

Grzegorz Jokiel

Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu

PROCESY DRGAJĄCE

Streszczenie: Artykuł przedstawia wyniki symulacji procesów wytwórczych przeprowadzanych w warunkach laboratoryjnych. Zidentyfikowano podstawowe przyczyny niedoskonałego szacowania czasu trwania procesu produkcyjnego oraz jakości wytworzonych produktów. Zaproponowano inny niż intuicyjny sposób szacowania czasów trwania operacji w procesie oraz procesu jako całości. W pracy sformułowano zasady dotyczące szacowania prawdopodobieństwa wystąpienia i konsumpcji opóźnień (czasów trwania operacji dłuższych niż wartości średnie) oraz wystąpienia i konsumpcji oszczędności (czasów trwania operacji krótszych niż ich wartości średnie).

Słowa kluczowe: efektywność procesu, wąskie gardło, statystyczna obróbka danych przy określaniu parametrów procesu.

1. Wstęp

Inspiracją do napisania artykułu jest seria eksperymentów przeprowadzonych na zajęciach ze studentami w ramach przedmiotów dotyczących zarządzania procesami gospodarczymi. Eksperymenty te polegały na symulacji działania prostego procesu wytwórczego z wykorzystaniem pracy manualnej studentów.

Badanie koncentrowało się na dwóch podstawowych parametrach sterowania procesami: czasie i jakości. Jednak jak wykazały eksperymenty, ustalenie metod pomiaru, kryteriów oceny oraz wielkości referencyjnych dla mierników było niezwykle trudne, a ustalone w drodze konsensusu parametry okazywały się nie do osiągnięcia przez studenckie zespoły wykonawcze. Wywołane problemy są na tyle ciekawe, że warto je opisać w formie artykułu, wskazującego na potrzebę doskonalenia zajęć dydaktycznych angażujących studentów w doświadczenia empiryczne, wraz ze statystyczną analizą zaobserwowanych wyników.

2. Opis modelu

Eksperyment przeprowadzany jest na prostym modelu czterech szeregowo umiejscowionych gniazd produkcyjnych¹. W każdym gnieździe jedna osoba wpisuje przygotowaną partię tekstu do edytora tekstowego, używając klawiatury, a druga ma za zadanie zanotować czas trwania tych czynności. Standardowa partia tekstu składa się z 300 znaków ze spacjami. Wytworzenie wyrobu finalnego polega na:

- 1) włożeniu nośnika pamięci (dyskietka, karta, *pendrive*) do komputera,
- 2) wpisaniu partii tekstu do otworzonego edytora tekstowego,
- 3) zapisaniu pliku na nośniku pamięci,
- 4) odłączeniu nośnika pamięci i przekazaniu go na następne stanowisko produkcyjne, gdzie do utworzonego już pliku zostanie dopisana kolejna partia tekstu.

Zestaw opisanych czynności jest przedstawiony na rys. 1 w postaci modelu procesu w notacji EPC. Jest on wykonywany kolejno na następnych stanowiskach produkcyjnych. Wyrób finalny to nośnik pamięci zawierający plik tekstowy, w którym zapisane są cztery partie tekstu (razem 1200 znaków ze spacjami). Po wytworzeniu jest on sprawdzany przez ostatni zespół studencki pod względem poprawności wpisanego tekstu (kontrola jakości). Przebieg całego procesu wytwórczego przedstawiony jest na rys. 2. Dla porównywalności wyników między komputerami i kolejnymi wyrobami należy zapewnić jednorodne warunki sprzętowe. Dotyczy to komputerów (takie same stacje dyskiety lub porty USB, takie same procesory, takie same nośniki danych itd.) oraz oprogramowania (takie same edytory tekstu, takie same systemy operacyjne, identyczne zestawy zainstalowanych programów itd.).

3. Normowanie czasu przebiegu procesu

W celu ustalenia normatywnego czasu potrzebnego na wytworzenie serii 10 wyrobów finalnych uczestnicy najpierw mierzą swoje czasy, przepisując dwie próbne partie tekstów. Na podstawie tych danych starają się oszacować czas potrzebny do wytworzenia całej serii produktów. Dotychczasowe obserwacje wyników symulacji wskazują na duże różnice pomiędzy tak określonym planowanym czasem wykonania serii 10 wyrobów finalnych a rzeczywistym czasem produkcji, który zwykle był o wiele dłuższy niż bezpieczne szacunki przyjmowane przez uczestników symulacji. Sytuacja ta wskazuje na duże problemy związane z szacowaniem czasu

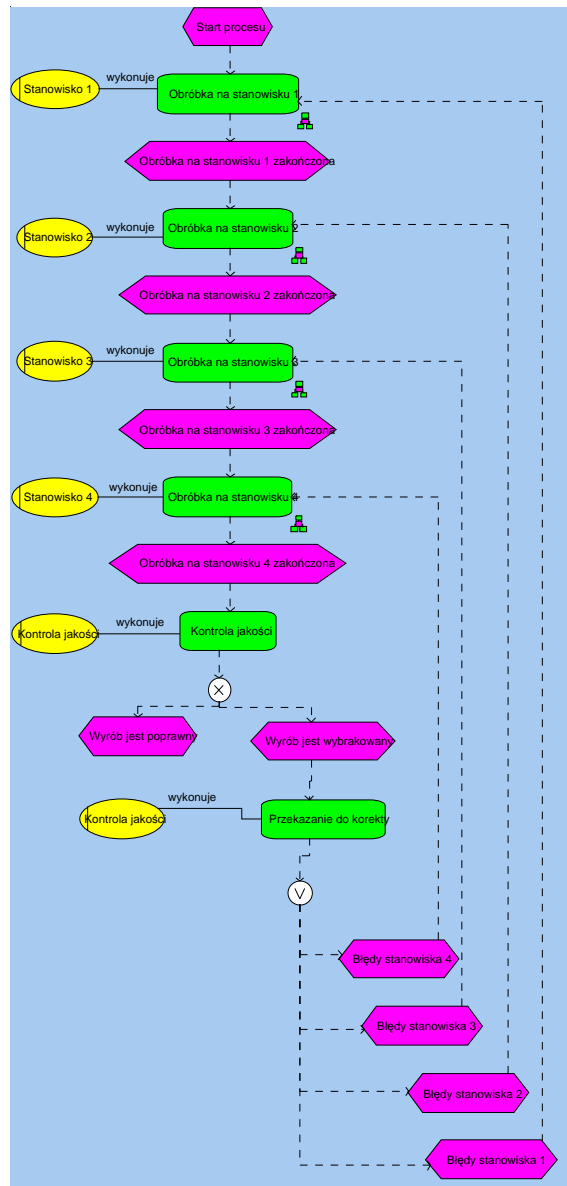
¹ Symulację można prowadzić z wykorzystaniem np. klocków, z których kolejne gniazda produkcyjne tworzą wyrób finalny (4-kondygnacyjny domek) – studium przypadku, w którym można znaleźć opis symulacji, znajduje się na stronie: <http://www.procesy.ue.wroc.pl/IstotaZPR.htm> w linku: Opis zajęć symulacji procesu wytwórczego (2.03.2011). W artykule symulacja opisana jest przy wykorzystaniu jednostek komputerowych, na których kolejne gniazda produkcyjne wpisują do dokumentu partie tekstu.

trwania procesów. Zjawisko to ma wiele przyczyn, które zostaną omówione poniżej z wykorzystaniem wyników symulacji w wybranej grupie studenckiej.



Rys. 1. Czynności wykonywane na kolejnych stanowiskach produkcyjnych przedstawione w notacji EPC

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 2. Proces wytwórczy przedstawiony w notacji EPC

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 1. Czasy uzyskane na stanowiskach wytwórczych przy dwóch próbnych partiach przepisywanego tekstu (0:00 – minuty:sekundy)

Próby	Stanowisko 1	Stanowisko 2	Stanowisko 3	Stanowisko 4	Stanowisko 5	Stanowisko 6
Próba 1.	1:53	1:39	1:05	2:34	1:40	1:35
Próba 2.	2:20	1:38	1:02	1:37	1:57	1:20

Źródło: opracowanie własne.

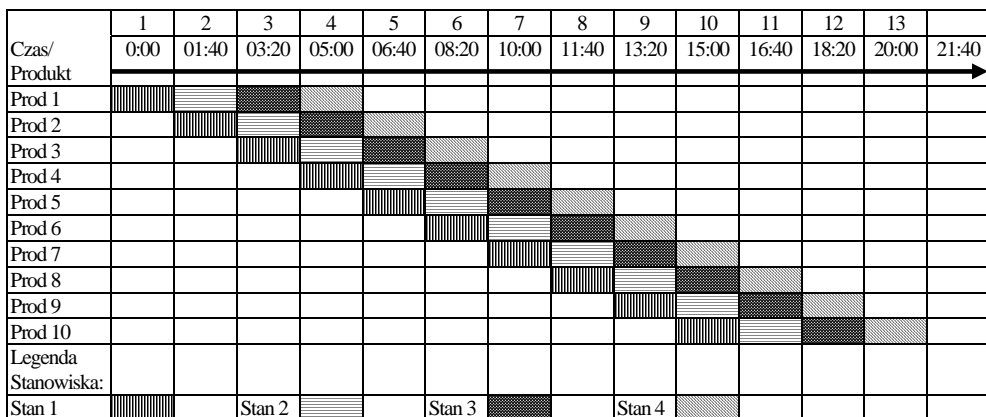
Wyniki pomiarów czasu przepisywania standardowej partii tekstu przez uczestniczące w symulacji zespoły przedstawione są w tab. 1. Podanych w tabeli stanowisk wytwórczych jest więcej niż w modelu, gdyż do wykonania próbnych szacunków zaangażowano również pozostałych studentów w grupie (np. zespoły kontroli jakości). Większa ilość danych empirycznych jest zawsze pożądana.

Główny problem, przed którym stoją uczestnicy symulacji, to obróbka i interpretacja uzyskanych danych. Pierwsze zjawisko, na które warto zwrócić uwagę, to różnicowanie wyników pomiędzy stanowiskami wytwórczymi. Tę sytuację da się łatwo wytłumaczyć choćby różnicami w zdolnościach manualnych osób zajmujących się wpisywaniem tekstu. Jednakże ciekawszym spostrzeżeniem jest to, iż na żadnym stanowisku wytwórczym nie uzyskano takiego samego wyniku czasowego w dwóch kolejnych próbach, mimo wpisywania porównywalnego tekstu (pod względem liczby znaków). Zwykle czas wykonania drugiej próby jest krótszy, co uczestnicy symulacji zwykle uzasadniają krzywą uczenia się. Natomiast sytuacja odwrotna, kiedy czas drugiej próby jest dłuższy niż osiągnięty w próbie pierwszej (tak stało się na stanowisku 2), jest zwykle wyjaśniana zmęczeniem wykonawcy. Często pojawiają się też interpretacje, że oddziaływanie tych dwóch czynników będzie się znosić (równoważyć) w symulacji procesu wytwórczego.

Drugim problematycznym zagadnieniem jest oszacowanie normy czasu potrzebnego do wykonania operacji wpisania partii tekstów na stanowisku wytwórczym. Najczęściej wśród wyników prób obserwuje się znaczne odchylenia, tak jest również w przypadku danych symulacyjnych podanych w tab. 1. Metod ustalania wartości czasu, którą można uznać za normę, jest wiele. W sytuacji gdy nie występuje dominanta, większość zespołów studenckich dąży do wyznaczenia normatywnego czasu trwania operacji w oparciu o średnią arytmetyczną. W analizowanym przypadku przyjęto następującą metodę ustalenia czasu normatywnego: odrzucono po dwie skrajne obserwacje w każdej z przeprowadzonych prób, a z pozostałych danych wyciągnięto średnią arytmetyczną, której wartość wyniosła jedną minutę i czterdzieści sekund (co było zaokrągleniem wyniku w postaci 1:39,875). Również w tym wypadku panuje wśród uczestników przekonanie, że fluktuacje w postaci krótszego, a czasem dłuższego czasu trwania operacji skompensują się.

Trzecim zadaniem uczestników jest oszacowanie czasu trwania procesu produkcji serii 10 sztuk wyrobów finalnych. W tej części eksperymentu pojawiają się różne koncepcje oszacowania całkowitego czasu trwania procesu. Jednak zwykle

przeważa zdanie większości uczestników, promujących schemat szacunków przedstawiony na rys. 3, w którym podstawowym założeniem jest przekonanie o równoważeniu się (kompensacji) fluktuacji czasu trwania operacji na kolejnych stanowiskach wytwórczych.



Rys. 3. Szacowanie czasu trwania procesu wytwórczego 10 sztuk wyrobu finalnego

Źródło: opracowanie własne.

W tej sytuacji do zamodelowania tego procesu można zastosować symetryczny rozkład prawdopodobieństwa, gdzie osią symetrii będzie oś rzędnych OY, określająca gęstość prawdopodobieństwa. Ciekawym spostrzeżeniem jest, że w większość narzędzi informatycznych służących do modelowania i symulacji procesów czy projektów gospodarczych albo nie przewiduje fluktuacji w czasach trwania operacji czy zadań (tak jest w MsVisio czy AdoGanttproject, Openproject), albo bazuje się właśnie na rozkładach symetrycznych przy szacowaniu czasów trwania czynności (Adonis, MsProject w obszarze analizy PERT). Jedynie najbardziej zaawansowane narzędzia do zarządzania i symulacji procesów zawierają możliwości zastosowania różnych rozkładów prawdopodobieństwa, według których można sterować fluktuacjami czasu poszczególnych operacji (iGraf, Aris).

W przedstawionym przykładzie określono czas trwania całego procesu wytwórczego na 21 minut i 40 sekund. Szacunek ten opiera się na uśrednionych czasach trwania operacji wykonywanych na każdym stanowisku wytwórczym oraz przekonaniu o kompensacji fluktuacji. Każde stanowisko wytwórcze może rozpocząć produkcję dopiero w momencie otrzymania nośnika pamięci z ogniwa poprzedzającego. Po przekazaniu przetworzonego nośnika na następne stanowisko wytwórcze może pobrać następny półprodukt (nośnik) z ogniwa wcześniejszego (jeżeli oczywiście na poprzednim stanowisku uporano się ze swoją partią tekstu).

4. Wyniki symulacji

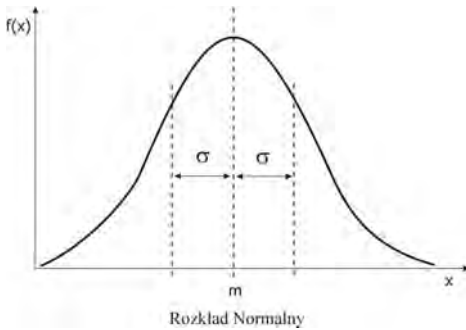
Po ustaleniu normatywnego czasu trwania procesu uruchamiana jest symulacja. Zwykle czas trwania opisanego procesu wytwórczego w rzeczywistości znacznie przekracza wyznaczoną wcześniej normę. W opisywanym przypadku w ustalonym jako norma czasie udało się wytworzyć jedynie osiem wyrobów, z czego zaledwie jeden był bez wad. Wytworzenie 10 wyrobów finalnych zajęło 23 minuty i 43 sekundy. W tym czasie udało się zespołowi wykonać jedynie trzy poprawne jakościowo wyroby. W tym wypadku istniała możliwość korekty wybrakowanych wyrobów na stanowiskach, na których popełniono błędy w swojej partii przepisywanego tekstu. Doliczając czas poświęcony na usunięcie braków, całkowity czas procesu wytworzenia serii 10 wyrobów finalnych wyniósł 33 minuty i 46 sekund.

Ocena jakości wykonania produktów również przysporzyła sporo kłopotów zespołowi kontrolującemu. Przyjęto, że za błąd będą uznawane przeinaczenia wyrazów spowodowane wpisaniem innych liter niż były w oryginalnym tekście. Jednak za dopuszczalne uchybienie uznano błędy typu: brak ogonków czy kresek przy polskich znakach typu ą, ę, ć, ń, ó, ś, ź, ż, tolerowano też braki znaków interpunkcyjnych, jak przecinki czy kropki. Gdyby rygorystycznie wymagać dokładnego przepisania partii tekstu, okazałoby się, że początkowo wyprodukowano by zaledwie jeden poprawny wyrób finalny, a czas korekty błędów powiększyłby się znacznie.

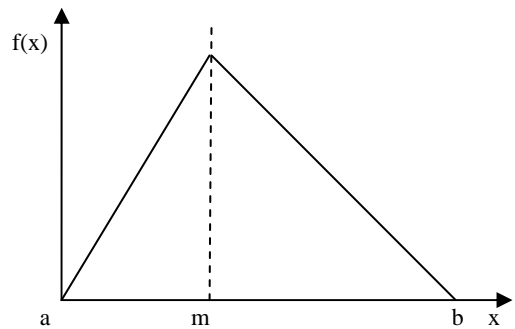
Wyniki przeprowadzanych symulacji stanowczo odbiegają od planowanych (szacowanych) norm. Spostrzeżenie to jest zwykle bardzo zaskakujące dla uczestników symulacji. Jednak dość łatwo da się zidentyfikować jego przyczyny.

Przede wszystkim należy zwrócić uwagę na fluktuacje czasu trwania przetwarzania partii tekstu na każdym stanowisku wytwórczym. Fluktuacje te można wyobrazić sobie właśnie jako tytułowe drgania – drgania czasów trwania czynności, które wchodzą w skład procesu produkcyjnego.

Pierwszą wątpliwość budzi dość powszechne przekonanie, że do opisu tych fluktuacji można, a wręcz należy wykorzystać rozkład symetryczny (beta, gaussowski itp.). Oznacza to, że prawdopodobieństwo wystąpienia czasu krótszego od średniej jest takie samo, jak wystąpienia czasu dłuższego od średniej dla kolejnych operacji, a jednocześnie przy większej liczbie powtórzeń czasy krótsze i dłuższe powinny się skompensować. Jednak w rzeczywistości wiele działań, jakie podejmuje człowiek, nie charakteryzuje się rozkładem symetrycznym. Przykładowo czas pokonania trasy: dom – miejsce pracy (zarówno w jednym, jak i w drugim kierunku), zwykle nie cechuje się rozkładem symetrycznym prawdopodobieństwa, lecz takim, gdzie wartości czasów dłuższych są bardziej doważone niż czasy krótsze. Rozkłady takie podobne są bardziej do rozkładów gamma czy trójkątnych. Na rysunkach 4 i 5 przedstawione są dla porównania rozkłady: symetryczny z rozkładem doważającymi wartości pesymistyczne (w naszym przypadku dłuższe czasy wykonania).



Rys. 4. Rozkład normalny (krzywa Gaussa) symetryczny



Rys. 5. Rozkład trójkątny niesymetryczny

Źródło: opracowanie własne.

Źródło: <http://www.zarz.agh.edu.pl/bsolinsk/statystyka.html>, 17.03.2011.

Najbardziej prawdopodobne jest pokonanie wyznaczonej trasy w czasie X_1 (najwyższy poziom gęstości prawdopodobieństwa na rysunkach 4 i 5 zaznaczony jako m), jednak częściej występować będą dłuższe niż krótsze czasy przejścia tej trasy, zwłaszcza w kierunku z miejsca pracy do domu, kiedy większość ludzi nie spieszy się, po drodze odwiedza sklepy, spotyka znajomych itp. Podobna tendencja dotyczy może operacji na stanowiskach wytwórczych w opisanym procesie produkcyjnym. Wykorzystanie rozkładów niesymetrycznych do szacowania czasów trwania operacji powinno być stosowane w dłuższych seriach monotonicznych operacji (tak jak w opisywanym przypadku) ze względu na zmęczenie osób je wykonujących.

Jeżeli przyjąć powyższe uwagi za uzasadnione, to można postawić następującą tezę:

Prawdopodobieństwo wykonania operacji X_i w czasie krótszym niż średnia \bar{X} jest mniejsze niż prawdopodobieństwo wykonania tej operacji w czasie dłuższym niż średnia, co zapiszemy wzorem:

$$P(P(X_i < \bar{X}) < P(X_i > \bar{X})). \quad (1)$$

Drugi problem związany jest z faktem, że szacowane czasy trwania operacji na kolejnych stanowiskach wytwórczych są ze sobą powiązane. Proces wytwórczy (serii 10 produktów) stanowi całość – system, a jego przepustowość limituje zawsze podstawowe ograniczenie (wąskie gardło). W opisywanym eksperymencie laboratoryjnym poczyniono starania, aby takie wąskie gardło nie powstało (jednolity sprzęt, oprogramowanie, zakres prac, sekwencja czynności na każdym stanowisku wytwórczym oraz dla każdego kolejnego wyrobu). Zapewne w trakcie symulacji wąskie gardło utworzy się samoistnie, gdyż każdy system musi mieć przynajmniej jedno podstawowe ograniczenie [Goldratt, Cox 2000, s. 111]. Pod względem dydaktycznym ciekawa może być

identyfikacja tego wąskiego gardła, wraz z przyczynami jego powstania (tym wypadku najczęściej powoduje je człowiek). Jednak gdy nie uda się zidentyfikować tego podstawowego ograniczenia wydajności procesu produkcyjnego, to warto zauważyć, że ze względu na współzależność stanowisk wytwórczych bardzo dużo czasu zajęło im bezczynne oczekiwanie. Tak się działo, kiedy ze stanowiska poprzedzającego nie dostarczono jeszcze kolejnego nośnika pamięci do obróbki. Czasy te pokazane są w tab. 2. Oznacza to, że nawet gdy na którymś stanowisku wystąpi oszczędność (krótszy czas wykonania operacji przepisania partii tekstu), to niekoniecznie stanowisko następne może tę oszczędność skosztować. Sytuacja ta powoduje, że oszczędności wygenerowane na stanowiskach wytwórczych materializowały się najczęściej w postaci zapasu produkcji niezakończonyj – nośników pamięci leżących przed kolejnym stanowiskiem wytwórczym, co widać w kolumnach 2, 4, 6, 9 (tab. 2). Nie miały więc wpływu na czas całego procesu produkcyjnego, nie skracały go. Natomiast opóźnienia wygenerowane przez jedno stanowisko wytwórcze przenosiły się na kolejne stanowiska, gdzie oczekiwano bezczynnie na nośnik pamięci – pokazują to dane w kolumnach 3, 5, 7, 8 (tab. 2). Stanowisko 1 nie generowało ani czasu przestoju ani czasu utrzymywania materiału, gdyż miało zapewniony ciągły dostęp do materiałów, dlatego nie jest uwzględnione w tab. 2.

Tabela 2. Czasy oczekiwania stanowisk wytwórczych oraz czas utrzymywania zapasów produkcji niezakończonyj między stanowiskami

Produkty	Stanowisko 2		Stanowisko 3		Stanowisko 4		Całociowy czas przestoju na produkcie	Całociowy czas utrzymywania zapasów w procesie
	zapas oczekujący – czas utrzymania zapasu	prześtoj ze względu na brak materiałów do przetwarzania	zapas oczekujący – czas utrzymania zapasu	prześtoj ze względu na brak materiałów do przetwarzania	zapas oczekujący – czas utrzymania zapasu	prześtoj ze względu na brak materiałów do przetwarzania		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
P1	00:00,0	00:00,0	00:05,0	00:00,0	00:07,0	00:00,0	00:00,0	00:12,0
P2	00:06,0	00:02,0	00:15,0	00:26,0	00:04,0	00:21,0	00:49,0	00:25,0
P3	00:01,0	00:04,0	00:12,0	00:40,0	00:05,0	00:26,0	01:10,0	00:18,0
P4	00:39,0	00:01,0	00:10,0	00:32,0	00:04,0	00:10,0	00:43,0	00:53,0
P5	00:47,0	00:01,0	00:18,0	00:39,0	00:05,0	00:24,0	01:04,0	01:10,0
P6	01:18,0	00:03,0	00:14,0	00:23,0	00:10,0	00:04,0	00:30,0	01:42,0
P7	01:33,0	00:02,0	00:17,0	00:25,0	00:09,0	00:09,0	00:36,0	01:59,0
P8	01:56,0	00:14,0	00:11,0	00:50,0	00:10,0	00:10,0	01:14,0	02:17,0
P9	02:31,0	00:05,0	00:16,0	00:41,0	00:02,0	00:18,0	01:04,0	02:49,0
P10	02:20,0	00:04,0	00:25,0	00:09,0	00:36,0	00:08,0	00:21,0	03:21,0
SUMY	11:11,0	00:36,0	02:23,0	04:45,0	01:32,0	02:10,0	07:31,0	15:06,0

Źródło: opracowanie własne.

Konstatację tę można zapisać w formie zasady mówiącej, że prawdopodobieństwo konsumpcji oszczędności, w postaci krótszego niż średnia (\bar{X}) czasu X_i wykonania operacji na stanowisku wytwórczym, jest mniejsze niż prawdopodobieństwo konsumpcji opóźnień, czyli czasów dłuższych wykonania operacji niż wartość średnia. Można to również przedstawić w postaci wzoru:

$$P(\text{konsumpcji } X_i < \bar{X}) < P(\text{konsumpcji } X_i > \bar{X}). \quad (2)$$

Przedstawione wnioski z symulacji procesu wytwórczego potwierdzają również inne eksperymenty. Przykładowo doświadczenie z szacowaniem podobnie zamodelowanego procesu przy użyciu kostki do gry, która wyznacza losowo wydajność na kolejnym stanowisku wytwórczym (w przedziale 1-6) opisuje E. Goldratt [Goldratt, Cox 2000, s. 333].

5. Podsumowanie

Obserwując procesy pracy w warunkach laboratoryjnych, można zidentyfikować ciągłe fluktuacje czasu wykonywania podobnych czynności. Fluktuacje te jak drgania wokół wartości średniej powodują wykonanie kolejnych operacji w procesie losowo: raz w dłuższym, a raz w krótszym czasie. Z danych empirycznych wynika jednak, że więcej obserwacji czasów trwania operacji na stanowiskach wytwórczych nawet nie jest dłuższa niż przyjęta norma oparta na uśrednionym czasie wykonania prób. Średnia arytmetyczna jednostkowego czasu przetwarzania na tych stanowiskach wyniosła 1 minutę 34 sekundy. Jednak ze względu na połączenie tych czynności w całość (proces produkcyjny) okazuje się, że na całkowity czas trwania procesu większy wpływ mają opóźnienia (odchylenia w postaci dłuższego czasu wykonania operacji) niż oszczędności (krótszy niż średnia czas trwania operacji). Te ostatnie zwykle materializują się w postaci zapasu produkcji w toku, oczekującego przed kolejnymi stanowiskami wytwórczymi.

Literatura

Goldratt E., Cox J., *Cel: doskonałość w produkcji*, Werbel, Warszawa 2000.
<http://www.zarz.agh.edu.pl/bsolinsk/statystyka.html>, 17.03.2011.

VIBRATING PROCESSES

Summary: The article presents the results of production process simulations conducted in lab conditions. The simulations allowed to identify the main reasons for the inaccurate estimations of the processes time-length and the end products quality. A new model is presented for the estimation of specific operations time within the process and the process as a whole. The article also formulates rules for the estimation of delay consumption (longer operation time than average) and savings consumption probability (shorter operation time than average).