

NOWE WSKAŹNIKI EFEKTYWNOŚCI PROCESU WDRAŻANIA PRODUKCJI NOWATORSKICH WYROBÓW, REALIZOWANEGO NA PODSTAWIE WYTYCZNYCH BRANŻY MOTORYZACYJNEJ

1. Narzędzia zapewnienia jakości dostawców – procedura PPAP

Ostatnimi laty dostrzegalny jest trend polegający na skracaniu cyklu życia wyrobu. Rynek wymusza na przedsiębiorstwach coraz większy stopień elastyczności (reagowanie na krótkie, zmienne zamówienia), produkcję towarów na satysfakcjonującym klienta poziomie jakości, przy możliwie niskich, konkurencyjnych cenach. Konkurencja powoduje, iż przedsiębiorstwa zmuszone są do ciągłego dostosowywania swoich produktów do nieustannie zmieniających się oczekiwań i standardów. Nowy, „lepszy” produkt może cechować wprowadzona w nim innowacja, np.: zastosowana nowa technologia produkcji, nowe wzornictwo, nowy materiał, wielowariantowość. Wszystkie wymienione zmiany oznaczają konieczność nowych uruchomień procesu produkcji. Zakres prac związanych z nowym uruchomieniem zależny jest od branży i charakteru produkcji. Na ogół producent finalny wyrobu współpracuje z wieloma dostawcami, dostarczającymi surowce, materiały, komponenty czy gotowe podzespoły. Każda zatem zmiana w produkcji finalnym powoduje zazwyczaj konieczność wprowadzania zmian również i u dostawców, często tworzących bardzo długi, złożony łańcuch współzależności. Bardzo dobrym przykładem jest branża samochodowa, gdzie finalny produkt – samochód, produkowany (montowany) jest w zakładzie jego finalnego producenta, podczas gdy tysiące komponentów dostarczane są przez setki kooperantów, zorganizowanych w bardzo rozbudowanym, kilkupoziomowym łańcuchu klient-dostawca, trudnym do zarządzania pod kątem jakości i terminowości dostaw. Spowodowało to konieczność powstania Systemów Zarządzania Jakością (SZJ) daleko bardziej rozbudowanych od standardowego modelu ISO 9001 [2]. Obecnie powszechnie uznawanym modelem SZJ dla branży samochodowej jest system ISO/TS 16949 [7]. Mimo ogólnie przyjętych wymagań tam zawartych, dotyczących zapewnienia jakości przy nowych uruchomieniach, tzw. wielka trójka amerykańskich producentów samochodowych: Chrysler LLC, Ford Motor Comp. i General Motors Corp. opracowała własne wytyczne dla dostawców, dotyczące wdrażania nowych produktów do produkcji. Wytyczne te znane są jako tzw. podręcznik referencyjny APQP [1] (*Advanced Product Quality Planning – Zaawansowane Planowanie Jakości WYROBÓW*) oraz ściśle z nim związany podręcznik referencyjny PPAP [9] (*Production Part Approval Process – Proces Zatwierdzania Części do Produkcji*).

Podręcznik PPAP zawiera wytyczne dla dostawcy dotyczące zatwierdzania przez organizację klienta wyrobów wyprodukowanych przez dostawcę jako dowodu zdolności produkcyjnych dostawcy w zakresie jakości i wydajności.

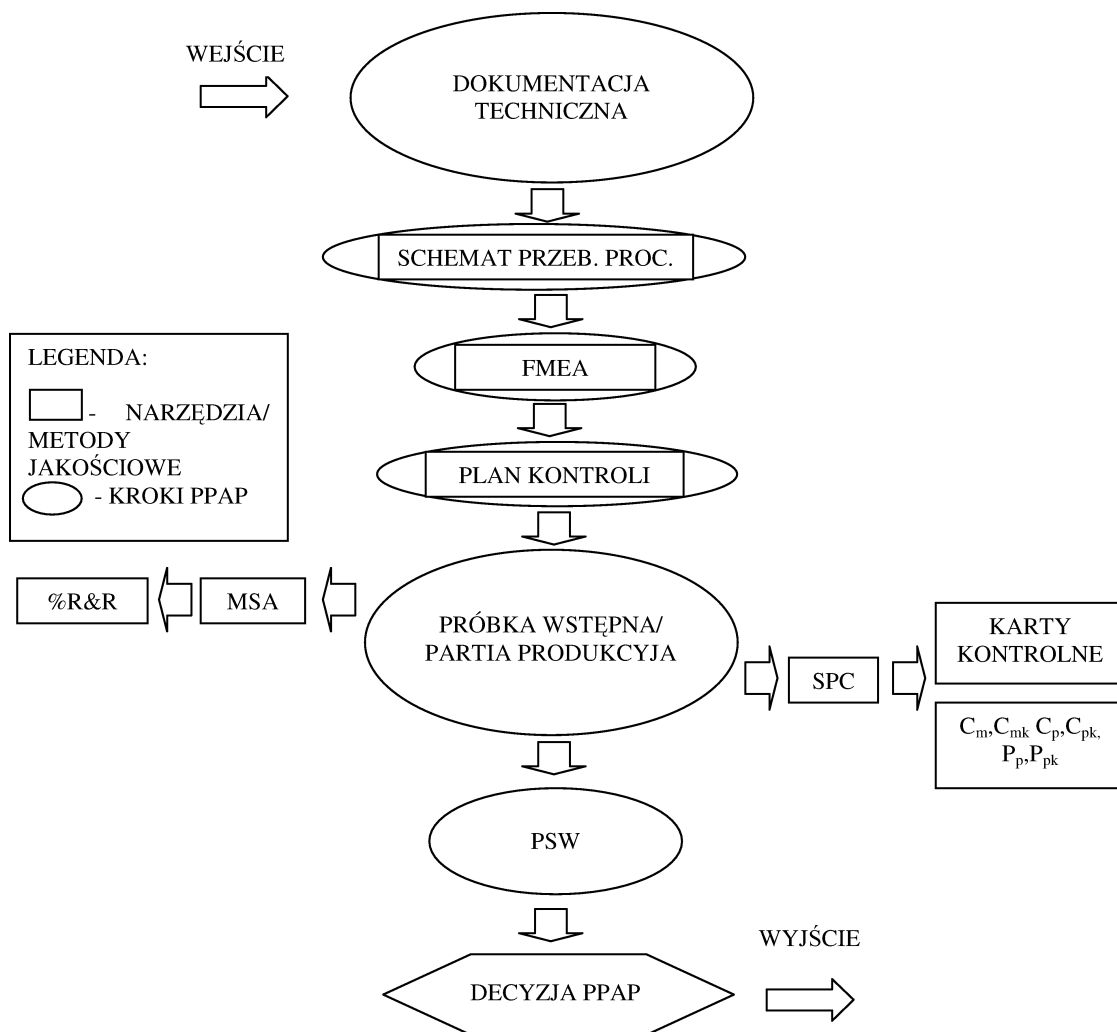
Uzyskanie zatwierdzenia PPAP przez klienta oznacza uznanie przez niego kompetencji dostawcy, który przedstawiając klientowi wymagane przez PPAP dokumenty dowiódł, że wszystkie wymagania techniczne klienta są prawidłowo rozumiane oraz będą realizowane przez organizację dostawcy w toku produkcji i realizacji dostaw [10]. W zależności od tzw. poziomu przedłożenia, narzuconego przez klienta, dostawca jest zobowiązany do przygotowania, przedstawienia i uzyskania zatwierdzenia wymaganych dowodów gotowości do podjęcia produkcji seryjnej. Pozyskiwanie i opracowywanie poszczególnych dowodów wymaganych w ramach PPAP można traktować jako „kamienie milowe” w procesie przygotowywania produkcji, za pomocą których można ten proces monitorować, mierzyć, oceniać, a także doskonalić.

2. Uzasadnienie potrzeby pomiaru efektywności PPAP

PPAP (*Production Part Approval Process*), jak nazwa wskazuje, jest procesem. Jak każdy proces, zgodnie z podejściem wymaganym przez EN-ISO 9001:2008 [2], wymaga ustalenia struktury procesów, określenia zbiorów działań i zasobów wzajemnie powiązanych przekształcających wejście w wyjście, opisanie działań, które składają się na dany proces, oraz przypisania do nich odpowiedzialności.

Proces PPAP można przedstawić za pomocą algorytmu określającego działania podejmowane przy zbieraniu kolejnych dowodów jakościowych. Proces ten można również przedstawić jako sekwencję wymaganych metod/narzędzi jakości użytych w trakcie jego realizacji.

Wejściem do procesu są wszystkie dane i zapisy z projektowania wyrobu (włączając komponenty), zgodne z zasadami GD&T, zazwyczaj w formie elektronicznej (CAD/CAM). Wejściem są również wszelkie autoryzowane dokumenty dotyczące zmian technicznych, nieuwzględnione w zapisach projektowych, ale włączone do wyrobu lub oprzyrządowania, jak również udokumentowane zatwierdzenie techniczne zapisów projektowych przez klienta (rysunek czy też inne specyfikacje). Wyjściem procesu PPAP jest uzyskanie statusu bądź to zatwierdzenia, bądź zatwierdzenia tymczasowego lub, w przypadku niespełnienia wymagań, odrzucenia PPAP. Norma EN ISO 9001:2009 [2] oraz dobra praktyka zarządzania procesowego sugerują, aby każdym procesem aktywnie zarządzać, czyli określać mu cele główne i cząstkowe oraz monitorować ich realizację za pomocą adekwatnych sposobów pomiaru i analizy efektywności. Wiąże się z tym nierozdzielnie zasada ciągłego doskonalenia procesów, powszechnie realizowana wg cyklu Deminga PDCA (*Plan-Do-Check-Act*). Trzeba przyjąć za oczywiste, iż wdrażanie nowych projektów do produkcji wg wytycznych APQP/PPAP podlega tym samym zasadom.



Rys. 1. Model ogólny PPAP w oparciu o użyte narzędzia jakościowe [4]

Aby proces nadzorować, należy zatem określić mu cele oraz ich mierniki. Cele powinny być sformułowane wg zasady SMART (*Specific, Measurable, Ambitious, Reasonable, Time-bound*). Mierniki (i wskaźniki) mogą być ilościowe (opisujące przebieg procesu) jak i jakościowe (opisujące osiąganie celów) [13]. W obu przypadkach konieczne jest wskazanie niezbędnych do pozyskiwania informacji i zapewnienie ich wiarygodnych źródeł. Źródłem informacji są realizowane w ramach procesu zapisy, natomiast przedmiotem monitorowania są obserwowane warunki i skutki podejmowanych w procesie działań [8].

Traktując PPAP jako proces, powinien on również być poddany monitorowaniu i ocenie w celu określania poziomu efektywności realizowania celów częściowych i celu głównego, jakim jest uzyskanie zatwierdzenia dokumentacji PPAP. Jest to kluczowe z punktu widzenia możliwości ciągłego doskonalenia procesu PPAP, czyli dążenia do poprawy jego efektywności. Oznacza to uzyskiwanie stanu gotowości do produkcji seryjnej skutecznie (czyli w terminie, uzyskując zatwierdzenie PPAP za pierwszym razem) oraz efektywnie, czyli przy ograniczaniu kosztów procesu PPAP, m.in. poprzez eliminację marnotrawstwa zasobów (czasu, środków finansowych) wykorzystanych na jego realizację.

3. Koncepcje wskaźników oceny efektywności PPAP

Efektywność procesów jest na ogół związana ze skutecznością, jednakże nie oznacza tego samego. W praktyce proces realizowany efektywnie to proces, w wyniku którego uzyskiwany jest zamierzony efekt, przy możliwie niskich nakładach koniecznych do jego uzyskania [8]. Efektywność w sensie ekonomicznym jest skutkiem dążenia do realizacji postawionych celów przy zużyciu jak najmniejszej ilości oraz wartości zasobów. Niska efektywność powoduje zwiększenie zapotrzebowania na różne zasoby, czyli m.in. „informację czy pracę ludzką, na ogół bez wzrostu ilości i jakości świadczonych usług (...). Natomiast wyższa efektywność ekonomiczna stwarza podstawy do obniżenia kosztów działania, co zwiększa dodatni wynik finansowy” [13].

Opracowanie obejmuje trzy różne koncepcje wskaźników efektywności dla procesu PPAP. Koncepcje odnoszą się do efektywności w sensie zgodności z planowanym budżetem wykonania danego dowodu przedłożenia (składnika PPAP) bądź do PPAP jako całości. W artykule skupiono się na szacowaniu efektywności dla głównych dowodów przedłożeń tj. DFMEA, Flow Chart, PFMEA, Plan Kontroli, MSA, SPC, jednakże, postępując analogicznie można zastosować przedstawione propozycje dla każdego innego elementu (podprocesu) PPAP.

W artykule dla oceny efektywności PPAP zaproponowano ponadto wskaźniki wykorzystujące funkcję strat Taguchi'ego. Funkcja strat w zastosowaniu do PPAP przedstawia zależność strat (funkcji strat) od wielkości niedotrzymania zaplanowanego (optymalnego) terminu realizacji danego kroku procesu PPAP oraz całego procesu PPAP, przy założeniu określonej straty finansowej powstałej w wyniku nieodwracalnego odrzucenia PPAP przez klienta (koszty przygotowania, utrata korzyści).

3.1. Wskaźnik efektywności w sensie zgodności z planowanym budżetem – koncepcja nr 1 (liniowa)

Dla potrzeb dalszych rozważań wprowadzono następujące pojęcia i oznaczenia:

c_{plan} – planowany budżet przeznaczony na opracowywanie danego elementu PPAP,

c_e – wielkość dodatkowego budżetu przeznaczanego na wykonanie danego elementu PPAP,

c_{eo} – zakładana (umowna) wielkość krytyczna/graniczna dodatkowego budżetu przeznaczanego na wykonanie danego elementu PPAP,

c_p – rzeczywisty budżet przeznaczony na opracowanie danego elementu PPAP,

i – kolejny dowód przedłożenia (element PPAP, np. PFMEA),

Ef – wskaźnik efektywności,

Ef_i – wskaźnik efektywności realizacji danego elementu PPAP.

Założenia dla koncepcji 1:

- I. wskaźnik ma mieć charakter liniowy,
- II. efektywność dla $c_e = 0$ ma wynosić 100%,
- III. efektywność dla $c_e = c_{eo}$ ma wynosić 0%,
- IV. efektywność dla $c_e > c_{eo}$ ma maleć poniżej 0% (ujemna),
- V. efektywność w przypadku poczynienia oszczędności (czyli dla dodatkowych budżetów ujemnych $c_e < 0$) ma rosnąć począwszy od wartości 100%.

Na podstawie powyższych założeń można przedstawić zależność wskaźnika efektywności Ef od wielkości dodatkowego budżetu przeznaczanego na wykonanie danego elementu PPAP:

$$Ef = a \cdot c_e + b \quad (1)$$

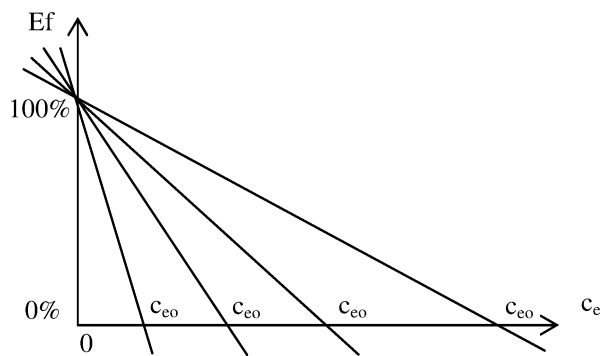
Pęć prostych reprezentujących wskaźnik Ef opisany wzorem (1) dla różnych wartości c_e przedstawiono na wykresie nr 1.

Po uwzględnieniu założeń I-V wzór (1) przyjmie postać:

$$Ef = \left(1 - \frac{c_e}{c_{eo}}\right) \cdot 100\% \quad (2)$$

Wzór (2) dla wyznaczenia skuteczności wykonania kolejnych dowodów (elementów) PPAP przyjmuje postać:

$$Ef_i = \left(1 - \frac{c_{ei}}{c_{eo_i}}\right) \cdot 100\% \quad (3)$$



Wykres 1. Zależność liniowa efektywności Ef od wielkości dodatkowego budżetu c_e przeznaczanego na wykonanie danego elementu PPAP i wielkości krytycznej dodatkowego budżetu c_{eo}

3.1.1. Przykład zastosowania koncepcji do obliczenia efektywności poszczególnych dowodów jakościowych

Firma produkująca odpowiedzialne, metalowe części dla branży motoryzacyjnej technologią obróbki plastycznej na zimno określa dla realizowanego projektu niezbędny budżet uwzględniając w nim całkowite koszty wykonania PPAP, równocześnie zdefiniowane zostają również składowe budżety przypadające na każdy dowód przedłożenia. Biorąc pod uwagę ambitnie postawione cele budżetowe, określona zostaje dodatkowo wielkość krytyczna budżetu przeznaczona na realizowany PPAP, na którego podstawie określone zostają poszczególne krytyczne budżety na kolejne dowody przedłożenia. Dla wykonania *Flow Chart* krytyczny budżet wynosi 600 Euro. Jest to maksymalny wydatek możliwy do udźwignięcia przez firmę w ramach budżetu projektowego w ramach przygotowywania dowodu przedłożenia – *Flow Chart*. Jednakże wykonanie *Flow Chart* spowodowało dodatkowe koszty w wysokości 330 Euro.

Stąd stosując wzór (3) i uwzględniając:

$$c_e = 330 \text{ EUR}$$

$$c_{eo} = 600 \text{ EUR}$$

można obliczyć efektywność wykonania działania *Flow Chart*:

$$Ef_{Flow\ Chart} = 45\%$$

Działanie *Flow Chart* wykonane w ramach realizowanego PPAP wykonane zostało zatem z 45% efektywnością.

W analogiczny sposób można przeprowadzić wyliczenia efektywności Ef_i dla wszystkich pozostałych dowodów przedłożenia PPAP, a także dla PPAP jako całości:

$$Ef_{PPAP} = 100\% \left(1 - \frac{c_{ePPAP}}{c_{eoPPAP}}\right) \quad (4)$$

gdzie:

c_{ePPAP} – wielkość dodatkowego budżetu przeznaczanego na wykonanie PPAP,

c_{eoPPAP} – założona wielkość krytyczna dodatkowego budżetu przeznaczanego na wykonanie PPAP.

3.1.2. Obliczenie *OPEf* – ogólnej efektywności PPAP (*Overall PPAP Efficiency*)

Rysunek 2. przedstawia koncepcję obliczania wskaźnika *OPEf*, który jest iloczynem składowych wskaźników efektywności poszczególnych składników PPAP.

Koncepcja ta została także zastosowana dla opisanych w dalszej części artykułu propozycji dwóch kolejnych wskaźników efektywności.

A zatem:

$$OPEf = Ef_{DFMEA} \cdot Ef_{Flow Chart} \cdot Ef_{PFMEA} \cdot Ef_{Control Plan} \cdot Ef_{MSA} \cdot Ef_{SPC} \quad (5)$$

czyli:

$$OPEf = \prod_{i=1}^n Ef_i \quad (6)$$

gdzie:

n – ostatni wykonywany dowód przedłożenia (często: wykazanie zdolności i stabilności procesu za pomocą SPC).

3.2. Wskaźnik efektywności w sensie zgodności z planowanym budżetem – koncepcja nr 2 (liniowa), uwzględniająca czas rozpoczęcia produkcji seryjnej (SOP)

Dla potrzeb dalszych rozważań do wprowadzonych już pojęć i oznaczeń w pkt 3.1 wprowadzono dodatkowe tj.:

c_{SOP} – wielkość budżetu (planowanych kosztów PPAP) od rozpoczęcia pracy nad danym dowodem PPAP do czasu rozpoczęcia produkcji (wg harmonogramu projektu).

Założenia dla koncepcji 2:

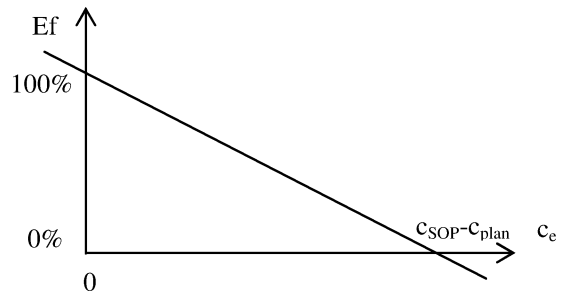
- I. funkcja ma mieć charakter liniowy,
- II. efektywność dla $c_e = 0$ ma wynosić 100%,
- III. efektywność dla $c_e = c_{SOP} - c_{plan}$ ma wynosić 0%,
- IV. efektywność w przypadku poczynienia oszczędności (czyli dla dodatkowych budżetów ujemnych $c_e < 0$) ma rosnąć począwszy od wartości 100%,
- V. dla $c_e > c_{SOP} - c_{plan}$ efektywność ma maleć poniżej 0% (ujemna).

Z powyższych założeń wynika, iż wskaźnik ten jest szczególnym przypadkiem wskaźnika liniowego, opisanego wyżej (w rozdziale 3.1).

Na podstawie powyższych założeń można przedstawić zależność wskaźnika efektywności od przekroczenia budżetu w postaci funkcji liniowej o parametrach a i b :

$$Ef = a \cdot c_e + b \quad (7)$$

Przebieg funkcji wskaźnika $Ef = f(c_e)$ wg poczynionych założeń przedstawiono na wykresie nr 2.



Wykres 2. Zależność liniowa skuteczności od wielkości dodatkowego budżetu c_e

Po uwzględnieniu założeń I-V wzór (7) dla danego dowodu przedłożenia i przyjmie postać:

$$Ef_i = \left(1 - \frac{c_{e_i}}{c_{SOP_i} - c_{p_i}}\right) \cdot 100\% \quad (8)$$

Stosując ww. konwencję można również, nie wchodząc w wyliczenia efektywności dla poszczególnych dowodów jakościowych, wyliczyć globalną efektywność całościowego wykonania danego PPAP wg poniższego wzoru:

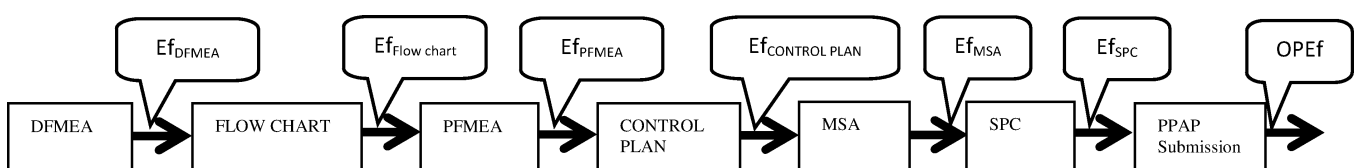
$$Ef_{PPAP} = \left(1 - \frac{c_{ePPAP}}{c_{SOPPPAP} - c_{pPPAP}}\right) \cdot 100\% \quad (9)$$

3.2.1. Przykład zastosowania koncepcji do obliczenia efektywności poszczególnych dowodów jakościowych

Wspomniana wyżej firma branży motoryzacyjnej zakłada niezbędny budżet projektowy uwzględniając w nim koszty przeprowadzenia działań PPAP. Zdefiniowane równocześnie zostają składowe koszty kolejnych dowodów przedłożenia PPAP.

Lider projektu odpowiedzialny za przygotowanie PPAP rozpoczyna działanie PFMEA, którego zakładany budżet miał wynosić 1200 Euro. Jednakże w trakcie opracowywania PFMEA, pojawiły się dodatkowe czynniki procesowe nieujawnione na etapie planowania (budżetowania) kosztów PPAP, wymagające dodatkowych działań. Spowodowało to wydłużenia prac, a tym samym wygenerowanie dodatkowych kosztów w postaci 500 Euro. Znacząc datę startu projektu (produkcji - SOP) wg harmonogramu klienta, firma może wyliczyć także wielkość całego budżetu od momentu rozpoczęcia działań PPAP do momentu SOP u klienta, określając również składowe budżetowe dla kolejnych dowodów przedłożeń. W przypadku PFMEA jest to 6000 Euro. Stąd stosując wzór (9) i uwzględniając:

- $c_e = 500$ EUR,
- $c_p = 1200$ EUR,
- $c_{SOP} = 6000$ EUR,



Rys. 2. Proces zbierania kolejnych dowodów PPAP i wyliczania efektywności poszczególnych dowodów oraz ogólnej efektywności

można obliczyć efektywność wykonania działania PFMEA: $Ef_{PFMEA} = 89,6\%$.
 Efektywność wykonania PFMEA w rozpatrywanym przypadku wynosi 89,6%.

3.2.2. Obliczenie OPEf – ogólnej efektywności PPAP

Po wyznaczeniu efektywności wszystkich dowodów PPAP można wyliczyć wskaźnik OPEf, czyli ogólną efektywność wykonania PPAP (*Overall PPAP Efficency*), będący iloczynem efektywności poszczególnych składowych PPAP:

$$OPEf = Ef_{DFMEA} \cdot Ef_{Flow Chart} \cdot Ef_{PFMEA} \cdot Ef_{Control Plan} \cdot Ef_{MSA} \cdot Ef_{SPC} \quad (10)$$

dającego się zapisać w postaci:

$$OPEf = \prod_{i=1}^n Ef_i \quad (11)$$

gdzie:

n – ostatni wykonywany dowód przedłożenia.

3.3. Wskaźnik efektywności w sensie zgodności z planowanym budżetem - koncepcja nr 3 (nieliniowa)

Założenia dla koncepcji 3:

- I. funkcja ma mieć charakter nieliniowy malejący,
- II. efektywność powinna zależeć od wielkości dodatkowego budżetu przeznaczanego na wykonanie danego działania PPAP (c_e) w stosunku do planowanego budżetu przeznaczanego na realizację danego elementu PPAP – (c_{plan}),
- III. efektywność dla $c_e = 0$ ma wynosić 100%,
- IV. efektywność dla $c_e \rightarrow \infty$ ma asymptotycznie dążyć do 0,
- V. efektywność w przypadku redukcji kosztów (czyli dla wielkości dodatkowego budżetu $c_e < 0$) ma coraz silniej (nieliniowo) rosnać począwszy od wartości 100%.

Na podstawie powyższych założeń można przedstawić zależność wskaźnika efektywności od wielkości dodatkowego budżetu w postaci hiperboli o parametrach a i b :

$$Ef = \frac{a}{c_e + b} \quad (12)$$

Przebieg funkcji wskaźnika $Ef = f(c_e)$ wg poczynionych założeń przedstawiono na wykresie nr 3.

Po uwzględnieniu założeń I-V i wyznaczeniu parametrów a i b , wzór (12) dla danego dowodu przedłożenia i przyjmie postać:

$$Ef_i = \frac{c_{plan_i}}{c_{e_i} + c_{plan_i}} \quad (13)$$

3.3.1. Przykład zastosowania koncepcji do obliczenia skuteczności poszczególnych dowodów jakościowych

Wspomniana wyżej firma branży motoryzacyjnej dla realizowanego projektu określa niezbędny budżet projektowy uwzględniając w nim całkowite koszty wykonania PPAP, równocześnie zdefiniowane zostają również składowe budżety przypadające na każdy dowód przedłożenia. Planowany budżet wykonania Planu Kontroli to 750 Euro. Jednakże w wyniku dłuższego okresu wykonywania tego działania budżet uległ zwiększeniu o 250 Euro.

Stąd stosując wzór (13) i uwzględniając:

$$c_{plan} = 750 \text{ EUR}$$

$$c_e = 250 \text{ EUR}$$

uzyskuje się efektywność wykonania Planu Kontroli:

$$Ef_{Control Plan} = 75\%$$

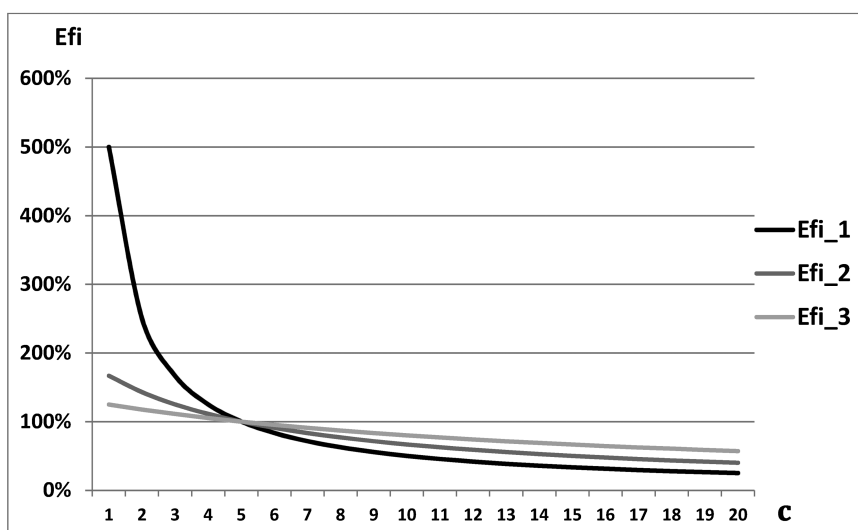
Działanie Planu Kontroli wykonane w ramach realizowanego PPAP wykonane zostało zatem z 75% efektywnością. W analogiczny sposób można przeprowadzić wyliczenia efektywności Ef_i dla wszystkich (i) pozostałych dowodów przedłożeń PPAP, a także dla PPAP jako całości:

$$Ef_{PPAP} = \frac{c_{planPPAP}}{c_{ePPAP} + c_{planPPAP}} \quad (14)$$

gdzie:

c_{ePPAP} – wielkość dodatkowego budżetu przeznaczanego na wykonanie PPAP,

$c_{planPPAP}$ – planowana wielkość budżetu przeznaczanego na wykonanie PPAP.



Wykres 3. Pęk hiperbol przedstawiających zależność efektywności Ef od wielkości dodatkowego budżetu c_e oraz budżetu planowanego c_{plan}

3.3.2. Obliczenie OPEf - ogólnej efektywności PPAP

Po wyznaczeniu efektywności wszystkich dowodów PPAP można wyliczyć wskaźnik OPEf, czyli ogólną efektywność wykonania PPAP (*Overall PPAP Efficiency*), będący iloczynem efektywności poszczególnych składowych PPAP:

$$OPEf = Ef_{DFMEA} \cdot Ef_{Flow Chart} \cdot Ef_{PFMEA} \cdot Ef_{Control Plan} \cdot Ef_{MSA} \cdot Ef_{SPC} \quad (15)$$

czyli:

$$OPEf = \prod_{i=1}^n Ef_i \quad (16)$$

gdzie:

n – ostatni wykonywany dowód przedłożenia.

4.4. Wskaźnik efektywności z wykorzystaniem funkcji strat Taguchi'ego

Praktyka przemysłowa zdaje się wskazywać, iż podstawowym wskaźnikiem jakości procesu jest frakcja wyrobów spełniających określone przedziałem tolerancji wymagania jakościowe. Genichi Taguchi przedstawił nieadekwatność takiego podejścia dla nowoczesnej koncepcji jakości. W swojej słynnej koncepcji *Robust technology development* [10] słusznie twierdzi, iż najlepszą miarą jakości realizacji procesu jest zmienność właściwości, wg której „rozliczamy” proces. Taguchi krytykuje tradycyjne podejście do oceny jakości, w którym istnieje radykalne przejście między wyrobem akceptowalnym (właściwość w przedziale tolerancji) a wyrobem nieakceptowalnym (właściwość poza przedziałem tolerancji). W zamian proponuje ocenę jakości poprzez funkcję strat (*Loss function*), która wynika z koncepcji, iż należy dążyć, aby proces uzyskiwał pożądaną wartość danej właściwości, ponieważ każda odchyłka może generować straty. Taguchi pokazał, iż wartość straty jest proporcjonalna do kwadratu odchyłki właściwości od jej wartości pożądanej (ang. *target characteristics*):

$$L = k \cdot \Delta^2 \quad (17)$$

gdzie:

L – strata,

k – stała (wynikająca ze znanej straty dla danego stopnia niezgodności, czyli odchyłki od wartości pożądanej),

Δ – odchyłka właściwości względem wartości pożądanej.

Warto ponadto zauważyć, iż istnieją istotne, dodatkowe argumenty przemawiające za przyjęciem funkcji strat do oceny jakości procesu. Jeśli rozpatrywana właściwość ma określony (w sposób przekonujący) przedział tolerancji, można jej zmienność opisać wskaźnikami zdolności procesu (np. Pp , Ppk , Cp , Cpk). W przypadku dużej niepewności określenia przedziału tolerancji, wskaźniki zdolności procesu tracą istotnie na znaczeniu. Jeśli natomiast właściwość nie posiada określonego przedziału tolerancji (np. termin wykonania kroku procesu), wskaźników takich nie można określić.

Koncepcja pomiaru efektywności z wykorzystaniem funkcji Taguchi'ego zakłada, że dla każdego etapu procesu PPAP istnieje optymalny termin (czasokres) realizacji, którego niespełnienie w dowolny sposób (przekroczenie lub

przyspieszenie) powoduje ryzyko strat. Straty te wynikać mogą bądź to ze wzrostu ryzyka nieuzyskania zatwierdzenia PPAP (opóźnienie w stosunku do planowanego-optymalnego czasokresu) bądź to, w przypadku krótszej realizacji elementu PPAP (w stosunku czasokresu planowanego-optymalnego) z powodu ryzyka wykonania PPAP w sposób niedostatecznie zapewniający jakość przygotowywanego procesu produkcji.

Założenia omawianej koncepcji przedstawiają się zatem następująco:

- I. wszystkie elementy PPAP mają ustalone optymalne terminy wykonania (optymalne, jak wyżej wspomniano oznaczają, że dany składnik wykonany jest na tyle szybko, aby nie zagrozić projektowi – terminowi przedłożenia PPAP, ale nie na tyle szybko, aby ucierpieła na tym jakość składnika PPAP),
- II. wykonanie danego składnika PPAP po zaplanowanym terminie rodzi różne straty i ryzyko związane z realizacją całości PPAP, trudne do oszacowania,
- III. wykonanie danego składnika PPAP przed terminem rodzi także straty i ryzyko, związane z potencjalnie słabą jakością opracowania danego składnika (patrz: założenie 1),
- IV. potencjalne straty zależą od opóźnienia (t_d) silniej niż liniowo (ryzyka się kumulują) i są tym większe, im termin wykonania składnika PPAP jest bliżej terminu rozpoczęcia produkcji (SOP).

Z powyższych założeń wynika, iż straty dla każdego składnika PPAP mogą być opisane za pomocą funkcji strat Taguchi'ego jako proporcjonalne do kwadratu opóźnienia t_d , przy czym parabola funkcji straty będzie tym bardziej stroma (szybszy wzrost strat), im termin realizacji danego składnika PPAP jest bliższy terminowi SOP.

Biorąc za podstawę powyższe założenia można przedstawić funkcję strat dla danego składnika PPAP

$$L_i = k_i \cdot t_{di}^2 \quad (18)$$

gdzie:

L_i – strata dla danego (i) składnika PPAP,

k_i – współczynnik nachylenia paraboli dla i -tego elementu PPAP,

t_{di} – opóźnienie względem planowego czasu zakończenia opracowywania i -tego elementu PPAP; jest to argument funkcji strat $L_i(t_{di})$.

Z poczynionych założeń I-IV oraz z postaci funkcji strat Taguchi'ego (18) wynikają następujące wartości charakterystyczne funkcji strat:

$$\text{dla } t_{di} = 0 \text{ funkcja strat przyjmuje wartość } L_i = 0 \quad (19)$$

$$\text{dla } t_{di} = t_{SOP} - t_{plan,i} \text{ strata przyjmuje wartość krytyczną } L_i = L_0 \quad (20)$$

Zależność (19) można uzasadnić na podstawie założenia I (tylko optymalny termin realizacji danego składnika PPAP, czyli wg planu, jest satysfakcjonujący z punktu widzenia jego terminowości i jakości wykonania).

Zależność (20) można uzasadnić zauważając, że dla opóźnienia na tyle dużego, że zakończenie wykonywania danego składnika PPAP pokrywa się z terminem rozpoczęcia produkcji, strata przyjmuje wartość krytyczną L_0 , którą można przyjąć na podstawie możliwych strat wynikających z nieprzedłożenia PPAP do dnia wymaganego uruchomienia produkcji seryjnej.

Na podstawie powyższych zależności można wyznaczyć współczynnik k_i (nachylenia paraboli). Po podstawieniu (19) i (20) do (18) współczynnik k_i wynosi:

$$k_i = \frac{L_0}{(t_{SOP} - t_{plan,i})^2} \quad (21)$$

Co daje finalną postać funkcji strat dla i-tego elementu PPAP:

$$L_i = \frac{L_0}{(t_{SOP} - t_{plan,i})^2} \cdot t_{di}^2 \quad (22)$$

Wartość L_0 wymaga arbitralnego przyjęcia wartości możliwych strat wynikających z nieprzedłożenia PPAP do dnia wymaganego uruchomienia produkcji seryjnej. Przykładowe, proponowane koncepcje określenia wartości L_0 przedstawiają się następująco:

- Podjęcie agresywne: za L_0 przyjąć planowany (potencjalnie utracony) zysk z całego projektu (biorąc pod uwagę przewidywany cykl życia projektu).
- Podjęcie zachowawcze: za L_0 przyjąć koszt wykonania całości PPAP (planowany koszt bez uwzględnienia opóźnień).

Dla całego PPAP można zatem oszacować stratę całkowitą, będącą sumą wszystkich strat L_i poszczególnych składników PPAP:

$$L_{PPAP} = \sum L_i \quad (23)$$

by następnie każdą ze strat L_i porównać ze stratą całkowitą L_{PPAP} w celu wyłonienia tych elementów PPAP, które najistotniej wpływają na ryzyko i straty w przygotowaniu nowego projektu, a więc w pierwszej kolejności wymagają działań doskonalących ich sposób realizacji dla kolejnych projektów:

$$\%L_i = \frac{L_i}{L_{PPAP}} \times 100\% \quad (24)$$

4.4.1. Przykład zastosowania koncepcji funkcji strat Taguchi'ego do obliczania efektywności wykonania PPAP

W firmie produkującej metalowe części dla branży motoryzacyjnej kierownik nowego projektu odpowiedzialny za przygotowanie dokumentacji PPAP otwiera działanie PPAP dla realizowanego projektu na 120 dni przed planowanym startem produkcji seryjnej. Wyznacza zakładany czas wykonania poszczególnych działań (elementów PPAP) – t_{plan} . W toku przygotowań kolejnych dowodów nastąpiły jednak opóźnienia (t_d). Wartość t_{SOP} przedstawia liczbę dni od rozpoczęcia danego działania do rozpoczęcia produkcji seryjnej. Tabela 1 zestawia dane dla poszczególnych elementów PPAP: t_{plan} , t_d , t_{SOP} . Dział sprzedaży wspólnie z działem finansowym dokonał estymacji wartości straty krytycznej L_0 , którą firma może ponieść w wyniku nieprzedłożenia PPAP do dnia rozpoczęcia produkcji u klienta (SOP). Biorąc pod uwagę, iż jest to projekt realizowany do nowo pozyskanego, rozwojowego klienta oraz uwzględniając skalę finansową projektu, podjęta zostaje decyzja o zastosowaniu podejścia agresywnego w wyliczeniu wartości strat L_0 . Bazą do wyliczenia wartości L_0 jest planowany potencjalnie utracony zysk z całego 5 letniego życia projektu tj. $L_0 = 7\,000\,000$ EUR. Stąd stosując wzór (21), uwzględniając powyższe założenia, obliczony zostaje współczynnik k_i dla kolejnych dowodów przedłożeń PPAP. Następnie stosując wzór (22) wyliczona zostaje strata dla kolejnych dowodów przedłożeń, suma wszystkich strat daje całkowitą stratę L_{PPAP} . Stosując wzór (24) wyliczony zostaje udział procentowy strat kolejnych elementów procesu PPAP w stratach całkowitych. Na podstawie oszacowania $\%L_i$ w celu wyłonienia tych elementów PPAP, które najistotniej wpływają na ryzyko i straty w przygotowaniu nowego projektu, a więc w pierwszej kolejności wymagają działań doskonalących zastosowano diagram Pareto-Lorenza.

Jak wynika z przeprowadzonej analizy, dla przedstawionego przykładu składnikiem PPAP, który wymaga w pierwszej kolejności podjęcia działań korygujących przed podjęciem kolejnych projektów jest SPC (udział strat stanowiący 82,85% strat związanych z całym PPAP).

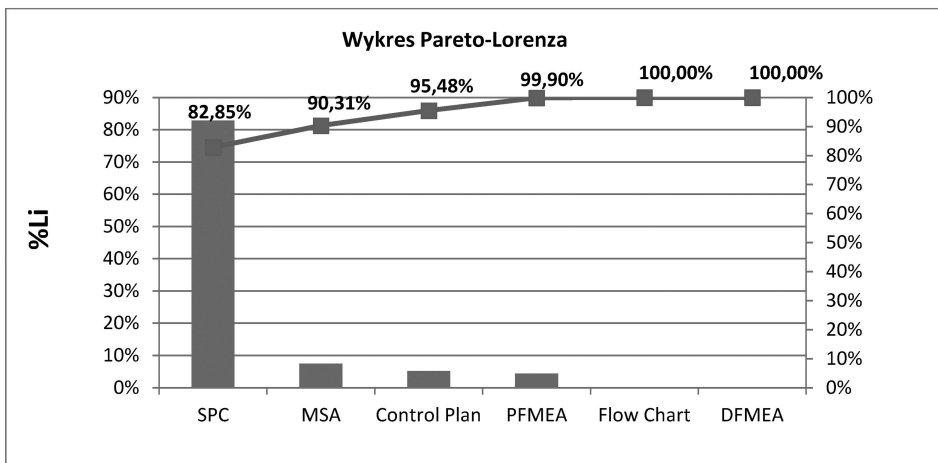
5. Podsumowanie i wnioski

Proces PPAP, aby mógł skutecznie funkcjonować i przynosić zakładane rezultaty, poza jego właściwym zaplanowaniem i realizacją, musi być w monitorowany, aby na bazie wyników pomiaru jego efektywności mogły zostać podjęte

Element PPAP	$t_{plan,i}$ [dni]	t_{di} [dni]	t_{SOPi} [dni]	k_i [$\frac{EUR}{dzieln^2}$]	L_i [EUR]	$\%L_i$ [%]
DFMEA	30	0	120	864	0	0
Flow Chart	5	1	90	969	969	0,1
PFMEA	20	5	85	1 657	41 420	4,41
Control Plan	5	5	65	1 944	48 611	5,18
MSA	10	5	60	2 800	70 000	7,46
SPC	20	10	50	7 777	777 778	82,85

L_{PPAP} Sumaryczna strata [EUR]	938 778
------------------------------------	---------

Tab. 1. Przykład obliczania efektywności



Wykres 4. Udział strat %Li, wynikających z poszczególnych składowych PPAP w analizowanym projekcie

doraźne działania korekcyjne i długoterminowe działania korygujące zmierzające do jego ciągłego doskonalenia. Proces PPAP wpisuje się zatem, tak jak każdy inny proces, w cykl PDCA.

W tabeli 2 zestawione zostały omówione powyżej trzy koncepcje wskaźników efektywności bazujące na planowanym budżecie, w tabeli 3 wskaźnik oceny efektywności bazujący na terminowości realizacji elementów procesu PPAP, wykorzystujący funkcję strat Taguchi'ego.

Przedstawione koncepcje oceny efektywności działań w ramach PPAP pozwalają ocenić efektywność dla poszczególnych dowodów przedłożenia, a dzięki temu zidentyfikować główne źródła strat w PPAP, obliczyć OPEf – ogólną efek-

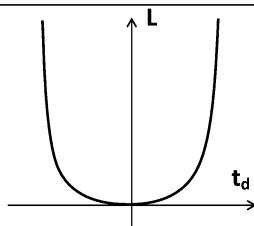
tywność PPAP, jak i obliczyć globalną efektywność działania PPAP, traktując ten proces całościowo;

- przedstawione trzy koncepcje oceny efektywności odnoszą się do zgodności z planowanym budżetem projektowym. Określony zostaje budżet, którego nie można przekroczyć, a jego przekroczenie świadczy o niskiej efektywności prowadzonych działań, nieprzekroczenie budżetu wskazuje na efektywność, tym większą, im większe oszczędności udaje się pozyczyć;

- efektywność ogólna zostaje obliczona jako iloczyn efektywności poszczególnych etapów PPAP, pozwala ona ocenić efektywność całego PPAP z uwzględnieniem efektywności poszczególnych składników,
- efektywność globalną PPAP można także ocenić, traktując PPAP jako proces, bez jego dekompozycji na elementy. Wskaźnik ten mógłby być podstawową informacją nt. efektywności realizacji PPAP dla najwyższego kierownictwa firmy;
- skuteczność wg koncepcji funkcji strat Taguchi'ego opisuje efektywność elementów procesu PPAP zakładając, że jedynie wykonanie ich w zaplanowanych terminach daje efekt zgodny z wymaganiami, czyli brak strat. Narzuca to potrzebę silnego założenia, iż terminy wykonywania poszczególnych elementów procesu PPAP są opracowane optymalnie z punktu widzenia niezagrożenia terminu uruchomienia procesu produkcji i jakości (skuteczności) tegoż uruchomienia. Kompetencje kierownictwa firmy w zakresie umiejętności planowania terminów i zasobów są zatem kluczowym warunkiem sukcesu przy podejmowaniu ryzyka nieodłącznie towarzyszącego nowym projektom wdrażania wyrobów do produkcji. Zaproponowane wskaźniki mogą istotnie pomóc w ocenie skuteczności planowania i realizacji ww. projektów oraz przyczynić się do poprawy kompetencji w tym zakresie.

Lp.	Ef/Ef_{PPAP}	OPEf	Prezentacja graficzna
1	$Ef_i = 100\% \times \left(1 - \frac{c_{e_i}}{c_{eo_i}}\right)$	$OPEf = \prod_{i=1}^n Ef_i$	
	$Ef_{PPAP} = 100\% \times \left(1 - \frac{c_{ePPAP}}{c_{eoPPAP}}\right)$		
2	$Ef_i = \left(1 - \frac{c_{e_i}}{c_{SOP_i} - c_{pl_i}}\right) \times 100\%$		
	$Ef_{PPAP} = \left(1 - \frac{c_{ePPAP}}{c_{SOP_{PPAP}} - c_{pl_{PPAP}}}\right) \times 100\%$		
3	$Ef_i = \frac{c_{plan_i}}{c_{e_i} + c_{plan_i}}$		
	$Ef_{PPAP} = \frac{c_{plan_{PPAP}}}{c_{e_{PPAP}} + c_{plan_{PPAP}}}$		

Tab. 2. Zestawienie porównawcze zaprezentowanych trzech koncepcji wskaźników efektywności

L_i	L_{PPAP}	$\%L_i$	Prezentacja graficzna
$L_i = \frac{L_0}{(t_{SOP} - t_p)^2} \cdot t_{di}^2$	$L_{PPAP} = \sum L_i$	$\%L_i = \frac{L_i}{L_{PPAP}} \cdot 100\%$	

Tab. 3. Wskaźnik oceny efektywności wykorzystujący funkcję strat Taguchi'ego

Literatura:

[1] *Advanced Product Quality Planning and Control Plan APQP*. Reference Manual. 2nd Edition. AIAG 2008.

[2] EN ISO 9001:2008 *Quality management system systems – Requirements*.

[3] Gawlik J.: *Nadzorowanie systemów wytwarzania*. Inżynieria Maszyn, R. 6, z. 2, 2001, s. 102-117.

[4] Gawlik J., Rewilak J., Tokaj T.: *Application of PPAP tools in production preparation management. Innovations in management and production engineering*. Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją. Opole 2012.

[5] Gawlik J., Ryniewicz A., Sioma A.: *Laserowe układy pomiarowe i kamery CCD w systemach oceny maszyn i jakości wyrobów*. „Mechanik” 11/2003, s. 643-647

[6] Gawlik J., Sioma A.: *Zastosowanie systemów wizyjnych w nadzorowaniu procesów wytwarzania*. Konf. Naukowo-techniczna „Postępy w technice wytwarzania maszyn – POSTĘPY 2001”, Kraków 25-26 października 2001, s. 49-58.

[7] ISO/TS 16949:2009 *Quality management systems – Particular requirements for the application of ISO 9001:2008 for automotive production and relevant service part organizations*.

[8] Miller P.: *Systemowe zarządzanie jakością. Koncepcja systemu, ocena systemu, wspomaganie decyzji*. Wydawnictwo Difin. Warszawa 2011.

[9] *Production Part Approval Process (PPAP). Reference Manual*. 4th Edition. AIAG 2006.

[10] Rewilak J., Tokaj T.: *Procedura procesu zatwierdzania części do produkcji (PPAP) jako standard zapewnienia jakości dostawców (SQA) w przedsiębiorstwach produkcyjnych*. „Zarządzanie Przedsiębiorstwem” nr 2/2012.

[11] Rewilak J., Tokaj T.: *Measurement of effectiveness of a new products implementation process according to APQP/ PPAP requirements – proposition of indices*. Management and Production Engineering Review, Volume 3, Number 4, December 2012.

[12] Taguchi G.: *On Robust Technology Development. Bringing Quality Engineering Upstream*. ASME Press Series on International Advances in Design Productivity, New York, 1993, p. 19-30.

[13] Szczepańska K.: *Koszty jakości dla inżynierów*. Wydawnictwo Placet. Warszawa 2009.

NEW EFFICIENCY INDICATORS OF INNOVATIVE PRODUCTS IMPLEMENTATION PROCESS REALIZED ON THE BASIS OF AUTOMOTIVE REQUIREMENTS

Key words:

APQP (Advanced Product Quality Planning), PPAP (Production Part Approval Process), Flow Chart, FMEA, Control Plan, MSA (Measurement System Analysis), SPC (Statistical Process Control), Taguchi's loss function.

Abstract:

One of the requirements of the process approach is to identify the methods and evaluation criteria for process measurement. Efficiency described as the ability to achieve planned results with respect to consumed resources may be a measure used for evaluation of processes. The article presents a few concepts of efficiency indicators that can be used in assessing the activities carried out within the framework of the implementation of new projects, according to standards of automotive industry. These standards are: APQP (Advanced Product Quality Planning) and its integral part, used in the final stage of validation of the product and process, known as PPAP (Production Part Approval Process). The paper proposes three concepts of indicators assessing the efficiency of the above-described process and one concept of calculating the efficiency indicator based on the Taguchi's loss function.

Prof. dr hab. inż. Józef GAWLIK

Institut Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji
Katedra Inżynierii Procesów Produkcyjnych
Politechnika Krakowska
tel.: 12 374 32 46
jgawlik.pk@gmail.com

Dr inż. Jan REWILAK

Institut Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji
Katedra Inżynierii Procesów Produkcyjnych
Politechnika Krakowska
tel.: 12 374 32 83
tekuem@gmail.com

Mgr inż. Tomasz TOKAJ

PPUH Malbox ZPChr
tel.: 664124952
t.tokaj@malbox.pl/
Doktorant WM PK