



POLITECHNIKA LUBELSKA



WYDZIAŁ MECHANICZNY

INSTYTUT TECHNOLOGICZNYCH SYSTEMÓW INFORMACYJNYCH

mgr inż. LECH MAZUREK

**ZWIĘKSZENIE EFEKTYWNOŚCI PRACY
OBRABIAREK WIELOZADANIOWYCH
W ELASTYCZNYCH SYSTEMACH PRODUKCYJNYCH**

ROZPRAWA DOKTORSKA

Promotor:

Dr hab. inż. ANTONI ŚWIĆ

Profesor Politechniki Lubelskiej

Lublin 2010

SPIS TREŚCI

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW	5
WPROWADZENIE	6
1. STAN ZAGADNIENIA I UZASADNIENIE KIERUNKU BADAŃ	9
1.1. Specyfika obróbki otworów na obrabiarkach wielozadaniowych NC	9
1.2. Wymagania odnośnie do elastyczności i wydajności obrabiarek wielozadaniowych NC w elastycznych systemach produkcyjnych	12
1.3. Określenie elastyczności systemów produkcyjnych	16
1.4. Analiza możliwości zwiększenia efektywności pracy obrabiarek wielozadaniowych NC w elastycznych systemach produkcyjnych	27
1.5. Elastyczność i wydajność obrabiarek wielozadaniowych NC	32
1.6. Analiza metod zwiększania efektywności pracy obrabiarek wielozadaniowych NC	37
1.7. Podsumowanie analizy zagadnienia	40
2. TEMAT, CEL I ZAKRES PRACY	43
2.1. Sformułowanie problemu badawczego	43
2.2. Uzasadnienie wyboru tematu	43
2.3. Cel pracy	44
2.4. Tezy naukowe pracy	44
2.5. Zakres pracy	45
3. PODSTAWY TEORETYCZNE ZWIĘKSZENIA EFEKTYWNOŚCI PRACY OBRABIAREK WIELOZADANIOWYCH NC W ELASTYCZNYCH SYSTEMACH PRODUKCYJNYCH	46
3.1. Metodologia modelowania efektywności pracy obrabiarek wielozadaniowych NC w elastycznych systemach produkcyjnych	46
3.2. Model matematyczny procesu przebrojenia obrabiarek wielozadaniowych NC w elastycznych systemach produkcyjnych jako systemach obsługi masowej	50

3.3. Modelowanie analityczne procesu przebrojenia obrabiarek wielozadaniowych NC w elastycznych systemach produkcyjnych	55
3.4. Modelowanie niezawodności synchronicznej elastycznej linii produkcyjnej złożonej z obrabiarek wielozadaniowych NC, zawierającej maszynę technologiczną rezerwową	61
3.4.1. Model matematyczny synchronicznej elastycznej linii produkcyjnej z maszyną technologiczną rezerwową	61
3.4.2. Program obliczania wydajności synchronicznej elastycznej linii produkcyjnej	67
3.4.3. Wyniki obliczeń parametrów niezawodności i wydajności synchronicznej elastycznej linii produkcyjnej	69
3.5. Ustalenie racjonalnej liczby obrabiarek w synchronicznej elastycznej linii produkcyjnej, zawierającej maszynę technologiczną rezerwową	72
3.6. Wnioski	78
4. KLASYFIKACJA OTWORÓW W CZĘŚCIACH KLASY KORPUS	79
4.1. Kodowanie otworów w częściach klasy korpus	79
4.2. Algorytm typizacji i unifikacji otworów	81
4.3. Wnioski	83
5. METODY TECHNOLOGICZNE I KONSTRUKCYJNE ZWIĘKSZENIA EFEKTYWNOŚCI PRACY OBRABIAREK WIELOZADANIOWYCH NC W ELASTYCZNYCH SYSTEMACH PRODUKCYJNYCH	84
5.1. Klasyfikacja metod zwiększenia efektywności pracy obrabiarek wielozadaniowych NC	84
5.2. Metody technologiczne zwiększenia efektywności pracy obrabiarek wielozadaniowych NC	87
5.2.1. Nastawienie obrabiarki wielozadaniowej NC od programu sterującego położeniem elementu ustalającego część obrabianą	88
5.2.2. Nastawienie obrabiarki wielozadaniowej NC względem bazy pomiarowej, zmiennej w układzie współrzędnych obrabiarki	90
5.2.3. Nastawienie obrabiarki wielozadaniowej NC względem bazy „pływającej” części obrabianej	94

5.3. Metody konstrukcyjne zwiększenia efektywności pracy obrabiarek wielozadaniowych NC w elastycznych systemach produkcyjnych	98
5.3.1. Ustawianie części obrabianych względem dolnej płaszczyzny rowka teowego płyty mocującej	98
5.3.2. Ustawianie części obrabianych względem górnej płaszczyzny rowka teowego płyty mocującej	102
5.3.3. Mocowanie narzędzi względem bazy „pływającej” części obrabianej	106
5.3.4. Przyrząd do zautomatyzowanego mocowania narzędzi obrotowych z regulacją ich wysunięcia	108
5.3.5. Zautomatyzowana zmiana narzędzi na obrabiarce wielozadaniowej NC	115
5.4. Wnioski	120
6. REALIZACJA METOD TECHNOLOGICZNYCH I KONSTRUKCYJNYCH ZWIĘKSZENIA EFEKTYWNOŚCI PRACY OBRABIAREK WIELOZADANIOWYCH NC W ELASTYCZNYCH SYSTEMACH PRODUKCYJNYCH	122
6.1. Dziedziny efektywnego zastosowania metod technologicznych i konstrukcyjnych zwiększenia wydajności obrabiarek wielozadaniowych NC w elastycznych systemach produkcyjnych	122
6.2. Wnioski	124
WNIOSKI	125
LITERATURA	127
STRESZCZENIE	136
ABSTRACT	137
АННОТАЦИЯ	138
ZAŁĄCZNIKI	139

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

- NC** – obrabiarki sterowane numerycznie (*numerical control*) (w rozprawie oznaczenie to obejmuje także obrabiarki CNC (*computerized numerical control*), czyli sterowane numerycznie przy użyciu komputera,
- APF** – algorytm powiększenia fazowego,
- ELP** – elastyczna linia produkcyjna,
- ESP** – elastyczny system produkcyjny,
- EZLM** – elastyczna zautomatyzowana linia montażu,
- MT** – maszyna technologiczna,
- MTR** – maszyna technologiczna rezerwowa,
- PS** – przyrząd specjalny,
- PZSP** – przetwarzany zautomatyzowany system produkcyjny,
- SELP** – synchroniczna elastyczna linia produkcyjna,
- SOM** – system obsługi masowej,
- ZSO** – zautomatyzowany system obróbkowy,
- ZSP** – zautomatyzowany system produkcyjny,
- λ – intensywność strumieni uszkodzeń, a także intensywność strumieni zapotrzebowań,
- μ – intensywność strumieni przywracania zdolności do pracy, a także intensywność strumieni obsługi,
- t** – czas obsługi.

WPROWADZENIE

Obrabiarki wielozadaniowe NC należą do grupy najnowocześniejszych i są projektowane głównie jako centra obróbkowe. Konstrukcje tego typu powstały w wyniku zapotrzebowania na obróbkę z wykorzystaniem kilku osi numerycznych sterowanych jednocześnie i osiągania bardzo wysokiej dokładności części obrabianych.

Sprawdzają się one znakomicie w kompleksowej obróbce części klasy korpus, ponieważ często można je obrobić w jednym zamocowaniu, eliminując błędy spowodowane wielokrotną zmianą położenia, a przy tym uzyskać wysoką dokładność obróbki elementów.

Obrabiarki wielozadaniowe posiadają dużą elastyczność i umożliwiają uzyskanie wysokiej wydajności obróbki. Dzięki swej uniwersalności i elastyczności, są bardzo efektywne w produkcji seryjnej.

Umożliwiają rozwiązanie dwóch istotnych problemów, a mianowicie:

- zwiększenie wydajności i elastyczności systemów produkcyjnych,
- ułatwienie integracji oprzyrządowania.

Jest to ściśle związane z obniżeniem kosztów wytwarzania.

Pomimo oczywistych zalet obrabiarek wielozadaniowych, nadal występuje problem zbyt skomplikowanego ich przezbrajania, przygotowania konstrukcyjnego oraz technologicznego narzędzi i przyrządów, a także nastawiania samych obrabiarek, szczególnie w zakresie produkcji małoseryjnej i jednostkowej.

Jednym z bardzo ważnych zagadnień, gdzie powyższe problemy pozostały nierozwiązane, jest obróbka otworów w częściach klasy korpus, obecnie wykonywana głównie na obrabiarkach wielozadaniowych.

W tego rodzaju częściach obrabianych występują otwory o różnych kształtach (jedno- i wielostopniowe, walcowe i stożkowe) oraz wymiarach (od kilku do kilkuset mm).

Wymaga to zastosowania w procesie technologicznym różnych rodzajów obróbki ubytkowej. Najczęściej otwory w korpusach wykonuje się poprzez wiercenie, gwintowanie oraz wytaczanie.

Tak duża różnorodność sposobów wykonywania otworów w częściach klasy korpus wymaga stosowania wielu rodzajów narzędzi skrawających. Można jednak zauważyć, że większość narzędzi, stosowanych w tych rodzajach obróbki, to narzędzia obrotowe, co nie zostało dotąd wykorzystane w celu skrócenia czasów przezbrojenia obrabiarek wielozadaniowych.

Obróbka otworów w korpusach uwarunkowana jest między innymi:

- tolerancjami wymiarów średnic,
- odchyłkami kształtu i położenia,
- tolerancjami odległości osi otworów od płaszczyzn bazowych lub osi innych otworów,
- dokładnością i chropowatością powierzchni.

Wymagania w zakresie dokładności wykonania otworów w korpusach powodują konieczność zwiększenia ilości operacji lub zabiegów, co z kolei wymusza zastosowanie większej liczby narzędzi. Wynikająca z tego duża złożoność procesu technologicznego wpływa na zwiększenie czasu, a więc i kosztów wykonania części.

Obrabiarki wielozadaniowe NC często są elementami elastycznych systemów wytwórczych. Wymusza to poszukiwanie nowych metod zwiększenia efektywności pracy obrabiarek wielozadaniowych NC, pracujących autonomicznie oraz w elastycznych systemach wytwarzania różnego typu.

W związku z tym, ważnym problemem jest zwiększenie efektywności pracy obrabiarek wielozadaniowych NC w elastycznych systemach produkcyjnych w wyniku:

- określenia racjonalnej ilości obrabiarek w systemie produkcyjnym,
- zastosowania maszyny technologicznej rezerwowej w celu podwyższenia niezawodności pracy linii,
- opracowania metod technologicznych i konstrukcyjnych umożliwiających: skrócenie czasów ustawienia i regulacji narzędzi oraz automatyzację ich wymiany, zmniejszenie czasów przebrojenia obrabiarek wielozadaniowych NC w wyniku usprawnienia ustawienia i zamocowania części obrabianych.

W rozdziale 1 pokazano specyfikę obróbki otworów na obrabiarkach wielozadaniowych NC, wymagania odnośnie do elastyczności i wydajności tych obrabiarek, możliwość zwiększenia efektywności ich pracy w przypadku, kiedy pracują autonomicznie oraz kiedy są elementami elastycznych systemów wytwarzania.

Rozdział 2 zawiera sformułowanie problemu badawczego, uzasadnienie wyboru tematu oraz cel, tezy i zakres pracy.

W rozdziale 3 przedstawiono podstawy teoretyczne zwiększenia efektywności pracy obrabiarek wielozadaniowych NC w elastycznych systemach produkcyjnych, umożliwiające określenie racjonalnej ilości obrabiarek w systemie produkcyjnym oraz niezawodności i wydajności przy wprowadzeniu maszyny technologicznej rezerwowej.

Rozdział 4 zawiera opracowaną klasyfikację otworów w częściach klasy korpus.

W rozdziale 5 zaprezentowano opracowane metody technologiczne i konstrukcyjne, zwiększające efektywność pracy obrabiarek wielozadaniowych NC w elastycznych systemach produkcyjnych.

W rozdziale 6 pokazano możliwości zastosowania opracowanych metod technologicznych i konstrukcyjnych w przedsiębiorstwach przemysłowych.

1. STAN ZAGADNIENIA I UZASADNIENIE KIERUNKU BADAŃ

Przedstawiono analizę literatury w zakresie sformułowanego problemu badawczego, dotyczącą zwiększenia wydajności i niezawodności obrabiarek wielozadaniowych NC, wpływu intensywności uszkodzeń i strumieni przywrócenia zdolności do pracy na ich niezawodność oraz wpływu zastosowania maszyny technologicznej rezerwowej na zwiększenie wydajności i niezawodności elastycznej linii produkcyjnej.

1.1. Specyfika obróbki otworów na obrabiarkach wielozadaniowych NC

Otwory w częściach klasy korpus dzielą się na główne (do ustalenia położenia innych części w korpusie) oraz mocujące (do łączenia innych części z korpusem za pomocą śrub i kołków oraz ułatwienia bazowania, obróbki jak również montażu). Wymiary średnic otworów głównych wahają się w zakresie od 16 do 50 mm i zależą głównie od rodzaju części.

Średnice otworów w korpusach obrabiarek mają wymiary, mieszczące się najczęściej w zakresie od 20 do 180 mm, natomiast w przypadku:

- korpusów samochodów wynoszą od 30 do 200 mm,
- korpusów dźwigów wynoszą od 40 do 320 mm,
- korpusów przyrządów wynoszą od 16 do 60 mm.

Ilość występujących w korpusach otworów głównych, w zależności od średnicy, pokazano w tab.1.1. Zdecydowana większość z nich, bo około 80%, to otwory gładkie [9].

Tab. 1.1. Liczba otworów głównych występujących w korpusach

Korpusy	Ilość otworów [%] przy zakresach średnic [mm]					
	do 20	20 – 40	40 – 60	60 – 80	80 – 120	pow. 120
Obrabiarek	4	24	46	18	5	3
Dźwigów	-	5	12	26	38	19
Samochodów	2	8	13	42	29	6
Przyrządów	28	45	15	12	-	-

W częściach klasy korpus jest duża ilość otworów pomocniczych, służących do połączeń [65]. Liczbę występujących w korpusach otworów mocujących, w zależności od średnicy, przedstawiono w tab. 1.2.

Tab. 1.2. Liczba otworów mocujących występujących w korpusach

Średnica otworu [mm]	3 – 6	6 – 10	10 – 16	16 – 20	10 – 25
Ilość otworów mocujących [%]	6	30	58	4	2

Analiza wymiarów i kształtów otworów głównych oraz mocujących wykazuje, że z każdej strony korpusu występuje po kilka jednakowych otworów, których procesy obróbki są takie same. Otwory te tworzą grupy otworów. Na jednej ścianie korpusu jest najczęściej kilka grup otworów. Mogą one powtórzyć się na innych ściankach, ale występują tam także nowe grupy. Jednakowe otwory na wszystkich ściankach tworzą swoją grupę otworów. Każda część klasy korpus posiada kilka grup otworów. Im mniej jest tych grup, tym mniej narzędzi jest potrzebnych do ich obróbki.

Wykonanie otworów w jednym zamocowaniu wymaga ustawienia narzędzi skrawających w różnych pozycjach, i tak: 42% części klasy korpus wymaga obróbki w płaszczyznach poziomych, 43% części - w płaszczyznach pionowych, 15% części - w płaszczyznach skośnych [65].

Liczbę części obrabianych, w zależności od dokładności wymiarów odległości osi otworów od płaszczyzn bazowych, charakteryzują dane w tab. 1.3 [65].

Tab. 1.3. Liczba części obrabianych w zależności od dokładności wymiarów odległości osi otworów od płaszczyzn bazowych

Dokładność wymiarów odległości osi otworów od płaszczyzn bazowych [mm]	do 0,02	0,02 – 0,05	0,05 – 0,1	pow. 0,1
Liczba części obrabianych [%]	6	14	31	49

Około 10% otworów głównych korpusów obrabiarek wykonywanych jest w 5 klasie dokładności, 50% - w 6 klasie dokładności, około 30% - w 8 i 9 klasie dokładności, a 10% - powyżej 9 klasy dokładności [65].

Natomiast w korpusach dźwigów około 5% otworów wykonywanych jest w 6 klasie dokładności, 15% - w 7 klasie dokładności, ponad 50% - w 8, 9 klasie dokładności, 25% - w 10 klasie, pozostałe - w 11, 12 klasie dokładności [65].

Liczbę otworów w częściach klasy korpus, w zależności od dokładności ich wykonania, pokazano w tab. 1.4.

W rozpatrywanych korpusach, błędy odległości międzyosiowych zawierają się w przedziale od 0,01 do 0,2 mm [65].

W przypadku korpusów skrzynek prędkości o $v > 15$ m/s, błędy odległości międzyosiowej powinny zawierać się w przedziale 0,01-0,025 mm, korpusów przekładni kinematycznych (we frezarkach do kół zębatach i wpustów, szlifierkach do kół zębatach i gwintów) - w przedziale 0,03-0,1 mm. Korpusy ciągników i dźwigów charakteryzują się niedokładnością odległości międzyosiowych większą od 0,1 mm.

Tab. 1.4. Liczba otworów w częściach klasy korpus w zależności od dokładności ich wykonania

Klasa dokładności otworów	5	6	8; 9	11
Ilość otworów [%]	6	35	45	14

Liczbę części obrabianych wyrażoną w procentach, w zależności od wielkości pola tolerancji, charakteryzuje zestawienie w tab. 1.5.

Tab. 1.5. Liczba części obrabianych w zależności od tolerancji odległości międzyosiowych w przypadku części klasy korpus

Tolerancje odległości osi otworów [mm]	0,01	0,02 – 0,09	0,1
Liczba części obrabianych [%]	12	30	58

Tolerancje odległości międzyosiowych otworów mocujących, a także dopuszczalne odchyłki ich średnic na większości rysunków nie są pokazywane. Na niektórych rysunkach ograniczone są wielkościami 0,2-0,5 mm.

Podczas obróbki korpusów dużo czasu zajmują prace związane z obróbką otworów, zawierających powierzchnie elementarne cylindryczne i stożkowe, stanowiące do 80% wszystkich typowych powierzchni części obrabianej [35, 76, 80]. Klasyfikacja otworów według wyróżników konstrukcyjnych i technologicznych umożliwia sformalizowanie schematów ich obróbki przy zastosowaniu komputera, a także znacząco skraca czas tego etapu technologicznego przygotowania produkcji. Podstawowym warunkiem formalizacji jest jednoznaczna zależność między kształtem, wymiarami i wymaganiami technicznymi elementarnej powierzchni części z jednej strony, a rozwiązaniami technologicznymi - z drugiej.

Znany jest klasyfikator otworów, zbudowany przy uwzględnieniu wyróżników konstrukcyjnych i technologicznych, w którym każdemu typowi otworów odpowiada własny schemat technologiczny obróbki [34]. Podjęto w nim próbę uogólnienia wyróżników klasyfikacji otworów, w wyniku podziału ich na główne (przelotowe i nieprzelotowe) oraz dodatkowe typowe elementy, które z kolei dzielą się na typy. Wadą takiej klasyfikacji jest ograniczona możliwość uogólnienia wyróżników klasyfikacji w zakresie otworów jednostopniowych. Otwory wielostopniowe, składające się z kilku typowych elementów (głównych i dodatkowych), nie posiadają ogólnych wyróżników klasyfikacji i są możliwymi kombinacjami elementów konstrukcyjnych otworów o ograniczonym zakresie zastosowania.

Klasyfikację otworów, przeznaczonych do typizacji ich procesów technologicznych przedstawiono także w pracy [88]. W tym przypadku otwory podzielono na podklasy, grupy i podgrupy, uwzględniające głównie ich specyfikę konstrukcyjną. Do typowych otworów

przypisane są kody liczbowe, które nie posiadają znaczeniowej wartości. W związku z tym, do identyfikacji otworów należy mieć przed sobą klasyfikator z ich geometrycznym przedstawieniem.

Przeanalizowano 990 otworów 30 części korpusowych trzech wyrobów przemysłu elektronicznego. Rozkład ilości otworów według średnic pokazuje, że 70% stanowią otwory o średnicach w zakresie od 2,5 do 5 mm. Porównywalnie proste otwory, posiadające nie więcej niż dwa stopnie, określają specyfikę konstrukcji części stosowanych w wyrobach przemysłu elektronicznego [88].

1.2. Wymagania odnośnie do elastyczności i wydajności obrabiarek wielozadaniowych NC w elastycznych systemach produkcyjnych

Historia rozwoju podstawowych metod organizacji produkcji pokazuje, że w pierwszym etapie [4, 34, 35, 58, 59, 88] głównym zadaniem było zwiększenie produkcji i poszerzenie ograniczonego dotąd asortymentu wyrobów przy obniżeniu nakładów jednostkowych, ponoszonych na ich wytwarzanie.

Skutkowało to nowym podziałem pracy w warunkach wąskiej specjalizacji pracowników, którzy przy wielokrotnym wykonaniu jednego typu operacji, nie musieli posiadać wysokich kwalifikacji. Odpowiedzią na powstałą potrzebę wyeliminowania rutynowej pracy i zwiększenia wydajności stały się obrabiarki uniwersalne, specjalizowane i specjalne, szczególnie półautomaty oraz automaty [12]. Następstwem tego było z kolei zastosowanie obrabiarek zespołowych i linii budowanych z tych obrabiarek. Zakończył się pierwszy etap rozwoju, pojawiły się kompleksowe automatyczne linie produkcyjne i zautomatyzowane zakłady produkcji masowej, które spowodowały znaczne zwiększenie wydajności pracy (od 5 do 10%) oraz obniżenie kosztów własnych od 30 do 50 % [9].

„Sztywna” automatyzacja jest sprzeczna z wymaganiami postępu naukowo-technicznego, czyli tendencjami do częstej zmiany wyrobów. W pewnych przypadkach jest jednak wariantem najodpowiedniejszym (produkcja łożysk, tłoków silników spalinowych) [6].

Rozwiązanie tej sprzeczności doprowadziło do nowego jakościowego skoku w rozwoju form organizacji produkcji na bazie rozszerzenia możliwości urządzeń, przy zachowaniu wysokich wskaźników jakości i wydajności oraz podwyższeniu ich mobilności.

Koncepcja produkcji elastycznej i zautomatyzowanej spowodowała jakościowy skok w rozwoju automatyzacji procesów technologicznych w budowie maszyn i innych branżach pokrewnych.

Wydajność maszyn technologicznych mierzona jest ilością dobrej jakościowo produkcji, wykonanej w jednostce czasu [93, 106]. Ocena i analiza wydajności są niezbędne w początkowych i końcowych stadiach projektowania oraz w trakcie eksploatacji systemów produkcyjnych.

W pierwszym przypadku, przy analizie zadania technicznego i możliwych decyzji projektowych, kryterium oczekiwanej wydajności jest jednym z najważniejszych przy wyborze wariantu optymalnego. W drugim wypadku, kiedy już określono proces technologiczny, zaprojektowano schemat systemu produkcyjnego, a także opracowano konstrukcje mechanizmów, niezbędne jest prognozowanie uściślonych charakterystyk pracy i porównanie ich z zadanymi. Na etapie uruchomienia procesu produkcyjnego konieczna jest ocena rzeczywistej zdolności systemu do realizacji produkcji o wymaganych wskaźnikach jakości oraz niezbędnej ilości w określonym czasie. Wydajność w tym przypadku jest obliczana na podstawie wyników prób zdawczo-odbiorczych. W okresie eksploatacji, podstawowym zadaniem staje się ocena rezerw czasowych, wynikająca z podwyższenia wydajności.

W warunkach produkcji seryjnej, a zwłaszcza małoseryjnej, znaczną część cyklu produkcyjnego stanowi nie czas maszynowy, a inne jego składowe: czas odbudowy podsystemów i elementów po awariach funkcjonalnych i parametrycznych, sumaryczny czas przebrożeń, czas oczekiwania na półfabrykaty oraz czas transportu. Dlatego możliwość optymalizacji procesów technologicznych obróbki lub montażu nie jest decydującym czynnikiem podwyższenia efektywności. Ważniejszym środkiem, zmierzającym do podwyższenia ich efektywności, staje się zastosowanie rezerwowania czasowego i sprzętowego oraz technologii grupowej, zawierającej metody typizacji procesów technologicznych i metody opracowania grupowych procesów technologicznych [17].

Zmniejszenie nakładów umożliwia wykorzystanie tego samego wyposażenia technologicznego, a zwiększenie wydajności systemu - zastosowanie grupowych procesów technologicznych do jednej grupy wyrobów, co jest równoznaczne ze zwiększeniem wielkości serii produkcyjnej.

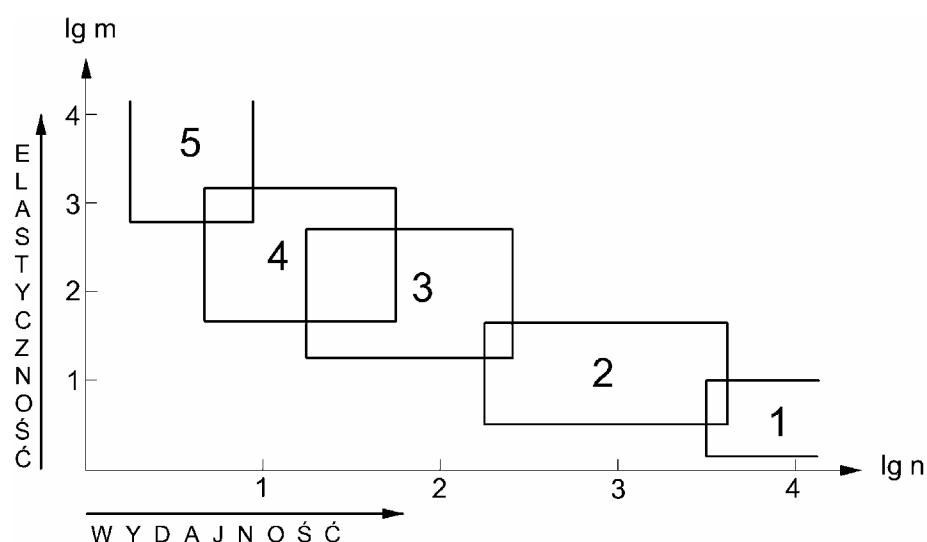
Ważne są także inne środki zwiększenia efektywności pracy:

- podwyższenie współczynnika wszechstronności poszczególnych zespołów i podsystemów,
- zastosowanie przy budowie systemu produkcyjnego zasady modułowości oraz automatycznie przebrajanego wyposażenia [15],
- automatyzacja operacji kontroli.

Działania, ukierunkowane na podwyższenie stopnia elastyczności i niezawodności systemu, wymagają zainwestowania pewnych środków. Dlatego, na bazie opisu matematycznego, uwzględniającego specyfikę warunków pracy systemu produkcyjnego, celowa jest wcześniejsza ocena efektywności ich wykorzystania, a także ujawnienie rezerw systemu, które pozwoliłyby, bez dodatkowego inwestowania środków, podwyższyć wydajność, a więc i efektywność.

Wydajność jest ściśle związana z elastycznością systemów produkcyjnych.

Wzajemny związek elastyczności i wydajności pokazano na rys. 1.1, na którym przyjęta została skala logarytmiczna, gdzie: **n** – roczna wielkość produkcji,
m – asortyment produkcji [97].



Rys. 1.1. Zależność typu produkcji od asortymentu i wydajności

Strefy 1-5 odpowiadają efektywnemu zastosowaniu różnych form organizacji produkcji zautomatyzowanej.

Strefa 1 – to automatyczne linie potokowe i maszyny-automaty, stosowane w produkcji masowej. Charakteryzują się one niezwykle małą elastycznością i wysoką wydajnością środków produkcji, przeznaczonych do wytwarzania produkcji powtarzalnej, mogącej różnić się tylko wymiarami.

Strefa 5 – w przeciwieństwie do strefy 1, to produkcja jednostkowa i eksperymentalna, kiedy stosowane są różne rodzaje urządzeń sterowanych numerycznie do pracy w warunkach częstej zmiany asortymentu. W przypadku takiej produkcji zautomatyzowanej występuje wysoka elastyczność i niska wydajność.

Typowe zautomatyzowane elastyczne systemy produkcyjne zajmują położenie w strefach 2-4 i wykazują zalety produkcji masowej (wysoka wydajność) oraz jednostkowej (duża elastyczność) w warunkach produkcji mało- (4), średnio- (3) i wielkoseryjnej (2). Sąsiednie strefy zachodzą na siebie (rys. 1.1), co oznacza, że nie można określić wyraźnych granic między zakresami racjonalnych zastosowań różnych form automatyzacji.

Strefy 4 i 5 odpowiadają warunkom produkcji małoseryjnej, gdzie najważniejszym funkcjonalnym związkiem systemu produkcyjnego z otoczeniem, (także projektowanym systemem produkcyjnym wyższego poziomu hierarchicznego oraz integralną charakterystyką zakresu technicznych możliwości wyposażenia) jest asortyment części obrabianych i możliwe granice jego zmiany.

Dominującą składową elastyczności w przedstawionych warunkach jest przezbrajalność systemu. Każdy ustalony stan przezbrajanego zautomatyzowanego systemu produkcyjnego (PZSP), to odpowiedź na napływające funkcjonalne zapotrzebowania przy zmianie asortymentu części obrabianych [91]. Momenty przejścia z jednego stanu ustalonego w inny odpowiadają przebrojeniom, które w wariancie idealnym, przy minimalnych nakładach czasowych i materialnych, wprowadzają system w nowy stan. W tym sensie proces przebrojenia można rozpatrywać jako proces przejściowy, występujący na przemian ze stacjonarnymi procesami pracy przy obróbce określonego rodzaju części.

Rozmieszczenie stref 4 i 5 na rysunku odzwierciedla miejsce przezbrajanych systemów w kompleksowej automatyzacji (bez ilustracji potencjalnych możliwości tych systemów), o maksymalnym, w porównaniu z innymi, stopniu elastyczności, przy niskiej wydajności. Charakterystyka ta jest w dużym stopniu umowna, otrzymana przy założeniu, że rozpatrywany czas jest dość długi, a przebrojenie ma w nim znaczny udział. Jeśli ten czas zostanie podzielony na niewielkie odcinki, kiedy system pracuje w trybie ustalonym przy określonym rodzaju wyrobów, to wydajność będzie porównywalna z wydajnością systemów „sztywnych”. Rezerwą, umożliwiającą podwyższenie średniej wydajności i efektywności wykorzystania PZSP, jest minimalizacja czasu przebrojeń i przestojów spowodowanych awariami. Czynnikiem losowości, występujący w przypadku produkcji wieloasortymentowej, charakteryzujący się tym, że wszystkie zasoby systemu (materialne, techniczne, informacyjne i energetyczne) są wykorzystywane na żądanie, w odpowiedzi na pojawiające się stochastyczne zapotrzebowania na obróbkę tej albo innej części rozpatrywanej klasy, znacznie komplikuje rozwiązanie zagadnienia unowocześnienia PZSP, ponieważ model matematyczny, odzwierciedlający opis pracy systemu jest bardziej złożony.

1.3. Określenie elastyczności systemów produkcyjnych

Elastyczność jest pojęciem złożonym, zawierającym całościowo wzajemnie powiązane składowe. W pracach [53, 77, 85, 91], podjęto próby wypracowania podejścia do analizy i oceny właściwości elastycznych systemów produkcyjnych.

Określenia pojęcia elastyczności w porządku chronologicznym przytoczono w tab. 1.6.

Tab. 1.6. Określenia pojęcia elastyczności

L.p.	Określenie elastyczności	Źródło
1	2	3
1	Elastyczność – właściwość przystosowywania wyposażenia do obróbki różnych części. Powinna być ekonomicznie uzasadniona i sprzyjać wysokiej wydajności, jakości produkcji oraz wygodzie obsługi przy wysokim stopniu automatyzacji.	[86]
2	Elastyczność systemu obróbki mechanicznej – zdolność odtwarzania szerokiego zakresu charakterystyk części przy ograniczonych nakładach na przebrojenie i przystosowywanie się do przypadkowych zmian warunków produkcji.	[77]
3	Elastyczność produkcji charakteryzuje się możliwością szybkiego odtworzenia ogólnej ilości informacji, koniecznych do zmian w produkcji, aby z materiałów wyjściowych otrzymać gotowy wyrób.	[53]
4	Elastyczność – możliwość szybkiego przejścia do obróbki każdej części w granicach technicznych możliwości wyposażenia.	[11]
5	Elastyczność rozumiana jest jako zdolność adaptacji zautomatyzowanego systemu obróbkowego (ZSO) do zmiany asortymentu części i różnych sytuacji produkcyjnych.	[91]
6	Elastyczność to zdolność systemu technologicznego do zachowania niezbędnych charakterystyk i parametrów roboczych przy zmianie w ustalonych granicach celów i zadań obróbki, pod warunkiem, że będą one osiągalne poprzez zmianę struktury, organizacji i programu działania systemu.	[79]
7	System produkcyjny powinien charakteryzować się elastycznością, czyli możliwością przejścia, przy minimalnych nakładach środków i stratach czasu, na produkcję przy zmieniających się warunkach.	[103]
8	Elastyczność jest charakterystyką produkcji, odzwierciedlającą możliwość zmiany produkcji przy minimalnych nakładach (w szczególności automatycznie) na określony rodzaj części.	[16]
9	Elastyczność PZSP – zdolność sprawnej zmiany produkcji z jednego rodzaju na inny, w wyniku samoregulacji (PZSP zapewnia wykonanie nowej produkcji po upływie czasu, potrzebnego na automatyczną zmianę produkcji). Najważniejszymi komponentami tego pojęcia są asortyment i wielkość serii produkcyjnej, a także czas i pracochłonność zmiany produkcji.	[31]
10	Elastyczność ZSO – właściwość zautomatyzowanego systemu obróbkowego, charakteryzowana szybkością jego adaptacji (w produkcji ciągłej - przebrojenie) do wyprodukowania części innego rodzaju.	[57]
11	Elastyczność – zdolność systemu produkcyjnego do przechodzenia, w ustalonych granicach możliwości technicznych, z jednego funkcjonalnego stanu pracy w inny w celu wykonania kolejnego zadania produkcyjnego albo nowej czynności.	[85]
12	Elastyczność charakteryzuje mobilność produkcji przy zmianie produkowanych części.	[14]
13	Elastyczność charakteryzuje odporność systemu na oddziaływanie różnych zmieniających się warunków funkcjonowania (zmienność programu produkcyjnego, środowiska, surowca, wyposażenia technologicznego).	[1]

Tab. 1.6. Określenia pojęcia elastyczności (c.d.)

1	2	3
14	Elastyczność zapewnia przejście systemu z jednego stanu ustalonego w inny, w zależności od środków produkcji.	[5]
15	Elastyczność charakteryzuje zdolność przystosowania do oddziaływań dynamicznych i stochastycznych, związanych z programem produkcyjnym. System jest elastyczny, jeśli przy zmianie programu produkcyjnego nie zmienia się jego struktura.	[94] [101]
16	Elastyczność jest bezpośrednio związana z obniżeniem wydajności, wzrostem kosztów wyrobu finalnego i złożonością automatyzacji.	[31] [56]
17	Elastyczność – zdolność przystosowania zautomatyzowanej produkcji do dynamicznych i stochastycznych zmian, związanych z procesem produkcyjnym. System jest elastycznie i szybko przebudowywany bez istotnych nakładów, przy tym nie zmienia się liczba i rodzaj jego elementów oraz związków między nimi.	[4]
18	Elastyczność systemu produkcyjnego posiada dwie cechy: wszechstronność (charakterystyka jakościowa, związana z rodzajem operacji, możliwych do wykonania w systemie produkcyjnym) i mobilność (charakterystyka ilościowa, która w granicach tych operacji określa elastyczność systemu).	[108]
19	Elastyczność – właściwość celowej zmiany technologicznych możliwości ESP w granicach dopuszczalnego zakresu zmian regulacyjnych (nastawianych na nowo parametrów) elastycznego systemu produkcyjnego poprzez jego przebudowę (przebrojenie) zgodnie z potrzebami produkcji, przy minimalnych czasach i nakładach na to przebrojenie.	[3]
20	Elastyczność – to zdolność ESP do zapewnienia efektywnego wykonania w trybie automatycznym ustalonych funkcji w warunkach częstej zmiany charakterystyk wejściowych i wyjściowych obiektów produkcji, składu, struktury i algorytmu funkcjonowania wzajemnie powiązanego z ESP środowiska produkcji, a także przy zakłóceniach w pracy.	[7]
21	Elastyczność rozumiana jest jako właściwość systemu produkcyjnego do przechodzenia, w granicach ustalonych możliwości technicznych wyposażenia, z jednego funkcjonalnego stanu pracy w inny, w celu wykonania kolejnego zadania produkcyjnego albo nowej funkcji.	[34]
22	Integralnie elastyczność można określić jako zdolność przystosowania zautomatyzowanej produkcji do zmian dynamicznych i stochastycznych, związanych z procesem produkcyjnym (sterującym oddziaływaniem), a także z zakłóceniami zewnętrznymi i wewnętrznymi.	[99]

Analogicznie, w pracy [85], przeprowadzono analizę semantyczną, sformułowanego na chwilę obecną, pojęcia elastyczności. Jej celem jest określenie treści i składu strukturalnego tego pojęcia.

Podstawę analizy semantycznej stanowią logiczne procedury specjalizacji i uogólnienia, które pozwalają wyodrębnić ogólne, w przypadku wszystkich określeń, elementy strukturalne.

Określenia elastyczności systemów produkcyjnych, przytoczone w tab. 1.6, zostały przeanalizowane z wykorzystaniem logicznych operatorów specjalizacji **O** (do określenia składu strukturalnego) i uogólnienia **U** (do uogólnienia podstawowych elementów określeń, co jest tożsame z pokazaniem podstawowych kategorii pojęcia elastyczności). W przypadku tych określeń dokonano podziału na układy strukturalne, charakteryzujące kategorię elastyczności.

Tab. 1.7. Elementy określające pojęcie elastyczność

L.p.	Elementy pojęcia elastyczność	Częstotliwość wykorzystania	Nr priorytetu
1	Charakterystyka właściwości elastyczności	17/22	3
2	Ograniczenia zasobów przy przebrojeniu – wg czasu	13/22	4
3	Ograniczenia zasobów przy przebrojeniu – wg innych kryteriów	11/22	5
4	Charakter reakcji ESP na oddziaływania zewnętrzne	21/22	1
5	Zakres technicznych możliwości	5/22	6
6	Zakłócenia w ESP wraz ze wzrostem elastyczności	3/22	8
7	Charakter oddziaływań zewnętrznych na system	19/22	2
8	Poprawność charakterystyki pracy wraz ze wzrostem elastyczności	2/22 - wpływ pozytywny 1/22 - wpływ negatywny	8
9	Stołość albo zmienność struktury	2/22 - stołość struktury 2/22 - zmienność struktury	7

Skład wyodrębnionych elementów strukturalnych, a także względne częstotliwości ich wykorzystania w pojęciach elastyczności (stosunek ilości określeń, w których stosuje się dane elementy, do ogólnej liczby określeń), przedstawiono w tab. 1.7. Odzwierciedlają one pośrednio stopień ważności poszczególnych elementów przy analizie istniejących podejść do określenia danego pojęcia. Każdemu elementowi przyporządkowano rangę priorytetu, w zależności od częstotliwości wykorzystania go w określeniach.

Najbardziej istotnymi elementami określeń są:

- charakter oddziaływania otoczenia na system,
- charakterystyka właściwości elastyczności,
- ograniczenie zapasów przy przebrojeniu,
- zakres technicznych możliwości wyposażenia.

W określeniach najrzadziej są wymieniane:

- towarzyszący wzrostowi elastyczności, narastający stopień złożoności systemu,
- zmiany jakości pracy systemu i jego stołości,
- zmiany struktury systemu.

Elementy te mają duże znaczenie przy analizie i syntezie systemów produkcyjnych, charakteryzując reakcję systemu na zewnętrzne oddziaływania i wyjściowe techniczno-ekonomiczne wskaźniki pracy.

Elementy określenia nr 6 (zakłócenia w ESP wraz ze wzrostem elastyczności) i nr 9 (stołość albo zmienność struktury), przedstawione w tab. 1.7, wskazują na zbyteczność elastycznych

systemów produkcyjnych i są wystarczająco ściśle ze sobą powiązane, a mianowicie: im bardziej system jest elastyczny, tym posiada większy potencjalny zapas mocy lub możliwości technicznych (w praktyce odpowiada temu odpowiedni stopień złożoności systemu). Stąd duże prawdopodobieństwo, że przy zmianie warunków produkcyjnych nie będzie konieczna zmiana struktury systemu (wymiana elementów, zwiększenie lub zmniejszenie ich ilości oraz wzajemnych powiązań), a do przebrojenia wystarczy przeprowadzenie regulacji parametrycznej elementów, realizowanej automatycznie w trakcie procesu produkcyjnego.

Analizując pojęcie elastyczności, należy przeanalizować zdolność systemu do zmiany struktury poprzez kompensację niewystarczającego stopnia wszechstronności w zakresie możliwości technologicznych wyposażenia. W elementach określeń nr 8 i 9 sformułowania mają charakter sprzeczny: z jednej strony, wskazuje się na poprawę wskaźników pracy systemu przy zwiększeniu jego elastyczności, a z drugiej - odwrotnie. Wynika to z niejednoznacznego wpływu zwiększenia elastyczności na wskaźniki pracy systemu. Elastyczność, związana z dodatkowym zużyciem zapasów, zwiększa adaptowalność albo zdolność przystosowania się systemu do zmiennych warunków produkcyjnych, co oznacza, że jest warunkiem technologicznej stabilności i zwiększenia efektywności pracy.

W związku z tym nie należy mówić o zwiększeniu lub zmniejszeniu elastyczności systemu i odrębnie - o poprawie albo pogorszeniu charakterystyk techniczno-ekonomicznych pracy zautomatyzowanego systemu produkcyjnego, a o ich optymalnej współzależności.

W tym przypadku elastyczność jest jednym z najważniejszych kryteriów optymalnego funkcjonowania, charakteryzującego podstawową właściwość danej klasy systemów. Nie uwzględnienie znaczenia elementów nr 6, 8, 9, w większości rozpatrywanych określeń oznacza naruszenie zasady analizy systemowej, polegającej na konieczności uwzględnienia wszystkich czynników związanych z analizowaną własnością w celu adekwatnego ich opisu.

Analiza podejść do określenia elastyczności systemów produkcyjnych pokazała, że najważniejszym elementem określenia elastyczności jest „przejście” lub adaptacja, przebudowa, przebrojenie, które może przebiegać samodzielnie albo w sposób wymuszony. W wielu, używanych przez autorów, określeniach, stosowana jest charakterystyka prędkości przejścia, natomiast termin „elastyczność” stosowany jest jako analog stałości pracy systemu. Rezultatem przejścia jest stan gotowości systemu do wykonywania kolejnych zadań produkcyjnych, a nie sam proces ich wykonania. Granice elastyczności są ograniczone technicznymi możliwościami wyposażenia, a rozszerzenie zakresu technicznych możliwości

wyposażenia odpowiada zwiększeniu elastyczności systemu i jest związane z dodatkowymi nakładami materialnymi.

Niezadawalający poziom elastyczności zmniejsza stopień integracji produkcyjnej systemu zautomatyzowanego, obniżając prawdopodobieństwo pełnej jego zgodności z wymaganiami funkcjonalnymi zewnętrznego ośrodka produkcyjnego.

Obecna wiedza, dotycząca tego problemu, jest dość pobieżna. Pojęcie „elastyczność” zawiera dość dużą ilość, hierarchicznie powiązanych ze sobą, elementów. Stosowane określenia nie zawsze dokładnie i jednoznacznie określają treść i granice tego pojęcia. Korzystając z danych w tab. 1.6 i 1.7, zestawiono określenia, które odzwierciedlają istotę tego pojęcia, z uwzględnieniem przyjętego na dzień dzisiejszy podejścia naukowego.

Elastyczność określa właściwość systemu produkcyjnego do adekwatnego reagowania na zmiany dynamiczne i stochastyczne warunków produkcyjnych (oddziaływań zewnętrznych sterujących i zakłócających, a także zakłóceń wewnętrznych). Wyraża się to zdolnością osiągnięcia lepszych, w zakresie technicznych możliwości wyposażenia, charakterystyk przejścia systemu z jednego ustalonego stanu funkcjonalnego w inny, z uwzględnieniem możliwości zmiany:

- struktury systemu (ilości, rodzaju elementów i charakteru związków między nimi),
- czasu i nakładów na przejście (także automatyczne),
- dokładności osiągnięcia charakterystyk technologicznych, niezawodnościowych i ekonomicznych danego stanu.

Jednym z podstawowych wniosków przeprowadzonej powyżej analizy jest stwierdzenie, że elastyczność to pojęcie bardzo złożone, zawierające szereg wzajemnie powiązanych sformułowań. Różne określenia pojęcia elastyczności przedstawione są w tab. 1.8.

Tab. 1.8. Strukturalne zestawienie pojęcia elastyczność

L.p.	Rodzaj elastyczności	Wyjaśnienie pojęcia
1	2	3
1	Elastyczność procesu [5, 11, 62, 63]	Zdolność produkowania wielu określonych typów części różnymi sposobami.
2	Elastyczność maszynowa [11]	Łatwość przebudowy technologicznych elementów systemu do produkcji wielu określonych typów części.
3	Elastyczność wyrobu [11]	Zdolność szybkiego i ekonomicznego przejścia na produkcję innej części.
4	Elastyczność systemu transportowego [11, 32, 79]	Zdolność zmiany sposobu wykonania operacji, dróg przemieszczeń podstawowych i pomocniczych strumieni materialnych [16, 87, 103, 105]. Przy maksymalnej elastyczności – uzyskanie wielu możliwych dróg strumieni, a w przypadku awarii - przekazanie części na maszynę-dubler.

Tab. 1.8. Strukturalne zestawienie pojęcia elastyczność (c.d.)

1	2	3
5	Elastyczność produkcyjna [11, 32, 79]	Zdolność do kontynuowania obróbki wielu określonych typów części przy zakłóceniach poszczególnych elementów technologicznych, zdolność obróbki w danym okresie każdej z określonych typów części, zamocowywanej w uchwycie.
6	Elastyczność zakresu [11]	Zdolność systemu do ekonomicznej pracy przy różnych wielkościach serii produkcyjnej.
7	Elastyczność rozszerzenia [11]	Możliwość wprowadzenia do istniejącej struktury nowych elementów technologicznych.
8	Elastyczność pracy [89]	Możliwość zmiany kolejności operacji w przypadku każdego z typów części.
9	Elastyczność produkcji [89]	Asortyment wyrobów, możliwych do wytworzenia w systemie.
10	Elastyczność asortymentu [79]	Zdolność produkowania różnorodnych wyrobów, możliwość przebrojenia na nowe wyroby.
11	Elastyczność organizacyjna [34, 91]	Orientacja struktury elastycznego systemu na środki produkcji z maksymalnym wykorzystaniem wyposażenia [63, 79], zdolność do pracy przy minimalnych stratach wydajności w przypadku zakłóceń w działaniu poszczególnych elementów albo odchyleniach od założonego sposobu pracy, określana niezawodnością systemu produkcyjnego [34], zdolność adaptacji do odchylenia od założonego sposobu pracy (brak wymaganych półwyrobów, narzędzi) [91].
12	Elastyczność strukturalna [91, 61, 79]	Określa: - dowolność w wyborze kolejności operacji, - możliwość wykonywania obróbki na innej obrabiarce przy awarii jakiegokolwiek z maszyn, - możliwość uzupełniania systemu, zgodnie z zasadą modułowości.
13	Elastyczność technologiczna (procesowa) [4, 5, 57, 79, 91]	Zdolność wykonywania kilku zadań technologicznych bez mechanicznego przebrojenia wyposażenia (lub przy nieznacznych nakładach na przebrojenie) [5, 79], zdolność adaptacji do zmieniającego się asortymentu części [4, 57, 91].
14	Elastyczność adaptacji (przystosowania się) [34]	Zdolność systemu produkcyjnego do przejścia z jednego określonego stanu funkcjonalnego w inny, tzn. potencjalna możliwość realizacji takich przejść.
15	Elastyczność środków technicznych [34]	Stopień uniwersalności wyposażenia technologicznego i mechanizmów podstawowych, zależny od możliwości funkcjonalnych i parametrów technicznych wyposażenia technologicznego systemu elastycznego.
16	Elastyczność schematu strukturalno-ideowego [5, 34]	Określana jest dowolnością adresowania strumieni materialnych wewnątrz systemu produkcyjnego – charakteryzuje jego pozycje robocze za pośrednictwem zautomatyzowanego systemu transportowo-magazynowego.
17	Elastyczność operacyjna [32, 79]	Wykonywanie, możliwych do realizacji w systemie operacji, niezbędnych do obróbki zmieniających się rodzajów części określonej klasy [79], możliwość zmiany procesów i cykli operacyjnych w taki sposób, żeby umożliwić pracę poszczególnych jednostek wyposażenia elastycznych zautomatyzowanych linii, przy zmiennej długości cyklu obróbki różnych części, dzięki ich międzyoperacyjnemu nagromadzeniu w systemie transportowym [32].
18	Elastyczność programowa [79]	Określana jest możliwością automatycznej zmiany programów sterujących w strukturze numerycznie programowanego układu sterowniczego oraz ilością równocześnie przechowywanych programów sterujących.
19	Elastyczność transportowa [79, 104]	Uwarunkowana liczbą różnych tras, dopuszczonych w danej sieci transportowej.

Tab. 1.8. Strukturalne zestawienie pojęcia elastyczność (c.d.)

1	2	3
20	Elastyczność konstrukcyjna [16, 79]	Obejmuje elastyczność strukturalną obrabiarki, a także elastyczność transportową i układów sterowniczych, można ją ocenić jako stosunek liczby poszczególnych jednostek wyposażenia do ich ogólnej ilości.
21	Elastyczność parametryczna [5, 79]	Określana jest czasem, efektywnością i dokładnością przejścia systemu w nowy stan funkcjonalny.
21	Elastyczność strukturalno-organizacyjna [4, 5]	Zdolność systemu do maksymalnego wykorzystania swoich możliwości.
23	Elastyczność statyczna [94, 101]	Zdolność przystosowania systemu do stochastycznej zmiany ilościowej i jakościowej programu produkcyjnego w warunkach rynku.
24	Elastyczność dynamiczna [5]	Zdolność systemu do pracy przy niestacjonarnych procesach działania, uwarunkowanych sterowaniem zewnętrznym oraz zakłóceniami zewnętrznymi i wewnętrznymi, ogólnie charakteryzowana jest wskaźnikami przejścia procesu przy zmianie rodzaju produkcji (czas, droga i dokładność przejścia).
25	Elastyczność zdeterminowana (taktyczna) [85]	Określana jest ustalonym asortymentem wyrobów, charakteryzowana jest zakresem środków, niezbędnych do przejścia z jednego rodzaju produkcji na inny, zgodnie z aktualnie obowiązującym programem produkcyjnym.
26	Elastyczność stochastyczna (strategiczna)	Zdolność do obróbki wyrobu spoza ustalonego asortymentu.
27	Elastyczność trwałości (rezerwowania) [3, 61]	Zdolność systemu do funkcjonowania w przypadku awarii jakiegokolwiek z jego elementów, aktywnego przeciwstawiania się szkodliwym oddziaływaniom środowiska zewnętrznego i wykonywania swoich funkcji w warunkach takiego oddziaływania.
28	Elastyczność rezerwowania sprzętowego [94, 101]	Uwarunkowana występowaniem modułów rezerwowych, zastępujących te, które ulegają uszkodzeniom.
29	Elastyczność rezerwowania czasowego [94, 101]	Uwarunkowana występowaniem elastycznych powiązań międzysprzętowych, tzn. magazynów pośrednich (międzyoperacyjnych i innych), zdolnych przez czas, określony średnimi statystycznymi warunkami produkcji, podtrzymywać funkcjonowanie systemu.
30	Elastyczność rozszerzenia ilościowego [94, 101]	Zdolność systemu do wbudowywania w jego strukturę nowych modułów (także ze struktury innych modułów), albo zamiany jednych modułów na inne.
31	Elastyczność rozszerzenia jakościowego [94, 101]	Charakteryzuje się występowaniem w systemie rezerwy mocy i zdolnością jej wykorzystania do zwiększenia produkcji.
32	Elastyczność kompensacyjno-kumulacyjna	Zdolność wyrównywania ilościowego programu produkcyjnego, ilościowych wahań struktury rezerw czasowych i średniego czasu realizacji produkcji od początku pracy.
33	Elastyczność efektywności [94, 101]	Zdolność systemu do łatwego przystosowania do produkcji nowego wyrobu bez przekroczenia ustalonej wielkości nakładów na to przystosowanie.
34	Elastyczność ekonomiczna [61]	Zależy od stopnia wszechstronności wyposażenia i efektywności automatyzacji, określana jest współzależnością nakładów na przebrojenie i odpisów amortyzacyjnych.
35	Elastyczność asortymentu [32]	Możliwość zmiany programu produkcyjnego w ramach ustalonego asortymentu wyrobów.

Pomimo dużej ilości wyodrębnionych elementów pojęcia „elastyczność”, zrozumienie jego istoty nie jest łatwe. Czasami sens tak samo określanych sformułowań nie jest

identyczny, a w niektórych nazwach zdarza się częściowe albo całkowite powtórzenie sensu. Podobna sytuacja ma miejsce również przy ilościowym opisie elastyczności (tab. 1.9).

Tab. 1.9. Ilościowa ocena pojęcia elastyczność

L.p.	Nazwa pojęcia	Formuła, źródła
1	2	3
1	Elastyczność maszynowa	$g_m = \left(1 - \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \tau_{ij}}{T_{pl}} \right)$, gdzie: τ_{ij} - czas przejścia systemu z jednego stanu funkcjonalnego w inny; T_{pl} - planowy okres [85].
2	Elastyczność transportowa	Względny zakres wewnętrznych powiązań transportowych $D_{tr} = \frac{a}{r!}$, gdzie: a - liczba podstawowych powiązań transportowych, zapewnionych zautomatyzowanym systemem transportowym; r - liczba stanowisk przyjęcia-wydania [7].
3	Elastyczność organizacyjna	$K_{org} = \frac{T_p}{T_p + T_{ow}}$, gdzie: T_p - czas pracy systemu; T_{ow} - czas odtworzenia wydajności pracy systemu [34].
4	Elastyczność strukturalna (rozszerzenia)	$k_{fc} = 1 - \frac{\Sigma t'_i + \Sigma t''_i}{\Sigma t_{ow}} + \frac{1}{\frac{1}{H} - 1}$, gdzie: $\Sigma t'_i, \Sigma t''_i$ - sumaryczne czasy wykonania polecenia bez i z częściową stratą wydajności; Σt_{ow} - czas odtworzenia wydajności pracy; $H = \frac{\Sigma t_{rz}}{\Sigma t_{rz} + \Sigma t_{ow}}$ - pewność systemu, gdzie: Σt_{rz} - czas reakcji na zakłócenie [77].
5	Elastyczność zastosowania	$g_z = \left(1 - \frac{1}{n} \right)$, gdzie: n - liczba różnych stanów funkcjonalnych, które system może przyjąć w granicach swoich możliwości technicznych [85]. $K_z = 1 - e^{-n}$, gdzie: n - ilość stanów funkcjonalnych albo przejść systemu, z zachowaniem jego zdolności produkcyjnej [34].
6	Elastyczność środków technicznych	$K_{sr.t} = 1 - \frac{1}{\frac{\sum_{i=1}^m P_t}{M}}$, gdzie: $\sum_{i=1}^m P_t$ - sumaryczna liczba różnych operacji technologicznych; M - ilość pozycji roboczych z różnymi operacjami [34].
7	Elastyczność schematu strukturalno-ideowego	$K_{si} = \frac{1}{[(b_{max} - b) + 1]}$, gdzie: $b_{max} = p(p-1)$ - liczba maksymalnie możliwych powiązań między elementami składowymi systemu; p - ilość elementów składowych; b - liczba faktycznie istniejących powiązań [34]. $k_m = q_{max} - q_f$, gdzie: q_{max}, q_f - maksymalnie możliwa i faktyczna ilość podstawowych oraz zwrotnych powiązań transportowych jednostek wyposażenia [5].

Tab. 1.9. Ilościowa ocena pojęcia elastyczność (c.d.)

1	2	3
8	Elastyczność mocy	$K_M = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{\Delta Q}{Q_1}$, gdzie: $\Delta Q = Q_1 - Q_2$ - przyrost wydajności systemu przy zwiększeniu mocy w porównaniu z wydajnością bazową Q_1 [34].
9	Elastyczność konstrukcyjna	$G_{konstr} = \frac{a}{b}$, gdzie: a - ilość jednostek wyposażenia, posiadającego właściwość przestawienia (przezbroyenia), b - ogólna ilość wyposażenia [16].
10	Elastyczność dynamiczna	$W_{dyn} = \frac{dH_{wyj}}{dH_{wej}}$ - intensywność zmian charakterystyki wyjściowej H_{wyj} w zależności od zmiany charakterystyki wejściowej H_{wej} . $W_{st} = \frac{dH_{wyj}}{df(t)}$ - stałość albo zapasy stałości systemu przy zewnętrznych zakłóceniach, w ustalonym procesie produkcji [5].
11	Elastyczność rezerwowania sprzętowego	Oceniana ilością rezerwowych modułów, średnio-statystycznym czasem pracy akumulatorów przy zakłóceniach sprzętowych, pośrednio - wskaźnikami pewności pracy systemu [99].
12	Elastyczność rezerwowania czasowego	
13	Elastyczność technologiczna	$k_{techn} = \frac{T_P}{T_P + T_{AD}}$, gdzie: T_P, T_{AD} - czas pracy i adaptacji systemu; $T_{AD} = \sum_{i=1}^n t_i$, gdzie: t_i - czas i-tej adaptacji (według różnych czynników); n - liczba adaptacji [91]. $K_{tech} = \frac{\bar{t}_{obr}}{\bar{t}_{j-k}} \cong \frac{\bar{t}_{obr}}{\bar{t}_{obr} + \bar{t}_{prz}}$, gdzie: $\bar{t}_{obr} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{obr.i} q_i}{\sum_{i=1}^n q_i}$, $\bar{t}_{prz} = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_{prz} q_i}{\sum_{i=1}^n q_i}$ - średni jednostkowy czas j-tej operacji i średni czas przezbroyenia; $t_{obr.i}$ - jednostkowy czas obróbki i-j części; $t_{prz.i} = \frac{T_{prz.i}}{p_i}$ - czas przezbroyenia do obróbki i-j części; $T_{prz.i}$, p_i - odpowiednio czas przezbroyenia i wielkości partii uruchomienia i-tej części; t_{j-k} - czas jednostkowy obróbki i-j części [100]. $K_{tech.w} = \frac{\sum_{j=1}^n z_{kj}}{\sum_{j=1}^n z_{ij}}$, gdzie: $\sum_{j=1}^n z_{kj}$ - suma współczynników w danej kolumnie macierzy elastyczności Z , której kolumnami są maszyny technologiczne $q_j \in Q, (j = \overline{1, m})$, a wierszami - wyroby $z_i, (i = \overline{1, n})$, obrabiane w systemie, z_{ij} - suma współczynników, gdy dana maszyna q_j używana jest do obróbki wszystkich wyrobów n [94, 101].

Tab. 1.9. Ilościowa ocena pojęcia elastyczność (c.d.)

1	2	3
13	Elastyczność technologiczna (c.d.)	Wybór wyposażenia pod kątem jego możliwości technologicznych wykonywany jest na podstawie wzoru $\bar{G} = \frac{I}{I_0}$, gdzie: I, I_0 - informacja nominalna i bieżąca. Przy czym, $I = H_{\max} - H_0$, $H = -\sum_{i=1}^n p_i \log p_i$, gdzie: H - entropia, p_i - prawdopodobieństwo wytypowania cechy części i [16]. $G = \frac{t_0}{t_0 + t_n} \left(1 - \frac{1}{n}\right)$, gdzie: t_0, t_n - cykl obróbki jednej części i-go rodzaju i czas przebrojenia systemu z obróbki części i-go rodzaju na część j-go rodzaju; n - ilość rodzajów części [5, 106]. Średnia waga współczynnika elastyczności, zmieniającego się przy przejściu od i-go do j-go wyrobu $\bar{E} = \frac{\sum_{j=1}^n t_{0j}}{\sum_{j=1}^n t_{0j} + \frac{2}{n-1} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{ij}} \left(1 - \frac{1}{n}\right)$, gdzie: $\sum_{j=1}^n t_{0j}$ - sumaryczny czas cyklu obróbki całego asortymentu n wyrobów; $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{ij}$ - sumaryczny czas przebrojenia [5, 106]. Uogólniony wskaźnik elastyczności technologicznej $E = \frac{T_{p-z}}{\sum_{j=1}^m t_{j-k}}$, gdzie: $\sum_{j=1}^m t_{j-k}$ - czas jednostkowy, T_{p-z} - czas przygotowawczo-zakończeniowy [32]. $k_{fm} = \frac{1}{1 + \frac{\sum t_{prz.i}}{\sum t_{c.i} K_i}}$, gdzie: $t_{c.i}$ - cykl obróbki i-j części; K_i - wielkość partii i-j części; $t_{prz.i}$ - czas i-tego przebrojenia [91]. $K_m = \frac{1}{1 + \frac{\sum t_{prz}}{t_{c.i} m_i + \sum t_c}}$, gdzie: $t_{c.i}, \sum t_{prz}$ - czas obróbki jednej części i-tego rodzaju i sumaryczny czas przebrojeń; $\sum t_c$ - przestoje własne wyposażenia, uwarunkowane jego charakterystykami technicznymi; m_i - wielkość partii części i-go typu [34]. $U_e = \frac{Nk}{100n}$, gdzie: N - asortyment części, wytwarzanych w określonym czasie, k - udział części, wytwarzanych po raz pierwszy, n - liczba jednakowych części w typowej partii [59].
14	Elastyczność kompensacyjno-kumulacyjna	$E_{kk} = \frac{W}{W_{now}}$, gdzie: W - wydajność systemu przy przejściu w nowy stan ustalony, przy oddziaływaniu czynników zakłócających bez zmiany struktury, W_{now} - maksymalnie możliwa wydajność w nowym stanie, uzyskana w wyniku optymalnej zmiany struktury [6].

Tab. 1.9. Ilościowa ocena pojęcia elastyczność (c.d.)

1	2	3
15	Zakres przebrojenia	$Z_{prz} = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{d_{0\max}}$, gdzie: $d_{\max}, d_{\min}$ - maksymalna i minimalna średnica części obrabianych w systemie produkcyjnym, $d_{0\max}$ - maksymalna średnica części, obrabianych na obrabiarkach danej klasy [7].
16	Elastyczność ekonomiczna	$E_e = 1 - \frac{K_p}{K}$, gdzie: K_p - nakłady na przebrojenie, K - odpisy amortyzacyjne [94]. $\overline{P}(D) = nA$, gdzie: n - asortyment obrabianych części, $A = \frac{EK_0}{C_w + EK_0}$ - efektywność automatyzacji, gdzie: E - normatywny współczynnik efektywności ekonomicznej, K_0 - nakłady na wyposażenie podstawowe (główne) i pomocnicze, C_w - wydatki na wynagrodzenia wszystkich kategorii pracowników [61].
17	Elastyczność żywotności	Współczynnik odbudowy $W_{odb} = \frac{T_{uz}}{T_{uz} + T_o}$, gdzie: T_{uz}, T_o - średnie czasy na usunięcie zakłóceń i na odbudowę [7].
18	Elastyczność rozszerzenia ilościowego	Wskaźnik przebudowy $F_{przeb} = \frac{w_c}{w_c + w_0}$, gdzie: w_c, w_0 - liczba standardowych i niestandardowych kanałów (informacyjnych i materialnych) powiązań zewnętrznych [7].
19	Elastyczność rozszerzenia jakościowego	Charakteryzuje się maksymalnie możliwą ilością dodatkowo wbudowywanych w system modułów i rezerwami mocy środków sprzętowych i programowych, jako stosunek wielkości rzeczywistej do maksymalnie możliwej [99].
20	Elastyczność efektywności	Charakteryzuje się nakładami na przebrojenie [6]
21	Elastyczność integralna	$G_0 = G\overline{G}$, gdzie: $G, \overline{G}$ - odpowiednio elastyczność konstrukcyjna i elastyczność, odzwierciedlająca zmianę wymiarów części [16]. $G = g_1 g_2$, gdzie: g_1, g_2 - zestawienie elastyczności według możliwych funkcjonalnych stanów i według czasu przebrojeń, albo $G = \frac{\log n}{t_{pss}}$, gdzie: n - ilość możliwych stanów funkcjonalnych, t_{pss} - średni czas jednego przejścia z stanu w stan [85]. $G = \left(1 - \frac{Z_p}{Z_a}\right) 100\%$, gdzie: Z_a, Z_p - nakłady na amortyzację i przebrojenie [5]. Integralny wskaźnik elastyczności: $K_i = K_z K_t K_{st} K_{si} K_{org} K_r$ - odpowiednio współczynniki elastyczności: technologicznej, zastosowania środków technicznych, schematu strukturalno-ideowego, organizacyjnej, rozszerzenia [34]. Addytywny wskaźnik elastyczności: $K_a = \alpha K_z + \beta K_t + \gamma K_{st} + \theta K_{si} + \psi K_{org} + \varepsilon K_r$, gdzie: $\alpha, \beta, \gamma, \theta, \psi, \varepsilon$ - odpowiednie współczynniki wagowe, określające znaczenie (wartość) tej albo innej formy wykazanej elastyczności w każdym konkretnym wypadku, ustalone w następujący sposób: $\alpha + \beta + \gamma + \theta + \psi + \varepsilon = 1$ [34].

Zbyt duża ilość, czasem sprzecznych pojęć elastyczności utrudnia sprecyzowanie kierunków działania, mających na celu zwiększenie efektywności pracy obrabiarek wielozadaniowych NC w elastycznych systemach produkcyjnych.

1.4. Analiza możliwości zwiększenia efektywności pracy obrabiarek wielozadaniowych NC w elastycznych systemach produkcyjnych

Efektywność w elastycznych systemach [30, 90] produkcyjnych zależy bezpośrednio od strat czasu (przestojów), wynikających z:

- przyczyn organizacyjnych,
- konieczności przebrojenia,
- obsługi konserwacyjnej,
- remontów oraz przestojów wynikających z konieczności odtworzenia wydajności.

Tradycyjnie do analizy pracy oprzyrządowania zautomatyzowanych systemów produkcyjnych stosowane są takie wskaźniki jak: wydajność, współczynniki obciążenia, wykorzystania organizacyjnego, wykorzystania jednostkowego, czasu jednostkowego i czasu realizacji operacji, wykorzystania technicznego, a także integralny współczynnik strat czasu, który charakteryzuje wzajemną zależność różnych strat czasu, prowadzących do obniżenia wydajności [29, 102]. Mniej rozpowszechnione są wskaźniki elastyczności.

Do przeprowadzenia badań na modelach pracy zautomatyzowanych systemów produkcyjnych znajdują zastosowanie podstawowe grupy modeli: symulacyjne i analityczne.

Modele symulacyjne budowane są na bazie specjalnych języków i systemów programowych. Pozwalają analizować złożone systemy, pomimo tego, że nie posiadają odpowiednio dużej bazy otrzymywanych wyników [10, 84].

Podstawowe etapy badania systemu przy symulacyjnym przeprowadzeniu badań na modelach, to:

- podział systemu wyjściowego na elementy strukturalne,
- określenie ich parametrów i wzajemnych związków,
- formalizacja opisu współdziałania elementów strukturalnych systemu środkami języka symulacyjnego,
- przeprowadzenie badań na modelach i opracowanie poszczególnych modułów programowych,
- sprawdzenie modelu na adekwatność modelowanego systemu do rzeczywistego,
- planowanie i przeprowadzenie eksperymentów symulacyjnych na komputerze.

Do wad modeli symulacyjnych zalicza się:

- brak odpowiedniej bazy otrzymywanych wyników, co powoduje znaczne ograniczenie przydatności,
- konieczność zastosowania komputera o dużej mocy obliczeniowej.

Istotne jest wykonywanie badań symulacyjnych na modelach w celu sprawdzenia adekwatności modelu analitycznego do systemu rzeczywistego, przez porównanie wyników przeprowadzonych badań na modelach i danych eksperymentalnych. W niektórych przypadkach stosowane są modele mieszane (analityczne połączone z symulacyjnymi), co powoduje podwyższenie dokładności wyników badań na modelach i zmniejszenie ilości niezbędnych procedur obliczeniowych [66, 71].

Do podstawowych zalet modeli analitycznych można odnieść:

- uproszczenie procesu analizy i syntezy badanych systemów - możliwość uzyskania wyników ogólniejszych w porównaniu z symulacyjnymi,
- szybkie przekazywanie danych do komputera, także przy sztywnych ograniczeniach na wykorzystanie zasobów obliczeniowych,
- możliwość zastosowania do szerokiego zakresu zadań optymalizacji parametrów funkcjonalnych systemów produkcyjnych.

Ostatnio szerokie zastosowanie, w pracach naukowych i badaniach analitycznych na modelach zautomatyzowanych systemów produkcyjnych (ZSP), znajdują metody teorii rozkładów, grafów i sieci obsługi masowej [49, 105], procesów markowskich i semimarkowskich [2, 107]. Podstawową zaletą tych ostatnich jest wysoka efektywność obliczeniowa, chociaż w dokładności obliczeń ustępują one teorii rozkładów i badaniom symulacyjnym na modelach.

Próby zbudowania i badania modeli analitycznych ZSP były wielokrotnie podejmowane i są szeroko prezentowane w literaturze. W rozprawach poświęconych analityczno - stochastycznemu modelowaniu pracy ZSP rozpatrywany jest wpływ zakłóceń wyposażenia na parametry pracy systemu, natomiast nie uwzględniają one warunków produkcji seryjnej i małoseryjnej, w przypadku których konieczne jest określenie przestojów systemu w związku z jego przebrojeniem przy zmianie asortymentu obrabianych wyrobów.

Zastosowanie aparatu markowskiego do przeprowadzenia badań na modelach ESP z uwzględnieniem przebrojenia przedstawiono w pracy [64].

Zagadnienia modelowania synchronicznych i asynchronicznych systemów produkcyjnych i optymalizacji procesów technologicznych rozpatrywane są w pracy [39].

Wydajność produkcji określana jest przy założeniu wykładniczego charakteru wpływu parametrów elementów systemu.

Analiza rzeczywistej wydajności systemu technologicznego przy automatycznie eliminowanych zakłóceniach przedstawiona jest w pracy [73].

Przybliżona metoda określenia przestoju systemu na stacjonarnym odcinku pracy przy zastosowaniu rachunku prawdopodobieństwa zaprezentowana jest w pracy [50]. Dokładne rozwiązanie można uzyskać przy założeniu, że system wielofazowy jest sprowadzony do dwufazowego. Przy rozpatrywaniu zatrzymania każdego z zespołów (możliwość uszkodzenia zespołów) jako zdarzeń równoważnych (równoznacznych założeniu o niezależności podziałów zapasów w akumulatorach), uzyskano zależność do określenia prawdopodobieństwa przestoju n -tego zespołu linii. Zależności obliczeniowe otrzymywane są przy wykładniczym charakterze rozmieszczenia losowych parametrów elementów systemu. Oprócz tego zakłada się, że wydajność wszystkich urządzeń jest jednakowa, a ich niezawodność pozwala pominąć prawdopodobieństwo równoczesnej awarii więcej niż jednego urządzenia.

W wielu pracach rozpatruje się bardziej złożoną strukturę zakłóceń. W pracy [40] przeanalizowano bardziej złożony przypadek, kiedy strumienie zakłóceń i przywrócenia zdolności do pracy podzielone są na zależne od wyposażenia i zależne od urządzenia. Na konieczność obliczenia zakłóceń parametrycznych i zakłóceń funkcjonalnych wskazano w pracy [50]. Różna intensywność zakłóceń wyposażenia elastycznej zautomatyzowanej linii montażu w stanie pracy i w stanie gotowości do pracy rozpatrywana jest w pracach [82, 83].

Ocenę dolnej granicy niezawodności systemu produkcyjnego przedstawiono w pracy [36], gdzie założono, że niezawodność każdej jednostki oprzyrządowania w systemie będzie wyższa, niż niezawodność własna systemu przy jego autonomicznej eksploatacji. Uzasadniono to tym, że zmniejszenie obciążenia wyposażenia w systemie prowadzi do zmniejszenia liczby zakłóceń. W pracy przedstawiono model iteracyjny ostatecznej struktury systemu, w oparciu o algorytm typu zwoje: zespoły linii pierwszy i drugi są zastępowane jednym zespołem ekwiwalentnym, który następnie wraz z trzecim jest zastępowany kolejnym ekwiwalentnym, itd.

W każdym etapie analizuje się system dwufazowy. Pozwala to na sformułowanie wniosku o wykładniczym charakterze podziału czasu zakłóceń i czasu odbudowy zespołów.

Ostatnio pojawia się coraz więcej prac, proponujących metody, nie bazujące na wykładniczym charakterze procesów losowych, zachodzących w badanych systemach.

W oparciu o teorię procesów punktowych, w pracy [47] zaproponowana została metoda aproksymacji sumarycznego strumienia wejściowego, umożliwiająca określenie obciążenia systemu i wskaźników systemu obsługi masowej według znanych formuł przybliżonych. Zależność czasu obsługi od typu postępujących żądań nie jest w nich rozpatrywana, ponieważ nie umożliwiają one obliczenia czasów, niezbędnych do wykonania operacji pomocniczych.

Niedokładność czysto wykładniczych modeli podkreślono także w pracy [13]. Przyjęto w niej założenie o niezależności funkcjonowania elementów ZSP - ich aproksymacja jest realizowana przy zastosowaniu systemów obsługi masowej typu M/G/1. Ocena dokładności aproksymacji wykładniczej strumienia wejściowego i przybliżone zależności obliczeniowe bazują na pierwszych dwóch etapach rozpatrywanych aproksymacji. Przedstawione są metody przybliżone obliczania systemów transportowych.

W pracy [41], korzystając z wyników otrzymanych w pracy [47], autorzy uzasadniają zastosowanie przybliżonych zależności do wyznaczenia charakterystyk systemu przy aproksymacji sumarycznego strumienia wejściowego. Ocena dokładności wykładniczej aproksymacji i formuł obliczeniowych [13], realizowana jest w oparciu o pierwsze dwa etapy analizowanych podziałów.

Ostatnio w badaniach modeli systemów złożonych coraz bardziej rozpowszechniony jest aparat procesów semimarkowskich [45, 49, 82, 83, 107], pozwalający na odrzucenie przypuszczenia o aproksymacji wykładniczej podziału wielkości przypadkowych, wchodzących w model i korzystanie ze swobodnych praw podziału.

Kierunkiem perspektywicznym przy przeprowadzaniu badań na modelach technicznych systemów o strukturze złożonej z rezerwowaniem czasowym jest zastosowanie algorytmów powiększenia fazowego (APF) [18, 43, 45]. W pracy [36] zaproponowany został semimarkowski model funkcjonowania ZSP z akumulatorami, umożliwiający uzyskanie maksymalnej wydajności przy zmianie asortymentu produkcji. Funkcjonowanie ZSP opisywane jest superpozycją końcową markowskich procesów odbudowy. Otrzymano analityczną zależność współczynnika gotowości ZSP do zmiany asortymentu produkcji od wielkości zasobów produkcji w magazynie pośrednim. Do określenia tych zasobów stosowane jest modelowanie symulacyjne.

Szeroki krąg zagadnień, połączonych z analizą i syntezą systemów zautomatyzowanych, rozpatrzono w [8, 42, 44, 52, 54]. W tych pracach przedstawiono zestawy informacyjnie zgodnych modeli matematycznych funkcjonowania wielopotokowych ZSP, z określeniem interakcji elementów systemu wewnątrz każdego poziomu hierarchii, jak i poziomów między sobą. Modele te, zbudowane na bazie zaproponowanej koncepcji opisu matematycznego

systemów wielopotokowych, nazywane są metodami zastosowanych iteracji. Metoda pozwala wykazać sprzeczność między modułowym opisem elementów systemu i koniecznością obliczenia ich wzajemnej interakcji.

Można wyznaczyć następujące trzy podejścia do budowania analityczno-losowych modeli zautomatyzowanego systemu produkcyjnego [54].

Pierwsze podejście: modułowe

W tym przypadku system dzielony jest na poszczególne moduły, opisywane niezależnie od siebie. Moduły są więc łączone z uwzględnieniem ich wzajemnego wpływu. Podstawową trudnością przy zastosowaniu tego podejścia jest uwzględnienie wzajemnego oddziaływania modułów, a także strata dokładności.

Drugie podejście: systemowo-analityczne.

Opracowywany jest model całego systemu z uwzględnieniem wzajemnego oddziaływania elementów. W tym przypadku pojawia się problem dużej wymiarowości modelu, chociaż podejście to charakteryzuje się wysoką dokładnością oraz prostymi zależnościami analitycznymi.

Trzecie podejście: modelowanie iteracyjne.

Pozwala ono wykryć sprzeczności między modułowym opisem elementów systemu i koniecznością wyznaczenia ich wzajemnych interakcji.

Opracowany obecnie aparat matematyczny teorii obsługi masowej procesów markowskich i semimarkowskich, dosyć efektywnie opisuje funkcjonowanie ZSP, co potwierdzono obliczeniami i badaniami, na przykład [64].

Jednak, po pierwsze, w większości istniejących modeli nie jest uwzględniany proces przebrojenia ZSP, dlatego nie wolno uważać ich za adekwatne do opisu jego pracy w przypadku produkcji seryjnej i małoseryjnej. Przy budowaniu modeli i analizie wyników badań przeprowadzonych na modelach w celu doskonalenia tych systemów, nie jest określona właściwość elastyczności.

Po drugie, w większości opracowanych modeli znalazło zastosowanie wykładnicze prawo podziału parametrów funkcjonowania urządzeń, co znacznie ogranicza możliwości ich zastosowania. Należy jednak podkreślić, że obecnie otrzymano dowody teoretyczne i eksperymentalne niewykładniczego charakteru procesów zakłóceń i odbudowy w złożonych systemach technologicznych [26, 45], w tym w PZSP [21, 42]. Jednakże, fakt ten nie znalazł odpowiedniego odzwierciedlenia w modelach zautomatyzowanych systemów produkcyjnych [44, 54].

Po trzecie, w szeregu modeli stosowane są procedury iteracyjne, które ograniczają możliwości analizy i doskonalenia systemów.

Zagadnienie budowy wysokoadekwatnych modeli PZSP produkcji seryjnej i małoseryjnej na obecnym etapie nie jest rozwiązane w pełnym zakresie. Budowa modeli matematycznych funkcjonowania takich systemów z obliczeniem zakłóceń, odbudowy i przebrojenia, przy wykorzystaniu aparatu procesów semimarkowskich, umożliwiającego stosowanie swobodnego prawa podziału wielkości przypadkowych jest perspektywicznym kierunkiem badań.

Przeprowadzona analiza badań teoretycznych, przeobrażalnych zautomatyzowanych systemów produkcyjnych, uwzględniająca zagadnienia modelowania matematycznego oceny poziomu elastyczności i wydajności oraz innych charakterystyk funkcjonowania systemów danej klasy wskazuje, że najważniejszym związkiem funkcjonalnym PZSP produkcji seryjnej i małoseryjnej ze środowiskiem produkcyjnym, a także integralną charakterystyką zakresu technicznych możliwości wyposażenia, jest założony asortyment wytwarzanych wyrobów i możliwe granice jego zmiany. Każdy ustalony stan PZSP jest odwróconą reakcją na funkcjonalne interpretacje przy zmianie asortymentu wytwarzanych wyrobów, momenty przejścia z jednego stanu ustalonego w inny, co odpowiada przebrojeniu. Podstawową systemową właściwością PZSP produkcji seryjnej i małoseryjnej jest elastyczność.

Możliwość optymalizacji procesów technologicznych obróbki lub montażu nie jest decydującym czynnikiem podwyższenia wydajności i efektywności pracy PZSP, podobnie jak duże straty czasu związane z odbudowaniem systemu po zakłóceniach i przebrojeniach. Ponieważ przedsięwzięcia, kierowane na podwyższenie współczynnika elastyczności i niezawodności systemu, wymagają pewnych środków, celowe jest wykonanie wcześniejszej oceny efektywności ich wykorzystania, w oparciu o opis matematyczny, umożliwiający określenie warunków pracy PZSP.

1.5. Elastyczność i wydajność obrabiarek wielozadaniowych NC

Warunki rynkowe powodują, że istnieje konieczność szybkiego uruchamiania i zmiany asortymentu produkowanych wyrobów. Obrabiarki wielozadaniowe NC i elastyczne systemy produkcyjne, w skład których one wchodzi, łącząc wysoką elastyczność uniwersalnego wyposażenia i wysoką wydajność obrabiarek - automatów, są najbardziej efektywnym wyposażeniem w przypadku produkcji wieloasortymentowej.

Jednym z podstawowych problemów jest zwiększenie poziomu automatyzacji systemu produkcyjnego, co w sposób istotny obniża elastyczność produkcji.

Zależność obniżenia poziomu elastyczności (E) związanego ze wzrostem automatyzacji (PA) w odniesieniu do produkcji wieloasortymentowej przedstawiono na rys.1.2.

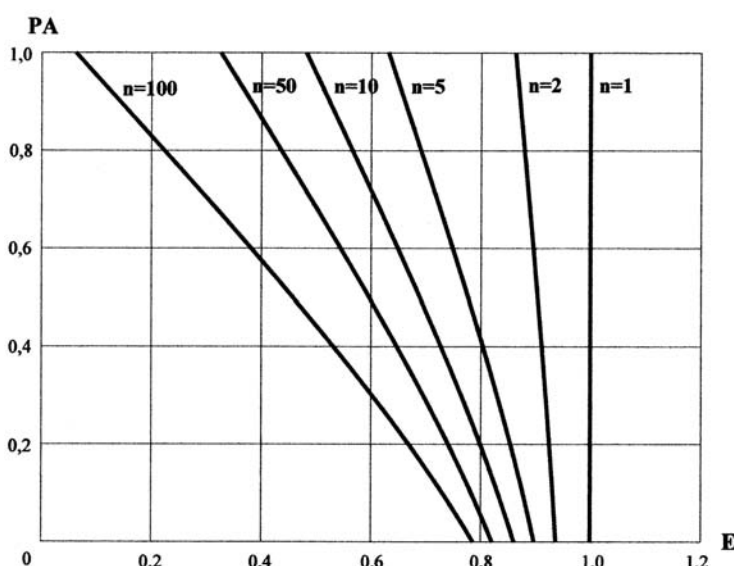
W tym przypadku poziom elastyczności (E) określony jest jako integralny wskaźnik niezawodności systemu produkcyjnego [73]:

$$E = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3, \quad (1.1)$$

gdzie: P_1 – prawdopodobieństwo pracy ESP bez zakłóceń z przyczyn technicznych (uszkodzenie wyposażenia),

P_2 – prawdopodobieństwo pracy ESP bez zakłóceń z przyczyn technologicznych (przebrojenie wyposażenia),

P_3 – prawdopodobieństwo pracy ESP bez zakłóceń z przyczyn organizacyjnych.



Rys. 1.2. Zależność poziomu elastyczności (E) od poziomu automatyzacji (PA) w produkcji wieloasortymentowej [71]

Poziom automatyzacji można przedstawić następującą zależnością:

$$PA = \frac{\sum_{i=1}^r L_i a_i}{L} = \sum_{i=1}^r l_i a_i, \quad (1.2)$$

gdzie: L_i – pracochłonność i -tej zautomatyzowanej operacji,

r – liczba zautomatyzowanych operacji,

L – ogólna pracochłonność procesu produkcyjnego,

$l_i = L_i / L$ – względna pracochłonność i-tej operacji,

a_i – współczynnik osiągnięcia planowanego efektu (podwyższenie wydajności, poprawa jakości produkcji lub warunków pracy) za pośrednictwem automatyzacji i-tej operacji ($a_i=0$, jeśli nie ma efektu; $a_i=1$, jeśli osiągnięty został planowany efekt).

Z analizy zależności na rys. 1.2 wynika, że intensywność obniżenia elastyczności E , przy wzroście n (ilości części lub operacji), rośnie.

Stosowana w literaturze wielokryterialna ocena elastyczności [89, 101] utrudnia ustalenie obszaru zastosowania środków i systemów automatyzacji, uzasadnionych z ekonomicznego punktu widzenia. Zastosowanie w charakterze kryterium elastyczności integralnego wskaźnika niezawodności ułatwia rozwiązanie wspomnianego problemu i umożliwia stosowanie matematycznego aparatu teorii niezawodności do oceny porównawczej poziomu elastyczności różnych struktur produkcji zautomatyzowanej we wszystkich fazach ich tworzenia i wdrożenia [76].

Jednakże, do zwiększenia niezawodności przewidywań, celowe jest przeprowadzenie oceny elastyczności według integralnego wskaźnika niezawodności. Ponieważ w metodyce nie wyodrębnia się podstawowych czynników, określających elastyczność systemu produkcyjnego, w tym przypadku nie jest uwidoczniiony związek między elastycznością i wydajnością obrabiarki wielozadaniowej NC.

Duży wpływ na wydajność zmianową ma wielkość partii uruchomienia - n . Na przykład, ze stosunku t_{pz} / t_j w zależności od wielkości partii części n wynika, że przy $n = 50$ szt., udział t_{pz} wynosi 10-15%, a przy $n = 5$ szt., udział t_{pz} rośnie do 50% i więcej [94, 101].

Przy zmniejszeniu wielkości partii i zwiększeniu ilości partii próbnych, niezbędne są dodatkowe nakłady na przygotowanie narzędzi, przyrządów i przebrojenie obrabiarki.

W praktyce wskaźnikiem określającym produkcję jest wydajność zmianowa (Q_z), która powinna zapewniać wykonanie kompletów części, niezbędnych w montażu. Wydajność zmianowa, uwzględniająca czas przebrojenia oprzyrządowania, może być określona z zależności:

$$Q_z = \frac{1}{t_j + \frac{t_{pz}}{n}} = \frac{Q_c}{1 + \frac{t_{pz}}{t_j \cdot n}} = Q_c \cdot \eta_E, \quad (1.3)$$

gdzie: η_E – współczynnik wydajności, uwzględniający elastyczność oprzyrządowania:

$$\eta_E = \frac{1}{1 + \frac{t_{pz}}{t_j \cdot n}}, \quad (1.4)$$

Q_C – cykliczna wydajność obróbki

$$Q_C = \frac{1}{t_g + t_p}, \quad (1.5)$$

gdzie: t_p – czas pomocniczy,

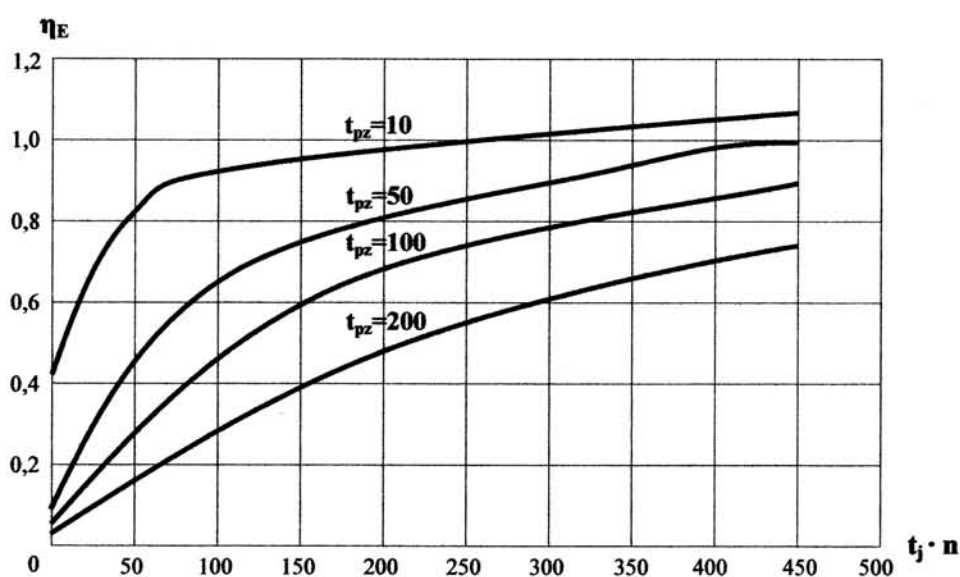
t_g – czas główny,

t_{pz} – czas przygotowawczo-zakończeniowy,

t_j – czas jednostkowy,

n – wielkość partii.

Z analizy zależności (1.3), (1.4), (1.5) wynika, że dominującym czynnikiem wpływającym na elastyczność wyposażenia jest pracochłonność jego przebrojenia przy przejściu do obróbki innego rodzaju części.



Rys. 1.3. Zależność współczynnika elastyczności produkcji η_E od iloczynu $t_j \cdot n$

Zwiększenie elastyczności (skrócenie t_{pz}) pozwala zdecydowanie podwyższyć efektywność wyposażenia. Efekt elastyczności widoczny jest zwłaszcza przy niskich wartościach t_j, n (produkcja wieloasortymentowa, rys. 1.3) [10, 102].

Jak pokazano wyżej, skrócenie czasu przebrojenia obrabiarki (t_{pz}) jest jednym z podstawowych kierunków zwiększenia efektywności wykorzystania wielozadaniowych

obrabiarek NC w produkcji mało- i średnioseryjnej, ponieważ równocześnie wzrasta wydajność i elastyczność systemu produkcyjnego.

Elastyczność ESP zależy od elastyczności wszystkich jego elementów, przy czym w znacznej mierze od elastyczności wyposażenia technologicznego. Jednakże obecnie żaden system oprzyrządowania nie odpowiada w pełni wymaganiom elastycznego systemu produkcyjnego, ponieważ przebrojenie obrabiarek NC jest realizowane głównie ręcznie.

Przebrojenie przyrządów-palet w produkcji wielkoseryjnej zwykle realizowane jest w wyniku wymiany specjalnych przyrządów-palet lub specjalnych przyrządów nierozbieralnych, w produkcji seryjnej – poprzez wymianę przyrządów na paletach i przebrojenie przyrządów bazowych, a w warunkach produkcji małoseryjnej – za pomocą prostych układów oraz uniwersalnych elementów ustalająco-mocujących.

Wadą przyrządów ustalająco-mocujących jest nadmiar elementów konstrukcyjnych (siatka dokładnych otworów ustalających albo wpustów), niedostatecznie wykorzystywanych w konkretnych nastawieniach, złożoność i duża pracochłonność przebrojenia.

Nadmiar elementów ustalających prowadzi do zmniejszenia sztywności przyrządów oraz do zwiększenia materiałochłonności, przy tym rośnie złożoność i pracochłonność wykonania poszczególnych części urządzenia.

Duża liczba możliwych elementów pośrednich w ustawieniu wielozadaniowej obrabiarki NC (stół-paleta-kątownik-podstawa) zmniejsza dokładność ustalania półwyrobów względem obrabiarkowego układu współrzędnych. W praktyce usunięcie tej wady realizowane jest zwykle poprzez zwiększenie dokładności wykonania części przyrządu albo w wyniku pomiaru baz montażowych przyrządu, bezpośrednio ustalających obrabiany półwyrób, a następnie korygowania programu sterującego na podstawie wyników pomiarów. Wiąże się to jednak z dużymi nakładami.

Zastosowanie tradycyjnych przyrządów, przeznaczonych do określonego asortymentu półwyrobów, mocowanych w przestrzeni roboczej obrabiarki, uwarunkowane jest parametrami geometrycznymi i ilością otworów lub wpustów ustalających, rozmieszczonych na płaszczyźnie bazowej przyrządu, a także odległościami ich osi. Zastosowanie przyrządu uniwersalnego umożliwia powiększenie asortymentu ustalanych półwyrobów, lecz prowadzi do zwiększenia ilości elementów ustalających przyrządu (złożoności przyrządu), zmniejszenia trwałości oraz zwiększenia nakładów na jego wykonanie.

Istotną wadą wymienionych systemów oprzyrządowania obrabiarek jest praktyczny brak możliwości automatyzacji przebrojenia przy przejściu do obróbki innej części, co znacznie obniża współczynnik elastyczności obrabiarki i poziom automatyzacji ESP.

Wykonanie oprzyrządowania automatycznie przezbrajanego do ESP jest jednym z perspektywicznych i najbardziej złożonych zadań.

W celu zwiększenia stopnia przezbrajalności obrabiarki i elastyczności ESP, opracowano uniwersalny przyrząd do uzbrajania obrabiarek, wyposażony w karetki i liniały z otworami, umożliwiającymi, poprzez regulację położenia kołków ustalających, ustawienie szerokiego zakresu części obrabianych i przyspieszenie przezbrojenia urządzenia [27].

Wadą takiego przyrządu jest jego złożoność i mniejsza dokładność ustalania półwyrobów w wyniku luzów w połączeniu „kołek-otwór”, które w procesie eksploatacji ulegają zwiększeniu, co wpływa na zmniejszenie dokładności obróbki części. Oprócz tego, możliwe położenie kołków ustalających w przestrzeni roboczej obrabiarki jest ograniczone skrajnym przemieszczeniem karetek i liniałów, a także ilością otworów ustalających i odległościami ich osi, rozmieszczonych na liniałach. Zmniejsza to uniwersalność urządzenia i elastyczność obrabiarki NC.

Jeden z wariantów zautomatyzowanego przezbrajania urządzeń został opracowany przez firmę „Toyota”. Jego istota polega na wprowadzeniu elementów ustalających półwyrób według zadanego programu [19, 20, 27]. Wadą przyrządu jest złożoność, tzn.: występowanie układu hydraulicznego, listew, kół zębatach, a także układu sterowniczego.

Na skutek dużej złożoności, niskiej dokładności i małej efektywności wskazane wyżej specjalne systemy wyposażenia obrabiarkowego nie znajdują szerokiego zastosowania w praktyce produkcyjnej.

1.6. Analiza metod zwiększania efektywności pracy obrabiarek wielozadaniowych NC

Niekorzystna współzależność wydajności i elastyczności obrabiarek wielozadaniowych NC, przy wysokim poziomie ich niezawodności [51], to główny problem organizacji produkcji jednostkowej i małoseryjnej. Analiza literatury przedmiotowej, przeprowadzone badania oraz zastosowane różne rozwiązania konstrukcyjne pokazują, że najlepsze wymierne efekty uzyskiwane są przez skrócenie czasów przezbrojenia (*quick changeover*) tych obrabiarek, przy zastosowaniu metody SMED (*Single-Minute Exchange of Die*) [74]. System SMED jest teorią i zestawem technik, umożliwiających dokonanie wymiany i nastawienia narzędzi oraz przyrządów w czasie poniżej 10 minut, tzn. w jednostkowej liczbie minut (*single-minute*). Udowodniono, że jego zastosowanie

w prawie każdym przypadku powoduje radykalne zmniejszenie czasów przebrojenia maszyn.

Na czas przebrojenia kluczowy wpływ ma grupa operacji przygotowawczych. Decydują one o możliwości zwiększenia elastyczności systemów produkcyjnych.

Operacje te określane są jako:

- **wewnętrzne** - wykonywane tylko po zatrzymaniu obrabiarki,
- **zewnętrzne** - wykonywane w czasie pracy obrabiarki.

Oba rodzaje operacji można podzielić na 4 grupy:

- 1) Przygotowanie, kontrola i regulacja narzędzi i przyrządów (stanowią ok. 30% wszystkich operacji przygotowawczych) - są to operacje wewnętrzne.
- 2) Montaż i demontaż narzędzi oraz przyrządów (ok. 5% wszystkich operacji przygotowawczych) - operacje wewnętrzne.
- 3) Ustawianie narzędzi i przyrządów (ok. 15% wszystkich operacji przygotowawczych) - operacje wewnętrzne i zewnętrzne.
- 4) Nastawianie obrabiarki i wykonanie serii próbnej (ok. 50% wszystkich operacji przygotowawczych) - operacje wewnętrzne.

Uwzględniając założenia metody SMED [74], należy przyjąć, że najważniejszym elementem przebrojenia obrabiarki jest stworzenie możliwości zamiany jak największej liczby operacji wewnętrznych na operacje zewnętrzne.

Efekt taki można uzyskać w następujący sposób:

Dokonanie separacji operacji wewnętrznych i zewnętrznych

W tym przypadku należy zwrócić szczególną uwagę na czynności związane z transportem i wymianą narzędzi oraz oprzyrządowania.

Efekty analizy, skierowanej głównie na operacje wewnętrzne, to:

- wyznaczenie pracowników, uprawnionych do ich wykonywania,
- określenie narzędzi i przyrządów (także ich sprawności),
- właściwy dobór materiałów,
- prawidłowe określenie parametrów pracy,
- właściwy dobór narzędzi i przyrządów pomiarowych.

Tak zrealizowana separacja wyeliminuje czas związany z wymianą niesprawnych narzędzi i przyrządów, a kontrola sprawności narzędzi - błędnie wykonane wyroby.

Dokonanie zamiany operacji wewnętrznych na zewnętrzne

Taka zamiana jest możliwa poprzez:

- a) **wczesne przygotowanie obrabiarki**, czyli transport narzędzi, przyrządów i materiałów, ale też ustawienie parametrów pracy obrabiarki jako operacji zewnętrznej;
- b) **standaryzację operacji montażu narzędzi i przyrządów** mającą na celu umożliwienie takiego dostosowania wymiarów zewnętrznych przyrządów i części chwytowych narzędzi, aby wyeliminować ich ustawianie na obrabiarce;
- c) **przyrządy pośredniczące**, stosowane, gdy niemożliwe jest ujednolicenie wymiarów zewnętrznych narzędzi (standaryzacja).

Optymalizacja operacji przygotowawczych

Jest to znalezienie dodatkowych możliwości skrócenia czasu t_{pz} poprzez:

- a) **optymalizację operacji zewnętrznych**, czyli magazynowanie i transport narzędzi, przyrządów oraz materiałów (magazynowanie narzędzi i przyrządów przygotowanych do kolejnych operacji, dokładne określenie ich ilości potrzebnej w magazynie);
- b) **optymalizację operacji wewnętrznych**, czyli:
 - stosowanie przyrządów szybkomocujących [74],
 - eliminację regulacji, która stanowi nawet 50% t_{pz} (szablony, linie centrujące lub skale numeryczne określające dokładność ustawienia elementu względem obrabiarki),
 - mechanizację niektórych operacji przygotowawczych (mechaniczny transport narzędzi i przyrządów, zdalne sterowanie ich mocowaniem) [66, 67],
 - równoległe wykonywanie operacji przygotowawczych przez dwie osoby [3].

Metody skrócenia czasu przezbrajania obrabiarek wielozadaniowych, określane są na podstawie klasyfikacji, dotyczącej etapów technologii wytwarzania zautomatyzowanego.

Badanie wzajemnego wpływu różnorodnych czynników w czasie obróbki części umożliwia wyodrębnienie dominujących w czasie realizowania operacji przygotowawczych.

Uwzględniając powstałą w ten sposób hierarchiczną, wielopoziomą strukturę systemu produkcyjnego, można wyodrębnić dwa najważniejsze czynniki, wpływające na skrócenie czasu przezbrajania obrabiarki, a więc na zwiększenie elastyczności systemu produkcyjnego.

Są to narzędzia i przyrządy.

W związku z tym metody zwiększania elastyczności można podzielić na:

Technologiczne, związane z realizacją operacji przygotowawczych w procesie produkcyjnym poprzez ich optymalizację, np. układy magazynowo-transportowe.

Konstrukcyjne, związane z budową obrabiarki, narzędzi i uchwytów - realizowane jako zamiana operacji wewnętrznych na zewnętrzne (wczesne przygotowanie obrabiarki), np.:

- modułowa budowa obrabiarek,
- stosowanie dwóch przestrzeni roboczych,
- odpowiednia konstrukcja narzędzi i przyrządów.

Na zwiększenie elastyczności systemu produkcyjnego będzie miał wpływ czas trwania następujących operacji przygotowawczych:

- a) **wymiana narzędzi**, realizowana jako:
 - optymalizacja operacji zewnętrznych i wewnętrznych,
 - zamiana operacji wewnętrznych na zewnętrzne.
- b) **regulacja (ustawienie) narzędzi**, realizowana jako:
 - optymalizacja operacji zewnętrznych i wewnętrznych.
- c) **wymiana przyrządów obróbkowych**, realizowana jako:
 - optymalizacja operacji wewnętrznych,
 - zamiana operacji wewnętrznych na zewnętrzne.
- d) **regulacja (ustawienie) przyrządów obróbkowych**, realizowana jako:
 - optymalizacja operacji wewnętrznych.

Korzyści dla przedsiębiorstwa i pracownika, jakie wynikają ze skutecznego zastosowania metod skrócenia czasów przebrojeń obrabiarek wielozadaniowych NC, to:

- zwiększenie elastyczności obrabiarek (metody konstrukcyjne i technologiczne),
- wyższa jakość produkcji (metody konstrukcyjne i technologiczne),
- efekty ekonomiczne wynikające ze skrócenia cyklu produkcyjnego i mniejszych zapasów magazynowych,
- zwiększenie poziomu bezpieczeństwa przez mechanizację przebrojeń, zmniejszenie ilości materiałów na stanowisku pracy, zmniejszenie ilości narzędzi na stanowisku pracy.

1.7. Podsumowanie analizy zagadnienia

Brak systemowości w klasyfikacji otworów prowadzi do powstawania niezliczonego zbioru typów otworów i odpowiednio dróg ich obróbki. Przy tym istniejące systemy zautomatyzowanego projektowania technologii wykonania otworów, z powodu ograniczonej ilości ich typów, są mało efektywne.

Nie da się wyraźnie rozgraniczyć czynników wpływających na elastyczność, ponieważ zazwyczaj są wzajemnie powiązane. Najbardziej właściwymi do scharakteryzowania procesu funkcjonowania ESP z obliczeniem zakłóceń odbudowy i przebrojenia, są następujące strukturalne elementy elastyczności (zgodnie z przeprowadzonym wcześniej przeglądem):

- elastyczność parametryczna,
- elastyczność trwałości,
- elastyczność asortymentu,
- elastyczność operacyjna,
- elastyczność organizacyjna.

Czynnik losowości, charakterystyczny w przypadku produkcji wieloasortymentowej, przejawia się w tym, że wszystkie zasoby (materialne, techniczne, informacyjne, energetyczne) systemu są wykorzystywane zgodnie z zapotrzebowaniem na nie. Odpowiedź na pojawiające się zapotrzebowania stochastyczne na obróbkę tej lub innej części danego typu, znacznie komplikuje zadania analizy i doskonalenia systemów przezbrajalnych. Bardziej złożony staje się model matematyczny, niezbędny do adekwatnego opisu pracy systemu.

Istniejące modele matematyczne teorii obsługi masowej, procesy markowskie i semimarkowskie dosyć efektywnie opisują funkcjonowanie zautomatyzowanych systemów produkcyjnych, lecz należy wziąć pod uwagę, że:

- większość istniejących modeli nie uwzględnia procesu samoregulacji w systemie, dlatego nie są one wystarczające do opisu pracy PZSP produkcji seryjnej i małoseryjnej,
- w większości opracowanych modeli stosowany jest wykładniczy charakter podziału parametrów funkcjonowania urządzeń, co znacznie komplikuje możliwości ich wykorzystania,
- w szeregu modeli stosowane są procedury iteracyjne, które ograniczają możliwości analizy i doskonalenia systemów.

Analiza literatury krajowej i zagranicznej wykazała, że istniejące w praktyce metody i środki przebrojenia wielozadaniowych obrabiarek NC nie zapewniają istotnego skrócenia

czasu przebrojenia, a zautomatyzowane przyrządy do przebrojenia obrabiarki nie są efektywne. Nie znajdują zastosowania, ponieważ charakteryzują się dużą złożonością i wysokimi kosztami wykonania.

Pracochłonność regulacji i przebrojenia obrabiarek wielowrzecionowych NC, zwłaszcza wymagających wielostanowiskowych ustawień, przy wykorzystaniu tradycyjnych metod przebrojenia znacznie rośnie, na skutek czego nieracjonalne staje się wykorzystanie ich w wieloasortymentowej produkcji małoseryjnej.

Problem opracowania nowych technologicznych (regulacje, przebrojenia, nastawienia, w tym także zautomatyzowane) oraz konstrukcyjnych (przyrządy montażowo-ustalające, elementy ustalające, uchwyty itd.) metod zwiększania elastyczności i wydajności ESP, pozwalających na skrócenie czasu uzbrojenia i przebrojenia obrabiarek wielozadaniowych NC w warunkach wieloasortymentowej produkcji, jest więc aktualny i perspektywiczny.

Korzyści uzyskiwane przez przedsiębiorstwa i pracowników, wynikające ze skutecznego zastosowania metod skrócenia czasów przebrojeń obrabiarek wielozadaniowych NC, to:

- zwiększenie elastyczności obrabiarek (metody konstrukcyjne i technologiczne),
- wyższa jakość produkcji (metody konstrukcyjne i technologiczne),
- efekty ekonomiczne wynikające ze skrócenia czasu cyklu produkcyjnego i mniejszych zapasów magazynowych,
- zwiększenie poziomu bezpieczeństwa w wyniku:
 - mechanizacji przebrojeń,
 - zmniejszenia ilości materiałów na stanowisku pracy,
 - zmniejszenia ilości narzędzi na stanowisku pracy.

2. TEMAT, CEL I ZAKRES PRACY

2.1. Sformułowanie problemu badawczego

Obrabiarki wielozadaniowe NC, pracujące autonomicznie oraz w składzie elastycznych systemów produkcyjnych, są szeroko stosowane w wielu przedsiębiorstwach przemysłowych.

Istotnym problemem jest efektywne ich wykorzystanie oraz określenie racjonalnej ilości obrabiarek w systemie produkcyjnym.

Efektywność ich pracy można w znaczny sposób podnieść w wyniku zmniejszenia czasów przebrojenia poprzez usprawnienie ustawienia i zamocowania części obrabianych, skrócenie czasów ustawienia i regulacji narzędzi oraz automatyzację ich wymiany.

Opracowanie modeli matematycznych, umożliwiających określenie racjonalnej liczby obrabiarek do systemu produkcyjnego oraz metod technologicznych i konstrukcyjnych, pozwalających na znaczne zwiększenie efektywności ich pracy, jest zagadnieniem aktualnym i ważnym w przemyśle maszynowym.

2.2. Uzasadnienie wyboru tematu

Analiza literatury wykazała, że istniejące metody przezbierania obrabiarek wielozadaniowych NC nie umożliwiają istotnego skrócenia czasu przebrojenia, a zautomatyzowane przyrządy do przebrojenia obrabiarek nie są efektywne, ponieważ charakteryzują się:

- dużą złożonością,
- wysokimi kosztami wykonania.

W chwili obecnej około 90% obrabiarek NC jest przezbieranych ręcznie, co znacznie obniża ich elastyczność, a w efekcie końcowym także wydajność.

Na zwiększenie wydajności i elastyczności obrabiarek wielozadaniowych NC duży wpływ ma oprzyrządowanie do zautomatyzowanego zamocowania, regulacji i nastawienia narzędzi oraz części obrabianych.

Znane dotychczas modele matematyczne przeznaczone są do obrabiarek NC, stosowanych w produkcji wielkoseryjnej i masowej. Nie uwzględniają one możliwości zastosowania obrabiarek wielozadaniowych NC w produkcji małoseryjnej, a szczególnie jednostkowej.

W chwili obecnej istnieje bardzo duże zapotrzebowanie na elastyczne linie produkcyjne, złożone właśnie z obrabiarek wielozadaniowych NC.

Dlatego należy opracować jeden model matematyczny w przypadku obrabiarki wielozadaniowej NC pracującej indywidualnie oraz drugi - elastycznej linii produkcyjnej, złożonej z takich obrabiarek.

Konieczne jest także opracowanie przyrządów do zautomatyzowanego ustawiania, regulacji i mocowania narzędzi oraz usprawnienia ustawiania i mocowania części obrabianych na obrabiarkach wielozadaniowych NC, co ma bardzo znaczący wpływ na skrócenie czasu przebrojenia, a przez to zwiększenie ich wydajności i niezawodności.

2.3. Cel pracy

Zwiększenie wydajności i elastyczności obrabiarek wielozadaniowych NC oraz elastycznych systemów produkcyjnych, na podstawie opracowanych modeli matematycznych funkcjonowania obrabiarek NC, pracujących autonomicznie oraz w elastycznych systemach produkcyjnych, a także metod technologicznych i konstrukcyjnych, skracających czas przygotowawczo-zakończeniowy (przezbieranie i nastawianie obrabiarek).

2.4. Tezy naukowe pracy

- Automatyzacja przezbierania i nastawiania obrabiarek wielozadaniowych NC, na podstawie opracowanych modeli matematycznych funkcjonowania tych obrabiarek jako systemów obsługi masowej, pozwala zwiększyć elastyczność i wydajność elastycznych systemów produkcyjnych.
- Na podstawie opracowanego modelu matematycznego funkcjonowania obrabiarek NC i elastycznych systemów produkcyjnych, można określić wpływ intensywności strumieni uszkodzeń i intensywności strumieni przywrócenia zdolności do pracy na efektywność pracy obrabiarek wielozadaniowych NC oraz synchronicznych elastycznych linii produkcyjnych oraz ustalić taką liczbę obrabiarek w synchronicznej elastycznej linii produkcyjnej, zawierającej maszynę technologiczną rezerwową, przy której wydajność linii jest najwyższa.

2.5. Zakres pracy

- Uzasadnienie tematyki badań na podstawie analizy literatury przedmiotu.
- Opracowanie klasyfikacji otworów, występujących w częściach klasy korpus według wyróżników konstrukcyjnych i technologicznych.
- Opracowanie klasyfikacji metod technologicznych i konstrukcyjnych zwiększenia elastyczności i wydajności (skrócenia czasów przezbrojenia) obrabiarek wielozadaniowych NC oraz uzasadnienie jej przydatności w projektowaniu procesów technologicznych.
- Opracowanie metod technologicznych (programu sterującego i innych sposobów nastawienia obrabiarek), zwiększających elastyczność i wydajność obrabiarek wielozadaniowych NC.
- Opracowanie metod konstrukcyjnych (przysrządów do ustawiania, zamocowania i regulacji narzędzi oraz części obrabianych), w celu zwiększenia elastyczności i wydajności obrabiarek wielozadaniowych NC.
- Opracowanie modelu matematycznego funkcjonowania obrabiarek wielozadaniowych NC jako systemów złożonych.
- Opracowanie modelu matematycznego funkcjonowania obrabiarek wielozadaniowych NC w systemach obsługi masowej.
- Opracowanie modelu matematycznego funkcjonowania synchronicznej elastycznej linii produkcyjnej, zawierającej maszynę technologiczną rezerwową, umożliwiającego określanie wydajności i niezawodności elastycznych systemów produkcyjnych.
- Określenie racjonalnej ilości obrabiarek wielozadaniowych NC w synchronicznej elastycznej linii produkcyjnej, zawierającej maszynę technologiczną rezerwową.

3. PODSTAWY TEORETYCZNE ZWIĘKSZENIA EFEKTYWNOŚCI PRACY OBRABIAREK WIELOZADANIOWYCH NC W ELASTYCZNYCH SYSTEMACH PRODUKCYJNYCH

Dążenie do zwiększenia możliwości zastosowania obrabiarek wielozadaniowych, szczególnie w produkcji małoseryjnej i jednostkowej [36, 37, 38, 81], spowodowało konieczność opracowania modeli matematycznych [92], mających na celu:

- zwiększenie ich wydajności i elastyczności poprzez automatyzację przebrojenia i nastawiania narzędzi oraz części obrabianych,
- eliminację lub znaczne skrócenie czasów przestojów po awariach,
- dobór racjonalnej ilości obrabiarek, pracujących w synchronicznych elastycznych liniach produkcyjnych.

3.1. Metodologia modelowania efektywności pracy obrabiarek wielozadaniowych NC w elastycznych systemach produkcyjnych

Elastyczny system produkcyjny, składający się z obrabiarek wielozadaniowych NC, można rozpatrywać jako system obsługi masowej, a wzajemny związek jego elementów, uwarunkowany procesami technologicznymi wykonania części, jako stochastyczną sieć SOM, w przypadku której określone są następujące podstawowe parametry wejściowe [3, 11, 25, 61]:

- asortyment części, obrabianych na każdej obrabiarence, wynikający z programu produkcyjnego;
czas obróbki każdej części określany czasem pracy według programu sterującego;
- wielkość partii części każdego rodzaju i liczba partii, wykonanych w ciągu roku,
 - czas przebrojenia obrabiarki przy zmianie rodzaju części.

Półfabrykat, wchodzący na obrabiarkę, traktowany jest jako zapotrzebowanie na obsługę. Jeśli w momencie przyjęcia zapotrzebowania obrabiarka jest wolna, realizowane jest ono od razu, a jeśli zajęta - oczekuje na swoją kolejność. Model procesu realizacji zapotrzebowań na poszczególnych obrabiarkach ESP odzwierciedla proces produkcyjny.

Strumień zapotrzebowań, tak jak wielkość partii uruchomienia, czas obróbki oraz czas przebrojenia obrabiarek, jest wielkością przypadkową i zależy od licznych czynników (kształtu i wymiarów części obrabianych, ilości powierzchni obrabianych, ich dokładności i chropowatości, ilości części, będących w trakcie obróbki itd.) [11, 61, 62, 63, 79].

Niezależnie od zdeterminowania niektórych parametrów początkowych produkcji, proces produkcyjny zależy od wielu przypadkowych czynników.

Dlatego strumień zdarzeń, określający stan faktyczny SOM, nie jest regularny. Do takich zdarzeń należą:

- zmiana asortymentu części, związana z często zmieniającą się koniunkturą na rynku,
- awaryjne przestoje obrabiarek, np: na skutek braku półfabrykatów, oprzyrządowania, ustawiacza, energii,
- zmiana przebiegu procesu produkcyjnego po zmianie wielkości partii produkowanych części,
- przeniesienie operacji na inny model obrabiarki,
- zamiana obróbki jednostanowiskowej na wielostanowiskową.

Taki proces produkcyjny nazywany jest markowskim, a jego charakterystyki zależą tylko od stanu SOM w rozpatrywanej chwili, nie zależą natomiast od tego, kiedy i jak przeszedł on do tego stanu.

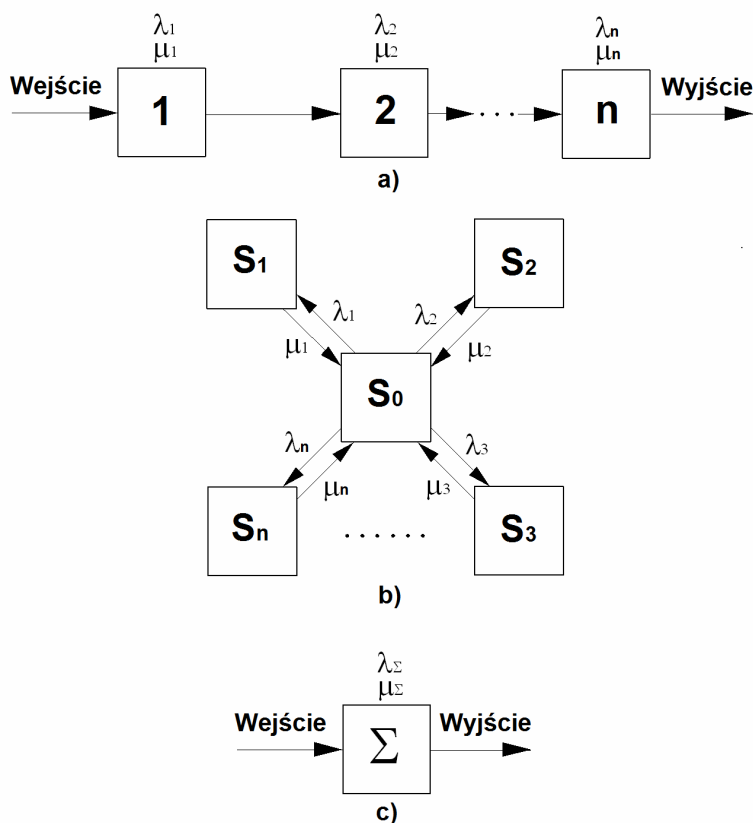
Ponieważ proces zakłada wielokrotne powtórzenie jednorodnych zdarzeń A w przypadkowych odstępach czasu i odpowiada trzem niżej wymienionym warunkom, jest strumieniem zdarzeń najprostszym (albo stacjonarnym puassonowskim):

- prawdopodobieństwo zaistnienia zdarzenia $P_n(t)$ zależy tylko od t (długości przedziału czasowego) i nie zależy od czasu początkowego t_0 oraz intensywności strumienia zapotrzebowań $\lambda = const$, taki strumień zdarzeń jest stacjonarny,
- prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia $P_n(t)$ nie zależy od liczby realizacji A , mających miejsce w każdym przedziale czasowym, poprzedzającym t_i , a każde zdarzenie zachodzi na skutek określonych przyczyn,
- strumień zdarzeń jest prosty, a zdarzenia przebiegają w nim pojedynczo, a nie grupowo, po kilka jednocześnie.

Obrabiarki wielozadaniowe NC są przeznaczone głównie do obróbki części klasy korpus, mających wiele otworów o różnych średnicach, o dokładności (od 5 do 11 klasy), na których bazowane są łączone z korpusem części oraz otwory do połączeń mocujących (do przyłączania części za pomocą śrub, kołków, ułatwiających obróbkę montaż i bazowanie). Wymiary średnic otworów głównych wahają się w szerokim zakresie (od 16 do 50 mm) i zależą przede wszystkim od rodzaju części. Warunki rynkowe wymagają od nowoczesnej produkcji szybkiego uruchomienia oraz zmiany asortymentu produkowanych wyrobów. Przy tym obrabiarki NC i elastyczne systemy produkcyjne, w skład których one wchodzi,

łącząc wysoką elastyczność uniwersalnego wyposażenia i wysoką wydajność obrabiarek-automatów, są najbardziej efektywne w przypadku produkcji wieloasortymentowych.

Każdą obrabiarkę wielozadaniową NC można rozpatrywać jako system złożony. Jeżeli system zawiera „n” elementów połączonych szeregowo, uszkodzenie każdego z nich prowadzi do niesprawności całego systemu. Obrabiarkę wielozadaniową NC można przedstawić przy pomocy grafu - rys. 3.1.



Rys. 3.1. Graf stanów obrabiarki wielozadaniowej NC:
a) elementy systemu od 1 do n;
b) stany elementów;
c) obrabiarka jako suma wszystkich elementów

Stany na grafie:

S_0 – wszystkie n elementy systemu są sprawne,

S_1 – pierwszy element uległ uszkodzeniu i system jest niesprawny,

S_2 – drugi element uległ uszkodzeniu i system jest niesprawny,

.....,

S_n – n-ty element uległ uszkodzeniu i system jest niesprawny.

Oznaczenia na grafie:

$\lambda_i, (i = 1, \bar{n})$ – intensywność strumienia uszkodzeń elementów 1-n,

$\mu_i, (i = 1, \bar{n})$ – intensywność strumienia przywracania zdolności do pracy elementów 1-n.

Ponieważ po uszkodzeniu dowolnego z elementów, pozostałe przestają funkcjonować w czasie przywrócenia jego zdolności do pracy, uważa się, że jednocześnie uszkodzeniu może ulec tylko jeden element. Wszystkie strumienie uszkodzeń i przywracania zdolności do pracy traktowane są jako proste.

System równań do określenia ostatecznych prawdopodobieństw ma postać:

$$\begin{aligned} P_0 \sum_{i=1}^n \lambda_i &= \sum_{i=1}^n P_i \mu_i; \\ P_1 \mu_1 &= P_0 \lambda_1; \\ P_2 \mu_2 &= P_0 \lambda_2; \\ &\dots\dots\dots \\ P_i \mu_i &= P_0 \lambda_i; \\ &\dots\dots\dots \\ P_n \mu_n &= P_0 \lambda_n. \end{aligned} \tag{3.1}$$

Warunek normowania można zapisać jako:

$$\sum_{j=0}^n P_j = 1. \tag{3.2}$$

Po zamianie pierwszego równania układu (3.1) na warunek normowania (3.2) i jego rozwiązania, każde z prawdopodobieństw $P_i, (i = 1, \bar{n})$ określone jest przez P_0 :

$$P_i = P_0 \frac{\lambda_i}{\mu_i}. \tag{3.3}$$

Zbiór numerów i oznaczono I , tj. $i \in I$. Wprowadzono numer j , należący do tego zbioru: $j \in I$. Z uwzględnieniem nowych oznaczeń, po podstawieniu (3.3) do warunku normowania (3.2), otrzymano:

$$P_0 = \frac{1}{1 + \sum_{j=1}^n \frac{\lambda_j}{\mu_j}}. \tag{3.4}$$

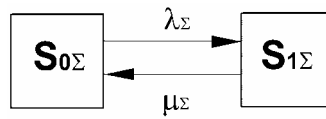
Po podstawieniu (3.4) do (3.3) ostatecznie uzyskano:

$$P_i = \frac{\lambda_i}{(1 + \sum_{j=1}^n \frac{\lambda_j}{\mu_j})\mu_i} = \frac{\rho_i}{1 + \sum_{j=1}^n \rho_j}, \quad (3.5)$$

gdzie: $\rho_i = \frac{\lambda_i}{\mu_i}, \rho_j = \frac{\lambda_j}{\mu_j}$.

System wyjściowy (rys. 3.1) zastąpiono prostym elementem, który może znajdować się w dwóch stanach: roboczym (stan pracy) i nieroboczym (stan uszkodzenia tj. niesprawności).

Graf takiego elementu lub nowego systemu przedstawiono na rys. 3.2.



Rys. 3.2. Graf elementu systemu

Określono λ_{Σ} :

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \lambda_i. \quad (3.6)$$

Wartość μ_{Σ} określana jest z zależności:

$$\mu_{\Sigma} = \frac{P_0}{1 - P_0} \lambda_{\Sigma}. \quad (3.7)$$

Po podstawieniu (3.4) do (3.7) ostatecznie otrzymano:

$$\mu_{\Sigma} = \frac{\lambda_{\Sigma}}{\sum_{j=1}^n \rho_j}. \quad (3.8)$$

3.2. Model matematyczny procesu przebrojenia obrabiarek wielozadaniowych NC w elastycznych systemach produkcyjnych jako systemach obsługi masowej

Wystarczająco adekwatnym aparatem matematycznym do opisu funkcjonowania elastycznych systemów produkcyjnych, w składzie których znajdują się wielozadaniowe obrabiarki NC, są systemy obsługi masowej [64], z następującymi parametrami wejściowymi:

- części obrabiane na każdej obrabiarce (zadane są grafikami kalendarzowymi),
- czas obróbki każdej części wyrażony czasem pracy według programu sterującego,

- wielkość partii każdego rodzaju i liczba partii obrabianych w ciągu roku,
- czas przebrojenia obrabiarki przy zmianie rodzaju części.

Chociaż pewne parametry wejściowe produkcji są zdeterminowane, to proces produkcyjny zależy od wielu czynników losowych, a więc strumienie zdarzeń określające faktyczny stan SOM nie są regularne. Do takich zdarzeń zalicza się:

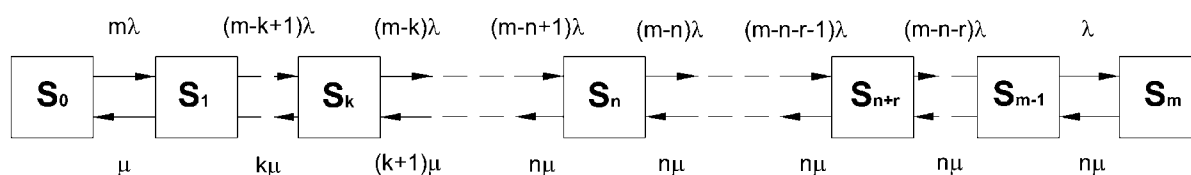
- zmianę asortymentu części, związaną z szybko zmieniającą się koniunkturą na rynku;
- awaryjne przestoje obrabiarek z powodu braku części, wyposażenia, ustawiacza, energii;
- zmianę realizacji procesu produkcyjnego po zmianie wielkości partii, przekazaniu operacji na obrabiarkę innego rodzaju, zamianę przyrządu jednopozycyjnego na wielopozycyjny.

Uważa się, że rozpatrywane SOM są procesami markowskimi, a wszystkie strumienie zdarzeń, przestawiające systemy ze stanu w stan, są najprostsze.

Rozpatrzono system następującego typu. Istnieje m źródeł zapotrzebowań, są one obsługiwane przez n kanałów ($n < m$). Każde źródło zapotrzebowań generuje strumień zapotrzebowań o intensywności λ , lecz na razie nie jest on obsługiwany, w czasie obsługi strumień zapotrzebowań zatrzymuje się. Obsługa jednego zapotrzebowania trwa średnio t_0 . Jeżeli wszystkie kanały są zajęte, to zapotrzebowanie oczekuje w kolejce nieograniczony czas. Należy określić prawdopodobieństwo stanów systemu i wskaźniki jego efektywności.

Warunki wstępne są określane w następujący sposób: n ustawiaczy obsługuje m obrabiarek, na których obrabiane są części jednego rodzaju. Każda obrabiarka średnio zatrzymuje się po czasie $t_n = \frac{1}{\lambda}$ równym czasowi obróbki partii części. Czas przebrojenia jednej obrabiarki jest równy $t_0 = \frac{1}{\mu}$. Należy określić średnią ilość zajętych ustawiaczy, bezwzględną możliwość przepustową SOM i średnią liczbę obrabiarek oczekujących na przebrojenie przy intensywności strumieni zapotrzebowań na przebrojenia λ_i i obsługi μ_i równej w przypadku każdej z obrabiarek ($\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_m = \lambda$; $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_m = \mu$).

Graf stanów takiego systemu pokazano na rys. 3.3.



Rys. 3.3. Graf stanów SOM

Stany SOM numerowane są zgodnie z liczbą obrabiarek wymagających przebrojenia:

S_0 – żadna obrabiarka nie wymaga przebrojenia, pracownicy nie są zajęci;

S_1 – jedna obrabiarka wymaga przebrojenia, jeden pracownik jest zajęty, pozostali wolni;

.....;

S_k – (k) obrabiarek wymaga przebrojeń, k pracowników jest zajętych, pozostali są wolni
($k < n$);

.....;

S_n – (n) obrabiarek wymaga przebrojenia, wszyscy robotnicy są zajęci;

.....;

S_{n+r} – ($n + r$) obrabiarek wymaga przebrojenia, z nich n jest przebrajanych, r oczekuje w kolejce ($n + r < m$);

.....

S_{m-1} – ($m-1$) obrabiarek wymaga przebrojenia, z nich n jest przebrajanych, ($m-n+1$) oczekuje w kolejce;

S_m – wszystkie obrabiarki wymagają przebrojenia, z nich n jest przebrajanych, ($m-n$) oczekuje w kolejce.

Zakładając, że system funkcjonuje w granicznym trybie stacjonarnym, zestawiono układ równań Kołmogorowa do wyznaczenia ostatecznych prawdopodobieństw $P_i, i = \overline{1, m}$:

$$\left\{ \begin{array}{l} m\lambda P_0 = \mu P_1, \\ \mu P_1 + (m-1)\lambda P_1 = 2\mu P_2 + m\lambda P_0 \\ \dots\dots\dots \\ k\mu P_k + (m-k)\lambda P_k = (k+1)\mu P_{k+1} + (m-k+1)\lambda P_{k-1}, \\ \dots\dots\dots \\ n\mu P_n + (m-n)\lambda P_n = n\mu P_{n+1} + (m-n+1)\lambda P_{n-1}, \\ \dots\dots\dots \\ n\mu P_{n+r} + (m-n-r)\lambda P_{n+r} = n\mu P_{n+r+1} + (m-n-r+1)\lambda P_{n+r-1}, \\ \dots\dots\dots \\ n\mu P_{m-1} + \lambda P_{m-1} = n\mu P_m + 2\lambda P_{m-2}, \\ n\mu P_m = \lambda P_{m-1}, \end{array} \right. , \quad (3.9)$$

rozwiązywanego przy uwzględnieniu warunku normującego:

$$\sum_{i=0}^m P_i = 1. \quad (3.10)$$

Średnia ilość zajętych ustawiaczy określana jest jako wartość oczekiwana liczby zajętych ustawiaczy:

$$K_{sp} = \sum_{i=0}^{n-1} iP_i + n \sum_{i=n}^m P_i. \quad (3.11)$$

Średnia ilość obrabiarek przezbrajanych i oczekujących na przezbrojenie:

$$W_{sp} = P_1 + 2P_2 + \dots + mP_m = \sum_{i=1}^m iP_i. \quad (3.12)$$

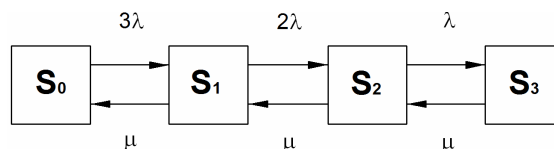
Bezwzględna przepustowość (średnia liczba zapotrzebowań, obsługiwanych w jednostce czasu):

$$A = \mu K_{sp}. \quad (3.13)$$

Rozpatrzono przykład takiego SOM przy przezbrajaniu ręcznym i automatycznym obrabiarek wielozadaniowych NC w składzie ESP.

Jeden ustawiacz obsługuje trzy obrabiarki wielozadaniowe, na których obrabiane są części jednego rodzaju (tzn.: $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3$ i $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3$).

Graf stanów systemu pokazany jest na rys. 3.4.



Rys. 3.4. Graf SOM z trzech obrabiarek: S_0 - wszystkie obrabiarki pracują, S_1 - na jednej obrabiarce obrabiana jest partia części, S_2 - dwie obrabiarki zatrzymały się, S_3 - wszystkie obrabiarki zatrzymały się (we wszystkich przypadkach ustawiacz obsługuje jedną obrabiarkę)

Każda obrabiarka zatrzymuje się średnio po czasie t_n , równym czasowi obróbki partii części. Przezbrojenie ESP do wykonania obróbki nowej partii części trwa t_0 . Należy określić wskaźniki efektywności systemu w oparciu o następujące dane: $t_n = 10$ h, $t_{0z} = 3$ h (przezbrojenie zautomatyzowane), $t_{0r} = 4$ h (przezbrojenie ręczne).

Intensywność strumienia zapotrzebowań przy przezbrojeniu ręcznym i zautomatyzowanym $\lambda = \lambda_r = \lambda_z = \frac{1}{t_n} = 0,1$.

Intensywność strumienia obsługi zapotrzebowań na przezbrojenie:

$\mu_z = 0,33$ - przezbrojenie zautomatyzowane;

$\mu_r = 0,25$ - przezbrojenie ręczne.

System równań Kołmogorowa przy stacjonarnym trybie funkcjonowania SOM ma postać:

$$\begin{cases} 3\lambda P_0 = \mu P_1, \\ \mu P_1 + 2\lambda P_1 = 3\lambda P_0 + \mu P_2, \\ \mu P_2 + \lambda P_2 = 2\lambda P_1 + \mu P_3, \\ \mu P_3 = \lambda P_2. \end{cases} \quad (3.14)$$

Po rozwiązaniu danego systemu równań łącznie z warunkiem normowania (podstawienie za dowolne z równań), określone jest końcowe prawdopodobieństwo stanów SOM

$$P_0 = \frac{\mu^3}{\mu^3 + 3\mu^2\lambda + 6\mu\lambda^2 + 6\lambda^3}, \quad (3.15)$$

$$P_1 = \frac{3\lambda P_0}{\mu}, \quad P_2 = \frac{6\lambda^2 P_0}{\mu^2}, \quad P_3 = \frac{6\lambda^3 P_0}{\mu^3}.$$

Po podstawieniu do powyższych zależności wartości intensywności strumienia zapotrzebowań na przebrojenie strumienia obsługi, obliczono końcowe prawdopodobieństwa stanów systemu przy przebrojeniu ręcznym i zautomatyzowanym.

W oparciu o te prawdopodobieństwa, określone są wskaźniki efektywności systemu.

$$\begin{aligned} K_{sp} &= P_1 + P_2 + P_3 \\ W_{sp} &= P_1 + 2P_2 + 3P_3 \\ A &= mK_{sp} \end{aligned} \quad (3.16)$$

Wyniki obliczeń przedstawiono w tab. 3.1.

Tab. 3.1. Wyniki obliczeń końcowych prawdopodobieństw i wskaźników efektywności SOM przy przebrojeniu ręcznym i zautomatyzowanym

	PRAWDOPODOBIENSTWA KOŃCOWE STANÓW SOM				WSKAŹNIKI EFEKTYWNOŚCI SOM		
PARAMETR	P ₀	P ₁	P ₂	P ₃	K _{sp}	W _{sp}	A
Przebrojenie ręczne	0,282	0,339	0,271	0,108	0,717	1,205	0,179
Przebrojenie zautomatyzowane	0,384	0,346	0,208	0,062	0,616	0,947	0,205

Wyniki z tab. 3.1 potwierdzają, że przebrojenie zautomatyzowane zmniejsza liczbę zajętych ustawiaczy (K_{sp}) oraz obrabiarek przebrajanych i oczekujących na przebrojenie (W_{sp}), natomiast zwiększa liczbę obrabiarek przebrajanych w jednostce czasu (A).

3.3. Modelowanie analityczne procesu przebrojenia obrabiarek wielozadaniowych NC w elastycznych systemach produkcyjnych

Przebrajanie wielozadaniowych obrabiarek NC rozpatrywane jest w pracy [61] jako proces obsługi strumienia kierowanego na wejście systemu obsługi masowej zapotrzebowania. Proces zachodzący w systemie ma charakter losowy, ponieważ wielkości partii, długość programów sterujących i czas przebrojenia są wielkościami losowymi [3, 11, 61, 62, 63].

W celu uproszczenia uważa się, że pokazany proces jest procesem markowskim, a wszystkie strumienie zdarzeń, przedstawiające system ze stanu w stan, są proste i odpowiadają niżej wyszczególnionym warunkom:

- stacjonarność - prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia zależy tylko od wielkości przedziału czasowego i nie zależy od początku odliczania czasu,
- brak skutków działania - prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia nie zależy od liczby realizacji, zachodzących w dowolnych przedziałach poprzedzających dany, a każde zdarzenie powodowane jest własnymi zdarzeniami,
- jednorazowość - zdarzenia w strumieniu zachodzą pojedynczo, a nie po kilka jednocześnie.

Systemy o stanach dyskretnych i ciągłym czasie, badane są za pomocą równań Kołmogorowa, zapisywanych do określenia prawdopodobieństwa zdarzeń.

Rozpatrywany jest zamknięty SOM w przypadku trzech obrabiarek wielozadaniowych NC, obsługiwanych przez jednego ustawiacza.

Porównywane są dwa sposoby przebrajania: ręczny i zautomatyzowany.

W oparciu o zależności do obliczania zamkniętych SOM, przeprowadzono analizę wpływu ilości ustawiaczy s na parametry ich efektywności przy różnych rodzajach przebrojeń, z uwzględnieniem wymagań stałej normy obsługi obrabiarek przez ustawiaczy.

Niech elastyczny system produkcyjny (ESP) składa się z m obrabiarek i jest obsługiwany przez s ustawiaczy, przy tym m i s mogą się zmieniać, jednak stosunek $\frac{m}{s} = \text{const} = 2$, co oznacza, że norma obsługi ustawiacza to 2 obrabiarki.

W oparciu o dane eksperymentalne określa się:

- średni czas powstawania zapotrzebowania na przebrojenie $t_n = \frac{1}{\lambda} = 30 \text{ h}$,
- średni czas obsługi w przypadku ręcznego przebrajania obrabiarek wielozadaniowych NC

$$t_{0r} = \frac{1}{\mu_r} = 8 \text{ h } (\mu - \text{intensywność strumienia obsługi}),$$

– średni czas obsługi przy przebrojeniu zautomatyzowanym $t_{0z} = \frac{1}{\mu_z} = 4,5 \text{ h}$.

Intensywności strumieni zapotrzebowań i ich obsługi przy metodach: ręcznej i zautomatyzowanej odpowiednio są równe:

$$\lambda = \lambda_z = \lambda_r = 0,033; \quad \mu_r = 0,125; \quad \mu_z = 0,22.$$

Współczynniki efektywności wykorzystania SOM są równe:

$$\varphi_{0z} = \frac{\lambda}{\mu_z} = 0,15.$$

Rozpatrywane są cztery sytuacje produkcyjne.

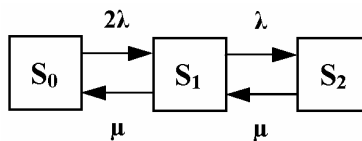
SOM – 1 ($m = 2, s = 1$)

Układ równań do określenia końcowych prawdopodobieństw SOM, w przypadku stanów przedstawionych na rys. 3.5, ma postać:

$$\begin{cases} -2\lambda P_0 + \mu P_1 = 0; \\ \lambda P_1 - \mu P_2; \\ 2\lambda P_0 - \mu P_1 - \lambda P_1 + \mu P_2 = 0. \end{cases} \quad (3.17)$$

Dany układ przy wykorzystaniu warunku normowania $\sum_{i=0}^2 P_i = 1$, umożliwia określenie P_i :

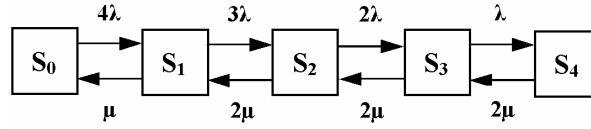
$$P_0 = \frac{1}{1 + \frac{2\lambda}{\mu} + \frac{2\lambda^2}{\mu^2}}, \quad P_1 = \frac{2\lambda}{\mu} P_0, \quad P_2 = \frac{2\lambda^2}{\mu^2} P_0. \quad (3.18)$$



Rys.3.5. Graf stanów SOM– 1

SOM – 2 ($m = 4, s = 2$)

Równania Kołmogorowa do określania końcowych prawdopodobieństw SOM-2 przedstawiono na grafie (rys. 3.6):



Rys.3.6. Graf stanów SOM-2

$$\begin{cases} -4\lambda P_0 + \mu P_1 = 0, \\ 4\lambda P_0 - \mu P_1 - 3\lambda P_1 + 2\mu P_2 = 0, \\ 3\lambda P_1 + 2\mu P_2 - 2\lambda P_2 + 2\mu P_3 = 0, \\ 2\lambda P_2 - 2\mu P_3 - \lambda P_3 + 2\mu P_4 = 0, \\ \lambda P_3 - 2\mu P_4 = 0. \end{cases} \quad (3.19)$$

Rozwiązując dany układ równań i uwzględniając warunek normowania, określa się:

$$P_0 = \frac{1}{(1 + 4\lambda / \mu + 6\lambda^2 / \mu^2 + 6\lambda^3 / \mu^3 + 3\lambda^4 / \mu^4)}, \quad (3.20)$$

$$P_1 = \frac{4\lambda}{\mu} P_0, \quad P_2 = \frac{6\lambda^2}{\mu^2} P_0, \quad P_3 = \frac{6\lambda^3}{\mu^3} P_0, \quad P_4 = \frac{3\lambda^4}{\mu^4} P_0.$$

SOM – 3 ($m = 6, s = 3$)

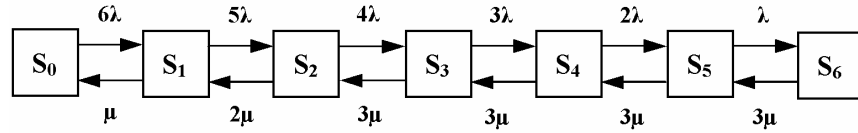
Równania Kołmogorowa do określania końcowych prawdopodobieństw SOM-3 (rys. 3.7):

$$\begin{cases} -6\lambda P_0 + \mu P_1 = 0, \\ 6\lambda P_0 - \mu P_1 - 5\lambda P_1 + 2\mu P_2 = 0, \\ 5\lambda P_1 - 2\mu P_2 - 4\lambda P_2 + 3\mu P_3 = 0, \\ 4\lambda P_2 - 3\mu P_3 - 3\lambda P_3 + 3\mu P_4 = 0, \\ 3\lambda P_3 - 3\mu P_4 - 2\lambda P_4 + 3\mu P_5 = 0, \\ 2\lambda P_4 - 3\mu P_5 - \lambda P_5 + 3\mu P_6 = 0, \\ \lambda P_5 - 3\mu P_6 = 0. \end{cases} \quad (3.21)$$

Rozwiązując dany układ, określa się:

$$P_0 = \frac{1}{1 + \frac{6\lambda}{\mu} + 15\frac{\lambda^2}{\mu^2} + 20\frac{\lambda^3}{\mu^3} + 20\frac{\lambda^4}{\mu^4} + 40\frac{\lambda^5}{\mu^5} + 40\frac{\lambda^6}{\mu^6}}, \quad (3.22)$$

$$P_1 = \frac{6\lambda}{\mu} P_0, \quad P_2 = \frac{15\lambda^2}{\mu^2} P_0, \quad P_3 = \frac{20\lambda^3}{\mu^3} P_0, \quad P_4 = \frac{20\lambda^4}{\mu^4} P_0, \quad P_5 = \frac{40\lambda^5}{3\mu^5} P_0, \quad P_6 = \frac{40\lambda^6}{9\mu^6} P_0.$$



Rys. 3.7. Graf stanów SOM-3

SOM – 4 ($m = 8, s = 4$)

Równania końcowych prawdopodobieństw stanów SOM-4 (graf – rys. 3.8):

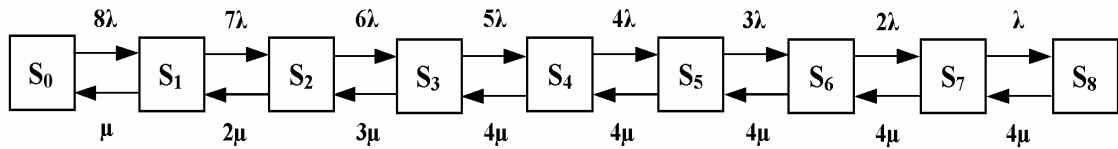
$$\begin{cases} -8\lambda P_0 + \mu P_1 = 0, \\ 8\lambda P_0 - \mu P_1 - 7\lambda P_1 + 2\mu P_2 = 0, \\ 7\lambda P_1 - 2\mu P_2 - 6\lambda P_2 + 3\mu P_3 = 0, \\ 6\lambda P_2 - 3\mu P_3 - 5\lambda P_3 + 4\mu P_4 = 0, \\ 5\lambda P_3 - 4\mu P_4 - 4\lambda P_4 + 4\mu P_5 = 0, \\ 4\lambda P_4 - 4\mu P_5 - 3\lambda P_5 + 4\mu P_6 = 0, \\ 3\lambda P_5 - 4\mu P_6 - 2\lambda P_6 + 4\mu P_7 = 0, \\ 2\lambda P_6 - 4\mu P_7 - \lambda P_7 + 4\mu P_8 = 0, \\ -4\mu P_8 + \lambda P_7 = 0. \end{cases} \quad (3.23)$$

Rozwiązując układ równań i uwzględniając warunek normowania uzyskano:

$$P_0 = \frac{1}{(1 + 8\lambda/\mu + 28\lambda^2/\mu^2 + 56\lambda^3/\mu^3 + 70\lambda^4/\mu^4 + 70\lambda^5/\mu^5 + 52,5\lambda^6/\mu^6 + 26,2\lambda^7/\mu^7 + 6,6\lambda^8/\mu^8)},$$

$$P_1 = \frac{8\lambda}{\mu} P_0, \quad P_2 = \frac{28\lambda^2}{\mu^2} P_0, \quad P_3 = \frac{56\lambda^3}{\mu^3} P_0, \quad P_4 = \frac{70\lambda^4}{\mu^4} P_0, \quad (3.24)$$

$$P_5 = \frac{70\lambda^5}{\mu^5} P_0, \quad P_6 = \frac{52,5\lambda^6}{\mu^6} P_0, \quad P_7 = \frac{26,2\lambda^7}{\mu^7} P_0, \quad P_8 = \frac{6,6\lambda^8}{\mu^8} P_0.$$



Rys. 3.8. Graf stanów SOM-4

Średnia liczba obrabiarek, nastawianych w systemie, określana jest w oparciu o zależność:

$$\bar{n} = \sum_{n=0}^m n P_n, \quad (3.25)$$

1. SOM – 1: $\bar{n} = P_1 + 2P_2;$
2. SOM – 2: $\bar{n} = P_1 + 2P_2 + 3P_3 + 4P_4;$
3. SOM – 3: $\bar{n} = P_1 + 2P_2 + 3P_3 + 4P_4 + 5P_5 + 6P_6;$
4. SOM – 4: $\bar{n} = P_1 + 2P_2 + 3P_3 + 4P_4 + 5P_5 + 6P_6 + 7P_7 + 8P_8.$

Średnia liczba obrabiarek oczekujących na przebrojenie:

$$\bar{\nu} = \sum_{n=s+1}^m (n-s)P_n, \quad (3.26)$$

1. SOM – 1: $\bar{\nu} = P_2;$
2. SOM – 2: $\bar{\nu} = P_3 + 2P_4;$
3. SOM – 3: $\bar{\nu} = P_4 + 2P_5 + 3P_6;$
4. SOM – 4: $\bar{\nu} = P_5 + 2P_6 + 3P_7 + 4P_8.$

Współczynnik przestoju obrabiarki w systemie:

$$K_1 = \frac{\bar{\nu}}{m}. \quad (3.27)$$

Średnia liczba nie zajętych ustawiaczy w systemie:

$$\bar{\rho} = \sum_{n=0}^s (s-n)P_n, \quad (3.28)$$

- SOM – 1: $\bar{\rho} = P_0;$
- SOM – 2: $\bar{\rho} = 2P_0 + P_1;$
- SOM – 3: $\bar{\rho} = 3P_0 + 2P_1 + P_2;$
- SOM – 4: $\bar{\rho} = 4P_0 + 3P_1 + 2P_2 + P_3.$

Średni czas oczekiwania na rozpoczęcie przebrojenia w systemie:

$$\bar{\omega} = \frac{\bar{\nu}}{\lambda}. \quad (3.29)$$

Wyniki obliczeń przedstawiono w tab. 3.2.

Tab. 3.2. Wskaźniki efektywności pracy SOM

L.p.	Wskaźniki	Oznaczenia	SOM-1	SOM-2	SOM-3	SOM-4
1	Liczba ustawiaczy	s	1	2	3	4
2	Ilość obrabiarek NC	m	2	4	6	8
3	Intensywność strumienia zapotrzebowań	$\lambda = \lambda_r = \lambda_z$	0,0330			
4	Intensywność strumienia obsługi	μ_r	0,1250			
		μ_z	0,2200			
5	Współczynnik efektywności wykorzystania SOM	φ_{0r}	0,2640			
		φ_{0z}	0,1500			
6	Średnia liczba obrabiarek oczekujących na przebrojenie	$\bar{V}_r$	0,083599	0,053689	0,032665	0,020320
		$\bar{V}_z$	0,033457	0,013257	0,005307	0,002176
7	Średnia liczba obrabiarek przezbieranych w systemie	$\bar{\eta}_r$	0,483860	0,877919	1,265082	1,686963
		$\bar{\eta}_z$	0,289962	0,533269	0,786405	1,045358
8	Współczynnik przestoju obrabiarki	K_{1r}	0,041800	0,013422	0,005444	0,002540
		K_{1z}	0,016729	0,003314	0,000885	0,000272
9	Średnia liczba nie zajętych ustawiaczy	ρ_r	0,599739	1,175770	1,734241	2,333357
		ρ_z	0,743494	1,479990	2,215758	3,019762
10	Średni czas oczekiwania na przebrojenie [h]	ω_r	2,533303	1,626940	0,989848	0,615758
		ω_z	1,013848	0,401728	0,160818	0,065940
11	Prawdopodobieństwa końcowe stanu S_0	P_{0r}	0,599739	0,384742	0,240418	0,152813
		P_{0z}	0,743494	0,569227	0,431291	0,326750
12	Prawdopodobieństwa końcowe stanu S_1	P_{1r}	0,316662	0,406286	0,380822	0,322741
		P_{1z}	0,223048	0,341536	0,388162	0,392100
13	Prawdopodobieństwa końcowe stanu S_2	P_{2r}	0,083599	0,160890	0,251343	0,298213
		P_{2z}	0,033457	0,076846	0,145561	0,205853
14	Prawdopodobieństwa końcowe stanu S_3	P_{3r}	---	0,042475	0,088473	0,157456
		P_{3z}	---	0,011527	0,029112	0,061756
15	Prawdopodobieństwa końcowe stanu S_4	P_{4r}	---	0,005607	0,023357	0,051961
		P_{4z}	---	0,000865	0,004367	0,011579
16	Prawdopodobieństwa końcowe stanu S_5	P_{5r}	---	---	0,004111	0,013718
		P_{5z}	---	---	0,000437	0,001737
17	Prawdopodobieństwa końcowe stanu S_6	P_{6r}	---	---	0,000362	0,002716
		P_{6z}	---	---	0,000022	0,000195
18	Prawdopodobieństwa końcowe stanu S_7	P_{7r}	---	---	---	0,000358
		P_{7z}	---	---	---	0,000015
19	Prawdopodobieństwa końcowe stanu S_8	P_{8r}	---	---	---	0,000024
		P_{8z}	---	---	---	0,000001

Górny szereg danych są to wartości wskaźników przy zastosowaniu ręcznych sposobów przebrojenia, dolny szereg - przy zastosowaniu zautomatyzowanych sposobów przebrojenia, umożliwiającym w rozpatrywanym przykładzie skrócenie czasu przebrojenia jednej obrabiarki wielozadaniowej NC nawet o 25%.

Przy obsłudze przez s ustawiaczy m obrabiarek wielozadaniowych NC efektywność przebrojenia rośnie ze wzrostem s przy $m/s = const$. Wynik ten może być uzyskany

pod warunkiem, że dowolną obrabiarkę może obsługiwać dowolny ustawiacz, system jest w pełni dostępny, w przeciwnym razie zwiększa się czas obsługi obrabiarek.

Model symulacyjny zawiera warunek: przejście ustawiacza ma miejsce w ustalonych momentach, a czas od momentu pojawienia się zapotrzebowania do momentu rozpoczęcia obsługi zapotrzebowania, jest wielkością przypadkową.

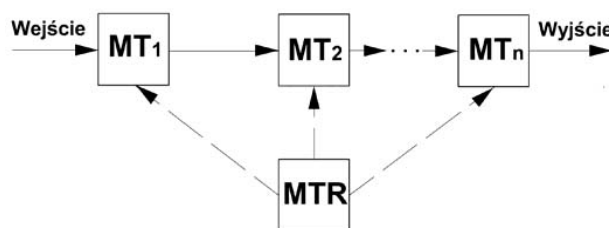
3.4. Modelowanie niezawodności synchronicznej elastycznej linii produkcyjnej złożonej z obrabiarek wielozadaniowych NC, zawierającej maszynę technologiczną rezerwową

Warunki rynkowe wymagają od nowoczesnej produkcji szybkiego uruchomienia i zmiany asortymentu produkowanych wyrobów. Przy tym obrabiarki NC i elastyczne systemy produkcyjne, w skład których one wchodzi, łącząc wysoką elastyczność uniwersalnego wyposażenia i wysoką wydajność obrabiarek-automatów, są najbardziej efektywnym wyposażeniem w produkcji wieloasortymentowej [46].

Przedstawione zostaną podstawowe zasady modelowania niezawodności elastycznej linii produkcyjnej (ELP), złożonej z obrabiarek wielozadaniowych NC z rezerwową obrabiarką wielozadaniową NC. Maszyna technologiczna rezerwowa (MTR) może przejmować funkcje każdej z obrabiarek ELP.

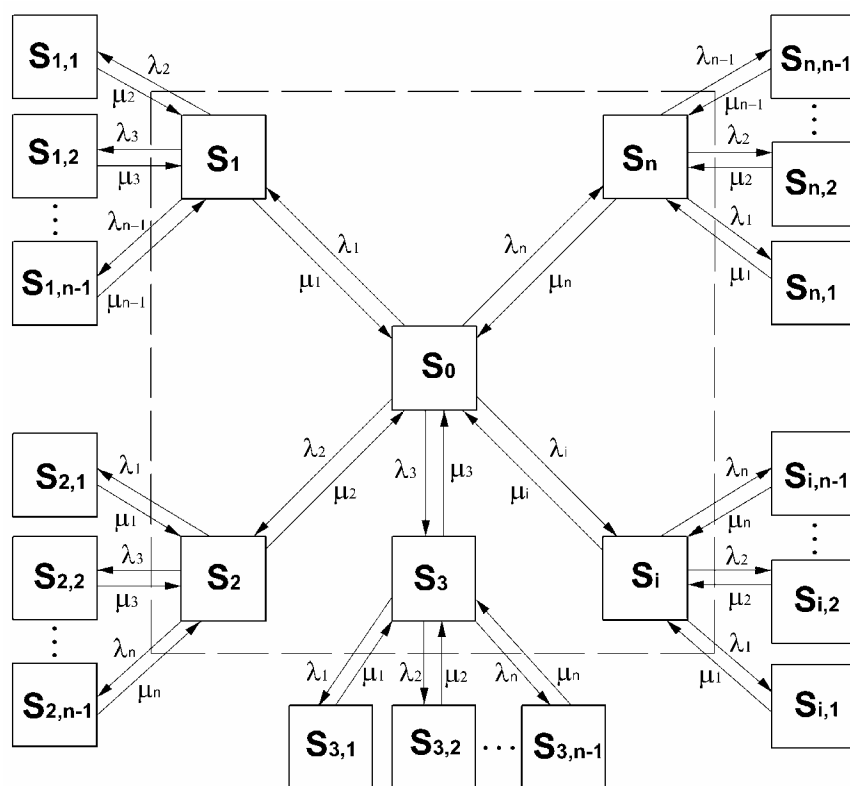
3.4.1. Model matematyczny synchronicznej elastycznej linii produkcyjnej z maszyną technologiczną rezerwową

Rozpatrzona zostanie struktura synchronicznej elastycznej linii produkcyjnej (SELP), złożonej z obrabiarek wielozadaniowych NC, w której jest maszyna technologiczna rezerwowa (MTR), mogąca zastępować dowolną obrabiarkę wielozadaniową (MT) linii [27]. Struktura takiego systemu elastycznego (SELP) jest przedstawiona na rys. 3.9.



Rys. 3.9. Struktura ESP

Maszyna technologiczna rezerwowa (MTR) może zastępować tylko jedną uszkodzoną obrabiarkę (MT). W takiej sytuacji, przy awarii dwóch obrabiarek (MT), cały system (SELP) przestaje pracować.



Rys. 3.10. Graf stanów SELP, zawierającej jedną MTR

Graf stanów SELP, zawierający MTR, przedstawiony jest na rys. 3.10. Stany na grafie: S_0 - wszystkie obrabiarki wielozadaniowe (MT) są sprawne; S_1 - pierwsza MT_1 jest niesprawna; S_2 - druga MT_2 jest niesprawna; ...; S_n - n -ta MT_n jest niesprawna; $S_{1,1}$ - przy niesprawności MT_1 uległa awarii druga MT_2 ; $S_{1,2}$ - przy niesprawności MT_1 uległa awarii trzecia MT_3 ; ...; $S_{1,n-1}$ - przy niesprawności MT_1 uległa awarii $(n-1)$ -ta MT_n ; $S_{2,1}$ - przy niesprawności MT_2 uległa awarii pierwsza MT_1 ; $S_{2,2}$ - przy niesprawności MT_2 uległa awarii trzecia MT_3 ; ...; $S_{2,n-1}$ - przy niesprawności MT_2 uległa awarii $(n-1)$ -ta MT_n ; $S_{3,1}$ - przy niesprawności MT_3 uległa awarii pierwsza MT_1 ; $S_{3,2}$ - przy niesprawności MT_3 uległa awarii druga MT_2 ; $S_{3,3}$ - (na grafie nie pokazano) przy niesprawnej MT_3 uległa awarii MT_4 ; ...; $S_{3,n-1}$ - przy niesprawnej MT_3 uległa awarii $(n-1)$ -ta MT_n ; $S_{i,1}$ - przy niesprawnej MT_i uległa awarii pierwsza MT_1 ; $S_{i,2}$ - przy niesprawnej MT_i uległa awarii druga MT_2 ; ...;

$S_{i,n-1}$ - przy niesprawnej MT_i uległa awarii $(n-1)$ -ta MT_n ; $S_{n,1}$ - przy niesprawnej MT_n uległa awarii pierwsza MT_1 ; $S_{n,2}$ - przy niesprawnej MT_n uległa awarii druga MT_2 ; ...; $S_{n,n-1}$ - przy niesprawnej MT_n uległa awarii $(n-1)$ -ta MT_n ;

Stany $S_0, S_1, S_2, S_3, S_4, \dots, S_n$ - wszystkie MT są zdolne do pracy lub MTR jest zdolna do pracy, a jedna z pozostałych MT jest uszkodzona. Oznaczenia na grafie: $\lambda_i (i=1, \bar{n}); \mu_i (i=1, \bar{n})$ - intensywności strumieni awarii i przywrócenia zdolności do pracy maszyn technologicznych MT_i $i=1, \bar{n}$) odpowiednio.

Jak wynika z grafu, liczba stanów jest znaczna (na przykład, dla $n=10$ liczba stanów jest równa $N = n^2 + 1 = 101$, co utrudnia budowę modelu i jego analizę. Dlatego proponowane jest podejście oparte na powiększeniu ilości stanów.

W zbiorze E (o mocy N) wyodrębniono następujące podzbiory:

$$E_1 = \{S_1, S_{1,1}, S_{1,2}, \dots, S_{1,n-1}\}; E_2 = \{S_2, S_{2,1}, S_{2,2}, \dots, S_{2,n-1}\}; E_3 = \{S_3, S_{3,1}, S_{3,2}, \dots, S_{3,n-1}\};$$

$$\dots; E_i = \{S_i, S_{i,1}, S_{i,2}, \dots, S_{i,n-1}\}, \dots, E_n = \{S_n, S_{n,1}, S_{n,2}, \dots, S_{n,n-1}\}. \quad (3.30)$$

Określono prawdopodobieństwo znajdowania się systemu w tych podzbiórach. W tym celu rozpatrzono graf stanów ekwiwalentnego powiększonego systemu przedstawionego na rys. 3.11.

Stany na grafie (rys. 3.11) określono jako:

S_0 - wszystkie wielozadaniowe obrabiarki NC (MT) są sprawne; $S_{1\Sigma}$ - system znajduje się w jednym ze stanów podzbioru E_1 ; $S_{2\Sigma}$ - system znajduje się w jednym ze stanów podzbioru E_2 ; ...; $S_{n\Sigma}$ - system znajduje się w jednym ze stanów podzbioru E_n .

Oznaczenia na grafie: $\lambda_i, (i=1, \bar{n})$ - intensywności strumieni niesprawności $MT_i, (i=1, \bar{n})$; $\mu_{i0}, (i=1, \bar{n})$ - intensywności strumieni przywrócenia zdolności do pracy systemu z podzbiorów $E_i, (i=1, \bar{n})$.

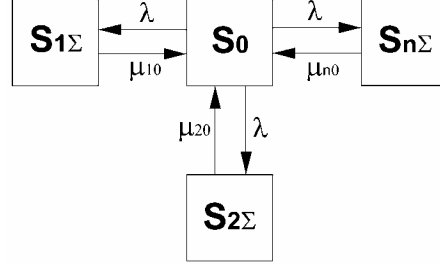
Zadanie polega na określeniu $\mu_{i0} (i=1, \bar{n})$. W przypadku, kiedy są znane wszystkie prawdopodobieństwa stanów grafu przedstawionego na rys. 3.10, to $\mu_{i0} (i=1, \bar{n})$ można określić z zależności:

$$\mu_{i0} = \frac{P_i}{P_i + \sum_{j=1(j \neq i)}^{n-1} P_{ij}} \mu_i, \quad (3.31)$$

gdzie: P_{ij} - prawdopodobieństwa stanów $S_{ij} \in E_i$, współczynnik przed μ_i , równy

$$\frac{P_i}{P_i + \sum_{j=1(j \neq i)}^{n-1} P_{ij}}, \text{ to umowne prawdopodobieństwo tego, że znajdując się w podzbiorze}$$

stanów E_i , system znajduje się w stanie S_i .



Rys. 3.11. Graf stanów ekwiwalentnego powiększonego systemu

Przez $S_k, (k=1, \overline{N})$ oznaczono składowe zbioru E , (to znaczy $S_k \in E$). Dzielać licznik i mianownik przez prawdopodobieństwo znajdowania się systemu w podzbiorze

$$E_i P_{iz} = P\{S_k \in E_i\} = P_i + \sum_{j=1(j \neq i)}^{n-1} P_{ij}, \text{ otrzymano:}$$

$$\mu_{i0} = \frac{P_i}{P_{i\Sigma}} \mu_i = P_{iy} \mu_i, \quad (3.32)$$

gdzie P_{iy} - umowne prawdopodobieństwo znajdowania się systemu w stanie S_i .

Określono umowne prawdopodobieństwa elementów podzbiorów E_i :

$$P_{iy} = P\{S_k = S_i / S_k \in E_i\}, P_{ijy} = P\{S_k = S_i / S_k \in E_i\}.$$

Są one równe:

$$P_{iy} = \frac{P_i}{P_{i\Sigma}}, \quad (3.33)$$

$$P_{ijy} = \frac{P_{ij}}{P_{i\Sigma}} = \frac{P_{ij}}{P_i + \sum_{j=1(j \neq i)}^{n-1} P_{ij}}. \quad (3.34)$$

Do określenia prawdopodobieństw P_{iy} i $P_{ijy}, (i=1, \overline{n}; j=1, \overline{n-1})$ należy rozpatrzyć podzbiory $E_i, (i=1, \overline{n})$ jako podzbiory samodzielne. W celu ułatwienia, zbiór numerów j oznaczono

jako J , to jest $j \in J$. Wprowadzono numery m , należące także do tego podzbioru: $m \in J$.

Z uwzględnieniem nowych numerów zależności do określenia P_{iy} i P_{ij} mają postać:

$$P_{iy} = \frac{1}{1 + \sum_{j=1(j \neq i)}^{n-1} \rho_j}, \quad (3.35)$$

$$P_{ij} = \frac{\rho_j}{1 + \sum_{m=1(m \neq i)}^{n-1} \rho_m}, \quad (3.36)$$

gdzie: $\rho_j = \frac{\lambda_j}{\mu_j}$, $\rho_m = \frac{\lambda_m}{\mu_m}$ - sprowadzone intensywności strumieni.

Podstawiając (3.35) do (3.32), otrzymano:

$$\mu_{i0} = (1 + \sum_{j=1(j \neq i)}^{n-1} \rho_j)^{-1} \mu_i. \quad (3.37)$$

Wszystkie intensywności na grafie (rys.3.11) są znane, a prawdopodobieństwa stanów $P_0, P_{1\Sigma}, \dots, P_{i\Sigma}, \dots, P_{n\Sigma}$ określane są według znanych zależności:

$$P_0 = \left[1 + \sum_{i=1}^n \rho_i (1 + \sum_{j=1(j \neq i)}^{n-1} \rho_j) \right]^{-1}, \quad (3.38)$$

$$P_{i\Sigma} = \left[1 + \sum_{i=1}^n \rho_i (1 + \sum_{j=1(j \neq i)}^{n-1} \rho_j) \right]^{-1} \rho_i (1 + \sum_{j=1(j \neq i)}^{n-1} \rho_j). \quad (3.39)$$

Po obliczeniu, według zależności (3.38) i (3.39), prawdopodobieństw stanów grafu na rys. 3.11, można określić prawdopodobieństwa stanów $S_i (i = 1, \bar{n})$ i $S_{ij} (i = 1, \bar{n}; j = 1, \bar{n} - 1)$ grafu, przedstawionego na rys. 3.9. Zgodnie z (3.35), (3.36), (3.37) i (3.38) można zapisać:

$$P_i = P_{iy} P_{i\Sigma} = (1 + \sum_{j=1(j \neq i)}^{n-1} \rho_j)^{-1} P_{i\Sigma}, \quad (3.40)$$

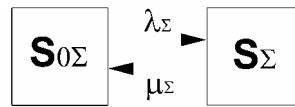
$$P_{ij} = P_{ijy} P_{i\Sigma} = \frac{\rho_j}{1 + \sum_{m=1(m \neq i)}^{n-1} \rho_m} P_{i\Sigma}. \quad (3.41)$$

Po podstawieniu (3.39) do (3.40) i (3.41) otrzymano:

$$P_i = \left[1 + \sum_{i=1}^n \rho_i \left(1 + \sum_{j=1(j \neq i)}^{n-1} \rho_j \right) \right]^{-1} \rho_i, \quad (3.42)$$

$$P_{ij} = \left[1 + \sum_{i=1}^n \rho_i \left(1 + \sum_{j=1(j \neq i)}^{n-1} \rho_j \right) \right]^{-1} \rho_i \rho_j. \quad (3.43)$$

Początkową strukturę elastycznej linii synchronicznej, złożonej z obrabiarek wielozadaniowych NC, zawierającą maszynę technologiczną rezerwową, można zastąpić przez jeden najprostszy element ekwiwalentny, w przypadku którego znane są intensywności strumieni uszkodzeń λ_Σ i przywrócenia zdolności do pracy μ_Σ . Za najprostszy uważa się element mający dwa stany: awaryjny i roboczy. Graf stanów takiego elementu przedstawiony jest na rys.3.12.



Rys. 3.12. Graf stanów SELP, sprowadzony do najprostszego elementu

Stany na grafie (rys.3.12): $S_{0\Sigma}$ - zdolne do pracy; S_Σ - uszkodzone (niezdolne do pracy). Wprowadzono dwa nowe podzbiory stanów do grafu na rys. 3.10: U - zdolne do pracy, obwiedzione linią przerywaną, i V - niezdolne do pracy:

$$U = \{S_0, S_1, \dots, S_i, \dots, S_n\},$$

$$V = \{S_{1,1}, \dots, S_{1,j}, \dots, S_{1,n-1}, \dots, S_{i,1}, \dots, S_{ij}, \dots, S_{i,n-1}, \dots, S_{n,1}, \dots, S_{n,j}, \dots, S_{n,n-1}\}.$$

Podzbiór U odpowiada stanowi $S_{0\Sigma}$, a podzbiór V – stanowi S_Σ (rys. 3.12).

Prawdopodobieństwo znajdowania się systemu w stanach $S_{0\Sigma}$ i S_Σ jest równe:

$$P_{0\Sigma} = P_0 + \sum_{i=1}^n P_i, \quad (3.44)$$

$$P_\Sigma = 1 - P_{0\Sigma} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1(j \neq i)}^{n-1} P_{ij}. \quad (3.45)$$

Intensywności λ_Σ i μ_Σ w przypadku grafu przedstawionego na rys. 3.12 są równe:

$$\lambda_\Sigma = \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i}{P_{0\Sigma}} \sum_{j=1(j \neq i)}^{n-1} \lambda_j \right) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i}{P_0 + \sum_{i=1}^n P_i} \sum_{j=1(j \neq i)}^{n-1} \lambda_j \right), \quad (3.46)$$

$$\mu_\Sigma = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1(j \neq i)}^{n-1} \frac{P_{ij}}{P_\Sigma} \mu_j = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1(j \neq i)}^{n-1} \frac{P_{ij}}{\sum_{j=1}^n \sum_{j=1(j \neq i)}^{n-1} P_{ij}} \mu_j. \quad (3.47)$$

3.4.2. Program obliczania wydajności synchronicznej elastycznej linii produkcyjnej

Program do określania parametrów funkcjonowania SELP wykonano w środowisku matematycznym obliczeń analitycznych Maple. Środowisko to jest mocnym narzędziem komputerowym, umożliwiającym rozwiązanie złożonych zagadnień matematycznych. Zawiera środki powiązane z wieloma dziedzinami matematyki (algebra, matematyka dyskretna, rachunek różniczkowy i całkowy, metody cyfrowe i inne), a także środki reprezentacji graficznej, powiązania z modułami zewnętrznymi i środki programowania.

Częściami składowymi programu są:

- schemat blokowy danych wejściowych,
- blok obliczania parametrów funkcjonowania linii synchronicznej z miejscem rezerwowym lub bez niego,
- blok kształtowania wyników eksperymentu i wyprowadzania tych wyników.

Dane wejściowe do przeprowadzenia badań, to:

- maksymalna ilość komórek w linii N ,
- intensywność strumienia uszkodzeń λ_i i przywracania zdolności do pracy μ_i każdej jednostki ($i = \overline{1, N}$),
- średni czas obsługi jednostki produkcyjnej każdej komórki t_i ($i = \overline{1, N}$),
- krok obliczeń Δn (liczba całkowita równa różnicy wartości bieżącej ilości komórek w linii n dwóch sąsiednich cykli).

Blok obliczeń zawiera następujące operacje:

- 1) Określanie sprowadzonych intensywności strumieni $\rho_i = \frac{\lambda_i}{\mu_i}$, $i = \overline{1, N}$.
- 2) Określenie intensywności μ_{i0} według zależności (3.37).
- 3) Obliczanie prawdopodobieństwa P_0 według zależności (3.38).
- 4) Obliczanie prawdopodobieństwa $P_{i\Sigma}$, P_i , P_{ij} odpowiednio według zależności (3.39), (3.40), (3.43).
- 5) Określenie współczynnika gotowości linii $K_g = P_{0\Sigma}$ według zależności (3.44).
- 6) Określenie wydajności linii: $Q = \frac{K_g}{t_{\max}}$,

gdzie $t_{\max}$ - maksymalny czas spośród średnich czasów obsługi jednostki produkcyjnej każdej komórki t_i ($i = \overline{1, N}$).

7) Określanie parametrów funkcjonowania linii synchronicznej nie zawierającej miejsca rezerwowego:

– współczynnika gotowości linii $K'_g = \frac{1}{1 + \sum \rho_i}$,

– wydajności linii $Q' = \frac{1}{t_{\max}} K'_g$.

8) Określenie wartości bieżących:

– przyrostu współczynnika gotowości linii

• jako wartości bezwzględnej $\Delta K_g = K_g - K'_g$,

• w procentach $\delta K_g = \frac{\Delta K_g}{K_{g \max}, K'_{g \max}} 100\%$;

– przyrostu wydajności linii

• jako wartości bezwzględnej $\Delta Q = Q - Q'$,

• w procentach $\delta Q = \frac{\Delta Q}{Q_{\max}, Q'_{\max}} 100\%$.

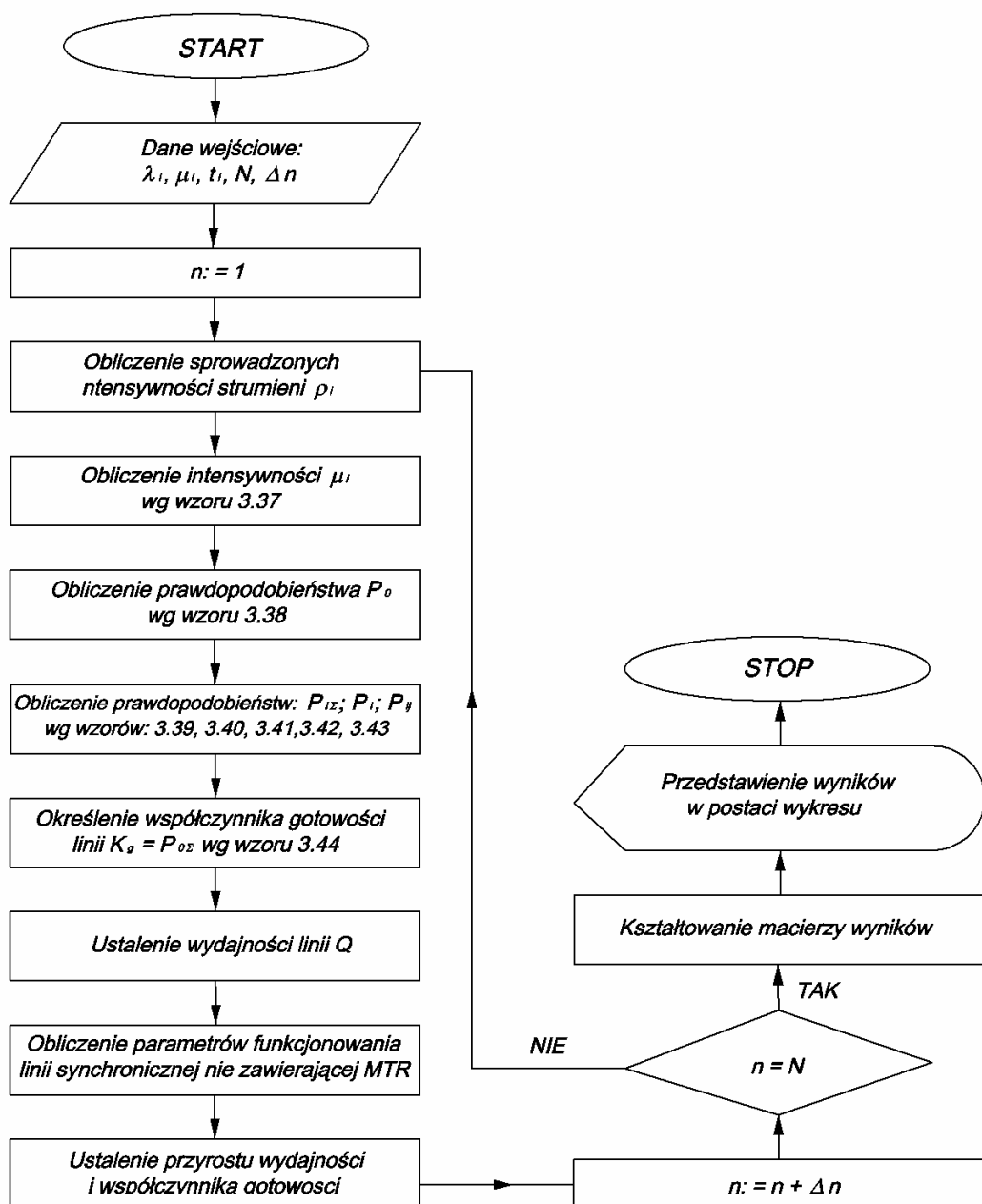
Obliczenia te wykonywane są cyklicznie do spełnienia warunku $n = N$.

Następnie program opracowuje wyniki eksperymentu (przyrost wydajności), które są wprowadzone na ekran w postaci macierzy i graficznej.

3.4.3. Wyniki obliczeń parametrów niezawodności i wydajności synchronicznej elastycznej linii produkcyjnej

Przedstawione w podrozdziale 3.4.2 środowisko obliczeń matematycznych Maple, zostanie zastosowane do wyznaczenia przyrostu wydajności elastycznych systemów produkcyjnych. Obliczenia wykonano, przyjmując różne parametry wejściowe linii produkcyjnej, złożonej z 10 obrabiarek.

Algorytm przebiegu obliczeń parametrów funkcjonowania synchronicznej elastycznej linii produkcyjnej, złożonej z obrabiarek wielozadaniowych NC, przedstawiono na rys. 3.13.



Rys. 3.13. Schemat blokowy obliczania parametrów funkcjonowania linii synchronicznej

We wszystkich rozpatrywanych przypadkach przyjęto następujące parametry wejściowe linii produkcyjnej:

- intensywność strumienia uszkodzeń λ ,
- intensywność strumieni przywracania zdolności do pracy μ ,
- średni czas obsługi jednostki produkcyjnej t .

Obliczanie przyrostu wydajności linii w przypadku maksymalnej liczby MT równej 10

I przypadek

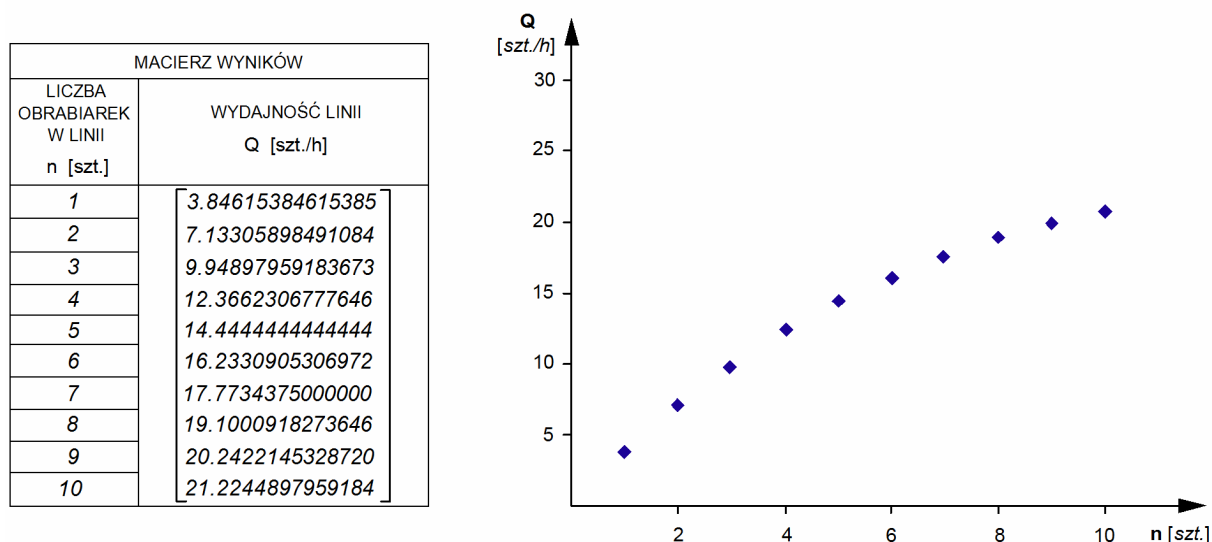
Obliczenia przeprowadzono przy jednakowych parametrach niezawodności i obsługi wszystkich MT równych:

$$\lambda = 0,2 \text{ [h}^{-1}\text{]},$$

$$\mu = 5 \text{ [h}^{-1}\text{]},$$

$$t = 0,1 \text{ [h]}.$$

Wyniki obliczeń przyrostu wydajności w postaci macierzy i wykresu, wykonanych w środowisku obliczeń matematycznych Maple, przedstawiono na rys. 3.14.



Rys. 3.14. Zależność wydajności linii od liczby obrabiarek

Przyrost wydajności ΔQ jest prawie równomierny w całym zakresie liczby obrabiarek od 1 do 10 szt. w linii produkcyjnej.

II przypadek

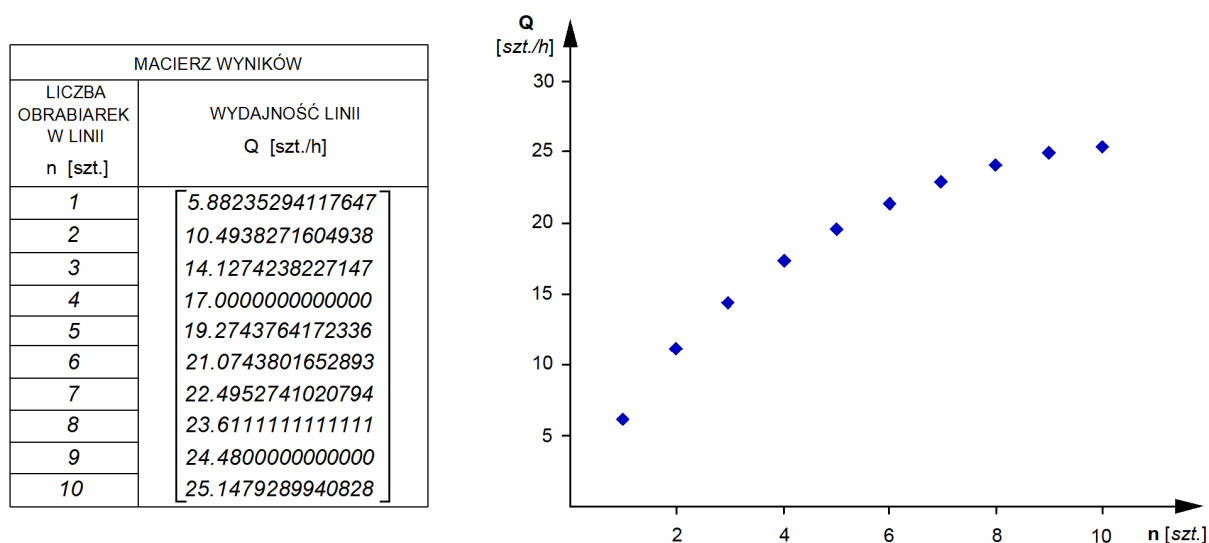
Parametry niezawodności i obsługi wszystkich MT są jednakowe i mają następujące wartości:

$$\lambda = 0,25 \text{ [h}^{-1}\text{]},$$

$$\mu = 4 \text{ [h}^{-1}\text{]},$$

$$t = 0,1 \text{ [h]}.$$

Wyniki obliczeń w postaci macierzy i wykresu, wykonanych w środowisku obliczeń matematycznych Maple, przedstawiono na rys. 3.15.



Rys. 3.15. Zależność wydajności linii od liczby obrabiarek

Duży i równomierny przyrost wydajności ΔQ występuje przy zwiększaniu liczby obrabiarek w linii produkcyjnej w zakresie od 1 do 8 szt., natomiast maleje przy dalszym zwiększaniu ich liczby w linii.

III przypadek

Przyjęto również jednakowe parametry niezawodności i obsługi wszystkich MT :

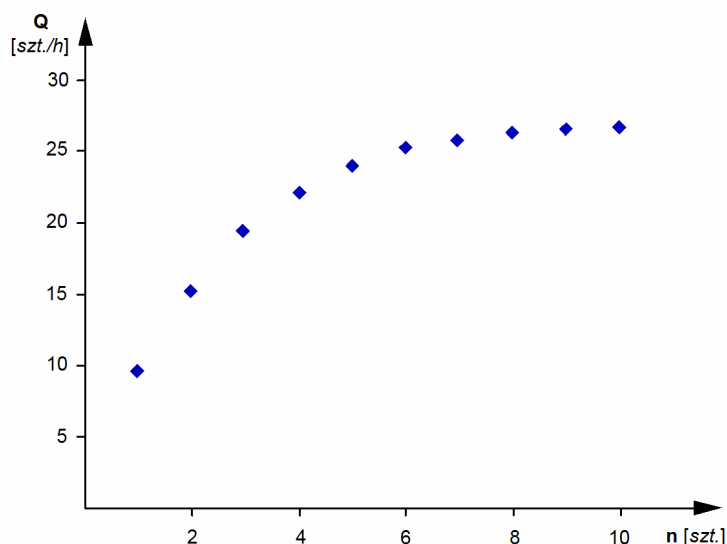
$$\lambda = 0,3 \text{ [h}^{-1}\text{]},$$

$$\mu = 3 \text{ [h}^{-1}\text{]},$$

$$t = 0,1 \text{ [h]}.$$

Wyniki obliczeń w postaci macierzy i wykresu, wykonanych w środowisku obliczeń matematycznych Maple, przedstawiono na rys. 3.16.

MACIERZ WYNIKÓW	
LICZBA OBRABIAREK W LINII n [szt.]	WYDAJNOŚĆ LINII Q [szt./h]
1	9.09090909090909
2	15.2777777777778
3	19.5266272189349
4	22.4489795918367
5	24.4444444444444
6	25.7812500000000
7	26.6435986159170
8	27.1604938271605
9	27.4238227146814
10	27.5000000000000

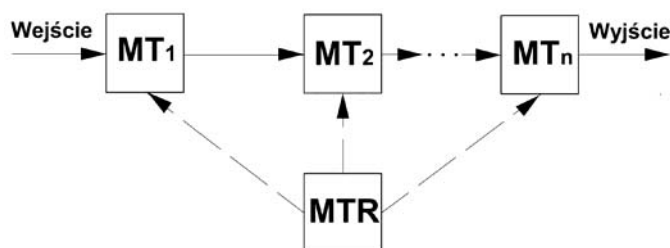


Rys. 3.16. Zależność wydajności linii od liczby obrabiarek

Duży i równomierny przyrost wydajności ΔQ występuje w przypadku zwiększania liczby obrabiarek w linii produkcyjnej w zakresie od 1 do 5 szt., natomiast maleje zdecydowanie przy dalszym zwiększaniu ich liczby w linii.

3.5. Ustalenie racjonalnej liczby obrabiarek w synchronicznej elastycznej linii produkcyjnej, zawierającej maszynę technologiczną rezerwową

Rozpatrzono proces funkcjonowania synchronicznej elastycznej linii produkcyjnej, składającej się z kolejno połączonych maszyn technologicznych i zawierającej jedną maszynę technologiczną rezerwową (rys. 3.17).



Rys. 3.17. Elastyczna linia produkcyjna z MTR

Linia składa się z n maszyn technologicznych jednego typu ($MT_1, \dots, MT_n$) i jednej maszyny technologicznej rezerwowej MTR, zdolnej zastąpić każdą uszkodzoną MT.

Model funkcjonowania takiej SELP przedstawiono w pracy [89], przy czym całą strukturę linii zmieniono, według parametrów niezawodności, na najprostszy ekwiwalentny

element, mający dwa stany (roboczy i awaryjny) z określeniem następujących wskaźników jego funkcjonowania:

- intensywności strumienia uszkodzeń i przywracania do pracy;
- wartości oczekiwanej czasu obsługi jednostki produkcyjnej;
- współczynnika gotowości;
- wydajności, z uwzględnieniem parametrów niezawodności.

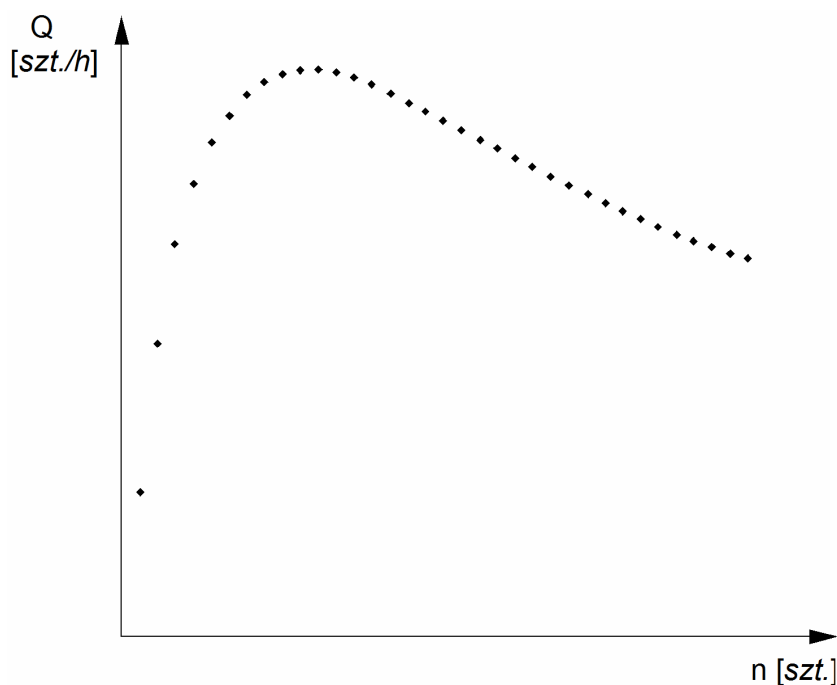
Przy tworzeniu modelu przyjęto, że wszystkie strumienie, przeprowadzające dany system z jednego stanu w inny są proste, a czasy obsługi są rozłożone wykładniczo. Natomiast wielkości intensywności strumienia uszkodzeń λ_i i przywracania do pracy μ_i , a także czasów obsługi t_i każdej i -ej MT są różne.

Model ten różni się od przedstawionego w [89] tym, że tam wielkości te były jednakowe.

Celem zbudowania modelu było określenie przyrostu wydajności, który jest różnicą między wydajnością SELP z MTR i wydajnością SELP bez niej:

$$\Delta Q = Q - Q'$$

Analiza wyników otrzymanych po zastosowaniu modelu pokazała, że przy zwiększeniu liczby obrabiarek w linii, wykres przyrostu wydajności ma kształt, pokazany na rys. 3.18.



Rys. 3.18. Teoretyczny wykres zależności wydajności od liczby MT w linii

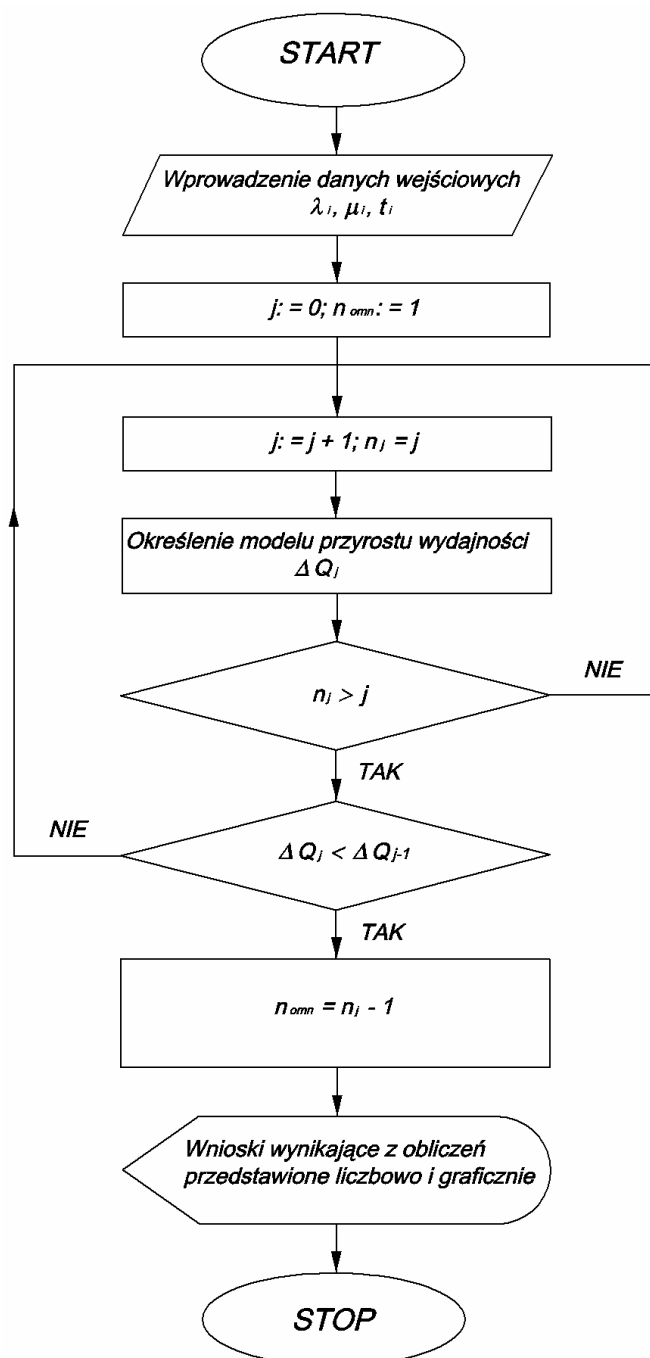
Początkowo wykres przebiega stromo w górę aż do miejsca, odpowiadającego maksimum, a dalej zaczyna płynnie opadać wraz ze zwiększającą się liczbą MT w linii, przy tym opadanie to może przebiegać praktycznie do zera. Jest to oczywiste, ponieważ przy znacznym zwiększeniu liczby maszyn technologicznych w SELP, jedna maszyna technologiczna rezerwowa nie zdąży w odpowiednim czasie zastąpić określonej liczby uszkodzonych MT, a więc wydajność SELP z MTR praktycznie jest równa wydajności tej linii bez niej.

Jest to optymalizacja zadania, polegająca na tym, że konieczne jest określenie liczby MT w SELP z MTR, pozwalającej osiągnąć maksimum przyrostu wydajności takiej linii. Zadanie to jest zadaniem programowania całkowitoliczbowego bez ograniczeń, lecz z uwzględnieniem tego, że liczba maszyn technologicznych w linii jest wielkością parzystą [22, 28].

Do jego rozwiązania nie są wymagane specjalnie opracowane algorytmy, a można zastosować metodę otwartego wyboru, polegającą na cyklicznym przebiegu powtarzalnej procedury, która w każdym kroku j modelu matematycznego, zbudowanego w [89], dla aktualnej liczby maszyn technologicznych MT_j , określa współczynniki gotowości SELP z MTR i bez niej, a także jej wydajności (Q_j i Q'_j odpowiednio). Określany jest przyrost wydajności Q_j . Jeśli $\Delta Q_j > \Delta Q_{j-1}$, to aktualną liczbę maszyn technologicznych n_j w linii przyjmuje się jako punkt optimum $n_{i\tau\delta}$. W przeciwnym razie cykl można przerwać.

Tą własność funkcji unimodalnej (ma jedno ekstremum, które jest ekstremum globalnym), potwierdzają wyniki badań przy różnych wartościach parametrów. W danej procedurze wielkość j będzie zmieniać się od 1 do znalezionej wartości $n_{i\tau\delta}$, przy tym na początku cyklu $n_{i\tau\delta} = 1$.

Algorytm procedury poszukiwania rozwiązania optymalnego pokazano na rys. 3.19.



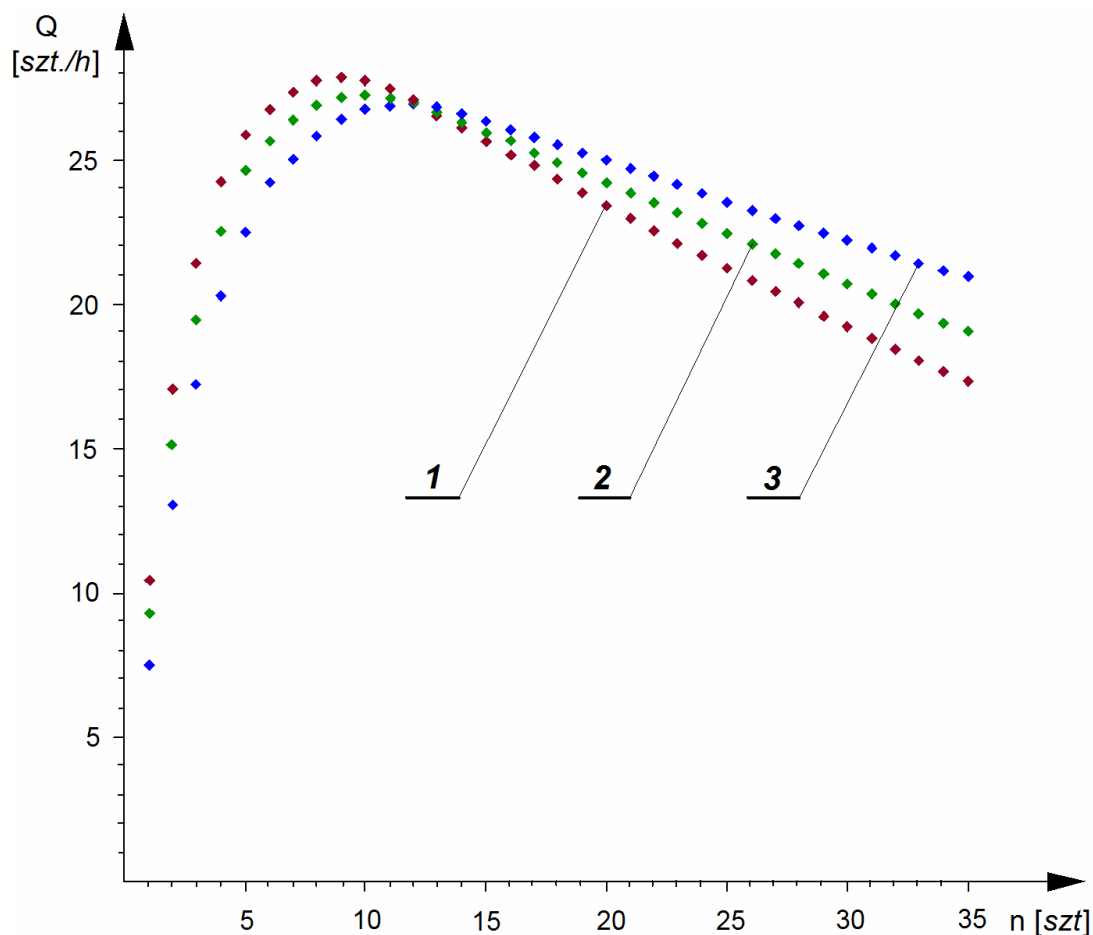
Rys. 3.19. Algorytm procedury poszukiwania optymalnego rozwiązania

Program do określania optymalnej ilości maszyn technologicznych zrealizowano w środowisku Maple 9.

Wielkości intensywności strumieni uszkodzeń i przywracania zdolności do pracy, a także średnich czasów obsługi każdej obrabiarki w celu uproszczenia przyjęto jako jednakowe.

Przeprowadzono badania, związane z określeniem wpływu parametrów niezawodności każdej obrabiarki na optymalną ich liczbę w linii przy stałych czasach obsługi.

- 1) Parametry niezawodności analizowano w zależności od wartości intensywności strumienia uszkodzeń każdej obrabiarki $\lambda_i = 0,25; 0,30$ i $0,35 \text{ h}^{-1}$, przy stałych $\mu_i = 3 \text{ h}^{-1}$ i $t_i = 0,05 \text{ h}$ (rys. 3.20).



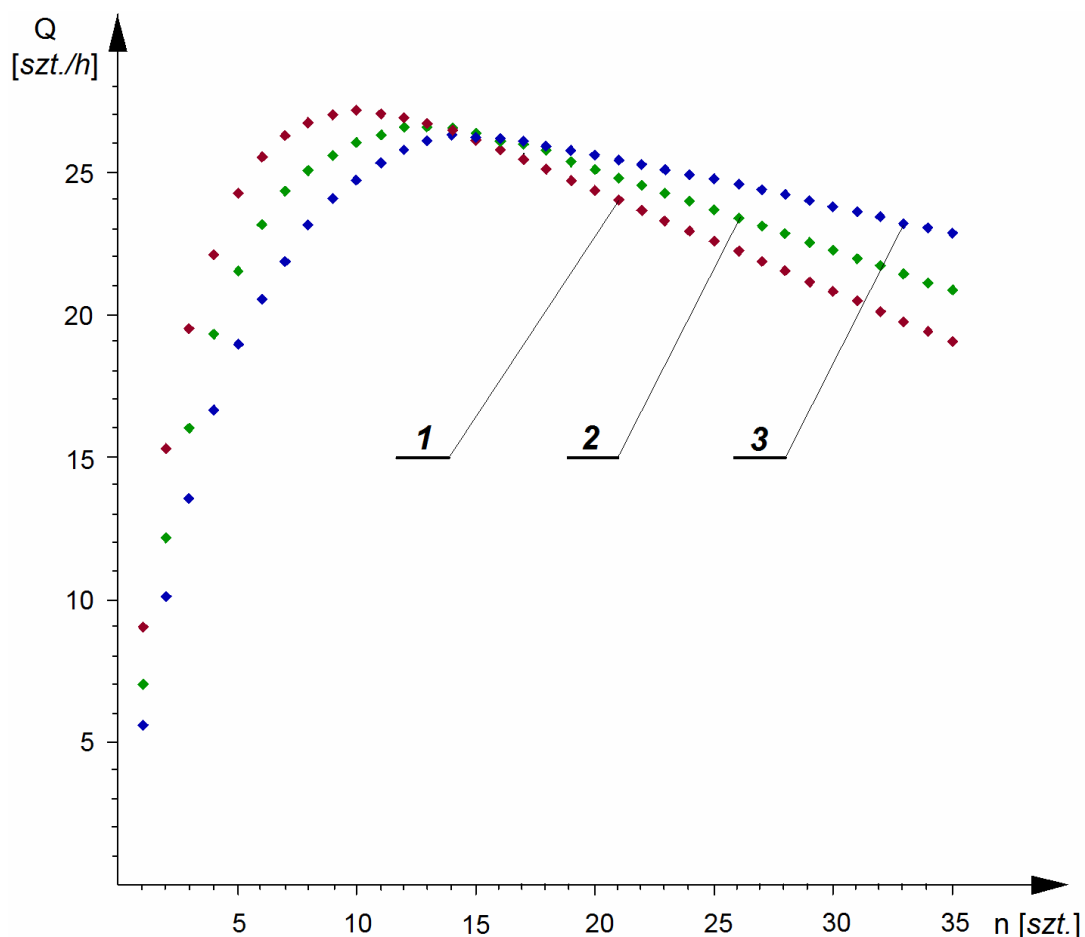
Rys. 3.20. Wykres zależności wydajności od liczby MT przy wielkościach parametrów:

- 1) $\lambda_i = 0,35 \text{ h}^{-1}$, $\mu_i = 3 \text{ h}^{-1}$, $t_i = 0,05 \text{ h}$,
- 2) $\lambda_i = 0,30 \text{ h}^{-1}$, $\mu_i = 3 \text{ h}^{-1}$, $t_i = 0,05 \text{ h}$,
- 3) $\lambda_i = 0,25 \text{ h}^{-1}$, $\mu_i = 3 \text{ h}^{-1}$, $t_i = 0,05 \text{ h}$.

Maksymalne wydajności i racjonalne ilości obrabiarek odpowiednio wynosiły:

- w pierwszym przypadku: $Q_{max} = 27,90 \text{ szt /h}$, $n_{racj} = 9 \text{ szt}$,
- w drugim przypadku: $Q_{max} = 27,50 \text{ szt /h}$, $n_{racj} = 10 \text{ szt}$,
- w trzecim przypadku: $Q_{max} = 27,10 \text{ szt /h}$, $n_{racj} = 12 \text{ szt}$.

- 2) Parametry niezawodności analizowano w zależności od wartości intensywności strumienia przywracania do pracy każdej obrabiarki $\mu_i = 3; 4 \text{ i } 5 \text{ h}^{-1}$, przy stałych $\lambda_i = 3 \text{ h}^{-1}$ i $t_i = 0,1 \text{ h}$ (rys. 3.21).



Rys. 3.21. Wykres zależności wydajności od liczby MT przy wartościach parametrów:

- 1) $\mu_i = 5 \text{ h}^{-1}$, $\lambda_i = 3 \text{ h}^{-1}$, $t_i = 0,1 \text{ h}$,
- 2) $\mu_i = 4 \text{ h}^{-1}$, $\lambda_i = 3 \text{ h}^{-1}$, $t_i = 0,1 \text{ h}$,
- 3) $\mu_i = 3 \text{ h}^{-1}$, $\lambda_i = 3 \text{ h}^{-1}$, $t_i = 0,1 \text{ h}$.

Maksymalne wydajności i racjonalne liczby obrabiarek odpowiednio wynosiły:

- w pierwszym przypadku: $Q_{max} = 27,10 \text{ szt /h}$, $n_{racj} = 10 \text{ szt}$,
- w drugim przypadku: $Q_{max} = 26,50 \text{ szt /h}$, $n_{racj} = 12 \text{ szt}$,
- w trzecim przypadku: $Q_{max} = 26,10 \text{ szt /h}$, $n_{racj} = 14 \text{ szt}$.

Analiza wyników potwierdziła, że wszystkie wykresy przebiegu funkcji mają jedno ekstremum. We wszystkich przypadkach, przyrost wydajności najpierw gwałtownie rośnie wraz ze wzrostem liczby obrabiarek w linii produkcyjnej aż do osiągnięcia wartości maksymalnej, a potem zmniejsza się.

3.6. Wnioski

Analiza matematyczna przeobrażania wielozadaniowych obrabiarek NC pokazała, że przy przeobrażeniu zautomatyzowanym o 12,7% zwiększa się bezwzględna zdolność przepustowa systemu obsługi masowej, o 21,4% zmniejsza się liczba przeobrażanych i oczekujących na przeobrażenie obrabiarek, a także istotnie zmniejsza się średni czas pracy ustawiacza.

Opracowany model umożliwia rozwiązanie całego kompleksu zadań optymalizacyjnych, na przykład przy optymalizacji parametrów przeobrażenia, jako funkcje celu można przyjąć czas przeobrażenia obrabiarek wielozadaniowych NC przy zmianie asortymentu części.

Obliczenia pokazują wysoką efektywność czynnika obniżenia czasu przeobrażenia obrabiarek, w przypadku wszystkich rozpatrywanych systemów obsługi masowej.

Systemy obsługi masowej, realizowane przy zastosowaniu przeobrażenia zautomatyzowanego obrabiarek NC w składzie ESP, ostatecznie umożliwiają zwiększenie wydajności i niezawodności urządzeń i ESP w całości.

Przedstawiono metodologię modelowania niezawodności i wydajności elastycznych linii produkcyjnych, zawierających maszynę technologiczną rezerwową, mogącą zastąpić dowolną maszynę technologiczną linii. Wyniki modelowania świadczą o tym, że przy odpowiednim wyborze liczby maszyn technologicznych wzrasta wydajność i niezawodność ESP.

Na podstawie uzyskanych wyników badań można stwierdzić, że przy pogorszeniu parametrów niezawodności zmniejsza się optymalna liczba obrabiarek w linii produkcyjnej, jednakże przy określonej ich ilości, przyrost wydajności jest wyższy, niż w przypadku linii z analogicznymi parametrami obsługi i lepszymi wskaźnikami niezawodności.

4. KLASYFIKACJA OTWORÓW W CZĘŚCIACH KLASY KORPUS

Uporządkowanie, w postaci klasyfikacji, otworów w częściach klasy korpus jest jednym z podstawowych, dotychczas nierozwiązanych, problemów funkcjonowania elastycznych systemów produkcyjnych. Duża ich różnorodność powoduje konieczność stosowania bardzo zróżnicowanych procesów technologicznych oraz dużej ilości narzędzi. Powoduje to znaczne straty czasu przy realizacji tych procesów.

4.1. Kodowanie otworów w częściach klasy korpus

Opracowano klasyfikator otworów, na podstawie wyróżników konstrukcyjnych i technologicznych (tab. 4.1).

System klasyfikacji umożliwia włączenie do klasyfikatora otworu o dowolnej ilości elementów konstrukcyjnych. Istotą klasyfikacji jest podział otworów na podstawowe i pomocnicze elementy konstrukcyjne, o określonych drogach technologicznych obróbki.

Jako podstawowe elementy konstrukcyjne, umownie przyjęto:

- | | |
|--|------------|
| – przelotowy otwór cylindryczny (lub stopień otworu) | - kod „1”, |
| – nieprzelotowy otwór cylindryczny o stożkowym dnie (lub stopień otworu) | - kod „2”, |
| – nieprzelotowy otwór cylindryczny o płaskim dnie (lub stopień otworu) | - kod „3”, |
| – przelotowy otwór stożkowy (lub stopień otworu) | - kod „4”, |
| – nieprzelotowy otwór stożkowy (lub stopień otworu) | - kod „5”. |

Dowolny otwór można otrzymać, sumując podstawowe elementy wiersza „1” i kolumny „2”, przy czym w wierszu „1” kolejno umieszczane są otwory, otrzymane w wyniku złożenia (tab. 4.1).

Klasyfikator otworów teoretycznie jest więc nieskończoną, położoną poziomo, macierzą.

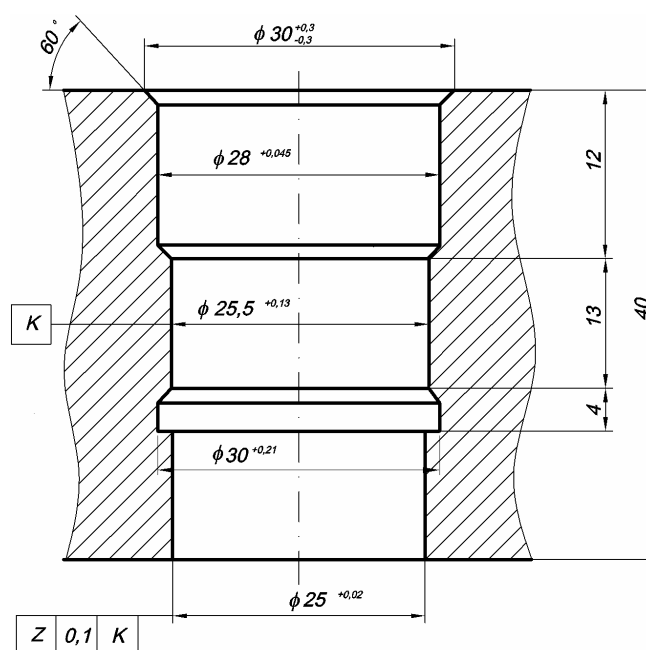
W otworach typu 1.1; 1.2; 1.3; 1.4; 1.5; 1.1.1; 1.1.2 i innych, pierwszy i następny stopień otworu przelotowego posiada sens fizyczny wtedy, gdy w miejscach przejścia stopni otworu znajduje się rowek lub otwór poprzeczny, umożliwiający wyjście narzędzia skrawającego podczas obróbki stopnia otworu na całą jego długości, co zostało graficznie zilustrowane w klasyfikatorze otworów.

W klasyfikatorze otwory mają umownie bezpośrednie stopniowanie. Oznacza to, że każdy następny bardziej głęboki stopień powinien mieć mniejszą średnicę. W przeciwnym razie otwór należy opisywać w taki sposób, aby przy kodowaniu stopnie były rozmieszczone od dołu do góry, w płaszczyźnie rysunku.

Przy klasyfikacji otworów przyjęto następujące elementy pomocnicze:

- fazka - kod „F”,
- kanałek - kod „K”,
- gwint - kod „G”,
- rowek wpustowy - kod „W”.

Dodając do otworów, składających się z podstawowych elementów konstrukcyjnych, zgodnie z przedłożonym klasyfikatorem, pomocnicze elementy (fazkę, kanałek, gwint lub rowek wpustowy), można otrzymać dowolnie złożony otwór o wielu stopniach.



Rys. 4.1. Typowy otwór wielostopniowy

Na przykład, otwór o kodzie 2.1.1, po dodaniu elementów pomocniczych: fazki i kanałka, ma kod F2.1.K1 (rys. 4.1).

Przedstawiona klasyfikacja otworów umożliwia opis dowolnego, złożonego otworu i przypisanie mu kodu strukturalnego, bez konieczności bezpośredniego stosowania klasyfikatora z geometrycznym przedstawieniem otworów, a także budowę macierzy typizowanych otworów oraz ich procesów technologicznych.

Tab. 4.1. Klasyfikator otworów

1 2	1	2	3	4	5	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	2.1	
	1	1.1	2.1	3.1	4.1	5.1	1.1.1	1.2.1	1.3.1	1.4.1	1.5.1	2.1.1
	2	1.2	2.2	3.2	4.2	5.2	1.1.2	1.2.2	1.3.2	1.4.2	1.5.2	2.1.2
	3	1.3	2.3	3.3	4.3	5.3	1.1.3	1.2.3	1.3.3	1.4.3	1.5.3	2.1.3
	4	1.4	2.4	3.4	4.4	5.4	1.1.4	1.2.4	1.3.4	1.4.4	1.5.4	2.1.4
	5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	1.1.5	1.2.5	1.3.5	1.4.5	1.5.5	2.1.5

Ponieważ dowolny złożony otwór wielostopniowy jest kombinacją elementów konstrukcyjnych, to także technologia jego obróbki jest kombinacją typizowanych zabiegów obróbki elementów konstrukcyjnych:

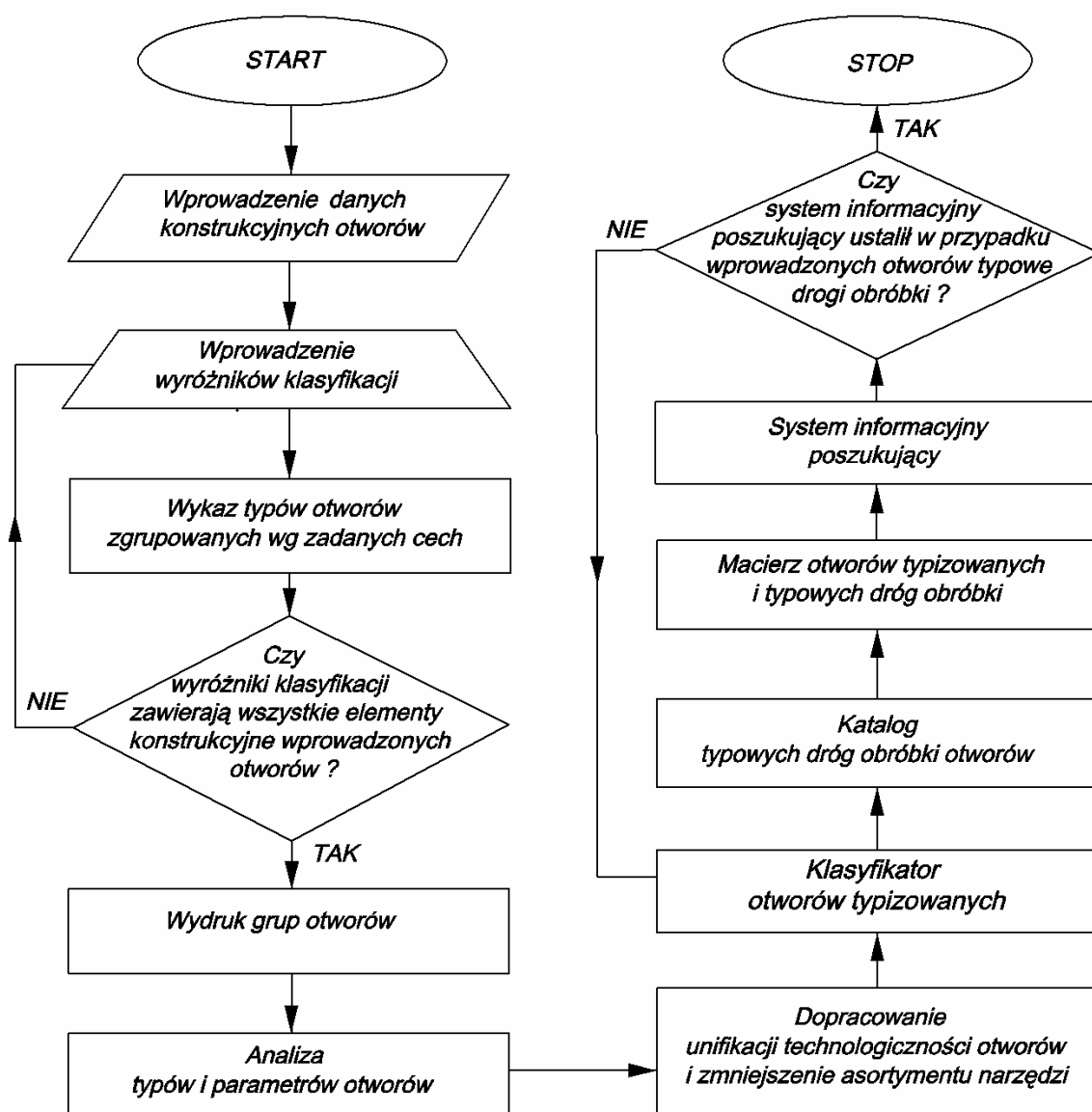
- podstawowych - 1...5,
- pomocniczych - F, K, G, W.

Fazki, kanałki, gwinty i rowki wpustowe w zależności od przeznaczenia, mają różny kształt i wymiary, a więc ich procesy technologiczne i niezbędne do obróbki narzędzia skrawające także będą różne.

4.2. Algorytm typizacji i unifikacji otworów

W przypadku typowej struktury procesu technologicznego obróbki otworów [24, 109], należy opracować schemat strukturalny rozwiązania zagadnienia typizacji i unifikacji otworów podczas przygotowania informacji wejściowej.

Przedstawiono go na rys. 4.2.



Rys. 4.2. Algorytm rozwiązania zadania typizacji i unifikacji otworów

Przykład kodowania otworów podczas przygotowania informacji podstawowej przedstawiony jest w tab. 4.2.

W procesie rozwiązania zagadnienia, wszystkie otwory należy podzielić na grupy, zgodnie z zadanymi wyróżnikami (typ otworu, występowanie elementów pomocniczych, wymiary).

W celu dalszego „dopracowania” wpływu konstrukcji otworów na technologiczność i opracowanie katalogu typizowanych otworów oraz dróg obróbki, zestawione są charakterystyki otworów według grup.

Tab. 4.2. Karta podstawowej informacji potrzebnej do opisanie otworów

L.p.		Nazwa części																			
Równanie strukturalne		Elementy konstrukcyjne pomocnicze						Elementy konstrukcyjne podstawowe						Warunki dodatkowe							
		Fazka kod „F”		Kanałek kod „K”		Gwint kod „G”		Rowek wpustowy kod „W”		Otwór przelotowy „1”		Otwór nieprzelotowy „2”		Otwór nieprzelotowy z płaskim dnem „3”		Otwór stożkowy przelotowy „4”		Otwór stożkowy z płaskim dnem „5”			
D [mm]	2κ [°]	h [mm]	D [mm]	H [mm]	MD × h [mm]	H [mm]	b [mm]	h [mm]	D [mm]	L [mm]	D [mm]	L [mm]	D [mm]	L [mm]	D [mm]	L [mm]	2γ [°]	D [mm]	L [mm]	2δ [°]	
30 ± 0,3	60		30 ± 0,21	4					25+0,02	11	25,5+0,13	13	28 + 0,045	12							

W procesie „dopracowywania” technologiczności otworu, realizowana jest unifikacja elementów konstrukcyjnych otworów (wymiary, konfiguracja) oraz zmniejszona ilość ich typów.

4.3. Wnioski

Opracowany katalog typizowanych otworów może być zalecany konstruktorom jako pomoc do projektowania nowych wyrobów, technologom - do ręcznego lub komputerowego projektowania technologii obróbki otworów, programistom systemowym - do opracowania typowych procedur programowych, pracownikom gospodarki narzędziowej - do określania asortymentu i ilości narzędzi.

Ogólna postać wyróżników klasyfikacji otworów na bazie przedstawionej metody, umożliwia włączanie do klasyfikatora dowolnie skomplikowanych otworów stopniowanych i łatwą ich identyfikację, a tym samym stworzenie przesłanki do budowy międzygałęziowego banku wiedzy.

5. METODY TECHNOLOGICZNE I KONSTRUKCYJNE ZWIĘKSZENIA EFEKTYWNOŚCI PRACY OBRABIAREK WIELOZADANIOWYCH NC W ELASTYCZNYCH SYSTEMACH PRODUKCYJNYCH

Jak pokazano w rozdziale 1, w celu osiągnięcia podstawowego celu, czyli skrócenia czasów przebrojenia [48, 67-70], stosowane są:

- separacja operacji wewnętrznych i zewnętrznych (transport oraz wymiana narzędzi i oprzyrządowania),
- zamiana operacji wewnętrznych na zewnętrzne (wczesne przygotowanie obrabiarki, standaryzacja operacji montażu narzędzi i przyrządów, ograniczenie stosowania przyrządów pośredniczących),
- optymalizacja operacji zewnętrznych (magazynowanie dokładnie określonej liczby narzędzi i przyrządów, niezbędnych do realizacji operacji, transport narzędzi, przyrządów i materiałów) oraz wewnętrznych (stosowanie przyrządów szybkoobrotowych, eliminacja regulacji ręcznej, mechanizacja operacji przygotowawczych, równoległe wykonywanie operacji przygotowawczych przez dwie osoby).

Na zwiększenie elastyczności systemu produkcyjnego, zdecydowany wpływ ma czas trwania operacji przygotowawczych [72], takich jak:

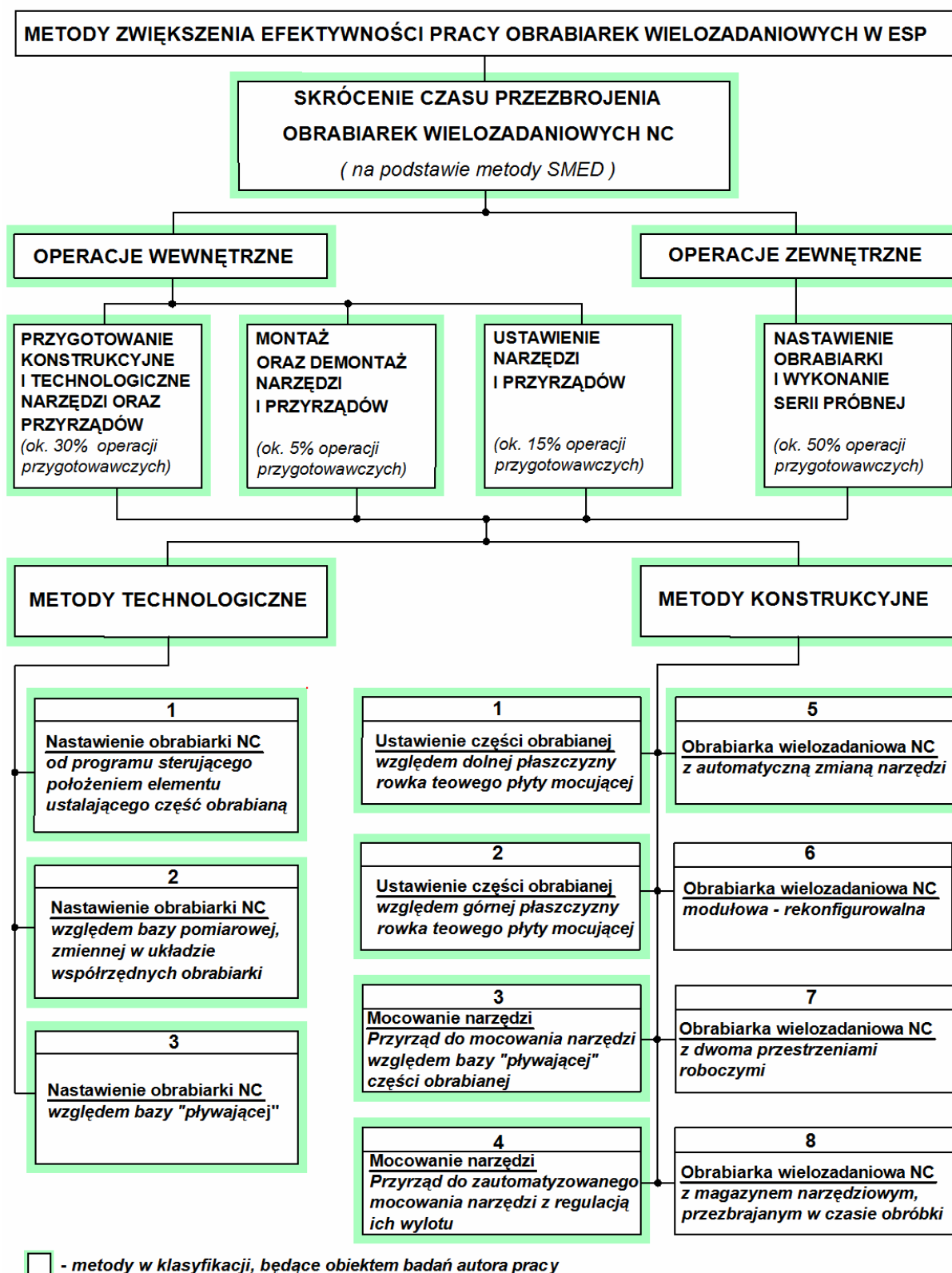
- ustawienie, zamocowanie i regulacja narzędzi,
- ustawienie, zamocowanie i regulacja przyrządów obróbkowych.

5.1. Klasyfikacja metod zwiększenia efektywności pracy obrabiarek wielozadaniowych NC

Klasyfikację metod zwiększania efektywności pracy obrabiarek wielozadaniowych NC przedstawiono na rys. 5.1.

Do jej opracowania wykorzystana została metoda SMED, która wskazuje sposoby zwiększenia efektywności pracy obrabiarek wielozadaniowych w elastycznych systemach produkcyjnych poprzez optymalizowanie operacji przygotowawczych, głównie skrócenie czasów przebrojenia. Opracowana klasyfikacja jest rozwinięciem SMED w zakresie metod technologicznych i konstrukcyjnych.

Opis metod zwiększania efektywności pracy obrabiarek wielozadaniowych NC obejmuje tylko metody technologiczne i konstrukcyjne, ponieważ operacje wewnętrzne i zewnętrzne scharakteryzowano w podrozdziale 1.6.



Rys. 5.1. Klasyfikacja metod zwiększania efektywności pracy wielozadaniowych obrabiarek NC w elastycznych systemach produkcyjnych

Metody technologiczne

Nastawienie obrabiarki wielozadaniowej NC w zależności od programu sterującego położeniem elementu ustalającego część obrabianą

Istota tego rozwiązania polega na kompensacji błędów łańcucha wymiarowego przyrządu przez ustawienie elementu ustalającego część obrabianą z zastosowaniem specjalnego programu, co eliminuje konieczność dokonywania pomiarów faktycznego położenia elementów ustalających.

Nastawienie obrabiarki wielozadaniowej NC względem bazy pomiarowej, zmiennej w układzie współrzędnych obrabiarki

Proponowana metoda umożliwia nastawienie narzędzia skrawającego względem każdej bazy pomiarowej, zmieniającej swoje położenie w układzie współrzędnych obrabiarki oraz eliminację przyrządów do regulacji narzędzia poza obrabiarką.

Nastawienie obrabiarki wielozadaniowej NC względem bazy pływającej

Rozwiązanie to umożliwia zwiększenie dokładności ustawienia części obrabianych poprzez wyeliminowanie błędu nastawienia elementu ustalającego.

Metody konstrukcyjne

Ustawienie części obrabianej na dolnej płaszczyźnie rowka teowego płyty mocującej

Do ustalenia części obrabianej wykorzystuje się dno rowka teowego płyty mocującej, oraz specjalna konstrukcja elementu ustalającego część obrabianą.

Ustawienie części obrabianej na górnej płaszczyźnie rowka teowego płyty mocującej

W rozwiązaniu tym wyeliminowano współdziałanie kołnierza elementu ustalającego z dnem rowka teowego przy zmianie położenia tego elementu, dzięki czemu zwiększa się dokładność ustawienia części i skraca się czas przebrojenia obrabiarki.

Przyrząd do mocowania narzędzi względem bazy „pływającej” części obrabianej

Możliwość zautomatyzowanego nastawienia wysunięcia narzędzia względem bazy „pływającej” pozwala na zmniejszenie ilości operacji (ustawień części) oraz przeprowadzenie niektórych operacji na obrabiarkach NC, wcześniej wykonywanych metodą próbnych przejść na obrabiarkach konwencjonalnych.

Przyrząd do zautomatyzowanego mocowania narzędzi z regulacją ich wysunięcia

Zautomatyzowana regulacja wysunięcia narzędzia względem każdej bazy „pływającej” jest możliwa dzięki zastosowaniu specjalnej oprawki, zamocowanej we wrzecionie obrabiarki NC.

Obrabiarka wielozadaniowa NC z automatyczną zmianą narzędzi

Konstrukcja takiej obrabiarki NC umożliwia wykorzystanie układu pomiarowego obrabiarki NC, który pozwala na określenie rzeczywistego położenia narzędzia względem osi.

Obrabiarka wielozadaniowa NC modułowa (rekonfigurowana)

Budowa tych obrabiarek pozwala na takie zestawienia modułów, aby była możliwa zmiana zadań obróbkowych.

W konstrukcji obrabiarek przestawialnych wykorzystana została koncepcja obrabiarek rekonfigurowanych, lecz zestawienia modułów do zmiany zadań obróbkowych mogą dokonywać sami użytkownicy.

Obrabiarka wielozadaniowa NC z dwoma przestrzeniami roboczymi

Dzięki zastosowaniu w konstrukcji obrabiarki NC dwóch przestrzeni roboczych, można dokonywać przebrojenia obrabiarki w jednej przestrzeni roboczej, podczas gdy w drugiej realizowana jest obróbka.

Obrabiarka wielozadaniowa NC z magazynkiem narzędziowym, przezbieranym w czasie obróbki

Magazyny narzędziowe zintegrowane ze stanowiskiem operatora, w zależności od typu maszyny, obejmują 50-56 gniazd. Uzbrojenie magazynu odbywa się bezpośrednio w czasie obróbki, przez drzwi zamontowane w tylnej części obrabiarki. Dzięki takiej konstrukcji magazynu możliwa jest wysoka niezawodność ustawiania narzędzi oraz właściwa ochrona narzędzi przed wiórami.

5.2. Metody technologiczne zwiększenia efektywności pracy obrabiarek wielozadaniowych NC

Metody te są związane z przebiegiem operacji przygotowawczych w procesie produkcyjnym, a ich celem jest skrócenie czasów ustawiania i mocowania części obrabianych oraz regulacji i mocowania narzędzi [14].

5.2.1. Nastawienie obrabiarki wielozadaniowej NC przez zastosowanie programu sterującego położeniem elementu ustalającego część obrabianą

Metoda ta umożliwia podwyższenie efektywności wykorzystania obrabiarek NC, zwłaszcza pracujących w warunkach elastycznej produkcji zautomatyzowanej.

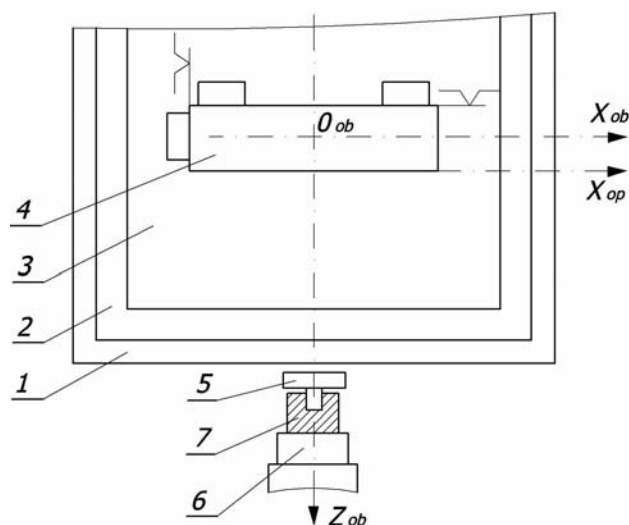
Zastosowanie jej wpływa na podwyższenie wydajności pracy obrabiarki NC, przy tym ulega uproszczeniu konstrukcja przyrządu do ustawienia i zamocowania części obrabianych.

W tym przypadku ustawienie elementu ustalającego przyrządu, określającego ostatnie ogniwo odpowiedniego łańcucha wymiarowego przyrządu, dokonywane jest bezpośrednio na obrabiarce NC w zależności od specjalnego programu, zgodnie ze szkicem operacyjnym procesu technologicznego.

Istotą tego rozwiązania jest możliwość kompensacji błędów łańcucha wymiarowego przyrządu przy pomocy ustawienia elementu, bezpośrednio ustalającego część obrabianą według specjalnego programu, co eliminuje konieczność dokonywania pomiarów faktycznego położenia elementów ustalających i korygowania programów sterujących na podstawie wyników pomiarów, a także znacznie upraszcza konstrukcję części korpusu przyrządu w wyniku eliminacji otworów, służących do ustawienia elementów ustalających.

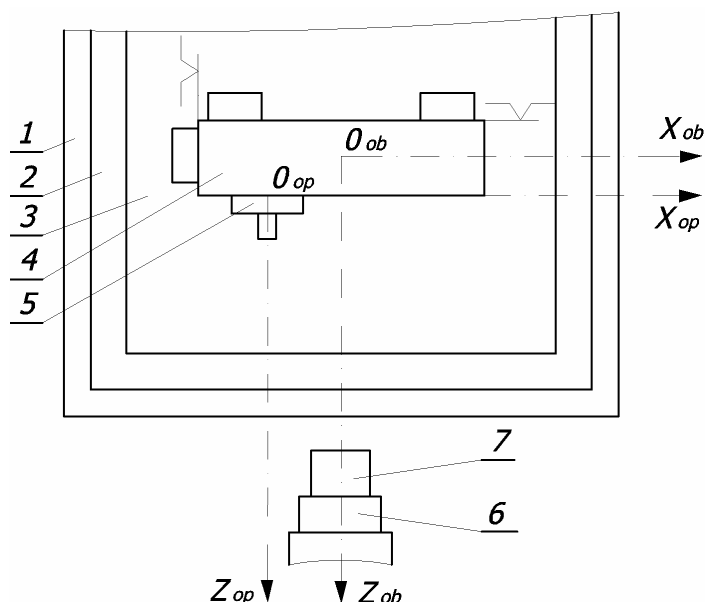
Położenie elementu ustalającego we wrzecionie obrabiarki, przed jego zamocowaniem w przyrządzie, pokazano na rys. 5.2.

Przyrząd, umożliwiający nastawienie obrabiarki (rys. 5.2) składa się ze stołu 1, palety 2 i płyty 3, z zamocowaną na niej płytą oporową 4. Element ustalający 5 ustawiony jest we wrzecionie 6 przy pomocy uchwyty 7.



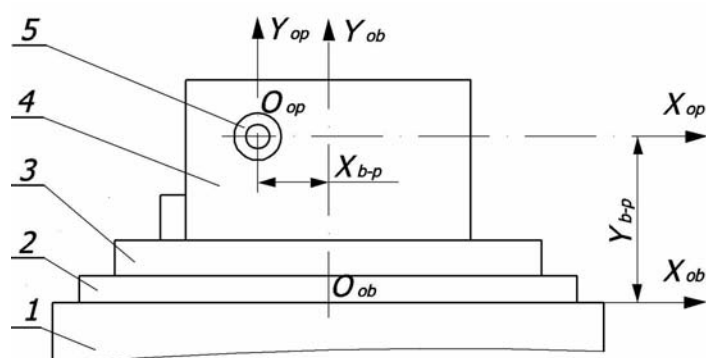
Rys. 5.2. Położenie elementu ustalającego we wrzecionie obrabiarki przed jego zamocowaniem na przyrządzie

Położenie elementu ustalającego 5 po zamocowaniu go na płycie oporowej 4, ustawionej na płycie 3 pokazano na rys. 5.3 i 5.4, gdzie: X_{b-p}, Y_{b-p} - wymiary, określające położenie elementu 5, ustalającego część obrabianą (położenie lokalnego układu współrzędnych $X_{op}Y_{op}Z_{op}$ względem obrabiarkowego układu współrzędnych $X_{ob}O_{ob}Y_{ob}$).



Rys. 5.3. Położenie elementu ustalającego po zamocowaniu na płycie oporowej

Wrzeciono 6 z uchwytem 7 znajduje się w położeniu umożliwiającym pobranie następnego elementu ustalającego. Płyta oporowa 4 jest ustawiona i zamocowana w wolnej strefie płyty 3 (rys.5.3).



Rys. 5.4. Położenie elementu ustalającego płycie oporowej względem obrabiarkowego układu współrzędnych

Element ustalający 5, przy pomocy uchwyty i wrzeciona, swoim płaskim końcem jest ustawiany zgodnie z programem na płaszczyźnie płyty oporowej 4 według współrzędnych

X_{op} i Y_{op} i mocowany, np. przy pomocy magnesu lub kleju w określonym, według planu operacyjnego procesu technologicznego, położeniu.

W ten sposób, błędy wykonania przyrządu, odniesione do płaszczyzny współrzędnych $X_{ob}O_{ob}Y_{ob}$, nie wpływają na położenie części obrabianej, ustawionej przy zastosowaniu elementu ustalającego 5, a jego położenie $X_{b-p}Y_{b-p}$ ustalane jest według programu względem obrabiarkowego układu współrzędnych $X_{ob}O_{ob}Y_{ob}$, z dokładnością pozycjonowania obrabiarki.

5.2.2. Nastawienie obrabiarki wielozadaniowej NC względem bazy pomiarowej, zmiennej w układzie współrzędnych obrabiarki

W chwili obecnej znane są zautomatyzowane i niezautomatyzowane sposoby regulacji ustawienia obrotowych narzędzi skrawających (frezów, wiertel, nawiertaków i innych) na obrabiarkach NC wzdłuż osi względem bazy stałej. Sposób niezautomatyzowany, realizowany przy pomocy płytek pomiarowych, wzorców i sond, charakteryzuje się wysoką pracochłonnością. Sposób zautomatyzowany, z wykorzystaniem układu odczytowo-pomiarowego obrabiarki NC, pozwala określić tylko rzeczywiste położenie narzędzia względem osi. Jednakże w praktyce ważne jest ustalenie położenia bazy „pływającej” części obrabianej względem narzędzia skrawającego, którego położenie nie może być określone wskazanymi wyżej sposobami.

Do regulacji narzędzia skrawającego względem bazy „pływającej” stosowane są głowice miernicze typu Renishaw. Głowica ustawiana jest we wrzecionie obrabiarki i według programu sterującego można określić faktyczne odchylenie położenia powierzchni mierzonej od obliczeniowej.

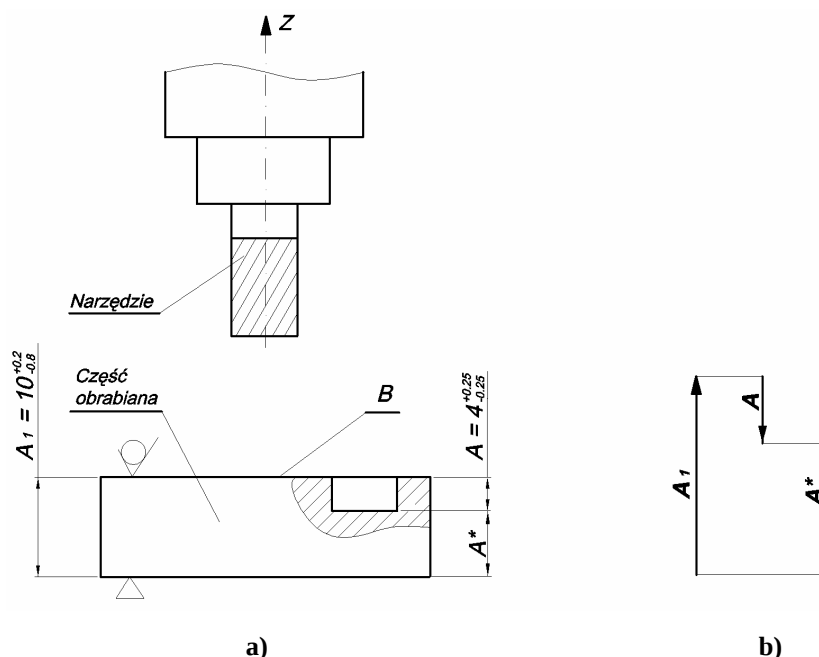
Zatem korygowany jest program sterujący albo wysunięcie narzędzia. Taki sposób regulacji jest także bardzo pracochłonny, ponieważ wymaga pomiaru każdej części w partii i zastosowania specjalnej głowicy mierniczej, co nie zawsze jest uzasadnione ekonomicznie.

Przy użyciu freza palcowego 1 (rys. 5.5a) należy wykonać rowek na wpust w części 2, o głębokości $A = 4 \pm 0,25 \text{ mm}$ względem powierzchni nieobrobionej B, która nie jest powierzchnią ustalającą. Położenie powierzchni B w przestrzeni roboczej obrabiarki zmienia się w granicach pola tolerancji wymiaru A_1 .

Wartość pola tolerancji wynosi $T_{A1} = 0,2 + 0,8 = 1 \text{ mm}$ [33].

W związku z tym, przy tradycyjnych sposobach regulacji, powierzchnia B nie może być bazą pomiarową.

W przedstawionym przykładzie wymiar A powinien być uzyskiwany automatycznie, jest więc wymiarem zamykającym trzyogniowego łańcucha wymiarowego (rys. 5.5b).



Rys. 5.5. Schemat regulacji narzędzia do obróbki rowka wpustowego w części obrabianej

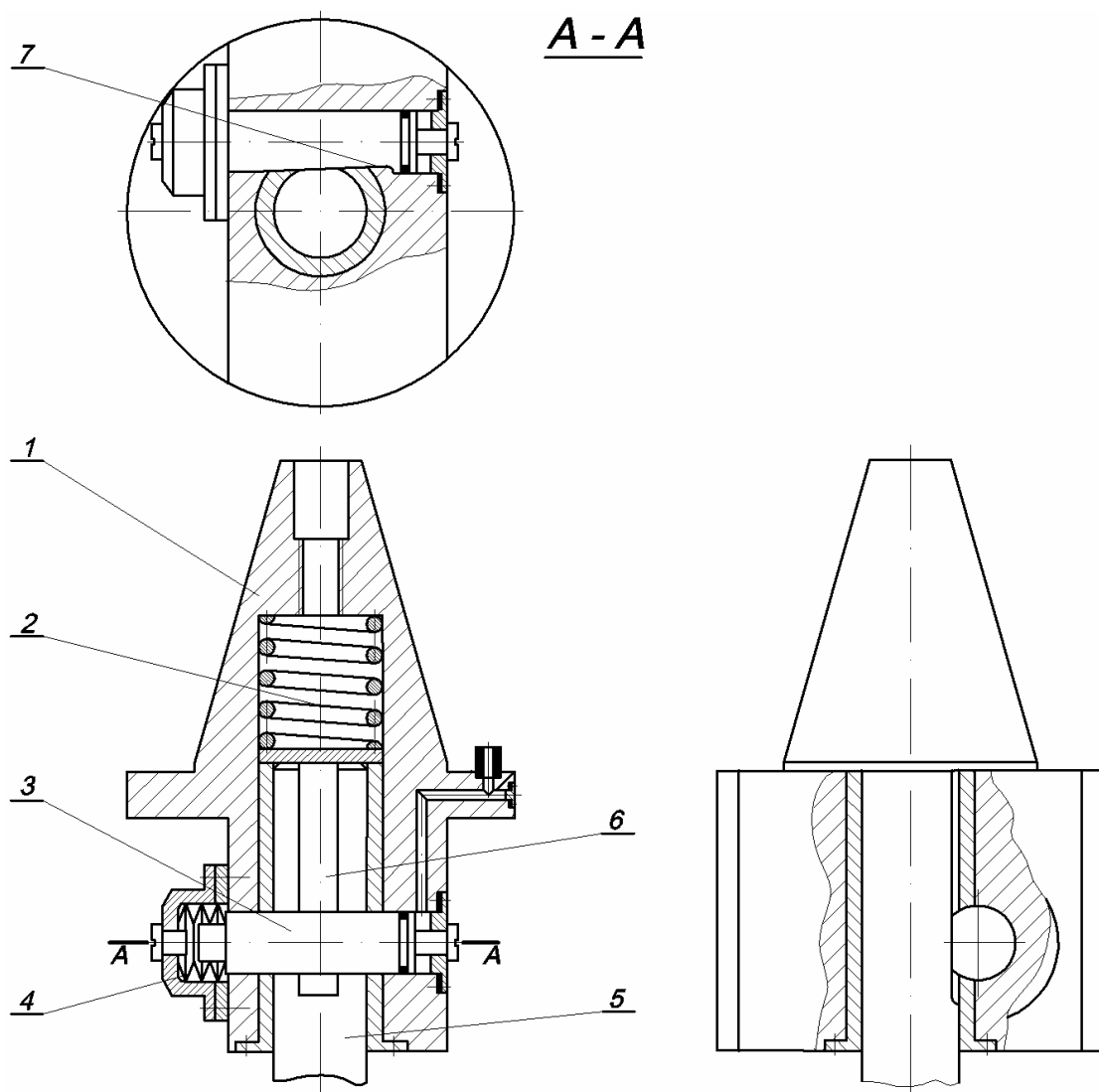
W tym przypadku wymiar A^* staje się wymiarem regulacyjnym i jest ustalony względem bazy stykowej (powierzchni ustalającej). Suma tolerancji ogniów A_1 i A^* nie powinna być większa od tolerancji ogniwa zamykającego A , jednakże w rozpatrywanym przypadku ten warunek nie jest spełniony, ponieważ

$$T_A + T_{A^*} = 1\text{mm} + T_{A^*} > T_A = 0,25 + 0,25 = 0,5\text{ mm}.$$

W praktyce to zadanie rozwiązywane jest w następujący sposób. Należy zwiększyć tolerancję ogniwa zamykającego, żeby zapewnić $T_A \geq T_{A1} + T_{A^*}$, czasem kosztem obniżenia jakości, albo zmniejszyć tolerancje ogniów tworzących łańcuch, wprowadzając dodatkowo operację frezowania (lub szlifowania) bazy „pływającej”. Jeśli nie daje to zadowalającego efektu, część poddaje się obróbce metodą próbnych przejść na obrabiarce uniwersalnej.

Ze względu na złożoność, wysokie koszty i znaczne straty czasu maszynowego przy pomiarze części, ta metoda w praktyce jest rzadko stosowana.

Automatyczna regulacja wysunięcia narzędzia 5 (rys. 5.6) względem każdej bazy „pływającej” jest możliwa dzięki zastosowaniu specjalnej oprawki 1, ustawionej we wrzecionie obrabiarki NC. Składa się ona z obudowy, sworznia zamykającego 3, sprężyn tarczowych 4 i sprężyny śrubowej 2.



Rys. 5.6. Oprawka do automatycznej regulacji wylotu narzędzia

Pod wpływem działania sprężyn 4, skos 7 sworznia zamykającego, współdziała z płaszczyzną 6, wykonaną na trzpieniu narzędzia w celu ustalenia dokładnego położenia narzędzia.

Oprawka podłączona jest do układu hydraulicznego obrabiarki NC i pod wpływem ciśnienia roboczego, sworzeń zamykający przesuwa się w lewo, ściskając sprężyny 4, co powoduje uwolnienie narzędzia. W chwili, gdy przestaje działać ciśnienie w układzie hydraulicznym, narzędzie zostaje zamocowane.

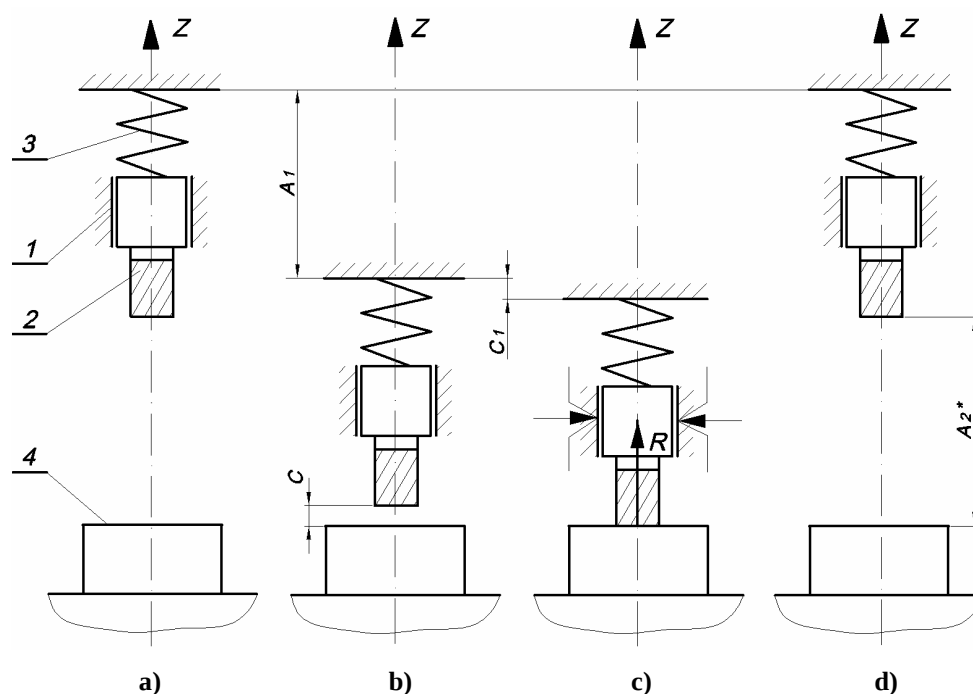
Wysunięcie narzędzia skrawającego jest regulowane w następujący sposób. W położeniu początkowym wrzeciona (rys. 5.7a) narzędzie 2, ustawione jest w oprawce 1, zamocowanej we wrzecionie. Następnie, zgodnie z programem sterującym, realizowane jest przemieszczenie wrzeciona z narzędziem wzdłuż osi Z na odległość A_1 (rys. 5.7b). Narzędzie zostaje ustawione w odległości C od pomiarowej bazy „pływającej” (płaszczyzny 4),

odległość ta jest co najmniej równa tolerancji położenia tej płaszczyzny w kierunku osi Z i wstępnie określonego błędu położenia wysunięcia narzędzia.

W celu kompensacji wskazanego błędu i zapewnienia trwałości narzędzia skrawającego, wrzeciono przesuwa się na odległość $C_1 > C$ (rys. 5.7c), co powoduje, że narzędzie pod wpływem ściśniętej sprężyny 3 przylega do płaszczyzny 4.

Powstaje reakcja R , przesuująca narzędzie w oprawce o wartość $C_1 - C$, a następnie, na polecenie „Zamocowanie narzędzia”, sworzeń zamykający pod wpływem działania sprężyn tarczowych mocuje narzędzie w oprawce.

Narzędzie wraca w położenie wyjściowe (rys. 5.7d), pokonując drogę równą odległości $A_2^* = A_1 + C_1$. Wymiar jest mierzony i wprowadzony do pamięci układu CNC.



Rys. 5.7. Schemat regulacji wysunięcia narzędzia skrawającego

Część programu sterującego, ilustrująca automatyczną regulację narzędzia, można przedstawić następująco:

N001 G80 G40

N002 G01 G91 Z – $[Z_{A1}]F[F_0]$

N003 Z – $[Z_{C1}]$

N004 G92 Z0,

gdzie: $[Z_{A1}]$, $[Z_{C1}]$, $[F_0]$ – liczbowe wartości przemieszczenia narzędzia wzdłuż osi Z na odległość A_1 i C_1 oraz drogi dojścia.

Po zakończeniu bloku N003 narzędzie zostało ustawione względem bazy pomiarowej, a po zakończeniu bloku N004 zostaje określony lokalny układ współrzędnych, odpowiadający położeniu bazy pomiarowej.

Obróbka części jest wykonywana od tej bazy (a nie od stykowej, odpowiadającej układowi współrzędnych części) i automatycznie jest ustalane położenie wysunięcia narzędzia.

Proponowany sposób umożliwia nastawienie narzędzia skrawającego względem każdej bazy pomiarowej, zmieniającej swoje położenie w układzie współrzędnych obrabiarki i umożliwia obróbkę tych powierzchni części, które ewidentnie nie są określone względem bazy stykowej (powierzchni ustalającej).

Oprócz tego, ten sposób poszerza możliwości technologiczne obrabiarki wielozadaniowej NC, zmniejszając liczbę ustawień części przy zmianie bazy, jak również umożliwia realizację na obrabiarce NC niektórych operacji, wcześniej wykonywanych na obrabiarkach uniwersalnych metodą przejść próbnych.

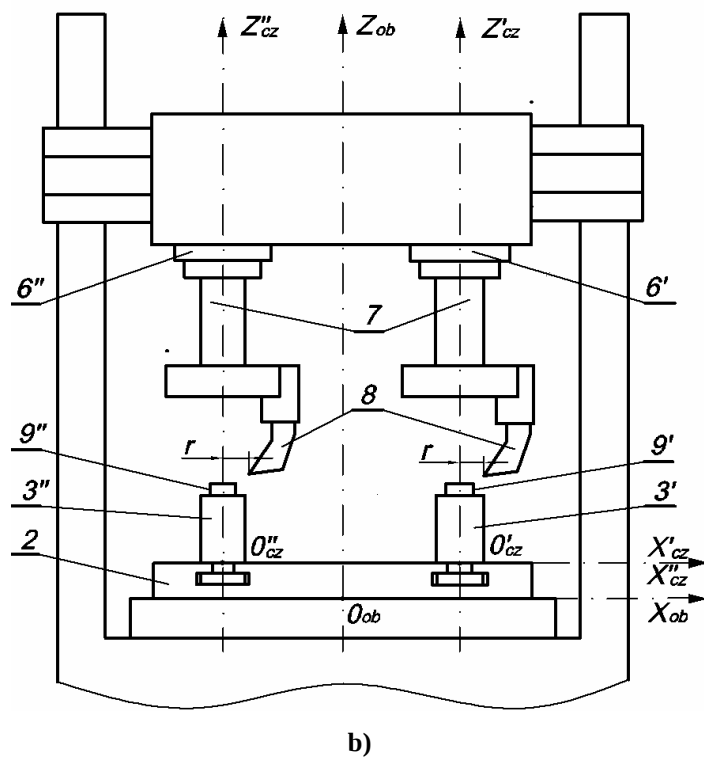
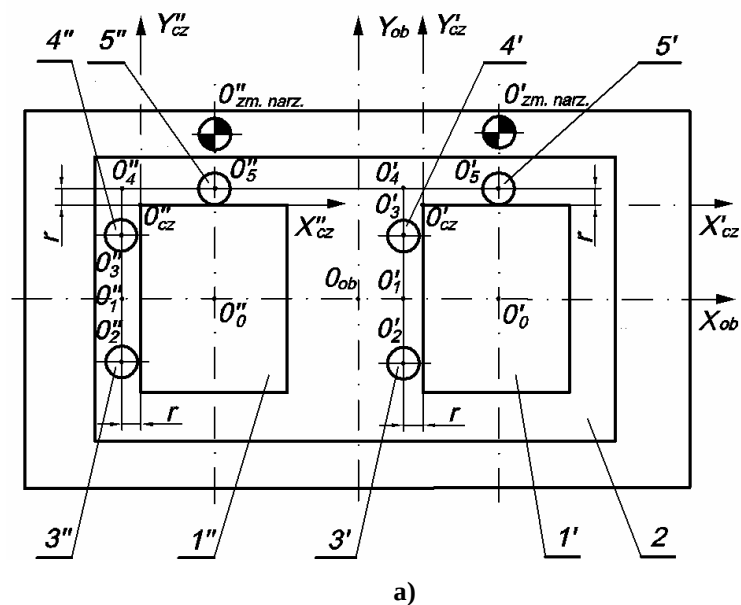
Rozwiązanie to nie wymaga stosowania przyrządów do regulacji narzędzia poza obrabiarką, ponieważ narzędzie można automatycznie nastawić na samej obrabiarce, nawet bez zastosowania specjalnych czujników położenia.

5.2.3. Nastawienie obrabiarki wielozadaniowej NC względem bazy „pływającej” części obrabianej

Sposób nastawiania umożliwia automatyzację regulacji obrabiarek wielozadaniowych NC, zarówno jedno – jak i wieloosiowych, pracujących autonomicznie lub w elastycznych systemach produkcyjnych z wykorzystaniem przyrządów uniwersalnych. Efektem jego zastosowania jest zwiększenie dokładności ustawienia części obrabianych poprzez zminimalizowanie błędu ustawienia elementu ustalającego.

Schemat nastawienia i obróbki elementów ustalających na dwuosiowej obrabiarce NC z ustawieniem na zewnętrznych powierzchniach części pokazano na rys. 5.8 [67].

Przed obróbką części 1' i 1'', na płycie bazowej przyrządu 2, ustawione są niedokładnie elementy ustalające 3'-5' oraz 3''-5'', w rowkach teowych płaszczyzny bazowej przyrządu 2. Elementy ustalające mogą być wykonywane w kształcie tulei. W pierwszym wrzecionie 6' umieszczona jest oprawka 7 ze śrubą do dokładnej regulacji narzędzia skrawającego 8 (noża wytaczaka). Na podstawie zadanego programu, w układzie współrzędnych obrabiarki, obrabiane są powierzchnie walcowe 9' i 9'' elementów ustalających.



Rys. 5.8. Nastawienie dwuosiowej obrabiarki NC
a) schemat nastawienia;
b) schemat obróbki elementów ustalających z ustawieniem na wewnętrznych powierzchniach części

Układy współrzędnych oznaczone są w następujący sposób: $X_{ob}O_{ob}Y_{ob}$ – układ współrzędnych obrabiarki, $X'_{cz}O'_{cz}Y'_{cz}$ – układ współrzędnych pierwszej obrabianej części, $X''_{cz}O''_{cz}Y''_{cz}$ – układ współrzędnych drugiej obrabianej części, O'_{cz} – punkt wyjściowy

(zerowy) do obróbki pierwszej części, O_{cz}'' – punkt wyjściowy (zerowy) do obróbki drugiej części, O_{ob} – punkt zerowy obrabiarki, r – odległość wysunięcia narzędzia od osi wrzeciona, $O_0' - O_1' - O_2' - O_3' - O_4' - O_5' - O_{zm.narz.}'$ – tor ruchu pierwszego narzędzia, $O_0'' - O_1'' - O_2'' - O_3'' - O_4'' - O_5'' - O_{zm.narz.}''$ – tor ruchu drugiego narzędzia, $O_{zm.narz.}'$ – punkt zmiany narzędzia, znajdującego się w pierwszym wrzecionie, $O_{zm.narz.}''$ – punkt zmiany narzędzia, znajdującego się w drugim wrzecionie, O_0', O_0'' – wyjściowe (zerowe) położenia wrzecion.

Pierwsze wrzeciono 6' w płaszczyźnie $X_{ob}O_{ob}Y_{ob}$ – przemieszcza się, na przykład, po torze $O_0' - O_1' - O_2' - O_3' - O_4' - O_5' - O_{zm.narz.}'$. Zatem, już nastawiona oprawka, zostaje przestawiona w drugie wrzeciono 6'', według tego programu obrabiane są elementy ustalające do ustawienia drugiej części, przy czym drugie wrzeciono przemieszcza się w płaszczyźnie $X_{ob}O_{ob}Y_{ob}$ po torze $O_0'' - O_1'' - O_2'' - O_3'' - O_4'' - O_5'' - O_{zm.narz.}''$.

Po obróbce elementów ustalających, określone są układy współrzędnych części: $X_{cz}'O_{cz}'Y_{cz}'$ i $X_{cz}''O_{cz}''Y_{cz}''$, których punkty zerowe O_{cz}' i O_{cz}'' ustalone są względem punktów charakterystycznych $O_4'O_4''$ toru ruchu oprawki przy obróbce baz wzdłuż osi X_{ob} i Y_{ob} na tę samą odległość r (zakres regulacji noża w oprawce).

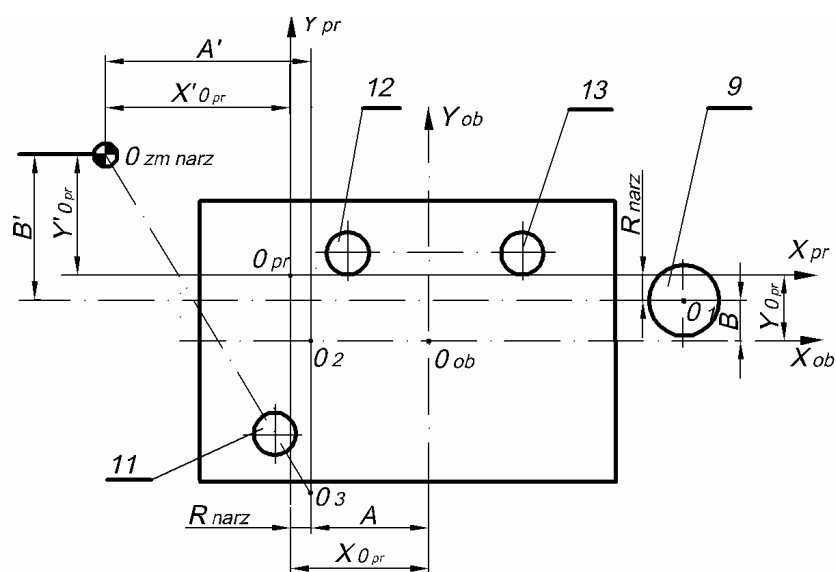
Przed obróbką części 1'', do numerycznego układu sterowania wprowadzana jest wielkość r , uwzględniana automatycznie przez program sterujący.

Schemat obróbki elementów ustalających przyrządu uniwersalnego na jednoosiowej obrabiarce z ustawieniem na zewnętrznych powierzchniach części pokazano na rys. 5.9a, a schemat ustawienia części - na rys. 5.9b.

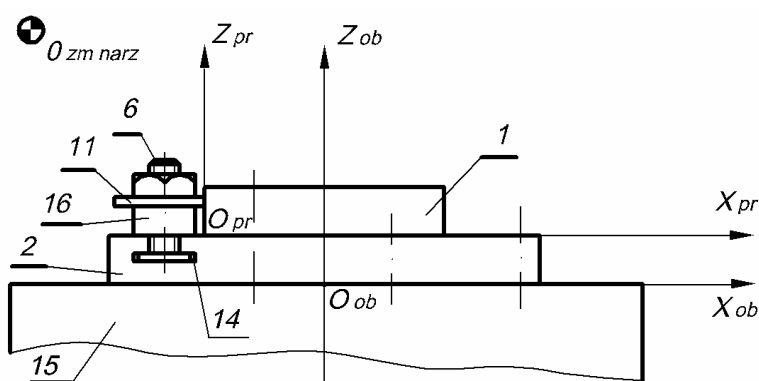
Układy współrzędnych do realizacji nastawienia na jednowrzecionowej obrabiarce, pokazane na rys. 5.9a, są oznaczone: $X_{ob}O_{ob}Y_{ob}$ - układ współrzędnych obrabiarki; $X_{pr}O_{pr}Y_{pr}$ - układ współrzędnych programu; O_{ob} - punkt zerowy obrabiarki; O_{pr} - punkt zerowy programu; $O_{zm.narz.}$ - punkt zmiany narzędzia; A i B - położenia narzędzia skrawającego względem zerowego punktu obrabiarki O_{ob} odpowiednio wzdłuż osi X_{ob} i Y_{ob} przy obróbce elementów ustalających 11-13; R_{narz} - promień narzędzia; X_{0pr} i Y_{0pr} - odległości od zerowego punktu obrabiarki O_{ob} do elementów ustalających 11-13; A' i B' - odległości od położenia narzędzia skrawającego w momencie obróbki baz

odpowiednio w kierunku osi X_{ob} i Y_{ob} do punktu zmiany narzędzia $O_{zm.narz.}$; X'_{0pr} i Y'_{0pr} - odległości od punktu zmiany narzędzia, odpowiednio do elementów ustalających 11-13; $O_{ob} - O_1 - O_2 - O_3 - O_{zm.narz.}$ - tor ruchu narzędzia.

Przed obróbką nowej partii części, wprowadzone w rowki teowe 14 przyrządu 2, ustawione na stole 15 obrabiarki NC, główki elementów mocujących 6, ustawiają i zamocowują elementy ustalające. W razie potrzeby elementy ustalające mogą być ustawione na tulejach oporowych 16.



a)



b)

Rys. 5.9. Ustawienie i obróbka części na obrabiarce jednowrzecionowej
a) schemat obróbki elementów ustalających przyrządu uniwersalnego
z ustawieniem na zewnętrznych powierzchniach części;
b) schemat ustawienia części

Na podstawie zadanego programu w układzie współrzędnych obrabiarki $X_{ob}O_{ob}Y_{ob}$ realizowana jest obróbka, na przykład frezem palcowym, elementów ustalających 11-13 po torze $O_{ob} - O_1 - O_2 - O_3 - O_{zm.narz.}$, przy tym wierzchołek kąta współrzędnościowego jest zerowym punktem programu O_{pr} i punktem podstawowym przy programowaniu obróbki części.

Po obróbce elementów ustalających, narzędzie skrawające 9 z punktu O_3 według programu przemieszcza się do punktu wymiany narzędzia $O_{zm.narz.}$. Punkt ten może być wybrany (na linii z punktem O_3 i osią elementu ustalającego 11 z uwzględnieniem wymiarów A' i B') w celu uproszczenia obsługi obrabiarki przy zmianie półfabrykatów, narzędzi i kontroli wymiarów. Sposób umożliwia automatyczną regulację obrabiarki NC za pomocą układu współrzędnych $X_{pr}O_{pr}Y_{pr}$, utworzonego w wyniku obróbki elementów ustalających, według których ustawiana jest część obrabiana.

$$\text{Przy tym } X_{0pr} = A \pm R_{narz}; Y_{0pr} = B \pm R_{narz}; X'_{0pr} = A' \pm R'_{narz}; Y'_{0pr} = B' \pm R'_{narz}.$$

Zastosowanie zaproponowanych metod nastawienia obrabiarek NC zwiększa dokładność nastawienia i bazowania części obrabianej w wyniku radykalnego zmniejszenia błędów ustawienia elementu bazującego.

5.3. Metody konstrukcyjne zwiększenia efektywności pracy obrabiarek wielozadaniowych NC w elastycznych systemach produkcyjnych

Metody te, związane z budową obrabiarki, narzędzi i uchwytów, są realizowane jako zamiana operacji wewnętrznych na zewnętrzne, czyli wczesne przygotowanie obrabiarki.

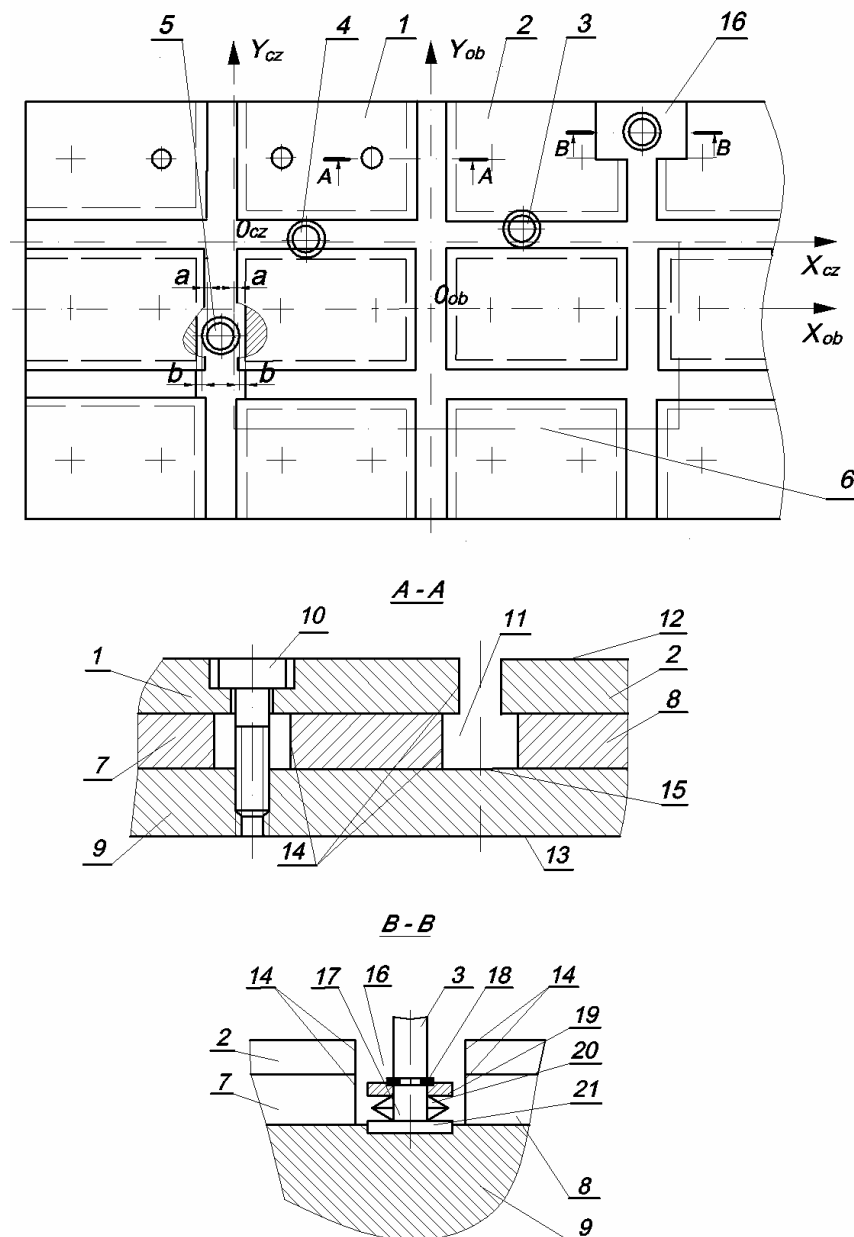
Pozwalają na skracanie czasów przebrojenia obrabiarek wielozadaniowych poprzez:

- usprawnianie ustawienia i zamocowania części obrabianych,
- usprawnienie regulacji i mocowania narzędzi,
- automatyzację wymiany narzędzi na obrabiarkach.

5.3.1. Ustawianie części obrabianych względem dolnej płaszczyzny rowka teowego płyty mocującej

Bardzo istotny wpływ na dokładność i czas obróbki ma szybkie i precyzyjne ustawienie części obrabianej w przyrządzie, zamocowanym na stole obrabiarki.

Przykład przyrządu przeznaczonego do ustawienia części na obrabiarce wielozadaniowej NC, pracującej w ESP, umożliwiającą zmniejszenie czasu przebrojenia tej obrabiarki do obróbki części innego typu, pokazano na rys. 5.10. Opis zasady działania przyrządu przedstawiono w oparciu o rys. 5.10 i rys. 5.11.

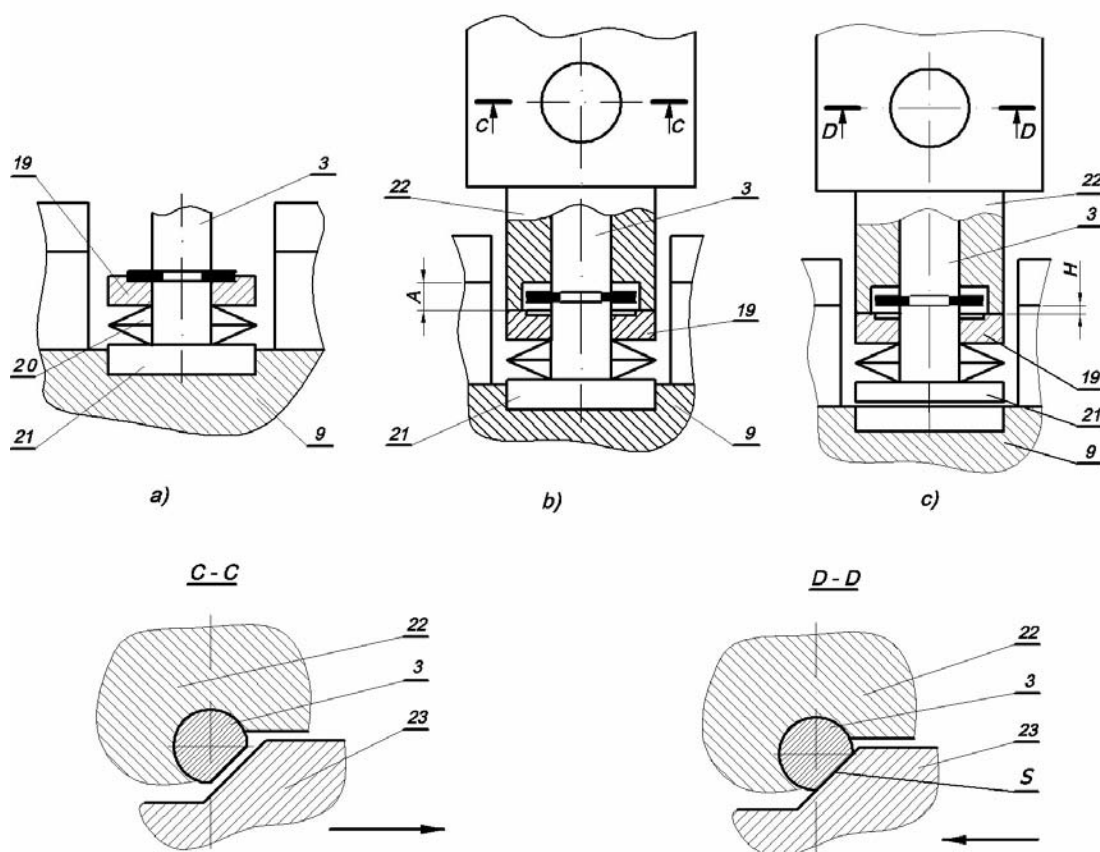


Rys. 5.10. Widok przyrządu do ustawiania części na wielozadaniowej obrabiarce NC

W górnych płaszczyznach prostokątnych części 1 i 2 (rys. 5.10 przekrój A-A) umieszczone są elementy ustalające 3-5, przeznaczone do ustalenia części obrabianej 6, której wymiary są określone we współrzędnych $X_{cz}O_{cz}Y_{cz}$. Przeszczenia elementu wykonawczego obrabiarki NC (nie pokazany) są określone współrzędnymi $X_{ob}O_{ob}Y_{ob}$.

Górne 1 i 2 oraz dolne 7 i 8 elementy, umocowane z możliwością względnego przesunięcia na podstawie 9 śrubami 10, tworzą płytę z rowkami teowymi 11. Między elementami ustalającymi 3-5 i ściankami rowka teowego 11 zawsze jest zapewniony luz a i b (rys. 5.10).

Górna płaszczyzna 12 jest przeznaczona do rozmieszczenia części 6, a dolna płaszczyzna 13 - do ustawienia na stole obrabiarki NC. Powierzchnie czołowe 14 górnych 1 i 2 oraz dolnych 7 i 8 elementów, tworzą pionowe ścianki rowka teowego 11, a górna płaszczyzna podstawy 9 jest jego dnem 15. Gniazdo 16 jest wyjściowym położeniem elementów 3-5.



Rys. 5.11. Położenia elementu ustalającego

- a) element ustalający w położeniu wyjściowym;
- b) element ustalający przy ściśniętych sprężynach;
- c) element ustalający przed jego przemieszczeniem względem ścianek rowka teowego

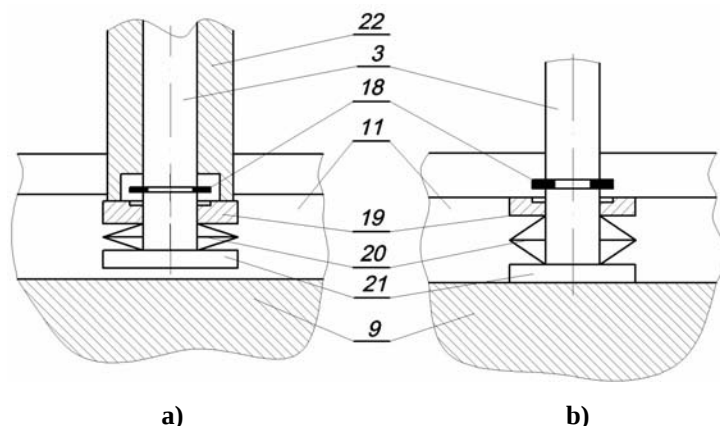
Kolejne położenia elementu ustalającego względem ścianek rowka teowego pokazano na rys. 5.11.

Oprawka 22 (rys. 5.11) jest przeznaczona do przemieszczenia elementów ustalających 3-5. Elementy ustalające 3-5 unieruchamiane są w oprawce 22 za pośrednictwem trzpienia zamykającego 23 ze skosem. W dolnej części każdego elementu ustalającego 3-5 (rys 5.10 przekrój B-B), znajdują się: pierścień zabezpieczający 18, pierścień oporowy 19 i sprężyny talerzowe 20. Sprężyny talerzowe 20, umieszczone są między pierścieniem oporowym i kołnierzem 21 każdego elementu ustalającego 3-5.

W położeniu wyjściowym, we wrzecionie obrabiarki NC umieszczona jest, na przykład, oprawka hydrauliczna 22. Oprócz tego, w pozycji wyjściowej znajduje się przygotowany element ustalający (na przykład 3), z pakietem sprężyn talerzowych 20, pierścieniem oporowym 19 i pierścieniem zabezpieczającym 18 (rys. 5.10 przekrój B-B).

Na podstawie programu wrzeciono obrabiarki przesuwają się do pozycji załadowania (rowek, w którym ustalany jest kołnierz 21). Wtedy, do cylindra hydraulicznego oprawki 22 jest podawany olej, co powoduje przesunięcie sworznia zamykającego 23 (rys. 5.11) w kierunku od osi wrzeciona, oraz uwolnienie otworu ustalającego oprawki 22 do wejścia elementu ustalającego 3. Wrzeciono z oprawką 22 przesuwa się wzdłuż osi w kierunku elementu ustalającego 3, naciskając czołem oprawki na pierścień oporowy 18 (zaznaczony na rys. 5.10), o wielkość A (rys. 5.11b). Zatem, zgodnie z programem, obniża się ciśnienie oleju w cylindrze hydraulicznym oprawki 22 i sworznie zamykający 23, na skutek nacisku sprężyn talerzowych 20, przemieszcza się w stronę elementu ustalającego 3, klinując go, przy pomocy skosu S na powierzchni elementu ustalającego 3. Wrzeciono z elementem ustalającym 3 przesuwa się wzdłuż swojej osi w kierunku, przeciwnym do dolnej płaszczyzny dna rowka teowego, zachowując luz H między środkową płaszczyzną rowka teowego i pierścieniem oporowym 19 (rys. 5.11) i dalej, zgodnie z programem, przesuwa się wzdłuż rowków teowych w położenie robocze, niezbędne do ustalenia współrzędnych części 6. Podawany jest olej do układu hydraulicznego oprawki 22, przy tym sworznie zamykający 23 oddala się od elementu ustalającego 3, który jest zwalniany z oprawki 22, w wyniku działania pakietu sprężyn talerzowych 20 jest ustalany w tym położeniu (rys. 5.12) w rowku teowym przyrządu, a wrzeciono przesuwa się wzdłuż swojej osi, uwalniając element ustalający 3, a następnie do strefy załadowania (rowek, w którym ustalany jest kołnierz 21), do powtórzenia cyklu w celu ustawienia pozostałych elementów ustalających.

Schemat przemieszczenia elementu ustalającego wzdłuż ścianek rowka teowego płyty przedstawiono na rys. 5.12a, a element ustalający w położeniu roboczym - na rys. 5.12b.



Rys. 5.12. Przemieszczanie elementu ustalającego
a) chemat przemieszczenia elementu ustalającego
wzdłuż ścianek rowka teowego płyty;
b) element ustalający w położeniu roboczym

Jeśli istnieje potrzeba zmiany wymiarów rowków teowych 11, to górne oraz dolne części należy przesuwac względem siebie w granicach luzów między łbami śrub, jednak powinny być wtedy zapewnione odpowiednie luzy pomiędzy elementami ustalającymi 3-5 a ściankami rowka teowego 11 (rys. 5.10 przekrój A-A).

5.3.2. Ustawianie części obrabianych względem górnej płaszczyzny rowka teowego płyty mocującej

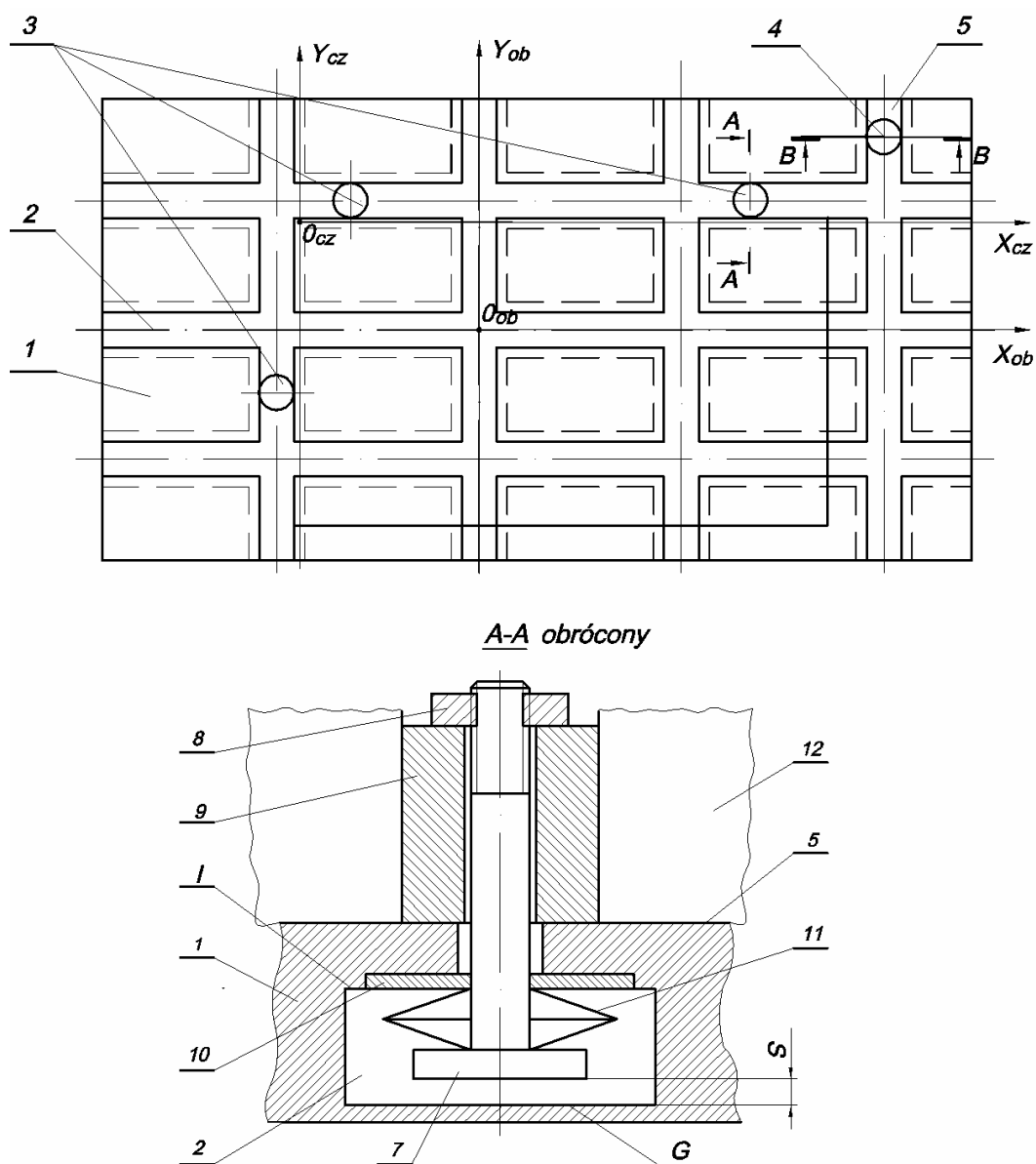
Przyrząd ten służy do ustawienia części na obrabiarkach wielozadaniowych NC, pracujących indywidualnie, jak i w składzie ESP. Umożliwia zwiększenie dokładności ustawiania części, wydajności oraz obniżenie pracochłonności. W proponowanym rozwiązaniu wyeliminowano oddziaływanie kołnierza na dno rowka teowego przy przemieszczeniu elementu ustalającego, dzięki czemu zwiększa się dokładność ustalenia części i skraca czas przebrojenia. Oprócz tego, prostsze jest przygotowanie rowków płyty ponieważ rozszerzeniu ulega pole tolerancji.

Zasadę działania przyrządu opisano w oparciu o rys.5.13; rys. 5,14 i rys. 5.15.

Przyrząd zbudowany jest z płyty 1 z siatką rowków teowych 2 (rys. 5.13), w których ustawione są elementy ustalające 3. Można w niej wyodrębnić gniazdo załadowania 4 i płaszczyznę bazową 5.

Każdy element ustalający 3 ma ściąg 7 z kołnierzem i elementem oporowym 8, w kształcie nakrętki, nakręconej na ściąg i swobodnie ustawionej na tulei bazującej 9, z pierścieniem oporowym 10 i pakietem sprężyn talerzowych 11.

Przy tym, między kołnierzem ściągu 7 i dnem G rowka teowego 2 utworzy się luz S , a pierścień oporowy 10 współdziała z płaszczyzną I rowka teowego 2, naprzeciw dna G tego rowka.

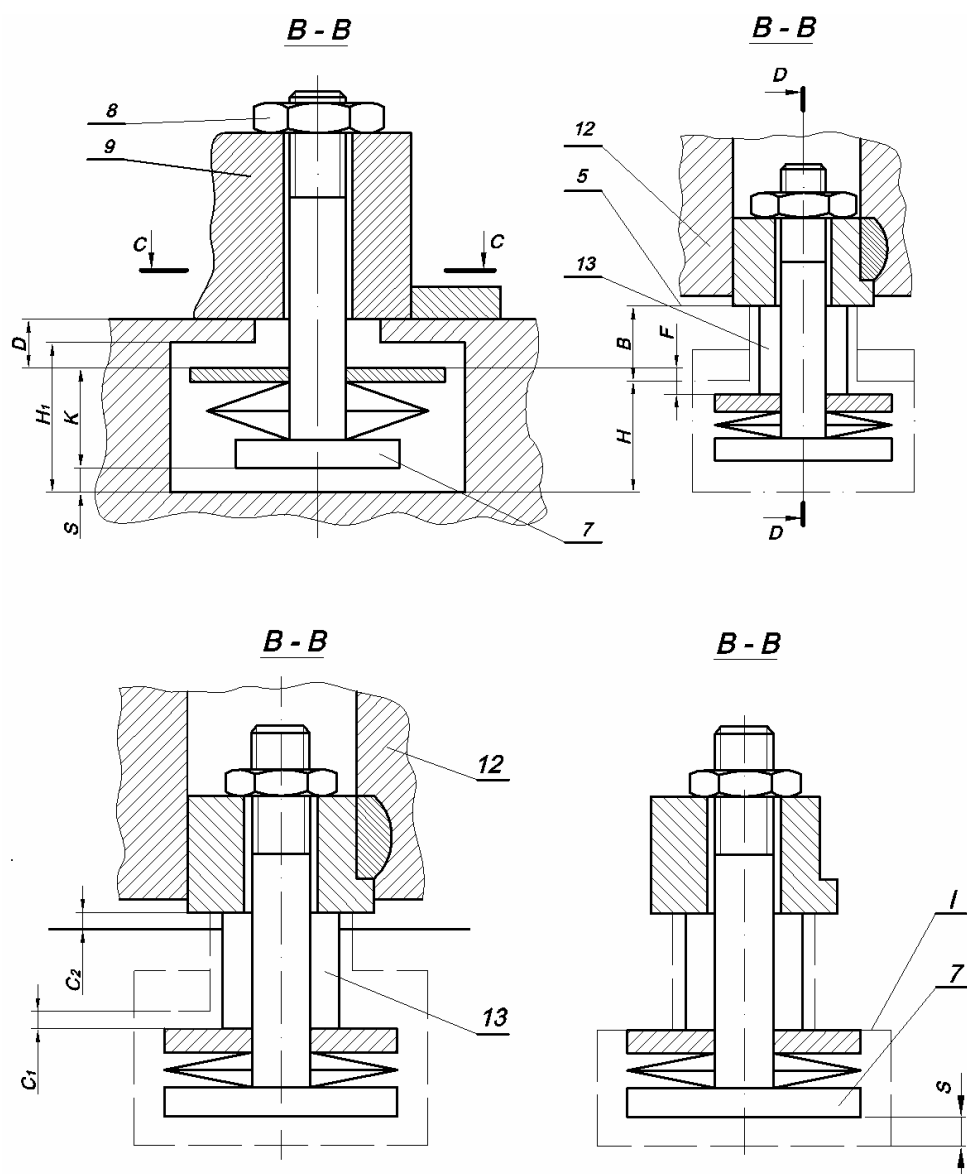


Rys. 5.13. Przyrząd do ustalania części obrabianej

Do przemieszczenia elementów ustalających 3 w rowkach 2 służy oprawka 12, z wpustami oporowymi 13 (rys. 5.14) oraz sworzniem klinującym 14 ze skosem M (rys. 5.15 przekrój E-E).

W pozycji załadowania wysokość poszerzonej części rowka teowego jest większa od wysokości poszerzonej części rowków teowych 2 siatki (rys. 5.13). Na płaszczyźnie bazowej 5 ustawiona jest płyta 16 (rys. 5.15 przekrój C-C).

Przestawienie realizowane jest w następujący sposób. Aby ustawić część obrabianą, należy rozmieścić elementy ustalające 3 w zadanych położeniach rowków roboczych 2.



Rys. 5.14. Przekrój B-B rys. 5.13 (po przestawieniu elementów ustalających)

Z kompletowanych części przygotowuje się elementy ustalające 3, mocowane nakrętkami 8, uzyskując gotowość do pracy elementu ustalającego i usuwając kolejne niedokładności (rys. 5.13 i rys. 5.14):

$$(K + D) < (H + B)$$

$$(B > D), \text{ przy czym: } (B - D) < e \cdot n,$$

gdzie: K - wymiar kołnierza ściągu, nieściśniętego pakietu sprężyn talerzowych i pierścienia oporowego;

D - wymiar, w pozycji załadowania, od płaszczyzny bazowej płyty do pierścienia oporowego;

H_1 - wysokość poszerzonej części rowka teowego 2;

B - wymiar od bazowej płaszczyzny płyty do poszerzonej części rowka teowego 2;

e - maksymalnie dopuszczalna wartość ściśnięcia sprężyny talerzowej;

n - ilość sprężyn talerzowych w pakiecie.

Przygotowany element ustalający jest ustawiany w gniazdo załadowania (rys. 5.15), przy tym skos tulei bazującej 9 ustalony jest na płycie 16, dzięki czemu uzyskiwane jest narożne położenie skosu B (rys. 5.13 i rys. 5.15). Pakiet sprężyn talerzowych 11 jest nieściśnięty, tak więc $H_1 > H$ (rys. 5.14).

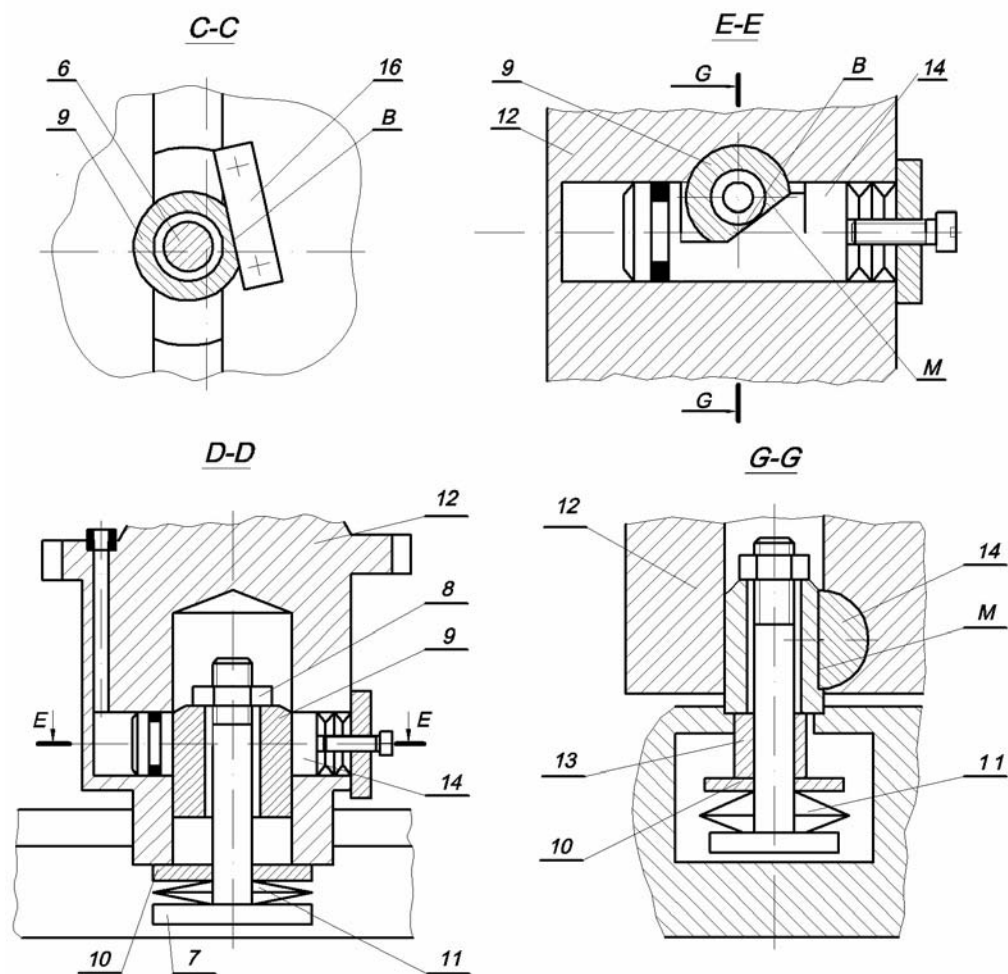
Zatem, według zadanego programu, wrzeczono, na przykład z oprawką 12 (rys. 5.15), przemieszcza się do gniazda załadowania 4, przy tym oś wrzeczona z oprawką jest zgodna z osią elementu ustalającego 3 (rys. 5.13), a do cylindra hydraulicznego oprawki jest podawany olej. Jego ciśnienie przemieszcza element klinujący 14 w prawo (rys. 5.15).

Wrzeczono z oprawką przemieszcza się do dołu, element ustalający swobodnie wchodzi w kształtowy wpust elementu klinującego 14 (rys. 5.15), przy tym wypusty oporowe 13, naciskając na pierścień oporowy 10, ściskają pakiet sprężyn talerzowych 11 (rys. 5.14 i rys. 5.15).

Następnie przekazywane jest polecenie zaciśnięcia elementu ustalającego w oprawce 12, zmniejsza się ciśnienie oleju w cylindrze oprawki i element klinujący 14, pod naciskiem sprężyn talerzowych, przesuwa się w lewo, klinując na skosie tuleję bazującą 9 (rys. 5.15).

Wrzeczono, z zamocowanym w oprawce 12 elementem ustalającym, przemieszcza się do góry wzdłuż osi, zapewniając luz C_2 między dolną płaszczyzną czołową tulei bazującej 9 i płaszczyzną bazową 5 płyty oraz luz C_1 między płaszczyzną rowka teowego i pierścienia oporowego, przy czym $C_1 + C_2 = A$ (rys. 5.14).

W takim położeniu wrzeczono z elementem ustalającym przesuwa się w rowku teowym 2, według współrzędnych obrabiarki $X_{ob}O_{ob}Y_{ob}$, w zadane położenie, ustalając system współrzędnych $X_{cz}O_{cz}Y_{cz}$ (rys. 5.13).



Rys. 5.15. Przekrój C-C i D-D rys. 5.14 oraz E-E i G-G rys. 5.15

W zadanym położeniu olej podawany jest do cylindra oprawki 12, uwalniając tuleję bazującą 9. Wrzeciono unosi się, co powoduje, że pierścień oporowy 10 bazuje na płaszczyźnie I rowka teowego.

Wrzeciono z oprawką wraca do pozycji wyjściowej w celu uchwycenia następnego elementu ustalającego.

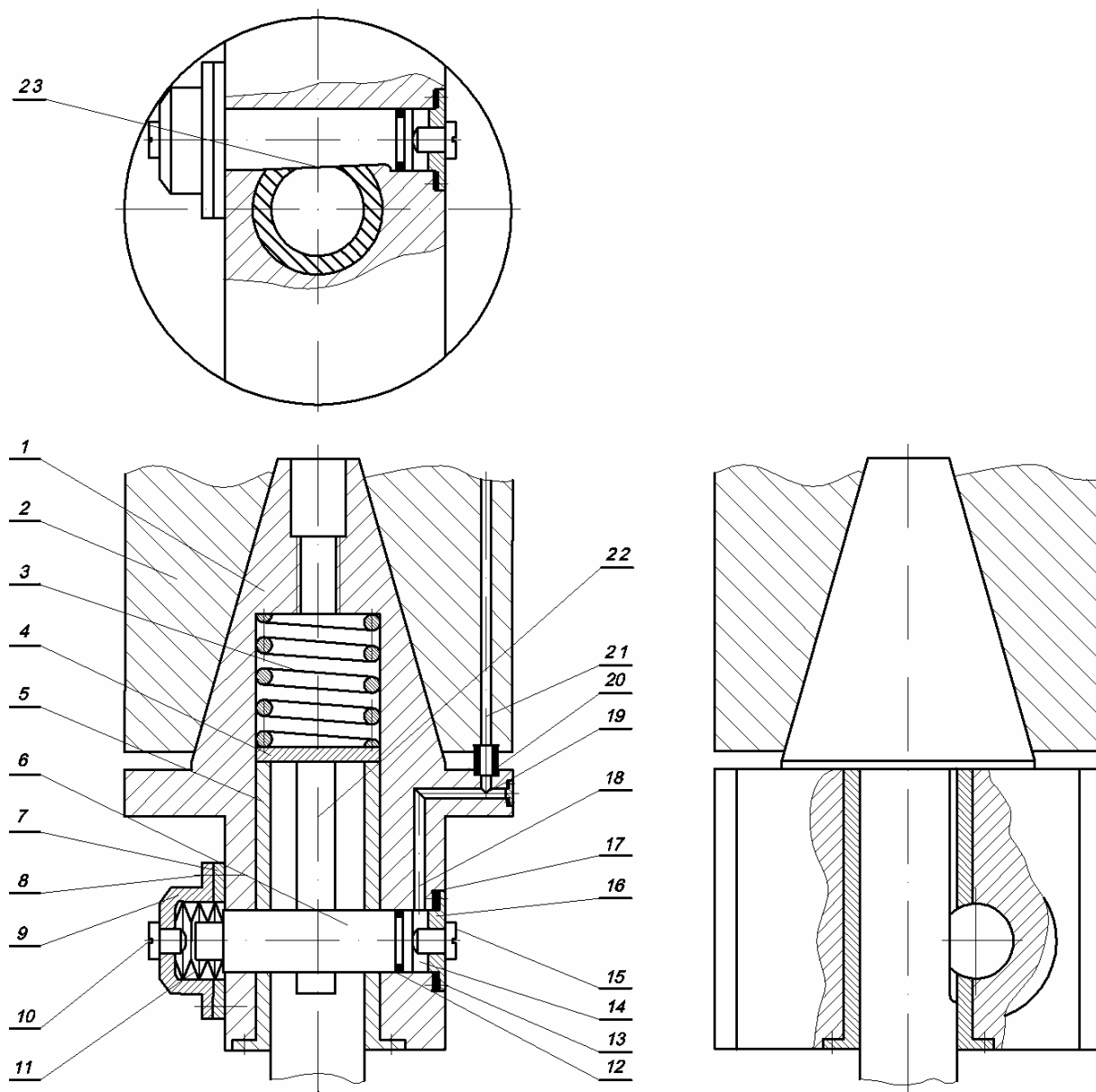
5.3.3. Mocowanie narzędzi względem bazy „pływającej” części obrabianej

Przyrząd (rys. 5.16) jest przeznaczony do zastosowania na obrabiarkach wielozadaniowych i rozszerza ich możliwości technologiczne przy nastawieniu narzędzi trzpieniowych względem każdej bazy „pływającej” części obrabianej lub przyrządu.

Składa się z oprawki narzędziowej 1 z kanałami 18, służącymi do doprowadzenia oleju do cylindra 14, sprężyny 3, sworznia zamykającego 6, sprężyn talerzowych 11, obudowy 9, pokrywy 16, zaworu zwrotnego 19.

Przyrząd ustalany jest w stożku wrzeciona 2 z kanałem 21 do doprowadzenia oleju. Przed wyciekem oleju z układu hydraulicznego zabezpieczają uszczelnienia 12, 17 i 20. Tuleja i pokrywa są mocowane śrubami 8 i 13. Na sworzniu zamykającym 6 wykonany jest skos 23, oddziałujący na narzędzie przez odpowiednie ścięcie 22, wykonane w jego końcowej części.

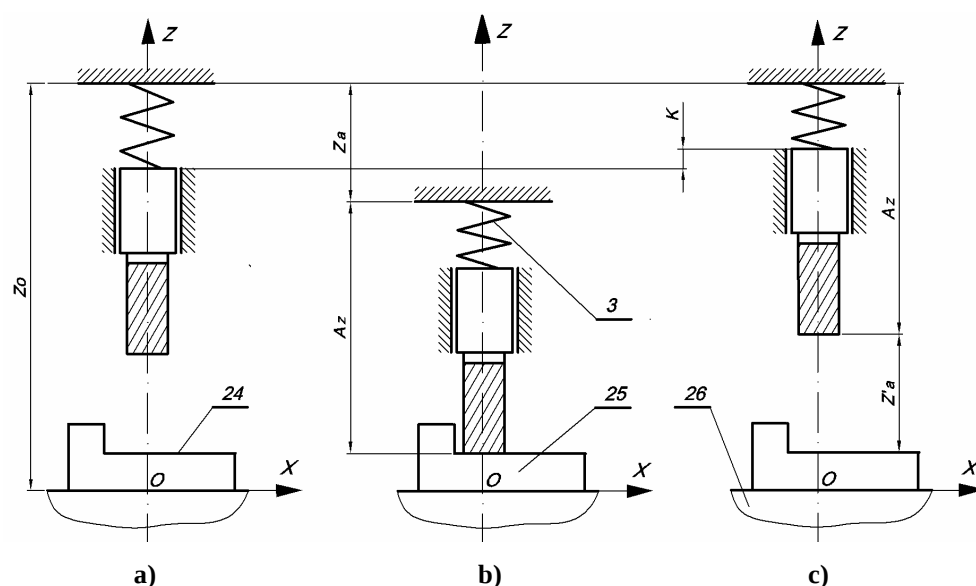
Niezbędną siłę zaciskania narzędzia zapewnia odpowiednia grubość pierścienia 7. Wypadanie narzędzia skrawającego w stanie niezaciśniętym uniemożliwia śruba oporowa 10, ograniczająca skok sworznia zamykającego 6.



Rys. 5.16. Oprawka do mocowania narzędzi trzpieniowych

W czasie nastawiania wysunięcia, narzędzie skrawające przemieszcza się do płaszczyzny bazy „pływającej” 24 części obrabianej 25, ustawionej na stole 26 obrabiarki NC (rys. 5.17).

Schemat nastawienia wysunięcia narzędzia skrawającego przedstawiony jest na rys. 5.17.



Rys. 5.17. Schemat nastawienia wysunięcia narzędzia skrawającego względem wysunięcia A_z

gdzie: Z_0 - odległość powierzchni czołowej wrzeciona od płaszczyzny stołu w położeniu wyjściowym („0” obrabiarki względem osi Z);

A_z - wymiar wzdłuż osi wrzeciona, nastawiony względem bazy „pływającej” 24 (wysunięcia narzędzia) do powierzchni czołowej wrzeciona;

Z_a - wartość przemieszczenia wrzeciona z narzędziem po nastawieniu wysunięcia narzędzia;

K - wartość ściśnięcia sprężyny 4 przy zapewnieniu kontaktu gwarantowanego wysunięcia ostrza narzędzia skrawającego z pływającą bazą pomiarową;

Z'_a - odległość między ostrzem zamocowanego narzędzia skrawającego i bazą „pływającą” w wyjściowym położeniu wrzeciona („0” obrabiarki), przy tym $Z_a = Z'_a$

Urządzenie działa w następujący sposób.

Przed obróbką części, po zmianie narzędzia, wrzeciono znajduje się w położeniu wyjściowym (rys. 5.17a). Na skutek działania ciśnienia w układzie hydraulicznym, sworzeń zamykający 6 (rys. 5.16) przemieszcza się w lewo do śruby oporowej 10, ściskając sprężynę talerzową 11, przy tym narzędzie skrawające znajduje się w położeniu niezaciśniętym. Zatem, zgodnie z programem sterującym, wrzeciono 2 z narzędziem przemieszcza się do bazy „pływającej” 24 części obrabianej 25, ustawionej na stole przyrządu 26, ściskając sprężynę 3

o wartość K do powstania kontaktu gwarantowanego ostrza narzędzia skrawającego z bazą pływającą części (rys. 5.17), po czym na podstawie sygnału programu sterującego następuje zaciśnięcie narzędzia, a ciśnienie w układzie hydraulicznym spada na skutek zadziałania zaworu 19 (rys. 5.16).

Pod wpływem oddziaływania sprężyny talerzowej 11, sworzeń zamykający 6 przemieszcza się w prawo, mocując narzędzie skrawające (rys. 5.16). W tym położeniu następuje automatyczne nastawienie narzędzia względem bazy „pływającej”. Zatem wrzeczono, zgodnie z programem sterującym, przesuwają się w położenie wyjściowe („0”) albo do strefy obróbki części.

Nastawienie automatyczne wysunięcia narzędzia względem bazy „pływającej” umożliwia rozszerzenie możliwości technologicznych obrabiarki NC, w wyniku zmniejszenia ilości operacji (ustawień części, niezbędnych do przeniesienia bazy) oraz daje możliwość realizacji niektórych operacji na obrabiarkach NC, wykonywanych wcześniej metodą próbnych przejść na obrabiarkach konwencjonalnych.

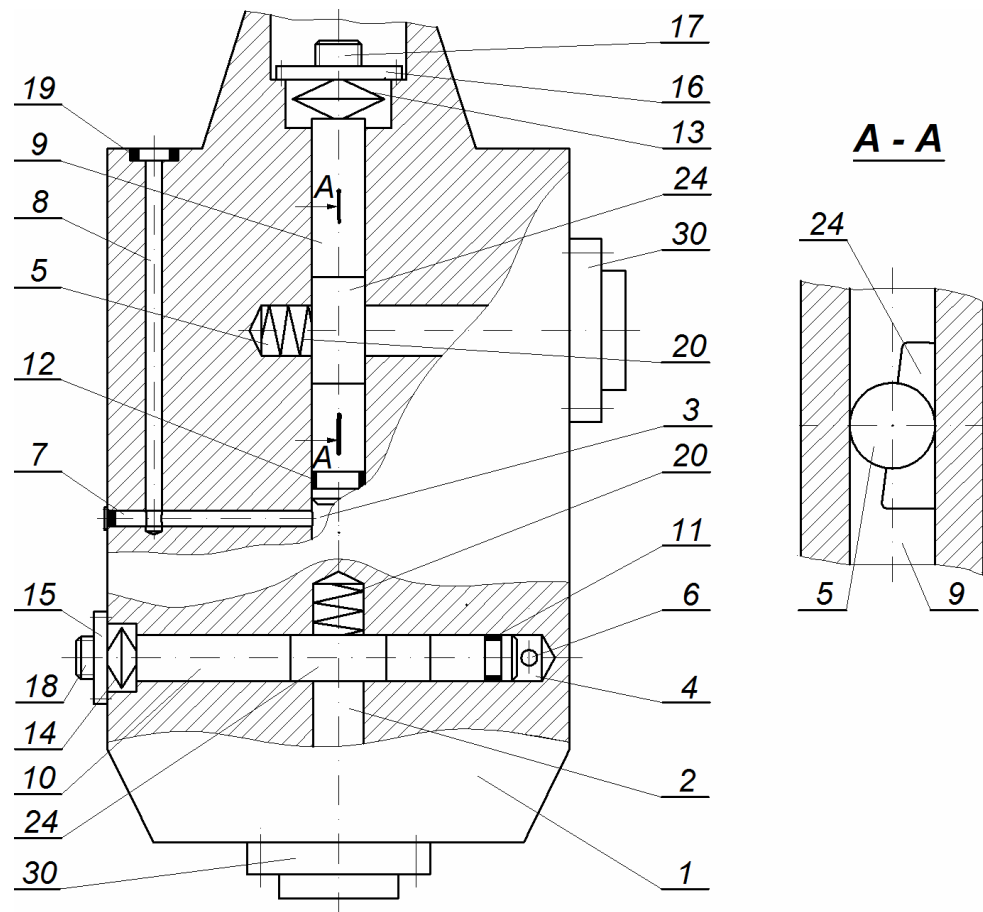
5.3.4. Przyrząd do zautomatyzowanego mocowania narzędzi obrotowych z regulacją ich wysunięcia

Przyrząd ten może być zastosowany na obrabiarkach wielozadaniowych NC oraz innych do zautomatyzowanego mocowania narzędzi z automatyczną regulacją ich wylotu względem bazy pomiarowej „pływającej”, a także do zautomatyzowanego mocowania elementów ustalających w przyrządzie mocującym część obrabianą.

Zasadę działania przyrządu przedstawiono w oparciu o rys. 5.18; rys. 5.19; rys. 5.20; rys. 5.21; rys. 5.22; rys. 5.23; rys. 5.24 i rys. 5.25.

Przyrząd (rys. 5.18) składa się z korpusu 1, którego trzpień jest mocowany we wrzecionie obrabiarki. W korpusie wykonane są dwa wzdłużne otwory nieprzelotowe 2 i 3 oraz dwa poprzeczne otwory 4 i 5, przecinające się ze wzdłużnymi.

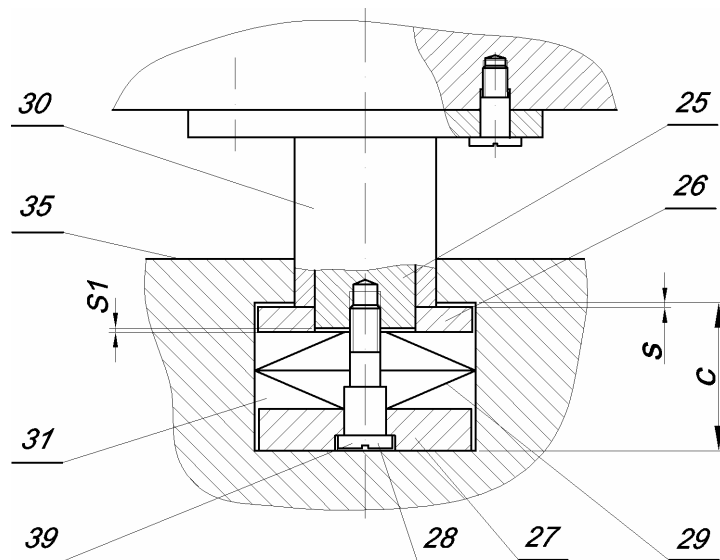
Kanały 6, 7 i 8 zostały wykonane w celu wytworzenia ciśnienia hydraulicznego w gniazdach, utworzonych na końcach otworów 3 i 4 i ustalonymi w tych otworach nurnikami 9 i 10.



Rys. 5.18. Przyrząd i przekrój w płaszczyźnie A-A

Z jednej strony nurników 9 i 10 znajdują się uszczelnienia 11 i 12, a z drugiej - sprężyny talerzowe 13 i 14, podkładki 15 i 16 oraz śruby 17 i 18 do regulacji siły nacisku sprężyn talerzowych. Uszczelnienie 19 uniemożliwia wyciek oleju po połączeniu korpusu 1 z wrzecionem. W otworach: wzdłużnym 2 i poprzecznym 5 znajdują się sprężyny 20, współdziałające z powierzchniami czołowymi narzędzi 21, 22 (rys. 5.21) lub z elementami ustalającymi, których ścięcia 23 (rys. 5.21) współpracują ze skosami 24, wykonanymi na nurnikach (rys. 5.18).

Element ustalający i jego przekrój wzdłużny przedstawiono na rys. 5.19. Posiada on trzpień 25, identyczny jak trzpień narzędzia. Na nim ustalona jest podkładka 26 i kołnierz 27, między którymi, przy pomocy śruby 28, umieszczone są sprężyny talerzowe 29. Na korpusie, współosiowo z otworami 2 i 5 (rys. 5.18), zamocowane są tuleje oporowe 30.



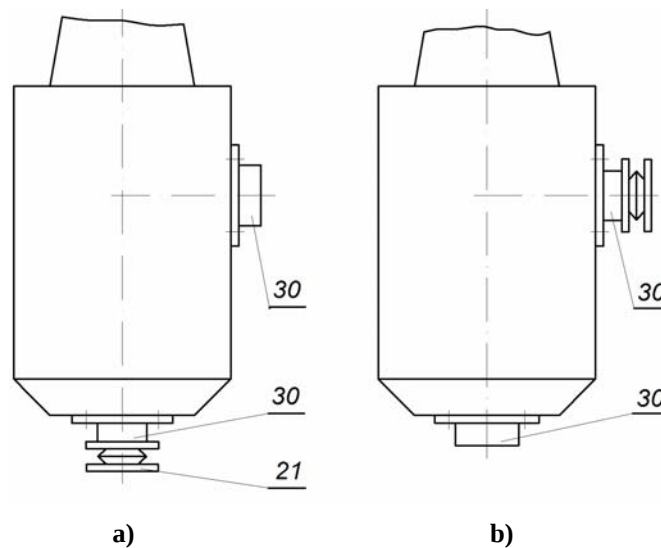
Rys. 5.19. Element ustalający i jego przekrój wzdłużny.

Elementy ustalające (rys. 5.19 - 5.25) są ustawione w rowku teowym 31 (rys. 5.19) stołu obrabiarki lub palety 32 (rys. 5.22), ewentualnie przyrządu 33 typu pryzma wielościanowa (rys. 5.23), za pomocą wrzeciona 34 (rys. 5.22). Przy tym, do ustawienia elementów ustalających w rowku teowym stołu lub przyrządu, podstawą jest powierzchnia bazowa 35 (rys. 5.22), równoległa do osi wrzeciona, a do zamocowania oprawki prostopadle do osi wrzeciona, służy otwór 5 (rys. 5.18) w korpusie przyrządu. Do zamocowania narzędzia skrawającego 22 i ustawienia elementów ustalających na stole lub w przyrządzie, podstawą jest powierzchnia bazowa 36 (rys. 5.23), prostopadła do osi wrzeciona, wykorzystany jest otwór 2 w korpusie przyrządu (rys. 5.18).

Przyrząd mocujący (rys. 5.18) działa w następujący sposób.

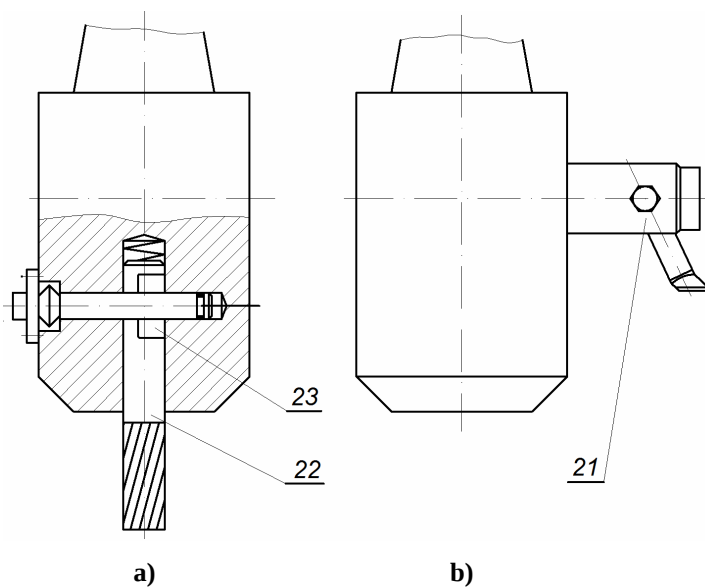
W stanie wyjściowym w otworach 2 i 5 nie ma elementów ustalających. Na skutek działania ciśnienia w układzie hydraulicznym, nurnik 9 przesuwa się w stronę wrzeciona, ściskając sprężyny talerzowe 13, przy tym trzpień 25 (rys. 5.19) elementu ustalającego jest wprowadzony ruchem wrzeciona w otwór 5. Przy dalszym przesuwaniu wrzeciona wzdłuż osi elementu ustalającego, tuleja oporowa 30 naciska na krążek oporowy 26, ściskając pakiet sprężyn talerzowych 29 o wielkość S_1 (rys. 5.19). Po tym, jak pomiędzy krążkiem 26 i górną płaszczyzną rowka teowego 31 utworzy się odpowiedni luz S , podawane jest polecenie zaciskania trzpienia 25 (rys. 5.19) elementu ustalającego, spada ciśnienie w układzie hydraulicznym i w wyniku oddziaływania sprężyn talerzowych 13 (rys. 5.18), nurnik 9 przesuwa się w stronę komory w otworze 3, zamocowując element ustalający w przyrządzie.

Przyrząd z zamocowanym w nim elementem ustalającym przedstawiony jest na rys. 5.20.



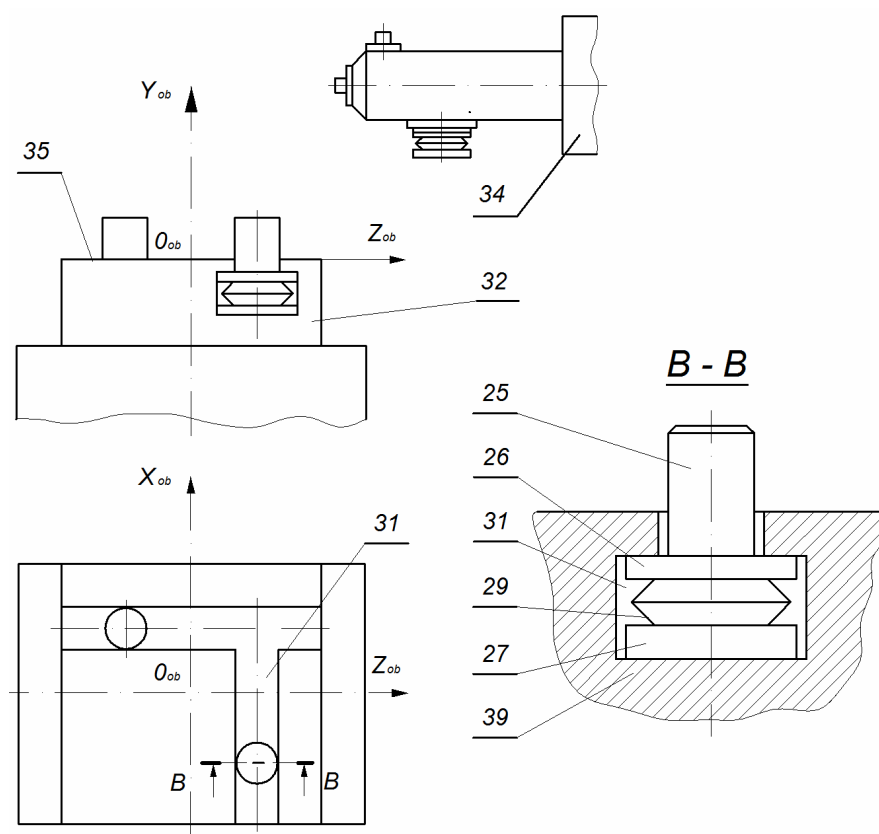
Rys. 5.20. Przyrząd z zamocowanym elementem ustalającym:
a) równoległym do osi korpusu przyrządu,
b) prostopadłym do osi korpusu

Przyrząd z zamocowywanym w nim frezem palcowym pokazano na rys. 5.21.



Rys. 5.21. Przyrząd z zamocowanymi narzędziami
a) z zamocowywanym w nim frezem palcowym,
b) przyrząd z zamocowywaną w nim oprawką do wytaczania

Schemat ustawienia elementów ustalających na płycie albo palecie przedstawiono na rys. 5.22.

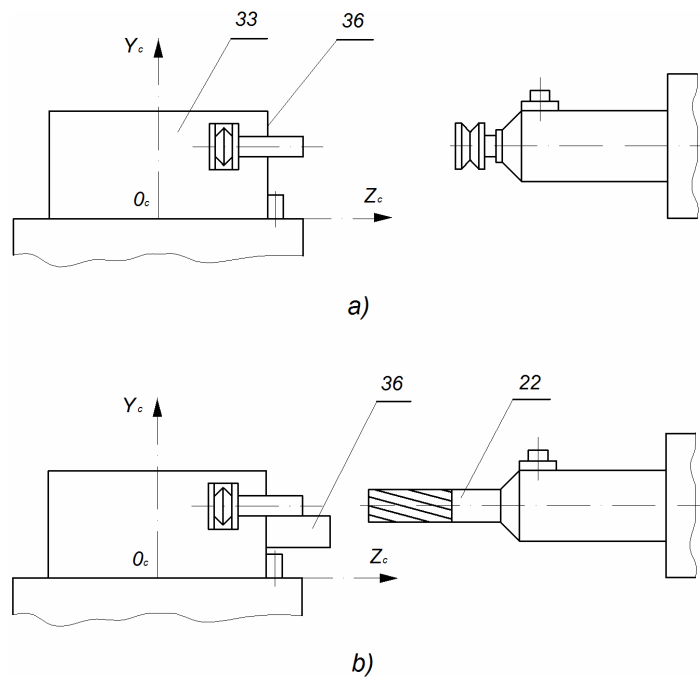


Rys. 5.22. Schemat ustawienia elementów ustalających na płycie albo palecie
a) podstawowa płaszczyzna ustalająca, równoległa do osi wrzeciona,
b) element ustalający, ustawiony w rowku teowym przyrządu (palety)

Pewność zamocowania zapewnia skos 24 i odpowiednie ścięcie na elemencie ustalającym (rys. 5.18). Zatem, zgodnie z programem, wrzeciono przenosi element ustalający wzdłuż rowka teowego 31 (rys. 5.22) i przemieszcza w zadane w programie położenie względem obrabiarkowego układu współrzędnych $X_{ob} O_{ob} Z_{ob}$ (rys. 5.22).

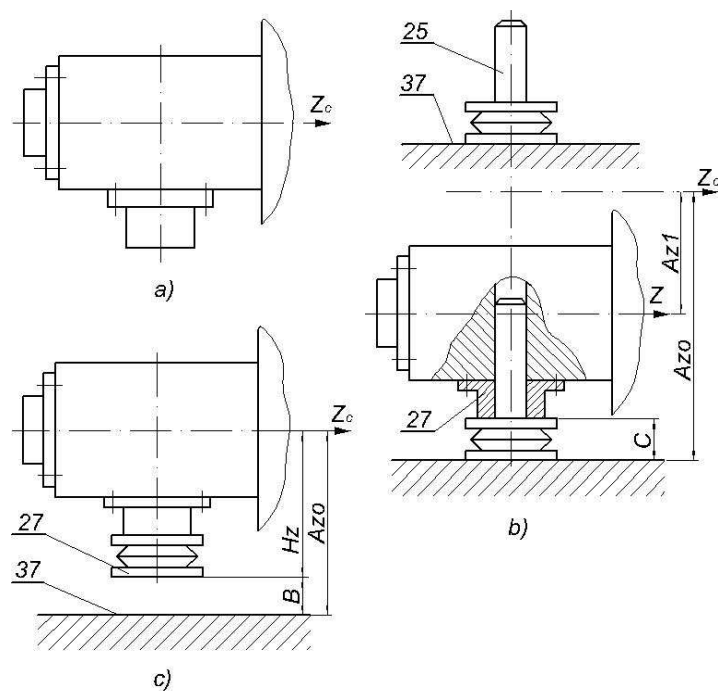
Podawany jest olej do układu hydraulicznego urządzenia, przy tym nurnik 9 odsuwa się od trzpienia elementu ustalającego i zwolniony od działania pakietu 29 sprężyn talerzowych, zamocowuje się w rowku teowym palety albo przyrządu (rys. 5.19 i rys. 5.22).

Schemat ustawienia elementów ustalających na urządzeniu typu pryzma wielostronna pokazano na rys. 5.23.



Rys. 5.23. Schemat ustawienia elementów ustalających na urządzeniu typu pryzma wielościanna
a) podstawowa płaszczyzna jest prostopadła do osi wrzeciona,
b) schemat obróbki części

Schemat wzajemnego położenia wyjściowego przyrządu względem elementu ustalającego pokazano na rys. 5.24.



Rys. 5.24. Położenie elementu ustalającego w przyrządzie
a) schemat położenia wyjściowego elementu ustalającego względem przyrządu,
b) schemat położenia elementu ustalającego w przyrządzie,
c) schemat w procesie przemieszczenia elementu ustalającego z jednej pozycji w inną

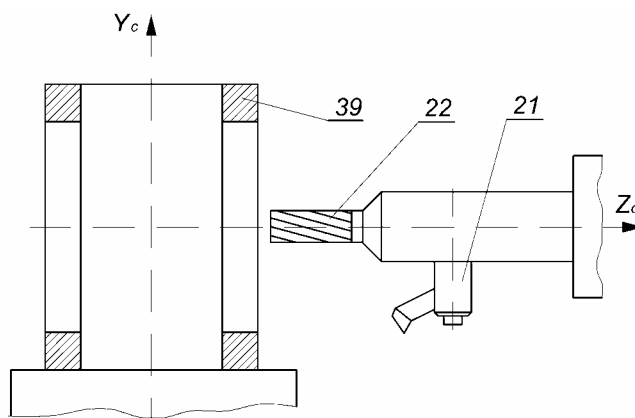
Zgodnie z programem sterującym, wrzeciono z przyrządem przesuwają się w kierunku prostopadłym do płaszczyzny ustalającej 35 (rys. 5.19), odchodząc od elementu ustalającego. Przy tym powinien być zachowany następujący warunek: $H_z = A_{z0} - B$ (rys. 5.24), gdzie A_{z0} - odległość osi wrzeciona od płaszczyzny dna rowka teowego w stanie wyjściowym, A_{z1} jest wielkością zaprogramowanego przemieszczenia wrzeciona z przyrządem przy ściśniętych sprężynach talerzowych elementu ustalającego, B - odległość między kołnierzem 27 elementu ustalającego i dnem rowka teowego przy powrocie wrzeciona w stan wyjściowy z zamocowanym elementem ustalającym.

Po zorientowaniu elementów ustalających w układzie współrzędnych obrabiarki $Y_{ob}O_{ob}Z_{ob}$, $X_{ob}O_{ob}Z_{ob}$ (rys. 5.22) i ich zamocowaniu w rowkach teowych, służą one do zamocowania półwyrobu 38 albo 39, który następnie obrabiany jest narzędziem 21 lub 22 według zadanego programu (rys. 5.21, rys. 5.23).

Analogicznie nastawiane są inne elementy ustalające (rys. 5.22, rys. 5.23), przy tym, w czasie nastawienia elementów ustalających, których oś jest równoległa do osi wrzeciona, używana jest inna para wzajemnie prostopadłych otworów 2 i 4 korpusu 1 (rys. 5.18). W tym przypadku część obrabiana ustawiana jest na podstawowej płaszczyźnie ustalającej 36, prostopadłej do osi wrzeciona (rys. 5.23).

Tuleje oporowe 30, po przebrojeniu przyrządu, w razie konieczności mogą być zdjęte z korpusu 1 (rys. 5.18), który można używać do automatycznego zamocowania i odmocowania narzędzia skrawającego 22, na przykład freza z trzpieniem walcowym z oprawki 21 (rys. 5.21). Mocowanie narzędzia skrawającego realizowane jest analogicznie do mocowania elementu ustalającego.

Przykład obróbki części (półwyrobu) 39 - frezowanie otworu frezem 22 i wytaczanie wytaczakiem, zamocowanym w oprawce 21 pokazano na rys. 5.25.



Rys. 5.25. Obróbka części (frezowanie i wytaczanie)

5.3.5. Zautomatyzowana zmiana narzędzi na obrabiarce wielozadaniowej NC

Rozwiązanie to dotyczy obróbki ubytkowej na wielozadaniowych obrabiarkach NC. Jego celem jest podwyższenie niezawodności urządzenia do automatycznej zmiany narzędzi.

Analizę proponowanego rozwiązania wykonano porównując go z urządzeniem bazowym. W proponowanym rozwiązaniu magazyn narzędziowy zbudowany jest z bloków, z których każdy, w zależności od konkretnych warunków, może składać się z jednego albo kilku gniazd, natomiast w rozwiązaniu bazowym jest nieprzezbrajany i nierozbieralny.

Oprócz tego, w technicznych rozwiązaniach urządzenia bazowego do zmiany frezów z trzpieniem stożkowym, przenoszących moment obrotowy przez wpusty, stosowany jest mechanizm orientacji wrzeciona i oprawek, znajdujących się w gniazdach magazynu narzędziowego, w celu zabezpieczenia zgodności położenia wpustów na powierzchni czołowej trzpienia z położeniem odpowiednich wpustów na wieńcu oprawki. W urządzeniu bazowym, do realizacji tej funkcji stosowany jest specjalny napęd elektromechaniczny magazynu narzędziowego, przeznaczony do obrotu i orientacji równocześnie wszystkich oprawek, znajdujących się w magazynie narzędziowym i napęd pneumatyczny do ustalenia wrzeciona z oprawką, znajdującą się w gnieździe wrzeciona.

Zmiana każdego narzędzia w proponowanym rozwiązaniu odbywa się bez wykorzystania mechanizmu do orientacji wrzeciona i oprawek.

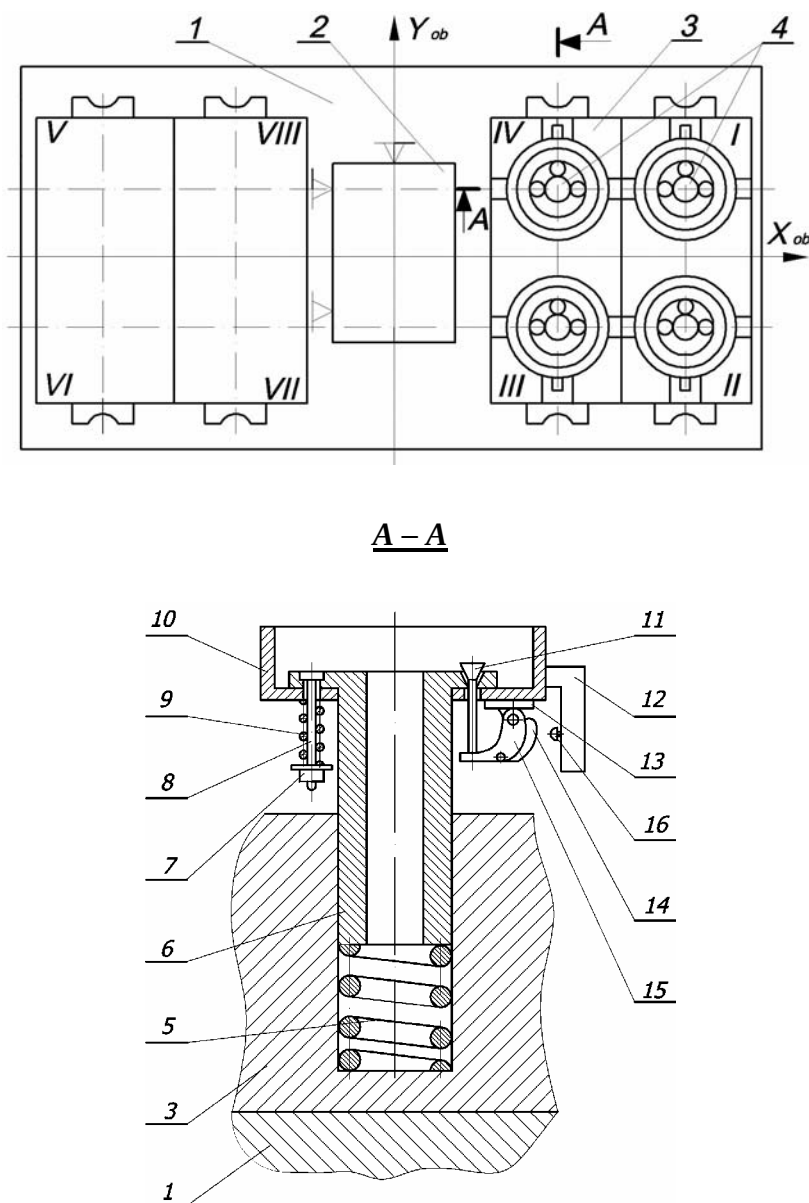
W porównaniu z urządzeniem bazowym, istotną różnicą jest ustawienie w każdym gnieździe magazynu narzędziowego uproszczonego bloku kontrolnego, spełniającego podwójną funkcję: ustalenie (zamocowanie) oprawki narzędziowej w gnieździe magazynu i zazębienie oprawki narzędziowej z pryzmatycznymi wpustami wrzeciona. We wrzecionie urządzenia bazowego nie jest stosowana kontrola obecności oprawki. Zmiana narzędzia jest realizowana przy określonych położeniach wrzeciona i oprawek, ustawianych mechanizmami orientacji, przy tym aby było możliwe uruchomienie urządzenia do wymiany narzędzia we wrzecionie powinna znajdować się oprawka narzędziowa. Ręczne ustawienie pierwszego narzędzia zmniejsza poziom automatyzacji obrabiarki NC.

W proponowanym urządzeniu proces wymiany narzędzi i załadowania magazynu narzędziowego może być całkowicie zautomatyzowany, na przykład przy pomocy robota, ponieważ oprawki narzędziowe mogą znajdować się w magazynie, zgodnie z kątem zmiany położenia wrzeciona.

Magazyn narzędziowy, ustawiony na stole obrabiarki NC przedstawiono na rys. 5.26.

Obrabiarka NC z automatyczną zmianą narzędzi działa w następujący sposób.

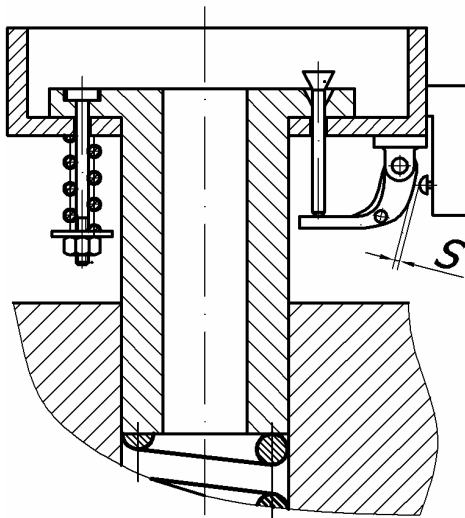
Na stole 1 obrabiarki NC z uwzględnieniem nastawienia, zamocowania i obróbki części 2 albo grupy części, w wolnej strefie znajduje się niezbędna ilość bloków 3 magazynu narzędziowego, mających jedno albo więcej gniazd narzędziowych 4 (rys. 5.26). Kiedy oprawka nie znajduje się w gnieździe, dźwignia 14, obracając się dookoła osi, oddziałuje na popychacz 11, który podnosi się powyżej płaszczyzny czołowej gniazda, w którym znajduje się tuleja 6 ze sprężyną. Między główką wyłącznika 16 i dźwignią 14 występuje luz „S” (rys. 5.26 przekrój A – A i rys. 5.27. poz. 1).



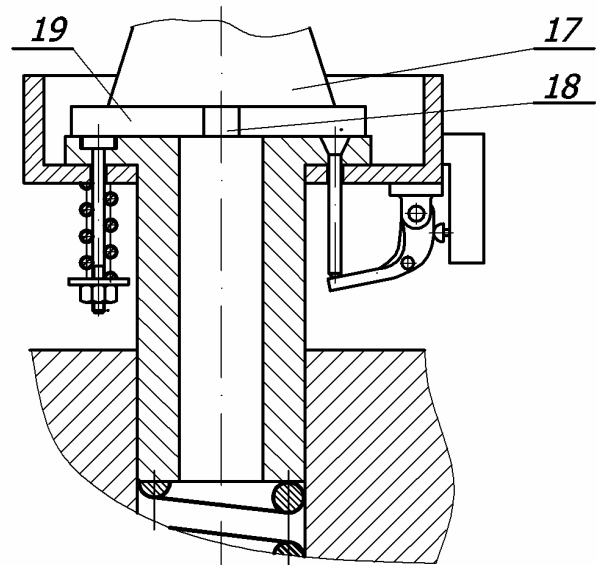
Rys. 5.26. Magazyn narzędziowy

1 - stół obrabiarki, 2 - część obrabiana, 3 - magazyn, 4 - gniazda narzędziowe, 5 - sprężyna, 6 - tuleja, 7 - nakrętka, 8 - ściąg, 9 - sprężyna, 10 - obudowa, 11 - popychacz, 12 - mikroprzełącznik, 13 - wspornik dźwigni, 14 - sprężyna, 15 - dźwignia, 16 - wyłącznik, $X_{ob}O_{ob}Y_{ob}$ - układ współrzędnych obrabiarki, I ÷ VIII - numery pozycji magazynu narzędziowego.

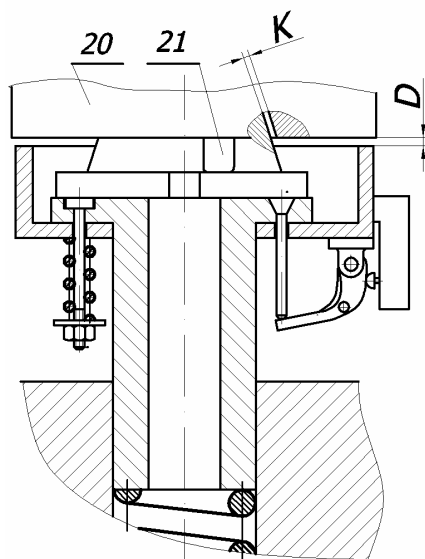
POZYCJA 1



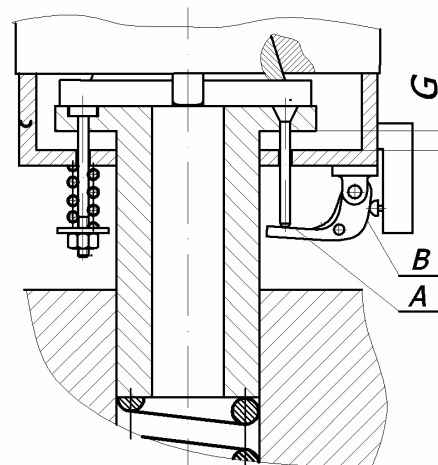
POZYCJA 2



POZYCJA 3



POZYCJA 4



Rys. 5.27. Pozycje magazynu narzędziowego

- 17 - oprawka narzędziowa,
- 18 - wpust,
- 19 - wieniec oprawki,
- 20 - wrzeciono obrabiarki CNC,
- 21 - wpust pryzmowy,
- K - luz między stożkiem wrzeciona i stożkiem oprawki,
- S - luz między główką wyłącznika 16 (rys. 5.26) i dźwigni 14 (rys. 5.26),
- A - pierwsza strefa robocza dźwigni,
- D - luz między nieobrotową częścią wrzeciona i powierzchnią czołową kołnierza obudowy 10,
- G - luz między kołnierzem tulei 6 (rys. 5.26) i wewnętrzną powierzchnią czołową obudowy 10 (rys. 5.26),
- B - druga strefa robocza dźwigni.

W gnieździe 4 są ustawiane ręcznie albo przy pomocy robota oprawki narzędziowe 17 (rys. 5.27), zgodnie z programem sterującym i szkicem przebrojenia, przy tym popychacz 11 pod działaniem wieńca 19 oprawki 17 przemieszcza się, naciskając na dźwignię 14, która z kolei naciska swoją strefą roboczą „A” na wyłącznik 16 mikroprzełącznika 12, ustalając położenie oprawki narzędziowej w gnieździe magazynu (rys. 5.26 przekrój A-A i rys. 5.27. poz. 2).

Wrzeciono (rys. 5.27) przemieszcza się zgodnie z programem do bloku narzędziowego, umieszczonego z lewej albo prawej strony od punktu zerowego obrabiarki O_{ob} zgodnie z kątem zmiany położenia w pozycję tego narzędzia, które według programu powinno pracować współosiowo. Dalej, przemieszczając się wzdłuż osi Z, wrzeciono 20 swoimi wpustami pryzmowymi 21 naciska na wieniec 19 oprawki 17, która naciska na tuleję 6, ściskając sprężynę 5 (rys. 5.26 przekrój A-A i rys. 5.27. poz. 3).

Po ściśnięciu sprężyny, ustaje przemieszczenie wzdłuż osi i okresowo włącza się i wyłącza „ruch wrzeciona” o określonym czasie cyklu.

Przy krótkotrwałym włączaniu „ruchu wrzeciona” i na skutek działania siły ściśniętej sprężyny 5, wpusty 21 trafiają w odpowiednie kanały 18, rozmieszczone na wieńcu 19 oprawki 17, przy tym tuleja 6 z oprawką 17 przesuwają się w stronę wrzeciona, zachowując luz „K” między stożkiem oprawki i stożkiem wrzeciona 21.

W czasie przemieszczenia tulei 6 razem z nią przesuwają się, do oparcia o kołnierz nieruchomej części wrzeciona, obudowa 10 (rys. 5.26 i rys. 5.27. poz. 4).

W ostatniej fazie tego przemieszczenia obudowa 10 zaczyna ściskać sprężyny 9, znajdujące się na ściągu 8, przy tym utworzy się luz „G”.

Popychacz 11, opierając się o kołnierz tulei 6, także przesuwają się w kierunku wrzeciona, a dźwignia 14 na skutek działania ściśniętej sprężyny 5 obróci się do oparcia o popychacz 11.

W czasie obrotu dźwignia naciska swoją drugą strefą roboczą „B” na wyłącznik 16, a mikroprzełącznik ustala moment zamocowania oprawki 17 na wrzecionie 20 (rys. 5.26 przekrój A – A, rys. 5.27. poz. 4). Siła ściskania sprężyny 5 powinna być większa od siły ściskania sprężyny 9. Automatyczny układ sterowania elektrycznego obrabiarki zaprzestaje włączania „ruchu wrzeciona” i wykonuje polecenie „zaciskanie narzędzia”, a oprawka 17 narzędzia jest mocowana we wrzecionie obrabiarki. Wrzeciono 20 według programu jest przemieszczane z oprawką narzędzia ze strefy magazynu narzędziowego do strefy obróbki części 2, zamocowanej na stole 1 obrabiarki z przyrządem uniwersalnym (rys. 5.26).

Po obróbce części 1 wrzeciono 20 zatrzymuje się i według programu przemieszcza się wraz z oprawką do odpowiedniego pustego gniazda magazynka w tuleję 6. Wykonywane jest polecenie „odmocowanie narzędzia”.

Oprawka 17 jest uwalniana z wrzeciona. Wrzeciono przesuwa się zgodnie z programem w kierunku „+Z” w celu uchwycenia następnego narzędzia. Cykl wymiany narzędzia powtarza się.

Przykład realizacji automatycznej wymiany narzędzi przy pomocy wrzeciona przedstawiono w tab. 5.1.

Tab. 5.1. Automatyczna wymiana narzędzi

L.P.	OPIS ELEMENTÓW CYKLU ROBOCZEGO	SPOSÓB REALIZACJI
ZAMOCOWANIE NARZĘDZIA		
1	Ruch wrzeciona do O_{ob}	Działanie programu sterującego
2	Ruch wrzeciona do wybranego gniazda magazynu narzędziowego	
3	Przemieszczenie wzdłuż osi wrzeciona w stronę magazynu narzędziowego	
4	Uchwycenie narzędzia	
5	Dobieg wrzeciona	Działanie układu sterowania elektroautomatycznego
6	Zacisk narzędzia	Działanie programu sterującego
7	Wyjście wrzeciona z tulei magazynu narzędziowego	
8	Ruch wrzeciona do strefy obróbki	
ODMOCOWANIE NARZĘDZIA		
1	Ruch wrzeciona do O_{ob}	Działanie programu sterującego
2	Ruch wrzeciona do wolnej pozycji magazynu narzędziowego	
3	Przemieszczenie wzdłuż osi wrzeciona w stronę magazynu narzędziowego	
4	Zwolnienie zacisku narzędzia	
5	Wyjście wrzeciona ze strefy magazynu narzędziowego	
6	Ruch wrzeciona do następnego gniazda magazynu narzędziowego	

W tym przypadku obrabiarka wielozadaniowa NC ma większe możliwości technologiczne, w porównaniu z jednowrzecionowymi obrabiarkami NC, w zakresie automatyzacji zmiany narzędzi, bez konieczności stosowania złożonych mechanizmów i urządzeń (automatycznego systemu sterowania, tradycyjnego magazynu narzędziowego, mechanizmu automatycznej orientacji wrzeciona), można lepiej wykorzystywać strefę roboczą obrabiarki przy obróbce części o niewielkich wymiarach.

5.4. Wnioski

Opracowano otwartą klasyfikację metod zwiększenia efektywności pracy obrabiarek wielozadaniowych w elastycznych systemach produkcyjnych. Można ją rozszerzać w zakresie metod technologicznych i konstrukcyjnych.

Klasyfikacja może być pomocna w typizacji procesów technologicznych części, szczególnie w przypadku części klasy korpus, zastosowanych w przeprowadzonych badaniach.

Opracowano metody technologiczne i konstrukcyjne zwiększenia efektywności pracy obrabiarek wielozadaniowych NC, pracujących autonomicznie oraz w elastycznych systemach produkcyjnych.

Zastosowanie tych metod w rzeczywistych warunkach produkcyjnych potwierdziło, że umożliwiają one:

- zwiększenie dokładności ustawienia części obrabianych,
- zwiększenie dokładności ustawienia narzędzi,
- zmniejszenie czasu ustawienia, mocowania i regulacji narzędzi,
- zmniejszenie czasu ustawienia i mocowania części obrabianych.

6. REALIZACJA METOD TECHNOLOGICZNYCH I KONSTRUKCYJNYCH ZWIĘKSZENIA EFEKTYWNOŚCI PRACY OBRABIAREK WIELOZADANIOWYCH NC W ELASTYCZNYCH SYSTEMACH PRODUKCYJNYCH

Opracowane metody technologiczne i konstrukcyjne zwiększenia efektywności pracy obrabiarek wielozadaniowych NC mogą znaleźć zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu. Przede wszystkim jednak, ich racjonalne wykorzystanie jest uwarunkowane rodzajem wytwarzanych wyrobów [95, 96].

6.1. Dziedziny efektywnego zastosowania metod technologicznych i konstrukcyjnych zwiększenia wydajności obrabiarek wielozadaniowych NC w elastycznych systemach produkcyjnych

Podstawowym obiektem badań było uniwersalne centrum obróbkowe CNC „KORRADI VH 1000”, które wchodzi w skład linii produkcyjnej do obróbki korpusów silników pojazdu Tavria Nova o pojemności 1200 cm³ w Oddziale Spółki Akcyjnej „AvtoZAZ-Motor” w Melitopolu na Ukrainie.

W tej linii pracują również:

- dwa uniwersalne centra obróbkowe CNC CINCINNATI SABRE 100,
- dwuwrzecionowe centrum frezarsko-tokarskie MC 726/MT-2C,
- trzy uniwersalne centra obróbkowe CNC CINCINNATI ARROW 1000,
- trzy uniwersalne centra obróbkowe CNC „KORRADI VH 1000”.

Linia produkcyjna, złożona z obrabiarek wielozadaniowych NC wyprodukowanych głównie w latach dziewięćdziesiątych, posłużyła jako modelowa do badań:

- efektywności pracy obrabiarki wielozadaniowej NC pracującej indywidualnie,
- racjonalnej ilości obrabiarek wielozadaniowych NC, pracujących w składzie elastycznej linii produkcyjnej.

Ta generacja obrabiarek nie jest konstrukcyjnie przygotowana do zautomatyzowanego przezbierania, co umożliwiło wykonanie prób zastosowania, opracowanych w rozdziale 5, metod zwiększania efektywności pracy obrabiarek wielozadaniowych NC.

Na przykład metody technologiczne, opisane w podrozdziałach 5.2.1 i 5.2.2 były z powodzeniem stosowane na centrum obróbkowym CNC „KORRADI VH 1000”.

Metoda przedstawiona w podrozdziale 5.2.1 (nastawienie obrabiarki od programu sterującego) pozwala uzyskać skrócenie czasu przezbrojenia o 12-19 %, w zależności od rodzaju produkcji. Największe różnice czasu przezbrojenia są widoczne przy produkcji małoseryjnej.

W metodzie przedstawionej w podrozdziale 5.2.2 (nastawienie obrabiarki wg zmiennej bazy pomiarowej), wyeliminowano przyrządy do regulacji narzędzi poza obrabiarką, co pozwala na skrócenie czasu przezbrojenia, nawet o 23%.

Natomiast metodę technologiczną, opisaną w podrozdziale 5.2.3 (nastawienie obrabiarki względem bazy „pływającej”), zastosowano z pozytywnym skutkiem na dwuwrzecionowym centrum frezarsko-tokarskim MC 726/MT-2C. Uzyskano znaczne zwiększenie dokładności ustawienia części obrabianych poprzez eliminację błędów ustawienia elementów ustalających.

Metody konstrukcyjne, przedstawione w podrozdziałach 5.3.1 i 5.3.2 (ustawienie części obrabianej względem dolnej i górnej płaszczyzny rowka teowego), dały dobre rezultaty w zakresie dokładności i czasu ustawienia części obrabianej na centrum obróbkowym CNC „KORRADI VH 1000”.

Na tym samym centrum obróbkowym wykonano próby działania metod, opisanych w podrozdziałach 5.3.3 i 5.3.4. Zastosowanie oprawek (rys. 5.16 i rys. 5.18) wyeliminowało niektóre czynności pomocnicze, na przykład: ustawienie narzędzi lub części obrabianych.

Pozwoliło to uzyskać skrócenie czasu przezbrojenia o 24-27%

Natomiast specjalna konstrukcja magazynu narzędziowego (metoda, opisana w podrozdziale 5.3.5), rozszerzyła możliwości technologiczne obrabiarki, dotyczące zautomatyzowanej zmiany narzędzi. Blok kontrolny w każdym gnieździe magazynu narzędziowego ustala i mocuje oprawkę narzędziową we wrzecionie bez dodatkowych czynności, wykonywanych ręcznie. Skraca to czas przezbrojenia dwuwrzecionowego centrum frezarsko-tokarskiego MC 726/MT-2C o 28%.

Wszystkie opracowane metody pozwalają na dostosowanie obrabiarek wielozadaniowych NC starszych generacji do wymogów stawianych obecnie systemom produkcyjnym w zakresie elastyczności, co umożliwia zwiększenie dokładności oraz zmniejszenie kosztów produkowanych wyrobów.

6.2. Wnioski

Największą opłacalność stosowania opracowanych metod technologicznych i konstrukcyjnych osiągnięto przy obróbce części, wymagających wielu operacji, w przypadku których konieczne jest użycie dużej ilości narzędzi skrawających, szczególnie obrotowych.

Przykładem jest obróbka części klasy korpus obejmująca wykonanie:

- płaszczyzn bazowych,
- płaszczyzn bazowych do wykonania otworów,
- otworów.

W/w metody pozwalają wykonać obróbkę korpusów przy minimalnej ilości zmian ustawienia części obrabianej.

Efektem końcowym jest:

- znaczne zwiększenie dokładności obróbki w wyniku zwiększenia dokładności ustawienia narzędzi i części obrabianych (osiągnięto dokładność pozycjonowania obrabiarki),
- znaczne skrócenie czasu przezbrajania obrabiarek (o 28%).

WNIOSKI

1. Zastosowanie przy przeobrażaniu zautomatyzowanym opracowanego modelu matematycznego procesu przeobrażania obrabiarek wielozadaniowych NC w elastycznych systemach produkcyjnych jako systemach obsługi masowej umożliwia:
 - zwiększenie o około 12,7% bezwzględnej przepustowości systemu elastycznego,
 - zmniejszenie o 21,4% ilości przebrojeń i oczekujących na przebrojenie obrabiarek,
 - zmniejszenie o 14,1% czasu pracy ustawiaczy.
2. Ustalono, że przy pogorszeniu parametrów niezawodności linii elastycznej:
 - intensywności strumienia uszkodzeń - λ ,
 - intensywności strumienia przywracania zdolności do pracy - μ ,
 - średniego czasu obsługi jednostki produkcyjnej - t ,zmniejszeniu ulega optymalna liczba obrabiarek; można jednak określić liczbę obrabiarek, w przypadku której przyrost wydajności jest wyższy niż w linii o analogicznych parametrach obsługi i lepszych wskaźnikach niezawodności.
3. W oparciu o opracowaną metodykę można określić liczbę obrabiarek o jednakowych parametrach niezawodności w synchronicznej elastycznej linii produkcyjnej, umożliwiającą uzyskanie najwyższego przyrostu wydajności linii.
4. Opracowana metodologia modelowania niezawodności i wydajności elastycznych linii produkcyjnych, zawierających maszynę technologiczną rezerwową (mogącą zastąpić dowolną obrabiarkę w linii) umożliwia, przy odpowiednim doborze ilości maszyn technologicznych, wyznaczenie ich maksymalnej wydajności $Q_{\max}$, na przykład:
 - $Q_{\max} = 27,90$ szt/h; w przypadku 9 obrabiarek, przy $\lambda = 0,35 \text{ h}^{-1}$, $\mu = 3 \text{ h}^{-1}$, $t = 0,05 \text{ h}$,
 - $Q_{\max} = 27,50$ szt/h; w przypadku 10 obrabiarek, przy $\lambda = 0,30 \text{ h}^{-1}$, $\mu = 3 \text{ h}^{-1}$, $t = 0,05 \text{ h}$,
 - $Q_{\max} = 27,08$ szt/h; w przypadku 12 obrabiarek, przy $\lambda = 0,25 \text{ h}^{-1}$, $\mu = 3 \text{ h}^{-1}$, $t = 0,05 \text{ h}$,oraz
 - $Q_{\max} = 27,10$ szt/h; w przypadku 10 obrabiarek, przy $\mu = 5 \text{ h}^{-1}$, $\lambda = 0,25 \text{ h}^{-1}$, $t = 0,10 \text{ h}$,
 - $Q_{\max} = 26,50$ szt/h; w przypadku 12 obrabiarek, przy $\mu = 4 \text{ h}^{-1}$, $\lambda = 0,25 \text{ h}^{-1}$, $t = 0,10 \text{ h}$,
 - $Q_{\max} = 26,10$ szt/h; w przypadku 14 obrabiarek, przy $\mu = 3 \text{ h}^{-1}$, $\lambda = 0,25 \text{ h}^{-1}$, $t = 0,10 \text{ h}$.

5. Zaproponowany klasyfikator otworów w częściach klasy korpus umożliwia włączanie do niego dowolnie skomplikowanych otworów wielostopniowych, ponieważ teoretycznie jest nieskończoną, położoną poziomo, macierzą. Ułatwia także ich identyfikację, a tym samym stwarza przesłanki do budowy międzygałęziowego banku wiedzy, umożliwia to ograniczenie rodzajów otworów, występujących w korpusach, dróg ich obróbki, a także asortymentu i ilości narzędzi.
6. Opracowano klasyfikację metod zwiększenia efektywności pracy obrabiarek wielozadaniowych w elastycznych systemach produkcyjnych. Wykorzystując istniejący system SMED, rozwinęto go w zakresie metod konstrukcyjnych i technologicznych, mających decydujący wpływ na skrócenie czasów przebrojenia obrabiarek wielozadaniowych, a także na dokładność ustawienia i mocowania narzędzi i części obrabianych.
7. Opracowane rozwiązania technologiczne i konstrukcyjne, umożliwiają skrócenie czasów przygotowawczo-zakończeniowych oraz zwiększenie efektywności pracy i elastyczności obrabiarek wielozadaniowych NC, pracujących autonomicznie, a także w synchronicznych elastycznych liniach produkcyjnych, w wyniku szerokiego wprowadzenia zautomatyzowanego przebrajania tych obrabiarek poprzez zastosowanie:
 - nastawiania obrabiarek (metody technologiczne),
 - przyrządów do ustawiania, mocowania oraz regulacji narzędzi i części obrabianych (metody konstrukcyjne).

Stwierdzono, że metody technologiczne mają mniejszy wpływ na czas przebrojenia, natomiast umożliwiają zwiększenie dokładności ustawienia przyrządów i części obrabianych oraz dokładności nastawienia narzędzi (nawet do poziomu dokładności pozycjonowania obrabiarek).

Zastosowanie metod konstrukcyjnych (oprawki i przyrządy), w przypadku obrabiarek wielozadaniowych NC, umożliwia skrócenie czasu przygotowawczo-zakończeniowego, nawet o 28%.

LITERATURA

- [1] Adamov E.O., Dukarskij S.M.: *Principy postroeniâ integrirovannyh mašinostroitel'nyh sistem èksperimental'nogo proizvodstva* – Vestnik mašinostroeniâ Nr 8, 1987, s. 31-37.
- [2] Albin S.L.: *Approximating a point process to quenes* – Operations Research, Nr 5, 1984, Vol. 32, s. 1133-1162.
- [3] Alekseev P.I., Gerasimov A.G., Davydenko È.P. i dr.: *Gibkie proizvodstvennye sistemy sborki* – Mašinostroenie, Leningradskoe otdelenie, 1989, 349 s.
- [4] Âmpol'skij L.S., Banaszak Z.: *Automatyzacja projektowania i sterowania w elastycznych zautomatyzowanych systemach produkcyjnych* – Warszawa, WNT, 1989, 214 s.
- [5] Âmpol'skij L.S., Polișuk M.N.: *Optimizaciâ tehnologičeskih processov v gibkih proizvodstvennyh sistemah* – Kijev, Tèhnika, 1988, 175 s.
- [6] Andrzejczyk K.: *Wytyczne do przeprowadzenia oceny opłacalności wprowadzenia automatyzacji produkcji z uwzględnieniem kosztów ogólnospołecznych* – Warszawa, WEMA, 1983.
- [7] Arhipenko N.A.: *Opredelenie gibkosti avtomatizirovannyh proizvodstvennyh sistem* – Vestnik mašinostroeniâ Nr 7, 1989, s. 44-46.
- [8] Bajhelt F., Franken P.: *Nadežnost' i tehničeskoe obsluživanie. Matematičeskij podhod* – Perevod s germanskogo, Moskwa, Radio i svâz', 1988, s. 392.
- [9] Balabanov A.N.: *Tehnologičnost' konstrukcij mašin* – Moskwa, Mašinostroenie, 1987, 336 s.
- [10] Banaszak Z., Jampolski L.S.: *Komputerowo wspomagane modelowanie elastycznych systemów produkcyjnych* – Warszawa, WNT, 1991.
- [11] Belanin P.N., V.A. Lešenko. M.: *Gibkie proizvodstvennye komplekсы* – Moskwa, Mašinostroenie, 1984, 105 s.
- [12] Burek J.: *Maszyny technologiczne* – Rzeszów, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 1999.
- [13] Čerpakov B.I.: *Èkspluataciâ avtomatičeskih linij* – Mašinostroenie, 1990, 304 s.
- [14] Choroszy B.: *Technologia maszyn* – Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2000.

- [15] Cichosz P. (red.), Darlewski J., Dopierała A., Grzesik W., Karpiński T., Koch J., Mackiewicz H., Pszczółowski W., Samek A., Stós J., Streubel A., Żebrowski H.: *Nowoczesne narzędzia skrawające i oprzyrządowanie* – Wrocław, Automatyzacja produkcji '97, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1997, s. 213–242.
- [16] Činaev P.I.: *Obšie podhody v analize i sinteze gibkih avtomatizirovannyh proizvodstvennyh sistem* – Vestnik mašinostroeniâ Nr 4, 1985, s. 27-31.
- [17] Čub O. P., Taranenko V.A.: *Interaktivnaâ optimizaciâ tehniko-èkonomičeskikh harakteristik pri sinteze GPS* – Kral'evo (Ŭgoslaviâ), Trudy meždunarodnoj naučno-tehničeskoj konferencii “Heavy machinery”, 1996, s. 36-42.
- [18] Čub O.P., Kopp V.Â.: *Statističeskaâ ocenka parametrov avtomatizirovannyh proizvodstvennyh sistem perenalazivaemogo proizvodstva* – Sevastopol', Sbornik naučnyh trudov, Sevastopolskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet, Vyp. 3, 2000, s. 89-94.
- [19] Čub O.P., Kopp V.Â., Obžerin Ŭ.E.: *Povyšenie proizvoditel'nosti perenalazivaemyh avtomatizirovannyh proizvodstvennyh sistem na osnove optimal'nogo raspredeleniâ resursom* – Sevastopol', Sbornik naučnyh trudov, SIÂÈiP, Vyp.3, 2000, s. 36-44.
- [20] Čub O.P., Kopp V.Â., Obžerin Ŭ.E.: *Minimizaciâ summarnyh vkladyvaemyh sredstv, obespečivaûših zadannyj uroven' proizvoditel'nosti v usloviâh perenalazivaemogo avtomatizirovannogo proizvodstva* – Sevastopol', Vestnik Sev. GTU, Avtomatizaciâ processov i upravlenie, Sevastopolskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet, 2000, s. 148-155.
- [21] Čub O.P., Kopp V.Â., Obžerin Ŭ.E., Taranenko W.A.: *Optymalizacja parametrów zautomatyzowanych systemów przezbrajanych* – Technologia i automatyzacja montażu, Warszawa, OBR "TEKOMA" Nr 4, 2001, s. 13-17.
- [22] Czerwieński Zb. (red.): *Optymalna organizacja złożonych działań zastosowania programowania całkowitoliczbowego* – Warszawa, Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, 1983.
- [23] Diestel R.: *Graph Theory* – Heidelberg, Third Edition. Graduate Texts in Mathematics, Volume 173. Springer-Verlag, 2005.
- [24] Feld M.: *Technologia budowy maszyn* – Warszawa, PWN, 2000.
- [25] Feller V.: *Vvedenie v teoriû veroâtnostej i ee priloženiâ* – Perevod s anglijskogo, Moskva, Mir, 1984, 528 s.
- [26] Feller V.: *Vvedenie v teoriû veroâtnostej i ee priloženiâ* – Perevod s anglijskogo, Moskva, Mir, 1984, 738 s.

- [27] Filipowicz O., Mazurek L., Taranenko W., Świć A.: *Model matematyczny funkcjonowania elastycznej linii produkcyjnej* – Warszawa, Pomiar Automatyka Robotyka, Miesięcznik naukowo – techniczny Nr 2, 2007, 11 s.
- [28] Garfinkel R.S., Nemhauser G.L.: *Programowanie całkowitoliczbowe* – Warszawa, PWN, 1978.
- [29] Gutenbaum J.: *Modelowanie matematyczne systemów* – Warszawa, PAN, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, 2003.
- [30] Hartli Dž.: *GPS v dejstvii* – Perevod s anglijskiego, Moskva, Mašinstroenie, 1987, 328 s.
- [31] Honczarenko J.: *Elastyczna automatyzacja wytwarzania. Obrabiarki i systemy* – Warszawa, WNT, 2000.
- [32] Ivanov A.A.: *Gibkie proizvodstvennye sistemy v priborostroenii* – Moskva, Mašinstroenie, 1988, 304 s.
- [33] Jakubiec W., Malinowski J.: *Metrologia wielkości geometrycznych* – Warszawa, WNT, 2007.
- [34] Kalin O.M., Jampolski S.L., Peskov L.V.: *Modelowanie ESP* – Warszawa, WNT, 1991, 180 s.
- [35] Kolesov I.M., Puzakova T.G.: *Vremennye svâzi i èffektivnost' proizvodstvennogo processa* – Vestnik mašinstroeniâ Nr 7, 1981, s. 42-46.
- [36] Koole G.: *Optimization of Business Processes: An Introduction to Applied Stochastic Modeling* – Vrije Universiteit Amsterdam, Department of Mathematics, 11th, 2006.
- [37] Kopp V., Taranenko V., Świć A., Mazurek L.: *Optimizating parameters of multitask CNC machine tools in flexibel production systems-P.1* – Kragujevac, Proceedings conference on production engineering of Serbia and Montenegro 2006, 19-21 September 2006, Kragujevac, Serbia and Montenegro, 2006, s. 323-328.
- [38] Kopp V., Taranenko V., Świć A., Mazurek L.: *Optimizating parameters of multitask CNC machine tools in flexibel production systems-P.2* – Kragujevac, Proceedings conference on production engineering of Serbia and Montenegro 2006, 19-21 September 2006, Kragujevac, Serbia and Montenegro, 2006, s. 329-332.
- [39] Kopp V.Â.: *Matematičeskaâ model' funkcionirovaniâ mnogopotočnoj gibkoj avtomatizirovannoj linii sborki* – Mehanizaciâ i avtomatizaciâ proizvodstva Nr 1, 1990, s. 31-34.

- [40] Kopp V.Â.: *Iteracionnyj podhod pri postroenii polumarkovskih modelej asinhronnyh avtomatizirovannyh linij* – Vestnik SevGTU, Sbornik naučnyh trudov, Sevastopolskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet, Vyp. 27, 2000, s. 73-80.
- [41] Kopp V.Â.: *Polumarkovskaâ model' gibkoj avtomatizirovannoj linii sborki* – Sevastopol', Sevastopolskij priborostroitelnyj instytut, 1992, s. 10, Dep. v UkrVNITI 25.02.91, Nr 232, Uk 91.
- [42] Kopp V.Â., Čub O.P., Obžerin Ů.E, Karpov M.P.: *Statističeskaâ ocenka parametrov gibkih avtomatizirovannyh sistem v melkoserijnom proizvodstve* – Optimizaciâ proizvodstvennyh processov, Sevasatopol', Sevastopolskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet, Vyp.2, 1999, s. 36-39.
- [43] Kopp V.Â., Čub O.P., Obžerin Ů.E.: *Matematičeskaâ model' ocenki vliâniâ perenaladok i otkazov na proizvoditel'nost' GPS melkoserijnogo proizvodstva* – Sbornik naučnyh trudov, Sevasatopol', Sevastopolskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet, Vyp.1, 1999, s. 39-45.
- [44] Kopp V.Â., Čub O.P., Obžerin Ů.E.: *Modelowanie funkcjonowania hierarchicznie zorganizowanych systemów przezbrajalnej produkcji montażowej* – Technologia i automatyzacja montażu, Warszawa, OBR "TEKOMA" Nr 2, 2000, s. 13-17.
- [45] Kopp V.Â., Čub O.P., Obžerin Ů.E., Šipilov I.Ů.: *Analiz superpozicii slučajnyh processov pri opisanii funkcionirovaniâ različnyh struktur GPS* – Optimizaciâ proizvodstvennyh processov, Sbornik naučnyh trudov, Sevastopolskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet, Vyp.1, 1999, s. 87-91.
- [46] Kopp V.Â., Obžerin Ů.E., Kartashov L. E.: *Parametry niezawodnościowe funkcjonowania synchronicznych jednopopotokowych linii automatycznych* – Technologia i automatyzacja montażu, Warszawa, OBR "TEKOMA" Nr 2, 1997, s. 17-22.
- [47] Kopp V.Â., Rapackij Ů.L., Orel E.V., Volkov S.P.: *Polumarkovskaâ model' avtomatizirovannogo sboročnogo kompleksa* – Sevastopol', Sevastopolskij priborostroitelnyj instytut, 1992, s. 10, Rus., Dep. v UkrVNINTI 03.06.92, Nr 806, UK 92.

- [48] Kopp V.Â., Rapackij Ŭ.L., Šipilov N.Ŭ.: *Matematičeskaâ model' funkcionirovaniâ odnopotočnoj gibkoj avtomatizirovannoj linii sborki s učetom režimov raboty ee elementom. Razrabotka metodov avtomatičeskoj sborki izdelij, soderžaših nežestkie legko deformiruemye èlementy s primeneniem èffekta levitacii na ètapah zagruzki, transportirovaniâ i soprâženiâ* – Sevastopol', Sevastopolskij priborostroitelnyj instytut, Nr GR 0193007233, 1989, s. 95-139.
- [49] Kopp V.Â., Šipilov N.Ŭ.: *Nadežnost' i proizvoditel'nost' avtomatizirovannoj sboročnoj sistemy s vremennym rezervirovanijem* – Sevastopol', Optimizaciâ proizvodstvennyh processov, Alliance Francaise, 1994, s. 12-20.
- [50] Kopp V.Â., Skatkov A.V., Šipilov N.Ŭ., Rapackij Ŭ.L., Kartašov L.E.: *Ocenka proizvoditel'nosti gibkoj avtomatizirovannoj linii sborki s učetom ee nadežnosti* – Sevastopol', Sevastopolskij priborostroitelnyj instytut, 1993, s. 16.
- [51] Kopp V.Â., Skatkov A.V., Šipilov N.Ŭ., Rapackij Ŭ.L., Kartašov L.E.: *Ocenka proizvoditel'nosti gibkoj avtomatizirovannoj linii sborki s učetom ee nadežnosti* – Sevastopol', Sevastopolskij priborostroitelnyj instytut, 1993, s. 16, Rus., Dep. v GNTB Ukrainy 31.03.93, Nr 758 – Uk 93.
- [52] Kopp W.Â., Obžerin Ŭ.E., Kolbasnikov A.G., Karlov A.G., Maszenko E.N.: *Wydažność modułu systemu montažowego z uwzględnieniem jego niezawodności* – Warszawa, OBR "TEKOMA" Nr 2, 1996, s. 7-10.
- [53] Korenderâsev A.I., Salamandra B.L., Tyves L.I.: *Sozdanie avtomatičeskih gibkih proizvodstv* – Stanki i instrumenty Nr 1, 1983, s. 3-5.
- [54] Korn G., Korn T.: *Spravočnik po matematike dlâ naučnyh rabotnikov i inženerov. Opredeleniâ, teoremy, formuly* – Perevod s anglijskogo, Nauka, 1973, 832 s.
- [55] Kosmol J.: *Automatyzacja obrabiarek i obróbki skrawaniem* – Warszawa, WNT, 2000.
- [56] Kosmol J.: *Automatyzacja obrabiarek i obróbki skrawaniem* – Warszawa, WNT, 1995.
- [57] Kotov A.V.: *Zavisimost' gibkosti avtomatizirovannogo proizvodstva ot organizacii processa perenaladok* – Vestnik mašinostroeniâ Nr 10, 1985 r., s. 60-62.
- [58] Krzyżanowski J.: *Wprowadzenie do elastycznych systemów wytwórczych* – Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2005.
- [59] Kulisz H.: *Elastycznie zautomatyzowane obrabiarki i systemy obróbkowe* – Opole, Wydawnictwo Politechniki Opolskiej, 2003.
- [60] Kultyšev Ŭ.I.: *Matematičeskaâ model' processa perenaladki stankov s ČPU v sostave GPS* – Stanki i instrument Nr 1, 1998, s. 11-14.

- [61] Lišinskij L.Ů.: *Strukturnyj i parametričeskij sintez gibkih proizvodstvennyh sistem* – Moskva, Mašinostroenie, 1990, 312 s.
- [62] Mâsnikov V.A., Ignat'ev M.B., Perovskaâ E.I.: *Modeli planirovaniâ i upravleniâ proizvodstvom* – Moskva, Mašinostroenie, 1982, 92 s.
- [63] Mâsnikov V.A., Ignat'ev M.B., Pokrovskij A.M.: *Programmnoe upravlenie oborudovaniem* – Mašinostroenie, Leningradskoe otdelenie, 1984, 95 s.
- [64] Mazurek L., Filipowicz O., Taranenko W., Świć A.: *Model procesu przezbrajania wielozadaniowych obrabiarek CNC w elastycznym systemie produkcyjnym* – Przegląd Mechaniczny Nr 5, 2007, s. 104-106.
- [65] Mazurek L., Świć A., Taranenko V.: *Holes processing and classification in automated technological process projecting system* – Kosice, Acta Mechanica Slovaca, Journal published by Faculty of Mechanical Engineering, the Technical University in Kosice, 2-A, 2006, Rocnik 10, s. 325-330.
- [66] Mazurek L., Taranenko V., A. Świć A.: *Methods of setting the machining tools on a multitask CNC machines* – Kosice, Acta Mechanica Slovaca, Journal published by Faculty of Mechanical Engineering, the Technical University in Kosice, 2-A/2007, Rocnik 10, s. 189-194.
- [67] Mazurek L., Taranenko V., Swic A.: *Metod of setting the CNC machine tools* – Sevastopol', Progressivnye napravleniâ razvitiâ mašino-priborostroitel'nyh otraslej i transporta – Materialy meždunarodnoj naučno-tehničeskoj konferencii studentov, aspirantov i molodyh učenych, 2007, s. 50-52.
- [68] Mazurek L., Taranenko V., Świć A.: *Shortening Re-setting time of multitask NC machine tools* – Sevastopol', Materialy meždunarodnoj naučno-tehničeskoj konferencii studentov, aspirantov i molodyh učenych 15-19 maâ 2006 , s.144-147.
- [69] Mazurek L., Taranenko V., Świć A.: *Device for fastening shank tools* – Avtomatizaciâ: Problemy, Idei, Rešeniâ – Sevastopol', Materialy meždunarodnoj naučno-tehničeskoj konferencii studentov, aspirantov i molodyh učenych, 10-15 sentâbrâ 2007, s. 47-48.
- [70] Mazurek L., Taranenko V., Świć A., Hajduk M.: *Enlargement the efficiency of multitools CNC machines* – Sevastopol', Materialy meždunarodnoj naučno-tehničeskoj konferencii studentov, aspirantov i molodyh učenych, 12-17 sentâbrâ 2006, s. 144-148.
- [71] Mazurek L., Taranenko W., Świć A.: *Analiza podejść do opisu elastyczności przezbrajalnych zautomatyzowanych systemów produkcyjnych* – Przegląd Mechaniczny Nr 12, 2006 / Suplement S., s. 105-109.

- [72] Mazurek L., Taranenko W., Świć A.: *Metody podwyższenia efektywności obrabiarek CNC w ESP* – Warszawa, Pomiary Automatyka Robotyka, Miesięcznik naukowo-techniczny Nr 2, 2008, s. 183-193.
- [73] Mazurek L., Taranenko W., Świć A.: *Elastyczność i wydajność wielozadaniowych obrabiarek CNC* – Opole, Komputerowo zintegrowane zarządzanie. Tom II, Pod redakcją Ryszarda Knosali, Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, 2007, s. 61-66.
- [74] Mazurek L., Taranenko W., Świć A.: *Klasyfikacja metod zwiększania elastyczności i wydajności wielozadaniowych obrabiarek CNC* – Opole, Komputerowo zintegrowane zarządzanie, Tom II, Pod redakcją Ryszarda Knosali, Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, 2008, s. 133-142.
- [75] Meldner B., Darlewski J.: *Narzędzia skrawające w zautomatyzowanej produkcji* – Warszawa, WNT, 1991.
- [76] Mikulczyński T.: *Automatyzacja procesów produkcyjnych* – Warszawa, WNT, 2006.
- [77] Novičihin R.V.: *O gibkosti proizvodstvennyh sistem* – Minsk, BPI, 1983, 20 s.
- [78] Novoselov Ŭ.K., Harčenko A.O.: *Vybor optimal'noj struktury proizvodstvennogo modulâ* – Stanki i instrument Nr 2, 1987, s. 5-7.
- [79] Nys A.: *Ponâtie gibkosti v sovremennyh stanočnyh sistemah* – Stanki i instrument Nr 10, 1984, s. 4-5.
- [80] Oczos K.E.: *Rozwój innowacyjnych technologii ubytkowego kształtowania materiałów* – Cz. I. Obróbka skrawaniem – Mechanik nr 8-9, 2002, s. 537–550.
- [81] Oprzędkiewicz J.: *Podstawy niezawodności obrabiarek i systemów produkcyjnych* – Warszawa, WNT, 1989.
- [82] Orel V.V., Kopp V.Â.: *Povyšenje èffektivnosti gibkogo sboročnogo proizvodstva* – "Znanie", 1991, 23 s.
- [83] Perederij A.Â., Kopp V.Â., Karlov A.G., Rapackij Ŭ.L.: *Modelirovanie avtomatizirovannyh proizvodstvennyh sistem s ispol'zovaniem approksimiruûsich zavisimostej* – Sevastopol', Trudy 3-j Ukrain'skoj konferencii z avtomatičnogo keruvannâ "Avtomatika - 96", Tom 3, 1996, s. 42-43.
- [84] Perros H.: *Computer Simulation Techniques: The definitive introduction!* – Computer Science Department, NC State University Raleigh, NC, 2003.
- [85] Proskurâkov A.V., Kravčenko V.F., Kazak D.S.: *Gibkost' proizvodstvennyh sistem* – Vestnik mašinostroeniâ Nr 7, 1986, s. 63-68.

- [86] Puš V.Ě., Piggert R., Sosonkin V.L.: *Avtomatičeskie stanočnye sistemy* – Mašinostroenie, 1982, 312 s.
- [87] Ricker P.: *Vvedenie v imitacionnoe modelirovanie i âzyk SLAM-2* – Perevod s angijskogo, Mir, 1987, 646 s.
- [88] Satanovskij R.L.: *Organizacionnoe obespečenie gibkosti mašinostroitel'nogo proizvodstva* – Mašinostroenie, 1987, 95 s.
- [89] Sawik T.: *Optymalizacja dyskretna w elastycznych systemach produkcyjnych* – Warszawa, WNT, 1992.
- [90] Sienkiewicz P.: *Teoria efektywności systemów* – Warszawa, PWN, 1987.
- [91] Solomencev Ŭ.M., Kutin A.A., Šeptunov S.A.: *Ocenka gibkosti avtomatizirovannoj stanočnoj systemy* – Vestnik mašinostroeniâ Nr 1, 1984, s. 38-40.
- [92] Šrajber T.Dž.: *Modelirovanie na GPS* – Perevod s angijskogo Garčera V.I., Šmujloviča I.L., red. Fajnberg M.A., Moskva, Mašinostroenie, 1980, 592 s.
- [93] Szron L., Bogucki W., Świć A., Taranenko W.: *Eksploatacja i remont maszyn technologicznych w elastycznych systemach produkcyjnych* – Lublin, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2007.
- [94] Świć A.: *Elastyczne systemy produkcyjne. Technologiczno-organizacyjne aspekty projektowania i eksploatacji* – Lublin, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 1998.
- [95] Świć A.: *Dobór maszyn technologicznych do elastycznego systemu produkcyjnego* – Wrocław, III Krajowa Konferencja Robotyki: prace naukowe Instytutu Cybernetyki Politechniki Wrocławskiej, 1990.
- [96] Świć A.: *Dobór obrabiarek dla elastycznego systemu produkcyjnego do obróbki przedmiotów klasy korpusy* – Lublin, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 1990.
- [97] Świć A.: *Efektywność eksploatacji elastycznych systemów produkcyjnych* – Lublin, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 1984.
- [98] Świć A., Lenik K.: *Analiza ekonomiczna wytwarzania przedmiotów w elastycznym systemie produkcyjnym* – Gliwice, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Automatyka, zeszyt 115, 1994.
- [99] Świć A., Lenik K., Kuszewski K.: *Optymalizacja przezbroyeń elastycznego systemu produkcyjnego przeznaczonego do obróbki przedmiotów klasy korpusy* – Zielona Góra, Komisja Technologii Budowy Maszyn Polskiej Akademii Nauk Oddział w Poznaniu, Wydawnictwo Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Zielonej Górze, 1992.

- [100] Świć A., Lenik K., Zając Sł.: *Analiza ekonomiczna procesu obróbki korpusów w elastycznym systemie produkcyjnym* – Kraków, Kwartalnik Akademii Górniczo-Hutniczej, Tom 15, zeszyt 12, Wydawnictwo AGH, 1996.
- [101] Świć A., Taranenko W.: *Projektowanie technologiczne elastycznych systemów produkcyjnych* – Lublin, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2003.
- [102] Tarnowski W., Bartkiewicz S.: *Modelowanie matematyczne i symulacja komputerowa* – Koszalin, WUPK, 2000.
- [103] Vasilev V.S.: *Principy postroeniâ gibkih proizvodstv* – Stanki i instrument Nr 1, 1984, s. 4-6.
- [104] Vilyčevskij N.O.: *Matematičeskoe modelirovanie transportno-skladskih sistem GPS* – Vestnik mašinostroeniâ Nr 4, 1985, s. 53-56.
- [105] Volčkevič L.I., Gubanov A.V., Dašenko A.I. i dr.: *Avtomatičeskie linii v mašinostroenii* – Spravočnik, t.1. Ètapy proektirovaniâ i rasčet, Moskva, Mašinostroenie, 1984, 312 s.
- [106] Volčkevič L.I., Kovalev M.P., Kuznecov M.M.: *Kompleksnaâ avtomatizaciâ proizvodstva* – Moskva, Mašinostroenie, 1983, 269 s.
- [107] Whitt W.: *Approchimating a point proces by a renewal proces. Two basic metchods* – Operations Research. Nr 1, 1982, Vol. 30, s. 125-147.
- [108] Zawadzka L.: *Współczesne problemy i kierunki rozwoju elastycznych systemów produkcyjnych* – Gdańsk, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2007.
- [109] Zubrzycki J., Taranenko V., Mazurek L.: *Typical structure of automatem projecting holes drilling process* – Novi Sad, Proceeding of the 9th international scientific conference flexible technologies – MMA 2006, s. 133-134.

ZWIĘKSZENIE EFEKTYWNOŚCI PRACY OBRABIAREK WIELOZADANIOWYCH W ELASTYCZNYCH SYSTEMACH PRODUKCYJNYCH

STRESZCZENIE

Istotnym zagadnieniem w przypadku obróbki części klasy korpus jest osiągnięcie możliwie największej efektywności pracy obrabiarek wielozadaniowych NC, pracujących indywidualnie oraz jako elementy składowe systemów produkcyjnych. Na jej zwiększenie zdecydowany wpływ mają: czas przebrojenia obrabiarek, czas ustawiania i regulacji narzędzi i części obrabianych w przypadku obrabiarek pracujących indywidualnie oraz racjonalnie dobrana ich ilość, w przypadku systemów produkcyjnych.

Określono, na podstawie analizy literatury, pojęcia elastyczności i kierunki badań w zakresie zwiększenia efektywności pracy obrabiarek wielozadaniowych NC.

Przedstawiono metodologię i opis matematyczny przeobrażenia tych obrabiarek oraz niezawodności elastycznych linii produkcyjnych, a także opracowano sposób określania racjonalnej ilości obrabiarek, pracujących w składzie tych linii.

Opracowano klasyfikację otworów w częściach maszyn (szczególnie w częściach klasy korpus), a także algorytm ich typizacji i unifikacji.

Przedstawiono opracowaną klasyfikację metod zwiększenia efektywności pracy obrabiarek wielozadaniowych NC w elastycznych systemach produkcyjnych.

W zakresie metod technologicznych opracowano sposoby nastawiania obrabiarek NC:

- od programu sterującego położeniem elementu ustalającego część obrabianą,
- względem bazy pomiarowej zmiennej w układzie współrzędnych obrabiarki,
- względem bazy „pływającej”.

Opracowano także metody konstrukcyjne, umożliwiające:

- ustawianie części obrabianych względem dolnej i górnej płaszczyzny rowka teowego płyty mocującej przyrządu,
- mocowanie narzędzi względem bazy „pływającej” części obrabianych wraz z regulacją ich wysunięcia,
- zautomatyzowaną wymianę narzędzi na obrabiarce wielozadaniowej NC.

Wiarygodność podstawowych wyników pracy potwierdzono w badaniach eksperymentalnych metod technologicznych i konstrukcyjnych zwiększenia efektywności pracy obrabiarek wielozadaniowych NC.

ENHANCING WORK EFFICIENCY OF CNC MULTI-TASK MACHINES IN FLEXIBLE PRODUCTION SYSTEMS

ABSTRACT

Achieving the best efficiency of machining frame-class parts with CNC multi-task machine tools, either operating separately or as a system element, is one of the most important issues. The increase of efficiency is mostly influenced by: reclamping time, tool-setting, tool-regulating and part-setting and part-regulating times for separate machine tools or reasonably moderate number of elements in production systems.

The paper introduces a literature-based term of ‘elasticity’ as well as main directions of research in the area of improving CNC multi-task machine-tools’ efficiency.

The presentation of methodology is conducted along with the presentation of the mathematical model of reclamping these machine-tools and followed by the description of reliability of flexible production lines, which end with designing the method of selecting a rational number of co-operating machine tools within a single assembly line.

These are followed by the classification of holes in machine parts (especially in the frame-class parts) as well as the algorithm of their typification and unification.

Next, the designed work efficiency enhancement of CNC multi-task machine tools’ in flexible production systems classification method is presented.

As for the technological methods the following CNC machine tools settings have been designed:

- on the level of the operating programme fixing the machined piece,
- in relation to the measuring base, variable in the machine tool co-ordinate system,
- in relation to the „floating” base.

The developed construction methods, presented in the paper, allow:

- fixing the machined piece in relation to the upper and lower surface of T-slot of a device fixing surface,
- fixing the tools in relation to the floating point of the machined piece with the regulation of the outlet,
- automated tool exchange in the multi-task CNC machine tool.

The verifiability of the base results has been backed by the experimental research of technological and construction methods of increasing the efficiency of multi-task CNC machine tools.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ МНОГООПЕРАЦИОННЫХ СТАНКОВ В ГИБКИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМАХ

АННОТАЦИЯ

Достижение наибольшей эффективности работы многооперационных станков с ЧПУ, работающих индивидуально или в составе гибких производственных систем, является важной и актуальной задачей современного машиностроения. На повышение эффективности существенное влияние оказывают: время перенастройки станков, время установки и настройки инструментов и обрабатываемых деталей в случае станков, работающих индивидуально, а также рационально выбранное их количество в случае работы в производственных системах.

На основе анализа литературы сформулированы определение гибкости производственной системы и направления исследований в области повышения эффективности работы многооперационных станков с ЧПУ.

В работе представлена методология и разработанные на ее основе математические модели перенастройки многооперационных станков и модели расчета надежности гибких производственных систем, а также способ определения рационального количества станков, работающих в составе таких линий.

Разработана классификация отверстий для деталей типа корпус и алгоритм их типизации и унификации.

Представлена разработанная автором классификация технологических и конструкторских методов повышения эффективности работы многооперационных станков с ЧПУ в гибких производственных системах. В области технологических методов разработаны методы настройки станков с ЧПУ:

- от программы, управляющей положением базирующего элемента при установке обрабатываемой детали,
- относительно изменяющейся измерительной базы в системе координат станка,
- относительно „плавающей” нулевой базы станка.

В области конструкторских методов разработаны следующие:

- установки обрабатываемых деталей относительно верхней и нижней плоскости Т-образного паза приспособления для закрепления детали,
- закрепления инструмента относительно „плавающей” базы обрабатываемой детали с одновременной регулировкой его вылета,
- автоматизированной смены инструментов на многооперационном станке с ЧПУ.

Достоверность основных теоретических результатов работы подтверждается результатами экспериментальных исследований конструкторских и технологических методов повышения эффективности работы многооперационных станков с ЧПУ и результатами численного моделирования надежности работы производственных систем, расчета времени перенастройки станков и способа определения их рационального количества в составе производственной линии.

ZAŁĄCZNIK:

I. Rysunek złożeniowy oprawki do automatycznej regulacji wysunięcia narzędzia