczywisty czas przetwarzania AUPT (ang. *Actual Unit Processing Time*),
- rzeczywisty czas produkcji APT (ang. *Actual Production Time*),
- rzeczywisty czas konfiguracji maszyny AUST (ang. *Actual Unit Setup Time*):

$$AUPT = APT + AUST \quad (2)$$

- rzeczywisty czas zajętości maszyny AUBT (ang. *Actual Unit Busy Time*):

$$AUBT = AUPT + ADOT \quad (3)$$

gdzie ADOT (ang. *Actual Unit Downtime*) jest rzeczywistym czasem przestoju urządzenia.

Wśród wskaźników czasowych odnoszących się do zasobów ludzkich można wyróżnić:

- rzeczywisty czas obecności pracowników na stanowisku APAT (ang. *Actual Personnel Attendance Time*),
- rzeczywisty czas pracy pracownika APWT (ang. *Actual Personnel Work Time*), przy czym zwykle zachodzi $APWT < APAT$.

Poza wskaźnikami bezpośrednimi odnoszącymi się do maszyn i pracowników, istnieje grupa wskaźników dotyczących utrzymania i konserwacji maszyn. Można tu wymienić np. takie wskaźniki, jak czas do wystąpienia uszkodzenia TTF (ang. *Time To Failure*) oraz czas naprawy urządzenia TTR (ang. *Time To Repair*) [7, 10].

Wśród wskaźników ilościowych można wymienić m.in. następujące pomiary dotyczące liczby oraz jakości wytworzonych produktów:

- ogólna liczba wytworzonych produktów PQ (ang. *Processed Quantity*),
- liczba produktów spełniających wymagania jakościowe GQ (ang. *Good Quantit*),
- liczba produktów niespełniających wymagań, ale możliwych do ponownego przetworzenia RQ (ang. *Rework Quantity*),
- liczba produktów niespełniających wymagań jakościowych SQ (ang. *Scrap Quantity*):

$$PQ = GQ + RQ + SQ \quad (4)$$

Na podstawie wymienionych wskaźników bezpośrednich możliwe jest w kolejnym kroku wyznaczenie podstawowych oraz złożonych wskaźników KPI, będących przedmiotem zainteresowań inżynierów produkcji oraz menedżerów zarządzających przedsiębiorstwem. Zostaną one omówione w kolejnych rozdziałach.

2.2. Poziom wskaźników podstawowych

Wskaźniki należące do tej grupy związane są z wydajnością systemu produkcyjnego, jego utrzymaniem oraz jakością wytwarzanych produktów. Można je podzielić na wskaźniki wymagane w dalszej kolejności do wyznaczenia wskaźników złożonych, oraz na dodatkowe wskaźniki reprezentujące pewne istotne parametry procesu produkcyjnego. Wartości wskaźników podstawowych obliczane są na podstawie omówionych

w rozdziale 2.1 wskaźników bezpośrednich, znajdujących się na najniższym poziomie hierarchii przedstawionej na rys. 1.

Wśród podstawowych wskaźników KPI opisujących wydajnościowe aspekty systemu produkcyjnego, w tym maszyn oraz zasobów ludzkich, można wymienić m.in.:

- dostępność A (ang. *Availability*), odzwierciedlającą rzeczywisty czas dostępności maszyny:

$$A = \frac{APT}{PBT} \quad (5)$$

- dostępność maszyny z uwzględnieniem czasu konfiguracji oraz przezbajania UA (ang. *Uptime Availability*):

$$UA = \frac{AUPT}{PBT} \quad (6)$$

- dostępność pracownika WA (ang. *Worker Availability*) – wskaźnik reprezentujący wykorzystanie czasu pracy pracownika:

$$WA = \frac{APWT}{APAT} \quad (7)$$

- wydajność E (ang. *Efectiveness*) odniesiona do rzeczywistego czasu pracy maszyny:

$$E = \frac{PRI}{APT} = \frac{PRI \cdot PQ}{APT} \quad (8)$$

- wydajność pracownika WE (ang. *Worker Efectiveness*) czyli wydajność odniesiona do rzeczywistego czasu pracy pracownika:

$$WE = \frac{PRI}{APWT} = \frac{PRI \cdot PQ}{APWT} \quad (9)$$

- współczynnik konfiguracji SeR (ang. *Setup Ratio*), reprezentujący względną utratę możliwości generowania przez maszynę wartości dodanej z powodu jej konfiguracji oraz przezbajania:

$$SeR = \frac{AUST}{AUPT} \quad (10)$$

- przepustowość TP (ang. *Throughput*), czyli rzeczywistą liczbę produktów wytworzonych przez ostatnią maszynę systemu produkcyjnego w jednostce czasu:

$$TP = \frac{PQ}{APT} \quad (11)$$

Wśród podstawowych wskaźników KPI opisujących jakościowe cechy produktów można wymienić m.in.:

- odsetek produktów dobrych jakościowo QR (ang. *Quality Ratio*), czyli ogólny odsetek wytworzonych produktów dobrej jakości:

$$QR = \frac{GQ}{PQ} \quad (12)$$

– odsetek produktów dobrych jakościowo nadających się do sprzedaży QBR (ang. *Quality Buy Rate*), czyli ogólny odsetek produktów dobrej jakości z uwzględnieniem elementów ponownie przetworzonych:

$$QBR = \frac{GQ + RQ}{PQ} \quad (13)$$

Poza wskaźnikami opisującymi wydajnościowe i jakościowe aspekty procesu produkcyjnego, istnieje również grupa wskaźników podstawowych związanych z utrzymaniem procesu. Można tu wymienić m.in. takie wskaźniki, jak średni czas do wystąpienia awarii urządzenia MTTF (ang. *Mean Time To Failure*) oraz średni czas naprawy urządzenia MTTR (ang. *Mean Time To Repair*).

2.3. Poziom wskaźników złożonych

Wskaźniki złożone, znajdujące się na najwyższym poziomie hierarchii, obliczane są na podstawie wskaźników podstawowych, omówionych w rozdziale 2.2. Wskaźniki bezpośrednie i podstawowe wymagane do wyznaczenia wskaźników złożonych oznaczono na rys. 1. pogrubioną czcionką. Do grupy wskaźników złożonych należą:

– OEE (ang. *Overall Equipment Effectiveness*) – wskaźnik charakteryzujący całkowitą efektywność sprzętu stosowanego w procesie produkcyjnym. Określa wydajność pojedynczych maszyn, gniazd produkcyjnych, ale także obszarów z wieloma maszynami lub wieloma gniazdami produkcyjnymi:

$$OEE = A \cdot E \cdot QBR \quad (14)$$

– NEE (ang. *Net Equipment Effectiveness*) – wskaźnik podobny do OEE, ale uwzględniający również czas konfiguracji lub przezbierania urządzenia (ang. *setup time*):

$$NEE = UA \cdot E \cdot QBR \quad (15)$$

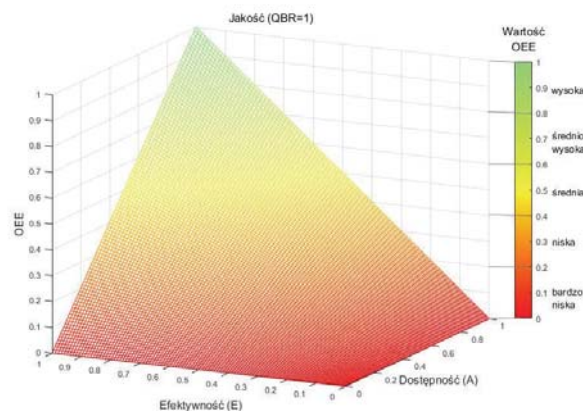
– OLE (ang. *Overall Labor Effectiveness*) – analogiczny do OEE wskaźnik charakteryzujący efektywność pracy w odniesieniu do zasobów ludzkich:

$$OLE = WA \cdot WE \cdot QR \quad (16)$$

Wymienione złożone wskaźniki KPI stanowią syntetyczną miarę, umożliwiającą całościową ocenę funkcjonowania procesu produkcyjnego pod kątem efektywności wykorzystania maszyn oraz zasobów ludzkich. Jednak porównywanie wartości tych wskaźników wyznaczonych dla różnych przedsiębiorstw ma sens tylko wówczas, gdy specyfika produkcji, metody obliczeniowe oraz metody zbierania danych są dla tych przedsiębiorstw identyczne, co w praktyce nigdy się nie zdarza. Z tego względu wskaźniki te należy traktować jako miary wewnętrzne, pozwalające np. na oszacowanie poprawy lub pogorszenia się kondycji procesu produkcyjnego dla tej samej maszyny lub linii produkcyjnej w porównaniu z innym okresem [4, 11].

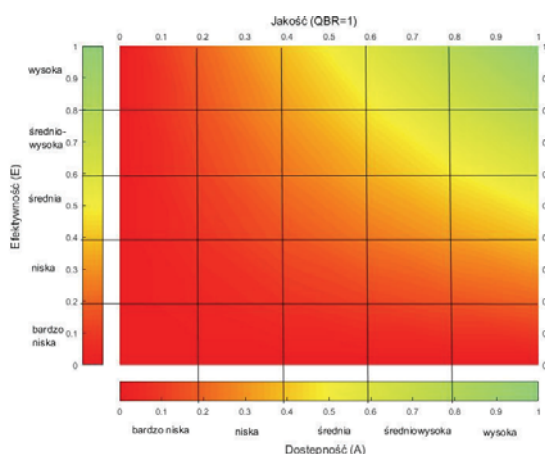
Mając na uwadze definicje wskaźników KPI wyrażone za pomocą wymienionych formuł matematycznych, zauważyć można szereg zachodzących między nimi zależności. Na przykład na poziomie złożonych wskaźników KPI istnieje następująca relacja między wskaźnikami OEE (14) oraz NEE (15):

$$\frac{OEE}{NEE} = \frac{A}{UA} = \frac{APT}{AUPT} = 1 - SeR \quad (17)$$



Rys. 2. Wykres przestrzenny zależności wskaźnika OEE od wskaźników A oraz E dla QBR = 1

Fig. 2. 3D plot of the OEE dependence on the A and E indicators for QBR = 1



Rys. 3. Wykres poziomicowy zależności wskaźnika OEE od wskaźników A oraz E dla QBR = 1

Fig. 3. 2D contour plot of the OEE dependence on the A and E indicators for QBR = 1

Tab. 1. Propozycja wartości lingwistycznych oraz oznaczeń barwnych dla przedziałów wartości wskaźników KPI

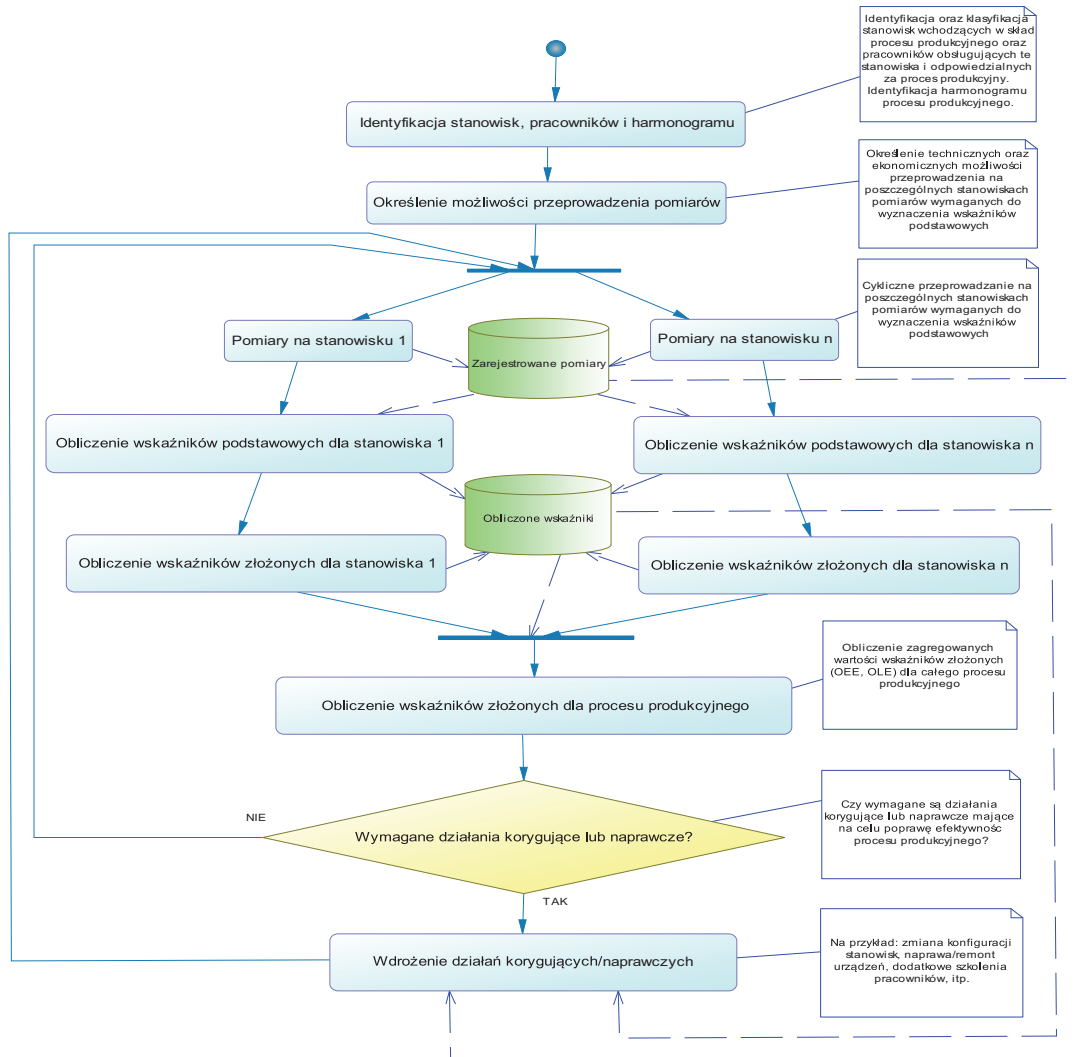
Tab. 1. Proposed linguistic values and color markings for KPI ranges

wskaźniki	przedział wartości	wartość lingwistyczna oraz barwa
OEE NEE OLE dostępność (A, WA) wydajność (E, WE) jakość (QBR, QR) pozostałe wskaźniki podstawowe	[0; 0,2)	bardzo niska
	[0,2; 0,4)	niska
	[0,4; 0,6)	średnia
	[0,6; 0,8)	średniowysoka
	[0,8; 1]	wysoka

Dzięki tego typu zależnościom jedne wskaźniki, np. niedostępne pomiarowo, można zastąpić innymi; możliwe jest również wyznaczenie wartości danego wskaźnika na podstawie innych zależności niż podane w rozdziałach 2.2 oraz 2.3.

2.4. Alternatywne metody reprezentacji wskaźników KPI

Oryginalną propozycją autorów jest rezygnacja, w pewnych określonych warunkach, ze stosowania dokładnych (tzn. wyra-



Rys. 4. Diagram BPM ilustrujący metodę oceny efektywności procesu produkcyjnego na podstawie wskaźników KPI
 Fig. 4. BPM diagram of the KPI-based assessment of a production process

zonych liczbowo) wartości wskaźników oraz zastąpienie ich wartościami lingwistycznymi, wyrażonymi przez odpowiednie przymiotniki o charakterze stopniującym. Dodatkowo, ze względu na wzmocnienie siły przekazu w odniesieniu do wartości poszczególnych wskaźników, korzystne byłoby przypisanie tym wartościom zróżnicowanych oznaczeń barwnych. W tabeli 1 przedstawiono pięciostopniową skalę wartości lingwistycznych wraz z przypisanymi im barwami oraz odpowiadające im przedziały wartości liczbowych poszczególnych wskaźników.

Kolor zielony w odniesieniu do wskaźników efektywności będzie oznaczał wysoką wydajność systemu produkcyjnego, kolor żółty traktować można jako ostrzeżenie wymagające podjęcia działań korekcyjnych, zaś kolor czerwony wskazywał będzie stan alarmowy, oznaczający konieczność natychmiastowego podjęcia działań naprawczych, omówionych dalej w rozdziale 3.5.

Wykresy ilustrujące zależność złożonego wskaźnika OEE od wskaźników podstawowych A, E oraz QBR z uwzględnieniem wartości lingwistycznych oraz odpowiednich barw przedstawiono na rys. 2 (w postaci wykresu przestrzennego) oraz na rys. 3 (w postaci wykresu poziomicowego). Z wykresów tych można m.in. odczytać, że:

- przy wysokiej dostępności (A) stanowiska produkcyjnego oraz wysokiej jakości produktów (QBR), niska efektywność tego stanowiska (E) sprawia, że wartość wskaźnika

OEE będzie niska mimo wysokich wartości dwóch pierwszych wskaźników,

- przy wysokiej jakości wytwarzanych produktów (QBR), średnia dostępność stanowiska (A) oraz jego średnia efektywność (E) sprawią, że wartość wskaźnika OEE będzie niska,
- wysoką wartość wskaźnika OEE można uzyskać jedynie przez jednoczesne zapewnienie wysokiej dostępności (A) i wysokiej efektywności (E) stanowiska, przy wysokiej jakości wytwarzanych na nim produktów (QBR).

Analogiczne wykresy można uzyskać dla wskaźników NEE i OLE.

3. Ocena efektywności procesu produkcyjnego na bazie wskaźników KPI

Ocena efektywności procesu produkcyjnego na podstawie omówionych w rozdziale 2. wskaźników KPI powinna być traktowana jako wieloetapowa procedura przeprowadzana w sposób iteracyjny. Na procedurę tę składa się szereg czynności, których etapem końcowym, przeprowadzanym w określonym horyzoncie czasowym (np. co miesiąc lub co kwartał), powinna być analiza otrzymanych wskaźników oraz podjęcie ewentualnych działań korygujących lub naprawczych. Działania te powinny mieć na celu poprawę efektywności funkcjonowania tych elementów procesu produkcyjnego, dla których zmierzone war-

tości wskaźników nie są satysfakcjonujące, tzn. nie spełniają przyjętego wcześniej kryterium. Autorski schemat ilustrujący przebieg omawianej procedury przedstawiono na rys. 4 w formie diagramu wykorzystującego notację modelu procesów biznesowych BPM (ang. *Business Process Model*), zaś jej kolejne etapy, wynikające z doświadczeń autorów w zakresie realizacji wspomnianego w rozdziale 1. projektu PUPMT, omówiono w kolejnych rozdziałach.

3.1. Identyfikacja stanowisk produkcyjnych

Na tym etapie istotne jest zidentyfikowanie oraz podanie dokładnego opisu funkcjonowania każdego stanowiska składającego się na proces produkcyjny. Istotne jest również określenie ról pracowników niezbędnych do funkcjonowania poszczególnych stanowisk, a także personelu odpowiedzialnego za nadzór całego procesu produkcyjnego.

Dla każdego stanowiska konieczne jest również określenie specyfiki jego działania, np. czy jest ono w pełni zautomatyzowane, czy jest to maszyna obsługiwana lub nadzorowana w sposób ciągły lub okresowy przez operatorów, czy też bazuje na pracownikach wykonujących swoją pracę w sposób ręczny. Wiąże się to z doбором wskaźników, których wartości dla danego stanowiska będą mogły być wyznaczone. W przypadku stanowisk w pełni zautomatyzowanych uzasadnione będzie stosowanie ogólnej oceny efektywności w postaci złożonego wskaźnika OEE lub NEE. Dla stanowisk charakteryzujących się pracą wykonywaną przez pracowników głównie w sposób ręczny bardziej celowe będzie wykorzystanie wskaźnika OLE. Z kolei dla stanowisk reprezentowanych przez maszyny obsługiwane przez operatorów, których wypadkowa efektywność będzie uzależniona zarówno od efektywności maszyn jak i od efektywności operatorów, uzasadnione będzie zastosowanie do oceny wydajności zarówno wskaźnika OEE/NEE, jak i OLE.

Niektóre ze wskaźników bazują na znajomości wielkości planowanych, np. w celu wyznaczenia wskaźnika dostępności maszyny A (5) wymagana jest znajomość planowanego czasu jej działania PBT. Z tego względu konieczna jest także identyfikacja harmonogramu procesu produkcyjnego, zarówno pod kątem zależności czasowych (np. liczba zmian, czas ich trwania) jak i ilościowych (np. planowana produkcja).

3.2. Analiza możliwości przeprowadzenia pomiarów

W celu umożliwienia wyznaczenia wartości wskaźników dla poszczególnych jednostek produkcyjnych, wymagana jest fizyczna możliwość przeprowadzenia odpowiednich pomiarów. W związku z tym konieczne jest określenie, które z pomiarów będą mogły być przeprowadzone na poszczególnych stanowiskach, biorąc pod uwagę zarówno uwarunkowania techniczne, jak i ekonomiczne.

W sytuacji, gdy uwarunkowania te nie pozwalają na pomiar niektórych parametrów charakteryzujących pracę stanowiska produkcyjnego, nie należy rezygnować z pomiaru pozostałych parametrów. Na przykład, jeśli możliwe będzie zmierzenie rzeczywistego czasu działania jednostki oraz liczby wytworzonych produktów, natomiast nie będzie możliwa kontrola jakości wytwarzanych przez tę jednostkę produktów, to takie pomiary mogą być wartościowe z punktu widzenia przyszłych działań naprawczych, pomimo braku możliwości wyznaczenia złożonego wskaźnika efektywności (OEE) dla tego stanowiska. Taka sytuacja może mieć miejsce np. w przypadku linii produkcyjnych złożonych z kilku lub kilkunastu jednostek (stanowisk), dla których często kontrola jakości ma miejsce dopiero na ostatnim stanowisku.

3.3. Wyznaczanie wskaźników bezpośrednich

O ile dwa poprzednie etapy wykonywane są zwykle jednorazowo, w ramach wdrożenia metody oceny efektywności procesu pro-

dukcyjnego, o tyle etapy kolejne, polegające na przeprowadzaniu na poszczególnych stanowiskach produkcyjnych odpowiednich pomiarów oraz wyznaczaniu wartości wskaźników KPI, realizowane będą w sposób cykliczny.

Najprostszą, a jednocześnie najmniej efektywną metodą jest ręczne wypełnianie odpowiednich formularzy lub arkuszy, w których pracownicy wpisują poszczególne wartości, np. czasy postojów, liczbę wytworzonych produktów itp. Niestety, podstawową wadą tej metody jest potencjalny brak rzetelności, ponadto zestawienia z tak prowadzonych zapisów rzadko robione są na bieżąco [9].

Alternatywnym, pozbawionym tej wady sposobem realizacji bezpośrednich pomiarów jest zastosowanie odpowiedniego oprogramowania typu MES, gromadzącego i przetwarzającego na bieżąco dane dotyczące procesu produkcyjnego [2, 8, 13]. Wstępne przetwarzanie surowych danych pomiarowych może polegać na:

- odpowiednim uzupełnianiu brakujących danych,
- korekcie danych błędnych czy elementów odstających,
- filtracji mającej na celu eliminację szumów pomiarowych.

Wyniki pomiarów zapisywane są w odpowiednim magazynie danych, z którego będą pobierane w celu wyznaczenia wartości wskaźników wyższego poziomu (rys. 4). Istotną zaletą podejścia polegającego na wprowadzeniu komputerowego systemu MES jest fakt, że nie musi wiązać się z ingerencją w warstwę urządzeń pomiarowych lub wykonawczych, a nawet w warstwę sterowania. System MES zwykle jest rozszerzeniem o wyższą warstwę systemu monitorowania i sterowania procesem produkcyjnym [8].

3.4. Wyznaczanie wskaźników podstawowych i złożonych

Na podstawie wartości wskaźników bezpośrednich obliczane są, zgodnie z zależnościami podanymi w rozdziale 2.2, wartości wskaźników podstawowych. Następnie, opierając się na wartościach wskaźników podstawowych, obliczane są, zgodnie z zależnościami podanymi w rozdziale 2.3, wartości wskaźników złożonych: OEE, NEE oraz/lub OLE.

Wyznaczanie wartości wskaźników złożonych całego procesu produkcyjnego powinno odbywać się na podstawie cząstkowych wartości wskaźników, obliczonych dla poszczególnych stanowisk produkcyjnych. Można tu wyróżnić dwa typowe sposoby obliczania wskaźników zagregowanych dla całego procesu [3]:

- przy użyciu średniej arytmetycznej prostej, np.:

$$OEE = \frac{OEE_1 + OEE_2 + \dots + OEE_N}{N} \quad (18)$$

gdzie OEE_i reprezentuje wartość odpowiedniego wskaźnika wyznaczoną dla i -tego stanowiska produkcyjnego, $i = 1, 2, \dots, N$, przy czym N jest liczbą stanowisk składających się na proces produkcyjny,

- przy użyciu średniej arytmetycznej ważonej, np.:

$$OEE = \frac{w_1 OEE_1 + w_2 OEE_2 + \dots + w_N OEE_N}{w_1 + w_2 + \dots + w_N} \quad (19)$$

gdzie w_i jest wagą odzwierciedlającą stopień „ważności” i -tego stanowiska w procesie produkcyjnym. Wagi te mogą być przypisywane stanowiskom produkcyjnym w dowolny sposób, zaleca się jednak dobieranie ich np. na podstawie wartości dodanej generowanej w procesie produkcyjnym przez dane stanowisko.

Zależności analogiczne do (18) i (19) można wykorzystać do obliczenia zagregowanych wskaźników NEE oraz OLE. Jeszcze raz podkreślić należy, że obliczanie np. wskaźnika OEE dla konkretnej firmy może być bardzo przydatne do monitorowania trendów, np. do zbadania, czy dana firma poprawia swoje OEE w czasie, lub jako przybliżona ocena, gdzie dana firma znaj-

Tab. 2. Charakterystyka tzw. sześciu głównych strat produkcyjnych (na podstawie [3])

Tab. 2. Six Big Losses of OEE (based on [3])

Kategoria strat	Wpływ na składowe wskaźnika OEE	Przykłady zdarzeń	Komentarz
awarie	straty czasu wskutek przestoju (A)	awarie narzędzi awarie sprzętowe nieplanowane konserwacje	Istnieje możliwość dowolnego określenia granicy między awarią a mikroprzezojem.
konfiguracje i dostrajania	straty czasu wskutek przestoju (A)	konfiguracje i przezbajania niedobory materiałowe nieobecność operatora inne korekty czas na rozruch	Straty te często redukuje się za pomocą programów redukcji czasu konfiguracji i/lub przezbajania.
mikroprzezoje	straty wydajnościowe (E)	zablokowany przepływ produktu zablokowany dopływ materiału zacięcie blokada czujnika blokada dostaw czyszczenie/sprawdzanie	Zazwyczaj obejmują one przerwy trwające do pięciu minut, nie wymagające zaangażowania obsługi.
zmniejszenie prędkości produkcji	straty wydajnościowe (E)	nierówna praca praca poniżej wydajności maksymalnej praca poniżej wydajności nominalnej zużycie sprzętu nieefektywność operatora	Wszystkie czynniki sprawiające, że proces nie działa z teoretyczną prędkością maksymalną.
straty rozruchowe	straty jakościowe (QBR)	wybrakowane produkty uszkodzenia podczas przetwarzania nieprawidłowy montaż	Odrzuty podczas fazy rozruchu lub innej wczesnej fazy produkcji. Może to być spowodowane niewłaściwą konfiguracją, niewłaściwym czasem rozruchu itp.
straty produkcyjne	straty jakościowe (QBR)	wybrakowane produkty uszkodzenia podczas przetwarzania nieprawidłowy montaż	Odrzuty podczas ustalonego stanu produkcji.

duje się w spektrum wzorcowym OEE. Należy jednak zachować ostrożność w stosowaniu OEE w celu porównania różnych firm. O ile nie wytwarzają one identycznych produktów na identycznym sprzęcie w identycznych warunkach, porównanie wartości wyznaczonych dla nich wskaźników mija się z celem.

3.5. Analiza wskaźników i podjęcie działań naprawczych

Ostatnim etapem oceny efektywności procesu produkcyjnego jest wykorzystanie znajomości wartości wskaźników wydajności w celu podjęcia określonych działań korekcyjnych lub naprawczych. Wymagać to będzie nie tylko znajomości zagregowanych wartości wskaźników złożonych dla całego procesu produkcyjnego, ale również wartości wskaźników podstawowych i bezpośrednich dla poszczególnych stanowisk produkcyjnych. Dzięki ich znajomości będzie można wywnioskować, że np. na stanowisku 1 występują problemy związane z dostępnością maszyny wskutek częstych awarii, na stanowisku 2 – problemy związane z niską efektywnością pracownika wskutek jego niedostatecznego przeszkolenia, zaś na stanowisku 3 – problemy z jakością produktów.

W tabeli 2 zestawiono tzw. sześć głównych strat produkcyjnych, czyli czynników negatywnie rzutujących na efektywność systemu produkcyjnego mierzoną przy pomocy wskaźnika OEE. Może być ona przydatna w podejmowaniu wspomnianych wyżej działań korekcyjnych oraz naprawczych. Analogiczną charakterystykę można zdefiniować w odniesieniu do strat związanych ze wskaźnikiem ogólnej efektywności pracy OLE.

Podjęcie odpowiednich działań naprawczych może być ułatwione dzięki zastosowaniu podejścia do zarządzania przedsiębiorstwem znanego pod nazwą *zarządzania przez jakość* TQM (ang. *Total Quality Management*). Proces szukania przyczyny

powinien być przeprowadzony od ogółu do szczegółu, np. po zaobserwowaniu niskiej wartości wskaźnika OEE sprawdzamy, który wskaźnik podstawowy wpłynął na tę wartość. Po odszukaniu „winnego” wskaźnika podstawowego (np. niskiej wartości QBR) można będzie z kolei znaleźć „winnego” wskaźnik bezpośredni (np. wysoką wartość wskaźnika SR, czyli dużą liczbę produktów nie spełniających wymagań jakościowych), a następnie zidentyfikować przyczynę tego zjawiska (np. niską jakość półproduktu pozyskiwanego od jednego z dostawców).

3.6. Dodatkowe uwagi i zalecenia do metody

Na podstawie doświadczeń autorów w trakcie realizacji projektu, a także opierając się na wskazówkach zawartych w literaturze przedmiotu, można sformułować następujące uwagi i zalecenia dotyczące skuteczności stosowania zaprezentowanej metody [1, 4, 5, 11]:

- Każdy z wskaźników powinien mieć określony okres wyliczeniowy, np. miesiąc lub kwartał. Punktem wyjścia powinny być wyniki osiągnięte w poprzednich okresach oraz analiza wskaźników uzyskiwanych przez najlepsze firmy działające w danym sektorze.
- Pracownicy zaangażowani w proces produkcyjny powinni zostać zapoznani z definicjami poszczególnych wskaźników. Powinni rozumieć te wskaźniki oraz sposób ich obliczania.
- Istotną rolę może odgrywać tutaj forma prezentacji tych wskaźników – obok klasycznej postaci liczbowej może być to postać lingwistyczna (np. niska dostępność maszyn, wysoka jakość produktu, średniowysoka wartość wskaźnika OEE) lub barwne wykresy (np. kolor zielony oznaczający dobrą kondycję procesu produkcyjnego, kolor żółty – ostrzeżenie wskazujące na konieczność podjęcia działań korekcyjnych,

- kolor czerwony – konieczność natychmiastowego podjęcia działań naprawczych).
- Stosowanie wskaźników musi rodzić odpowiedzialność – każdy wskaźnik powinien mieć swojego „właściciela”.
 - Pracownicy powinni regularnie i możliwie jak najszybciej otrzymywać informację zwrotną na temat wyników mierzonych za pomocą wskaźników. Zbyt długi czas oczekiwania na wyniki demotywuje i opóźnia realizację ewentualnych działań naprawczych.

4. Podsumowanie

W pierwszej części artykułu omówiono metodykę oceny efektywności procesu produkcyjnego, opartą na hierarchicznej strukturze kluczowych wskaźników wydajności. Na strukturę tę składają się zarówno wskaźniki bezpośrednie w postaci pomiarów przeprowadzanych na poszczególnych stanowiskach produkcyjnych, jak i podstawowe oraz złożone wskaźniki stanowiące metryki określonych aspektów wydajnościowych procesu produkcyjnego. Przedstawione tu zagadnienia związane są z wstępnym etapem realizacji projektu PUPMT, mającego na celu opracowanie narzędzia monitorująco-diagnostycznego, umożliwiającego selekcję czynników mających istotny wpływ na wskaźniki efektywności jednostek produkcyjnych.

W drugiej części artykułu zaprezentowane zostaną wyniki badań przemysłowych, polegających na implementacji zaproponowanej metody wyznaczania kluczowych wskaźników wydajności w wybranych jednostkach produkcyjnych.

Bibliografia

1. Badawy M., Abd El-Aziz A.A., Idress A.M., Hefny H., Hossam S., *A survey on exploring key performance indicators*. “Future Computing and Informatics Journal”, 1(1-2)/2016, 47-52, DOI: 10.1016/j.fcij.2016.04.001.
2. Bombiński T., *System nadzoru E2R*. „Pomiary Automatyka Robotyka”, 5/2014, 42–43.
3. Cesarotti V., Giuiusa A., Introna V., *Using Overall Equipment Effectiveness for Manufacturing System Design*, Operations Management Massimiliano M. Schiraldi, IntechOpen, 2013, DOI: 10.5772/56089.
4. *Fast guide to OEE*, Vorne Industries, 2002–2008, www.oee.com.
5. Grycuk A., *Kluczowe wskaźniki efektywności (KPI) jako narzędzie doskonalenia efektywności operacyjnej firm produkcyjnych zorientowanych na lean*, „Przegląd Organizacji”, 2/2010, 28–31.
6. International Standard ISO 22400–1. *Automation Systems and Integration – Key Performance Indicators (KPIs) for Manufacturing Operations Management – Part 1: Overview, Concepts and Terminology*. Geneva: International Standard Organization (ISO), 2014.
7. International Standard ISO 22400–2. *Automation Systems and Integration – Key Performance Indicators (KPIs) for Manufacturing Operations Management – Part 2: Definitions and Descriptions*. Geneva: International Standard Organization (ISO), 2014.
8. Ishaq Bhatti M., Awan H.M., Razaq Z., *The key performance indicators (KPIs) and their impact on overall organizational performance*. “Quality & Quantity”, 48/2014, 3127-3143, DOI: 10.1007/s11135-013-9945-y.
9. Jaroszewski K., *Systemy MES a optymalizacja produkcji*. „Pomiary Automatyka Robotyka”, 5/2014, 34–39.
10. Kang N., Zhao C., Li J., Horst J.A., *A Hierarchical structure of key performance indicators for operation management and continuous improvement in production systems*. “International Journal of Production Research”, 54(21)/2016, 6333–6350, DOI: 10.1080/00207543.2015.1136082.
11. Mazurek W., *Wskaźnik OEE, czyli jak teorię przełożyć na praktykę*. „Automatyka Podzespoły Aplikacje”, 9/2013, 114–120.
12. Li J., Meerkov S.M., *Production Systems Engineering*. New York, NY: Springer; 2009.
13. Rodak A., *System monitorowania produkcji Wonderware MES*. „Pomiary Automatyka Robotyka”, 5/2014, 40–41.

Key performance indicators as a tool for production process assessment – part I: theoretical research

Abstract: Key performance indicators are defined as a set of metrics allowing assessment of the production process performance. These metrics include e.g. throughput of the production line, availability and effectiveness of the machines and their operators, as well as the quality of manufactured products. The first part of the paper discusses a hierarchical, three-level structure of the performance indicators in which the values of the so-called basic indicators are determined both based on the production plans as well as from the measurements carried out directly at the production units. Based on the values of the basic indicators, the values of the comprehensive indicators are determined to be used as a synthetic assessment of the effectiveness of the use of machines and human resources. These indicators allow gathering knowledge on the current condition of the production process as well as taking possible corrective actions aimed at improving its functioning. The results of the industrial research based on the original implementation of the presented theory will be discussed in the second part of the paper.

Keywords: key performance indicators, production process, measurements, data exploration, production losses, ISO 22400

dr hab. inż. Krzysztof Bartecki, prof. PO

k.bartecki@po.opole.pl

W 1996 r. ukończył studia magisterskie o specjalności Automatyka i Metrologia Elektryczna w Wyższej Szkole Inżynierskiej w Opolu. Stopień naukowy doktora nauk technicznych w dyscyplinie elektrotechnika uzyskał w 2004 r. w Politechnice Opolskiej. W 2016 r. otrzymał stopień doktora habilitowanego w dyscyplinie automatyka i robotyka; główne osiągnięcie naukowe stanowiła monografia „Modeling and Analysis of Linear Hyperbolic Systems of Balance Laws”, wydana w wydawnictwie Springer. Obecnie pracuje w Instytucie Automatyki Politechniki Opolskiej na stanowisku profesora nadzwyczajnego, jest kierownikiem Katedry Inteligentnych Systemów Automatyki. Jego zainteresowania naukowe dotyczą głównie modelowania matematycznego układów w czasoprzestrzenną dynamiką, a także zastosowania tzw. metod sztucznej inteligencji w zagadnieniach modelowania oraz sterowania obiektami dynamicznymi.

**dr hab. inż. Dariusz Król**

dariusz.krol@pwr.edu.pl

Kierownik Pracowni Informatyki Stosowanej w Katedrze Systemów Informatycznych na Wydziale Informatyki i Zarządzania Politechniki Wrocławskiej. W ramach działalności naukowo-badawczej brał udział w kilkunastu projektach, m.in. był kierownikiem grantów Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, Niemieckiej Centrali Wymiany Akademickiej i Komisji Europejskiej. Jest autorem i współautorem 146 publikacji naukowych. Brał udział w pracach komitetów naukowych i organizacyjnych w ponad 100 konferencjach w kraju i za granicą. Jest ekspertem Komisji Europejskiej i Narodowego Centrum Badań i Rozwoju. Jego zainteresowania naukowe i aplikacyjne są związane z metodami propagacji i integracji wiedzy, zagadnieniami jakości danych oraz systemami inteligentnymi w szczególności w zastosowaniach przemysłowych.

**mgr inż. Jan Skowroński**

jan.skowronski@dss.com.pl

Kierownik Działu Badań i Rozwoju w firmie DSR S.A. W 2014 r. ukończył studia magisterskie o specjalności Inteligentne Systemy Informatyczne na Wydziale Informatyki i Zarządzania Politechniki Wrocławskiej. Obecnie jest doktorantem na tym wydziale. W ramach działalności naukowo-badawczej brał udział w projektach Inżynieria Internetu Przyszłości oraz Production Unit Performance Management Tool (PUPMT). Od kilku lat związany z zastosowaniem chmurowej platformy obliczeniowej Microsoft Azure w projektowaniu i rozwijaniu skalowalnych rozwiązań z obszaru data science. Jego zainteresowania dotyczą wykorzystania metod uczenia maszynowego oraz zastosowania Internetu Rzeczy w celu poprawy efektywności procesów produkcyjnych.

