

OBLICZANIE SKŁADOWEJ JAKOŚCI OEE PRZY WIELU OPERACJACH TECHNOLOGICZNYCH

1. Wstęp

Wskaźnik całkowitej efektywności wyposażenia (ang. *Overall Equipment Effectiveness* – OEE) jest podstawowym miernikiem wykorzystywanym w celu weryfikacji efektywności pracy maszyn oraz przebiegu procesów produkcyjnych. Jego głównym zadaniem jest identyfikacja przyczyn marnotrawstwa, dzięki czemu można zaplanować odpowiednie działania zmierzające do doskonalenia przebiegu procesów produkcyjnych oraz samych sposobów wytwarzania. Budowa wskaźnika OEE obejmuje trzy składowe:

- dostępność,
- wydajność,
- jakość.

Właśnie te składniki pozwalają nie tylko na określenie całkowitej efektywności, ale również pokazują elementy składowe wymagające poprawy.

Rozwój maszyn produkcyjnych oraz systemów produkcyjnych pozwolił na zwiększenie produkcji oraz umożliwił wytwarzanie nowych typów wyrobów, cechujących się niespotykaną wcześniej złożonością, przez co też wymagających wielu operacji technologicznych. Zmiany w sposobach produkcji, stosowanie bardzo kosztownych i złożonych systemów produkcyjnych spowodowały konieczność rozwoju mierników efektywności. Konieczność ta została zauważona podczas wykonywania pomiarów efektywności w zakładzie produkcyjnym X. W trakcie pomiarów ustalono, iż weryfikacja efektywności za pomocą wskaźnika OEE według standardowego wzoru jest obciążona błędem. Szczególnie widoczne jest to w przypadku składowej jakości. Składowa ta wiąże się z liczbą ostatecznie wytworzonych dobrych wyrobów i elementów, nie uwzględniając ilości wykonywanych na danym elemencie operacji, a w analizowanym przedsiębiorstwie wiele elementów poddawanych było właśnie więcej niż jednej operacji technologicznej. Badania pracy maszyny w przedsiębiorstwie X umożliwiły weryfikację sposobu obliczenia składowej jakości.

2. Zagadnienie definiowania wskaźnika całkowitej efektywności wyposażenia

Wzrost wymagań produkcyjnych był przyczyną opracowania nowych sposobów na podniesienie efektywności w przedsiębiorstwach. W tym celu niezbędne było znalezienie odpowiedzi na pytanie, w jaki sposób marnotrawimy posiadane zasoby i co właściwie jest dla nas marnotrawstwem. Metodyka Totalnego Produktywnego Utrzymania Ruchu (ang. *Total Productive Maintenance*, TPM) zawiera właśnie zestawienie strategii, które wytyczają kierunek doskonalenia, poprzez eliminację marnotrawstwa. Metoda ta została opracowana w latach 50 ubiegłego wieku przez japońskiego praktyka Seiichi Nakajime. Celem tej

metody była optymalizacja kontroli produktywności wykorzystywanego parku maszynowego [6]. Jedną z możliwości weryfikacji oceny przebiegu samego procesu produkcyjnego oraz poziomu wykorzystania maszyn w systemie produkcyjnym jest wskaźnik całkowitej efektywności wyposażenia [4, 5]. Obliczenie wskaźnika OEE należy rozpocząć od poznania samego procesu produkcyjnego oraz specyfikacji maszyny, dzięki czemu wyniki z dalszej analizy przełożą się na stworzenie usprawnień, które w najlepszy sposób zwiększą efektywność stanowiska roboczego [2].

Następnie wykonuje się pomiary, a uzyskane z nich dane służą do obliczenia składowych wskaźnika OEE. Są nimi [8]:

- **Dostępność** – wyrażona jako stosunek czasu pracy, czyli czasu poświęconego na produkcję wyrobów (rys. 1, Wartość B) do czasu operacyjnego netto, obejmującego czas zmiany roboczej pomniejszony o planowane przestoje (rys. 1, Wartość A).
- **Wydajność** – wyrażona jako stosunek rzeczywistej produkcji, czyli liczby wytworzonych wyrobów niezależnie od ich jakości (rys. 1, Wartość D) do produkcji docelowej, czyli liczby wyrobów, które mogłyby zostać wytworzone przy założeniu maksymalnych prędkości pracy maszyn (rys. 1, Wartość C).
- **Jakość** – wyrażona jako stosunek dobrej produkcji, czyli wyrobów spełniających założenia jakości (rys. 1, Wartość F) do rzeczywistej produkcji (rys. 1, Wartość E).

Obliczenie powyższych elementów umożliwia obliczenie wartości OEE [1, 3].

Klasycznie wartość wskaźnika OEE obliczana jest jako iloczyn składowych (1), rysunek 2 pokazuje graficzny rozkład poszczególnych składowych wskaźnika.

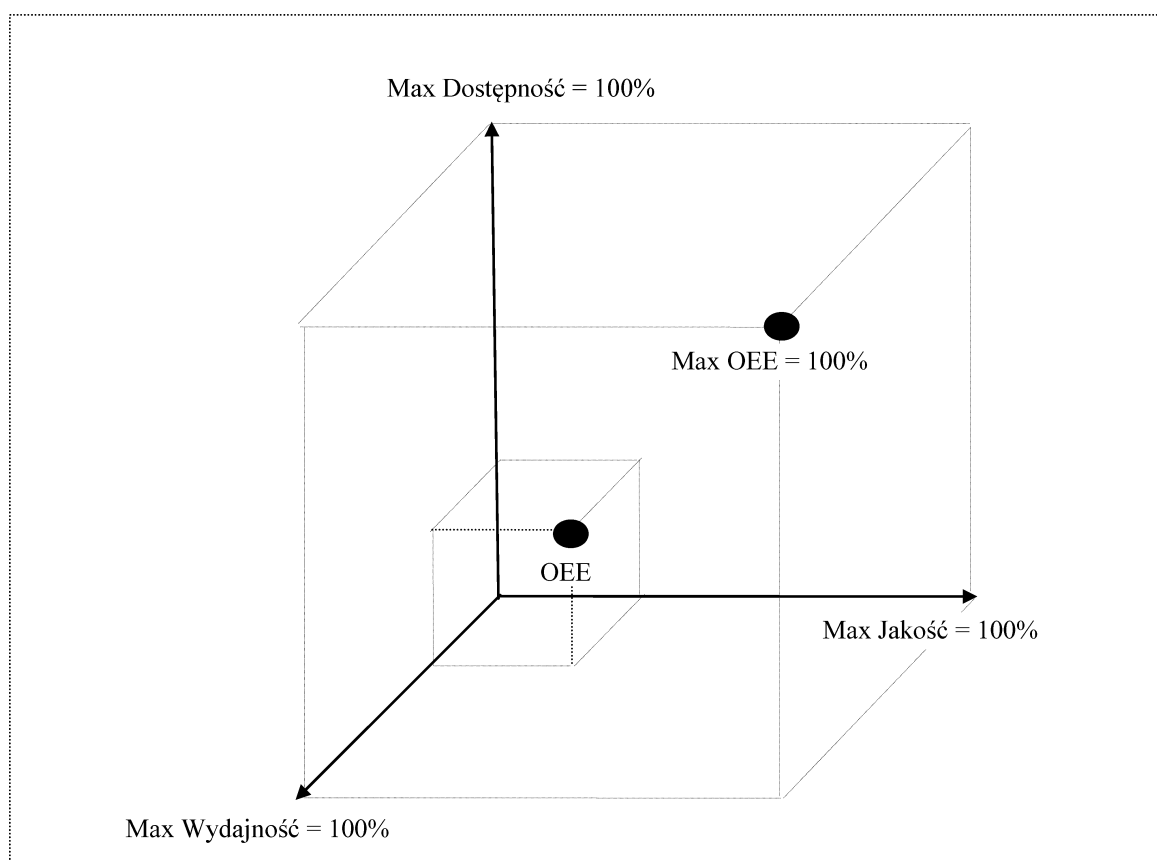
$$OEE = \frac{B}{A} \times \frac{D}{C} \times \frac{F}{E} \times 100\% \quad (1)$$

Rysunek 2 pokazuje, iż uzyskanie maksymalnych wartości – 100%, we wszystkich trzech składowych, wiąże się z osiągnięciem doskonałej efektywności. W praktyce jednak wartość OEE równa 100% jest niemal nieosiągalna, a obniżanie poszczególnych składowych powoduje przemieszczanie wskaźnika OEE wzdłuż odpowiedniej osi. Zarządy przedsiębiorstw mogą same wyznaczać wartości poszczególnych elementów wskaźnika, do których będą dążyć lub też kierować się wytycznymi japońskiego stowarzyszenia – Japan Institute of Plant Maintenance – założonego przez Seiichi Nakajimę i dążyć do wartości oznaczających „Produkcję Światowej Klasy”, gdzie wskaźniki wynoszą odpowiednio: dostępność 90%, wydajność 95% oraz jakość 99,9% [7].

Omówiony sposób interpretacji i obliczania wskaźnika OEE jest najpowszechniej stosowany w różnego rodzaju branżach produkcyjnych. Dzięki wprowadzaniu zmian we wzorze (1), można dopasować obliczenia wskaźnika OEE

	Całkowity czas operacyjny		
Dostępność	A	Czas operacyjny netto	Planowane przestoje
	B	Czas pracy	Straty związane z wyłączeniem
Wydajność	C	Produkcja docelowa	
	D	Produkcja rzeczywista	Straty związane z szybkością
Jakość	E	Produkcja rzeczywista	
	F	Dobra produkcja	Straty związane z wadliwą produkcją

Rys. 1. Elementy składowe wskaźnika OEE (na podstawie [7])



Rys. 2. Graficzne przedstawienie składowych wskaźnika OEE (na podstawie [8])

do innych procesów. Jak wykazano w wynikach badań w pracy [8], wartość OEE dla procesów budowlanych, cechujących się niepowtarzalnością projektu nie powinna być obliczana wzorem (1). W pracy [8] pokazano, iż elementami składowymi koniecznymi do obliczenia wartości wskaźnika OEE jest średnioroczny wskaźnik wykorzystania, sprawność techniczna oraz jakość wykonania. Elementy te w lepszy sposób pozwalają na określenie efektywności w przypadku procesu budowlanego.

Ostatnim krokiem w analizie efektywności, będącym jednocześnie esencją opisaną metodą, jest interpretacja otrzymanego wyniku. Obliczenie wartości wskaźnika OEE stanowi punkt wyjścia do opracowania usprawnień zwiększających efektywność pracy maszyny. W zależności od

uzyskanego wyniku można opracować działania ogólne lub też poprawiające konkretną składową wskaźnika. Należy pamiętać, iż właśnie wprowadzanie działań udoskonalających jest celem stosowania wskaźnika OEE, a uzyskane wyniki stanowią drogowskaz dalszych działań [9].

3. Charakterystyka produkowanych elementów

W przedsiębiorstwie X wytwarzane wyroby dzielą się na dwie zasadnicze grupy, pierwsza dotyczy produktów służących do ogrzewania rozjazdów oraz energetyki nietrakcyjnej, druga natomiast systemów sterowania uzbrojeniem oraz napędów w sprzęcie wojskowym. Pomiary wskaźnika OEE dotyczyły określenia wartości wskaźnika OEE dla

jednego stanowiska roboczego. Na analizowanej maszynie wytwarzane były elementy konstrukcyjne pojazdów militarnych. Wykaz elementów wytwarzanych podczas analizowanego okresu przedstawiono w tabeli nr 1 w drugiej kolumnie „elementy”. W dalszej części pracy określenie „element” będzie dotyczyło przedmiotu obrabianego na analizowanym stanowisku, natomiast określenie „wyrób” dotyczy efektu końcowego działalności produkcyjnej, ponieważ efekty obróbki wykonanej na analizowanym stanowisku wymagały dalszych obróbek oraz montażu, nie można ich uznać za gotowe wyroby.

Prowadzone pomiary trwały w dniach 17-28.03.2014 roku, obejmowały pracę pionowego centrum obróbczego CNC Super MiniMILL2 wyprodukowanego przez przedsiębiorstwo Haans Automation Inc, zakupionego w 2008 r. z rynku pierwotnego. Stanowisko robocze jest obsługiwane przez jednego pracownika, który przeszedł pełne szkolenie zalecane przez producenta maszyny. Proces produkcyjny cechował się:

- Występowaniem wielu partii produkcyjnych w ilościach zwykle do 10 sztuk, co było przyczyną częstych przebrojeń maszyny.
- Produkcją prototypów powodującą konieczność nagłych zmian planów produkcyjnych.
- Produkcją nowych elementów wymagających opracowania nowych programów sterowania.

Powyższe cechy uwarunkowały w znacznym stopniu proces produkcyjny, stał on się mniej ciągły, bardzo zróżnicowany i zmienny, a co się z tym wiąże, trudniejszy w organizowaniu i kontroli.

Podczas przeprowadzonych pomiarów na stanowisku roboczym wytworzono 11 różnych typów elementów (tab. 1), w liczbie sztuk między 1 a 14 każdego z nich, co dało w sumie 45 elementów. W celu ich wytworzenia wykonano 99 operacji technologicznych, których czasy trwania wynosiły pomiędzy 2 a 40 min. Elementy cechowały się różnym stopniem złożoności podczas produkcji, część z nich została ukończona i przekazana do montażu, natomiast niektóre wymagały dalszej obróbki na innym stanowisku roboczym, po czym powracały do montażu lub do ponownej obróbki na analizowanym stanowisku.

Wykonanie operacji technologicznej oznacza wykonanie na jednym elemencie czynności, która to rozpoczyna się w chwili umieszczenia elementu na maszynie oraz jej uruchomieniu, a kończy w chwili wyjęcia elementu. Natomiast określenie „wiele operacji technologicznych” odnosi się do wytwarzania elementów, które to na jednym stanowisku wymagają wykonania więcej niż jednej kolejno następującej operacji technologicznej.

Podczas pomiarów 40 elementów uznano za produkcję dobrą (rys. 1, wartość F) – spełniającą wymagania jakościowe, wśród wadliwych elementów (tab. 1, kolumna 5) znalazł się:

- korpus wymagający poprawy dwóch ścian, poprzez dwie dodatkowe operacje technologiczne (tab. 1, wiersz 2, Lp. 1),
- korpus wymagający poprawy jednej ściany (tab. 1, wiersz 2, Lp. 1),
- płytką wymagającą poprawy graweru (tab. 1, wiersz 3, Lp. 2),

- talerz korbowy całkowicie odrzucony po obróbce pierwszej ściany, bez próby jej poprawy (tab. 1, wiersz 11, Lp. 10),
- talerz korbowy, który wymagał poprawy pierwszej ściany, ale został odrzucony po obróbce drugiej ściany, bez próby jej poprawy (tab. 1, wiersz 11, Lp. 10).

Przeprowadzone pomiary pozwoliły na wyznaczenie składowej jakości zgodnie ze wzorem (1). Wartość F odnosząca się do dobrej produkcji wyniosła 40, natomiast wartość E wyniosła 45 sztuk, co pozwoliło obliczyć składową jakość.

$$Jakość = \frac{F}{E} = \frac{40}{45} = 0,8888$$

Przyczynami wyżej wymienionych wad były:

- złe zamocowanie elementu w imadle, przez co podczas wykonywania operacji element wypadł z imadła, operacja polegająca na obróbce danej ściany musiała zostać powtórzona (tab. 1, wiersz 2, Lp. 1, operacja *Frezowanie pierwszej ściany*),
- złamanie wiertła (tab. 1, wiersz 2, Lp. 1, operacja *Frezowanie czwartej ściany*), w wyniku czego należało ponownie wykonać operację obróbki na danym elemencie,
- brak odpowiedniego wiertła (tab. 1, wiersz 2, Lp. 1, operacja *Frezowanie czwartej ściany*) – po złamaniu wiertła nie udało się go wymienić na drugie o takiej samej średnicy, ponieważ pracownik nie posiadał go na stanie, dlatego też użyto inne wiertło, co wymagało zmiany programu komputerowego, zmiana nie została wykonana poprawnie, przez co korpus wymagał kolejnej poprawy,
- brak chłodziwa w maszynie (tab. 1, wiersz 11, Lp. 10, operacja *Obróbka przodu*) – z powodu braku chłodziwa zapiekło się wiertło, przez co element przemieścił się w imadle, element został całkowicie odrzucony z procesu produkcyjnego.

W celu osiągnięcia „Produkcji światowej klasy” powinno się dążyć do osiągnięcia wartości składowej jakości równej 99,9%, zatem otrzymany wynik 88,88% wskazuje, iż należy zweryfikować przyczyny obniżenia tej składowej oraz opracować usprawnienia, które je wyeliminują lub zmniejszą ich negatywne skutki.

4. Problemy w wykorzystaniu wskaźnika OEE w produkcji elementów wymagających wielu operacji technologicznych

Jak wcześniej wspomniano, wyznaczenie wskaźnika OEE wymaga obliczenia jego trzech elementów składowych. W przypadku elementów wymagających pojedynczych operacji technologicznych na stanowisku zadanie to następuje zgodnie z ogólnymi zasadami stosowania wskaźnika. Jednak w omawianym przypadku niektóre elementy wymagały więcej niż jednej operacji technologicznej. Zwykle operacja technologiczna obejmowała obróbkę jednej ze ścian. Po każdej operacji element był wyciągany z imadła, a na jego miejscu umieszczany był kolejny z partii lub rozpoczynano kolejną operację technologiczną na kolejnych elementach. Następnie pracownik za pomocą przyrządów pomiarowych sprawdzał jakość elementu, po czym decydował o dalszych działaniach na nim wykonywanych.

Obliczanie składowej jakości OEE przy wielu operacjach technologicznych

Lp.	Elementy	Liczba elementów [szt.] (Rys. 1, E)	Liczba dobrze wykonanych elementów [szt.] (Rys. 1, F)	Wadliwa produkcja [szt.]	Nazwa operacji	Liczba operacji technologicznych [szt.]	Czas trwania operacji	Operacje obniżające jakość
1	Korpus	7	5	2	Frezowanie pierwszej ściany	2	22	1
					Nawiercenie	7	5	
					Frezowanie drugiej ściany	7	16	
					Frezowanie trzeciej ściany	7	13	
					Frezowanie czwartej ściany	7	10	2
2	Płytką	3	2	1	Grawer	3	6	1
3	Nasadka	1	1	0	Frezowanie pierwszej ściany	1	5	
					Nawiercenie otworu na pierwszej ścianie	1	2	
					Nawiercenie otworu na drugiej ścianie	1	2	
4	Płyta mocująca	7	7	0	Obróbka przodu	7	17	
					Obróbka tyłu	7	13	
5	Płyta frontowa	7	7	0	Obróbka przodu	7	16	
					Obróbka tyłu	7	5	
6	Poliryda	1	1	0	Obróbka pierwszej ściany	1	18	
					Obróbka drugiej ściany	1	14	
7	Oslona	1	1	0	Wycięcie kształtu	1	40	
8	Bazówka	2	2	0	Wycięcie kształtu	2	38	
9	Podpora	1	1	0	Obróbka pierwszej ściany	1	16	
					Obróbka drugiej ściany	1	14	
10	Talerz korbowy	14	12	2	Obróbka pierwszej ściany	14	35	2
					Obróbka drugiej ściany	13	6	1
11	Podkładka	1	1	0	Nawiercenie	1	8	
	Σ	45	40	5	Σ	99	Σ	7

Tab. 1. Charakterystyka wyrobów wytwarzanych na maszynie Super MiniMill 2

Podczas tych kontroli okazało się, że 5 z 45 elementów nie spełniło wymagań jakościowych i zgodnie z literaturą [7, 9] uznawane są za straty i powinny posłużyć do obliczenia wskaźnika jakości. Zauważono jednak, iż elementy te przed odrzuceniem przeszły pomyślnie poprzednie kontrole, a co za tym idzie, ich jakość po wcześniejszych operacjach technologicznych została zaakceptowana. Zatem obliczając składową jakość zgodnie z wzorem (1), nie uwzględnia się:

- liczby operacji wykonanych poprawnie na danym elemencie, zanim został on uznany za wadliwy i przekazany do poprawy lub całkowicie usunięty z procesu produkcji,

- sytuacji, gdy na danym elemencie więcej niż jedna operacja została wykonana niepoprawnie, a zatem spowodowała powstanie elementu z więcej niż jedną wadą,
- czasów trwania wszystkich wykonanych na elemencie operacji.

Takie podejście powoduje, iż podczas obliczania składowej jakości otrzymany wynik jest obarczony błędem, gdyż **nie uwzględnia faktycznej jakości pracy maszyny, uwzględniając jedynie jakość elementu**. Ponadto, przy takim podejściu należy rozważyć moment sprawdzania jakości produktu – w analizowanym przedsiębiorstwie podczas

pomiarów założono, że sprawdzenie jakości następuje w chwili przeniesienia elementu ze stanowiska roboczego na kolejne lub do magazynu. Przeanalizowano zatem trzy różne sytuacje obrazujące analizowany problem:

- I Element wymagał tylko jednej operacji technologicznej na analizowanym stanowisku, następnie został przekazany do dalszej obróbki na innych stanowiskach, zgodnie z jego procesem produkcyjnym wiadomo, iż nie wróci na analizowane stanowisko. W takiej sytuacji, kierując się wzorem (1), jego ocena jakości dokonana po wykonaniu na nim obróbki wynosi 1/1 w sytuacji, gdy został wykonany poprawnie lub 0/1, gdy uznano, iż wyrób jest wadliwy; mianownik oznacza wartość E (1), czyli liczbę wytworzonych elementów, natomiast licznik oznacza wartość F (1), czyli produkcję, spełniając wymagania jakościowe.
- II Element wymagał dwóch operacji technologicznych na analizowanym stanowisku, następnie został przekazany do dalszej obróbki na innych stanowiskach, zgodnie z jego procesem produkcyjnym wiadomo, iż nie wróci na to stanowisko. Zgodnie ze wzorem (1) jakość wyrobu wynosi 1/1 lub 0/1.
- III Element wymagał jednej operacji technologicznej na analizowanym stanowisku, następnie został przekazany do dalszej obróbki na inne stanowiska, po czym ponownie wrócił na analizowane stanowisko, gdzie wykonano jedną operację technologiczną. Jeżeli kontrola odbywała się przy przeniesieniu elementu ze stanowiska roboczego wpływ każdej operacji był uwzględniany w składowej jakości, przez co składowa ta mogła wynieść 2/2, jeżeli obie kontrole uznały wyrób za poprawny, 1/2 jeżeli jedna kontrola potwierdziła dobrą jakość wyrobu, a druga odkryła wadę, lub 0/2, jeżeli podczas dwóch kontroli wyrób uznano za wadliwy. Należy pamiętać, iż podczas analizy mierzono wskaźnik OEE tylko dla analizowanego stanowiska, a co za tym idzie operacje wykonywane na innych stanowiskach nie wpływają na wartość składowych wskaźnika.

Sytuacje II oraz III pokazują dwa różne elementy. Każdy wymagał dwóch operacji technologicznych na analizowanym stanowisku, jednak poprzez różnicę w sposobie przebiegu procesu produkcyjnego, składowa jakości liczona według wzoru (1) może uzyskać różne wartości, gdyż w sytuacji II oceniamy jakość jednego elementu w chwili przeniesienia go ze stanowiska roboczego, natomiast sytuacja III pokazuje, iż kontrolując wyrób przy przekazaniu go do dalszej produkcji uwzględniamy go dwa razy w pomiarze jakości.

Dodatkowym aspektem wymagającym omówienia jest uwzględnianie wad. W standardowym przypadku wyrób był uznawany za spełniający wymagania jakościowe lub nie, a przypisana wartość wpływała na wskaźnik jakości. Dalsze działania w stosunku do tego elementu mogły być następujące:

- Całkowite odrzucenie z procesu produkcji.
- Ponowne przekazanie do produkcji w celu wyeliminowania wady, wymagające operacji technologicznej, która to zakończyła się sukcesem.
- Ponowne przekazanie do produkcji, mimo realizacji operacji technologicznej element dalej nie spełnia wymagań

jakościowych, zatem należy go ponownie przekazać do poprawy lub wyeliminować z procesu produkcji.

W każdej z powyższych sytuacji wartość wskaźnika OEE byłaby taka sama, ponieważ we wszystkich przypadkach element nie został wykonany poprawnie za pierwszym razem, a co za tym idzie, nie wlicza się do wartości F (1), a pozycja E (1) niezależnie od ilości wykonywanych operacji poprawiających jest wartością stałą odnoszącą się do sztuk wyrobu.

5. Propozycja modyfikacji sposobu obliczania i wykorzystania wskaźnika OEE

Wartość wskaźnika OEE liczono dla konkretnego stanowiska, a zatem podczas obliczeń uwzględniano operacje wykonywane tylko na jednej obrabiarce. Dzięki temu uzyskane dane pozwoliły na opracowanie usprawnień doskonalących pracę stanowiska roboczego. Wykonanie obliczeń wartości wskaźnika OEE dla procesu produkcyjnego podczas przeprowadzonych badań okazałyby się niemiernodajne, ponieważ w danym okresie część produkowanych wyrobów poddawana była nietypowym operacjom technologicznym, wiązało się to z aktualną produkcją prototypów, przez co standardowy proces produkcyjny uległ silnym zmianom i nie został ustabilizowany

W celu uniknięcia obliczania składowej jakości w oparciu o niepełne dane dotyczące produkcji zaproponowano trzy różne wzory, mające na celu uwzględnienie elementów nierozpatrywanych w obliczeniach wskaźnika OEE za pomocą wzoru (1). Pierwszy wzór uwzględniałby dane dotyczące ilości poprawnie wykonanych operacji technologicznych na danych elementach, drugi dodatkowo obejmowałby operacje polegające na wielokrotnych poprawach jednej operacji. Natomiast trzeci wzór dodatkowo uwzględniałby czas trwania poszczególnych operacji technologicznych.

5.1. Wzór uwzględniający liczbę operacji technologicznych

Zgodnie ze wzorem (1) składowa jakości wymaga określenia liczby dobrze wykonanych produktów oraz produkcji ogółem. Jednak w celu lepszego dopasowania wzoru do stanowisk wykonujących więcej niż jedną operację na danym wyrobie zaproponowano wzór (2):

$$Jakość = \frac{G}{H} \quad (2)$$

gdzie:

G = liczba poprawnie wykonanych operacji,

H = liczba operacji technologicznych.

Dzięki zastosowaniu powyższego wzoru, uwzględnia się operacje wykonane poprawnie nawet wtedy, gdy element został odrzucony w późniejszym etapie obróbki, oraz istnieje możliwość wykonania niepoprawnie więcej niż jednej operacji na danym elemencie. Zastosowanie tego podejścia oznacza, iż składowa jakości obecnie wskazywałoby na faktyczną ocenę jakości produkcji. Stosowanie zmodyfikowanego wzoru wymaga oceny elementu po zakończeniu każdej operacji technologicznej lub też kontroli jakości produktu po ukończeniu obróbki, jednak z możliwością

weryfikacji, która z operacji została wykonana niepoprawnie.

Oczywiście tak jak w podejściu klasycznym, słowo „dobre” odnosi się do operacji, które zostały wykonane poprawnie za pierwszym razem, a co za tym idzie nie wymagały żadnych poprawek.

Proponowana modyfikacja ma zastosowanie w przypadku produkcji elementów wymagających więcej niż jednej operacji technologicznej wykonywanej na jednym stanowisku. W przypadku wykonywania pojedynczych operacji na elemencie na stanowisku roboczym lub też w sytuacji, gdy wykonuje się więcej operacji, ale nie można przeprowadzić kontroli po operacjach, a podczas kontroli ostatecznej nie można zidentyfikować operacji, która spowodowała wadę w produkcji, zaleca się stosowanie klasycznej metody obliczania składnika jakości.

W analizowanym przedsiębiorstwie wyprodukowano 45 elementów, z czego 40 uznano za wyroby dobre, wskaźnik jakości obliczany zgodnie z wzorem (1) wynosi $40/45 = 0,8888$. Natomiast, jeżeli zastosujemy wzór zmodyfikowany (2) wskaźnik ten wyniesie 0,9293, ponieważ będzie odnosił się do 99 wykonanych ogółem operacji technologicznych oraz 7 operacji wykonanych niewłaściwie. Należy zauważyć, iż w przypadku korpusu (tab. 1, wiersz 2, Lp. 1), każdy z nich wymagał pięciu operacji technologicznych, przy czym jeden element został uszkodzony podczas ostatniej operacji, zatem podczas standardowych obliczeń wskaźnika cztery operacje nie były uwzględnione jako dobra produkcja, a drugi korpus został źle wykonany podczas pierwszej i ostatniej operacji (nie zostało to uwzględnione przy standardowym obliczaniu wskaźnika jakości, gdzie wyrób ten został policzony tylko raz). W przypadku nieprawidłowego wykonania operacji graweru na płycie (tab.1, wiersz 3, Lp. 2) jeden wyrób wymagał poprawy, a ponieważ wyroby te wymagały tylko jednej operacji technologicznej nie wpłynęło to na sztuczne obniżenie wskaźnika. Zatem przedstawiony wzór (2) pozwala unikać błędów nieuwzględniania ilości operacji wykonywanych na danym elemencie.

5.2. Wzór uwzględniający ilość operacji technologicznych wykonanych poprawnie za pierwszym razem oraz operacji poprawy

Kolejną cechą obliczania składowej jakości było nieuwzględnienie możliwości wykonywania kilku poprawek jednej operacji technologicznej na danym elemencie. Zatem w celu uwzględnienia takiej sytuacji sugeruje się stosowanie wzoru (3):

$$Jakość = \frac{(G + I)}{(H + J)} \quad (3)$$

gdzie:

I = operacje, które poprawiły wyrób,

J = operacje technologiczne poprawiające wyrób (niezależnie czy przyniosły sukces).

Przy zastosowaniu tego wzoru jakość w analizowanym przedsiębiorstwie wyniosłaby $97/104 = 0,9327$, uwzględnia on bowiem 92 operacje technologiczne wykonane poprawnie za pierwszym razem oraz 5 operacji technologicznych,

które wykonano w celu poprawy wyrobów i które zostały zakończone sukcesem, a także 104 operacje wykonane ogółem, przy czym 99 wykonanych zostało w celu obróbki, a 5 w celu poprawy wady.

W analizowanym przypadku wszystkie podjęte operacje przyczyniły się do poprawy elementu, gdyby natomiast wykonano operację, która nie przyniosłaby pożądanego efektu, należałoby uwzględnić ją tylko w mianowniku wzoru (3).

Przedstawione wzory (2) i (3) umożliwiają obliczenie składowej jakości wskaźnika OEE w sposób uwzględniający liczbę wykonywanych na wyrobach operacji, zarówno różnych operacji technologicznych, jak i operacji ponownych mających na celu wyeliminowanie wad.

5.3. Wzór uwzględniający czas trwania operacji technologicznych

Podczas obliczania składowej jakości zgodnie z wzorem (1) pomija się czas trwania poszczególnych operacji. Niedokładność ta jest szczególnie odczuwana, gdy poszczególne operacje mają zróżnicowane czasy trwania. Stosowanie wzoru (2) lub (3) oznacza, iż podczas obliczania składowej jakości elementy wymagające kilku operacji technologicznych są uwzględniane inaczej niż elementy, na których wykonywane są pojedyncze operacje, ale nie różnicuje sytuacji, gdy jedna operacja trwa minutę, a inna kilkanaście. Dlatego też w sytuacjach, gdy operacje technologiczne cechują się różnymi czasami trwania zaleca się stosowanie wzoru (4):

$$Jakość = \frac{(G \times T_i + I \times T_i)}{(H \times T_i + J \times T_i)} \quad (4)$$

gdzie:

T_i – jest to czas trwania wykonywanej operacji technologicznej „i”.

Stosowanie wzoru (4) pozwala na uwzględnienie wszystkich niedokładności pomiarowych, którymi obciążone było obliczanie składowej jakości.

Niestety stosowanie wzoru (4) w znaczny sposób utrudnia wykonywanie obliczeń wskaźnika OEE. Podczas obliczania składowej jakości wzorem (1) osoba analizująca sytuację na stanowisku pracy musiała ustalić jedynie ile elementów wytworzono i ile z nich uznano za spełniające wymagania jakościowe. Natomiast przy stosowaniu kolejnych wzorów wzrasta ilość informacji, które należy pozyskać.

Zatem zaleca się stosowanie tych wzorów w określonych przypadkach:

- Wzór (2) – gdy na wytwarzanych elementach wykonuje się różną liczbę operacji technologicznych, o zbliżonych czasach trwania, a wykonane elementy nigdy nie wymagają więcej niż jednej poprawy poszczególnych operacji.
- Wzór (3) – gdy na wytwarzanych elementach wykonuje się różną liczbą operacji technologicznych, o zbliżonych czasach trwania, a wykonane elementy mogą wymagać więcej niż jednej poprawy poszczególnych operacji.
- Wzór (4) – gdy na wytwarzanych elementach wykonuje się różną liczbę operacji technologicznych, o zróżnicowanych czasach trwania, a wykonane elementy mogą wymagać więcej niż jednej poprawy poszczególnych operacji.

W celu jak najlepszego obliczenia efektywności na stanowisku roboczym, należy określić, jakie operacje technologiczne będą wykonywane na elementach oraz w jakiej liczbie. W przypadku elementów wymagających pojedynczych operacji technologicznych o zbliżonych czasach trwania można stosować wzór (1), gdyż zebranie danych potrzebnych do jego obliczenia jest najprostsze, wskaźnik OEE obliczony w tej sytuacji będzie miarodajny, choć obciążony pewnym błędem. Natomiast w przypadku produkcji wyrobów wymagających wielu operacji technologicznych należy stosować wzór (2), (3) lub (4). Wybór wzoru zależy od opisanych wyżej sytuacji oraz od możliwości uzyskania danych, gdyż każdy kolejny wzór wymaga określenia większej ich ilości. Stosowanie wyżej wymienionych wzorów jest istotne zwłaszcza przy maszynach drożych, w pełni obciążonych, gdyż tam wprowadzenie usprawnień takich jak np. standaryzacja stanowiska pracy, skrócenie przebrojeń może dać najwięcej korzyści.

Jak już wspomniano, samo obliczenie wskaźnika OEE jest punktem wyjścia do określenia działań udoskonalających. Istotne jest tu rozpoczęcie usprawnień. Otóż po obliczeniu wskaźnika OEE można rozpocząć opracowanie udoskonaleń, mogą być one ogólne lub dopasowane bezpośrednio do poszczególnych składowych i te właśnie usprawnienia są zalecane. Mierząc składową jakość wzorem (1) możemy sztucznie zaniżyć jej wartość, a co za tym idzie, poświęcić czas i zasoby na opracowanie udoskonaleń jakości, a tymczasem lepszą decyzją byłoby skupienie się na innej składowej. Tabela 2 pokazuje jak różne mogą być wyniki składowej jakości uzyskane podczas jednych pomiarów w zależności od przyjętego wzoru.

Powyższa tabela pokazuje, iż w zależności od posiadanej wiedzy o procesie produkcyjnym możemy zastosować różne metody obliczenia składowej jakości. Zróżnicowane

wyniki końcowe potwierdzają zasadność modyfikacji wzoru. Może się zdarzyć, iż obliczenie składowej według wzoru (1), pomimo błędu, którym obciążony jest uzyskany wynik, będzie wystarczającym wskaźnikiem do dalszych działań. W pracy [8] podczas obliczania wskaźnika OEE, obliczono iż poszczególne składowe wynoszą:

- dostępność 0,83,
- wydajność 0,71,
- jakość 0,93.

Składowa jakość uzyskała najwyższy wynik, więc mimo iż może on zawierać pewne nieścisłości, poprzez nieuwzględnianie wykonywania wielu operacji technologicznych, podczas opracowania usprawnień skupiono się na wskaźniku wydajności.

Zaproponowane modyfikacje wiążą się jedynie ze składową jakością. Obliczanie składowej dostępności i wydajności w analizowanym przykładzie następowało zgodnie z wzorem (1), wykonywanie większej liczby operacji nie wpływało na konieczność wprowadzenia zmian w tym wskaźniku.

6. Podsumowanie

W niniejszym opracowaniu został przedstawiony problem obliczania składowej jakości wskaźnika OEE na stanowisku roboczym w przedsiębiorstwie X. Dzięki dokładnej obserwacji stanowiska pracy, sprawdzeniu parametrów produkcyjnych maszyny, przeprowadzeniu wywiadu z pracownikiem oraz znajomości metody obliczania wskaźnika OEE, zaproponowano nowe wzory do określenia składowej jakości. Wzór (1) może być stosowany, gdyż jego obliczenie wymaga najmniejszej ilości danych, a w sytuacji, gdy produkowane elementy wymagają pojedynczych operacji technologicznych o zbliżonych czasach trwania otrzymane

	Wzór na składową jakość			
	$\frac{F}{E}$	$\frac{G}{H}$	$\frac{(G + I)}{(H + J)}$	$\frac{(G \times T_i + I \times T_i)}{(H \times T_i + J \times T_i)}$
Wykorzystanie	pojedyncze operacje na elementach	różna liczba operacji technologicznych na elementach	różna liczba operacji technologicznych na elementach, możliwość wykonywania kilku poprawek	różna liczba operacji technologicznych na elementach, możliwość wykonywania kilku poprawek, operacje cechujące się zróżnicowanym czasem trwania
Uwagi	Wymaga małej ilości danych, wynik może być obciążony dużym błędem	Wzrost zapotrzebowania na dane \longrightarrow Wzrost dokładności wyniku		Wymaga wielu danych, wynik pozbawiony błędów
Uzyskany wynik podczas pomiarów w przedsiębiorstwie X	$\frac{40}{45} = 0,8888$	$\frac{92}{99} = 0,9293$	$\frac{97}{104} = 0,9327$	$\frac{1414}{1538} = 0,9194$

Tab. 2. Porównanie wzorów składowej jakości

wyniki można uznać za miarodajne. Jednak w celu uniknięcia błędów spowodowanego nieuwzględnieniem liczby operacji technologicznych wykonywanych na poszczególnych elementach oraz czasów trwania tychże operacji zaleca się stosowanie wzorów (2), (3) i (4). Dodatkowo zaleca się, aby pomiary mające na celu obliczenie wskaźnika OEE na drogich maszynach wykonywane były za pomocą nowych wzorów. Wyniki otrzymane podczas stosowania tych wzorów najwierniej odzwierciedlają poziom jakości pracy maszyny na stanowisku produkcyjnym.

Literatura:

- [1] Chabowski P., Żywicki K., *Wpływ organizacji produkcji na efektywność zasobów technicznych*. „Inżynieria Maszyn” 1/2013, s. 60-70.
- [2] Czerska J., *Doskonalenie strumienia wartości*. Difin, Warszawa 2009.
- [3] Duplaga M., Stadnicka D., *Wdrażanie TPM w praktyce dużego przedsiębiorstwa*. „Technologia i Automatyka Montażu” 3/2009, s. 25-27.
- [4] Francis W., Mathot J., *OEE Overall Equipment Effectiveness*. ABB, 2002.
- [5] Mączyński W., *Wskaźnik OEE, MTBF i MTTR – czy to coś więcej niż wartości bezwzględne?* „Utrzymanie Ruchu” 1/2011, s. 28-30.
- [6] Nakajima S., *Introduction to TPM: Total Productive Maintenance*. The Productivity Press, 1988.
- [7] *The Productivity Press Development Team, OEE dla Operatorów. Całkowita efektywność wyposażenia*, red. L. Kornicki, Sz. Kubik. ProdPress.com, Wrocław 2009.
- [8] Wirkus M., Kufel K., *Problem analizy obniżenia wartości OEE zautomatyzowanego parku maszynowego spowodowanego spadkiem prędkości pracy oraz mikroprzestojami technicznymi*, [w.] *Zarządzanie a inżynieria produkcji*, red. P. Łebkowski, AGH, Kraków 2014 (w druku).
- [9] Wirkus M., Węsierski T., Chmielarz A., *Marnotrawstwo pracy maszyn na placu budowy*. „Budownictwo i inżynieria środowiska” 4/2011, s. 699-708.

CALCULATION OF QUALITY COMPONENT IN OEE RATE FOR MULTIPLE TECHNICAL OPERATIONS

Key words:

Overall Equipment Effectiveness, quality

Abstract:

Aim of this article is to present way of calculation of the OEE rate for work stations. The OEE rate is a tool used in searching for the best way of improvement of functionality of a work station. During the research in X factory, which lead to calculation of OEE rate for certain work station, it was noticed that while producing elements which require multiple technical operations on this single station, the output value of rate is imprecise. The above imprecision results from the rules of calculation of the quality component of the OEE rate, which is calculated as quotient of the number of

properly produced elements to entire production on particular station. These rules don't consider the amount of technical operations performed on specific element properly, before it is considered a defect, also they don't consider possibility of performing more than one correcting operation, as well as they don't distinguish operations with different time schedule. As a result of performed analysis a new way of calculating the quality component of OEE rate was developed. Developing new formula for the quality component allows to eliminate earlier mentioned lack of precision, therefore provides a better reflection of actual quality of the machine. This allows to evaluate the best way of improvement. This article presents 3 various formulas, which allow calculating the quality component, depending on type of production and available amount of information. Variety of results, presented by examples, indicate that in many cases the classical formula, which can be found in the literature, can lead to the imprecision of the measurement.

Dr hab. inż. Marek WIRKUS

mgr inż. Alicja KUKUŁKA

Politechnika Gdańska

Wydział Zarządzania i Ekonomii

Katedra Inżynierii Zarządzania Operacyjnego

Marek.Wirkus@zie.pg.gda.pl

kukulka.alicja@gmail.com