

dr inż. Mariusz Sosnowski
mgr inż. Daniel Grochała
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

O MOŻLIWOŚCI ZAUTOMATYZOWANIA TECHNOLOGII NAGNIATANIA POWIERZCHNI PRZESTRZENNYCH 3D NA CENTRACH OBRÓBKOWYCH

W referacie przedstawiono technologię oraz problemy związane z procesem nagniatania. Zaprezentowano narzędzie oraz zasilacz hydrauliczny wykonany w Instytucie Technologii Mechanicznej. Opisano również koncepcję, będącego w fazie budowy, zautomatyzowanego systemu sterowania i nadzorowania procesu nagniatania powierzchni przestrzennych 3D, polegającą na automatycznym sterowaniu głowicą nagniatającą bez udziału operatora. Przedstawiono także plany budowy i sterowania układu sterująco-nadzorującego, wykorzystującego nowoczesne sterowniki PLC firmy Bernecker & Rainer.

ABOUT POSSIBILITY OF AUTOMATED TECHNOLOGY OF THE PRESSING ON 3D AREA IN THE MACHINING CENTRE

In the paper are introduced the technology and problems which connect with the process of pressing. The tool and the hydraulic power pack made in the Institute of Manufacturing Engineering are presented. They are described also the conception of automated control system (now in the phase of the creating) and supervision of process of the pressing on 3D area, which rely on the automatic control of the pressing head without the participation of the operator. Also are presented the plans of the structure and control of the controlling and supervision arrangement leaning on modern PLC drivers from the Bernecker & Rainer company.

1. WPROWADZENIE

Wykończeniowa obróbka powierzchni przestrzennych złożonych 3D często jest żmudnym i pracochłonnym ręcznym procesem, w którym powtarzalność i odtwarzalność struktury geometrycznej powierzchni formy, matrycy, czy też tłoczniaka we wszystkich fragmentach powierzchni zależy od doświadczenia pracownika. W ostatnich latach zaobserwować można ożywione poszukiwania alternatywnej metody obróbki wykończeniowej skomplikowanych kształtów powierzchni 3D bezpośrednio na obrabiarkach CNC.

Obróbka wykończeniowa musi zagwarantować wymaganą Strukturę Geometryczną Powierzchni (SGP), pożądany stan naprężeń w warstwie wierzchniej, dobrze jest również, gdy będzie można naprawić często spotykane wady powierzchni po obróbce skrawaniem (rysy, ślady drgań narzędzi, graty po obróbcze itp.).

W przypadku obróbki powierzchni obrotowych na tokarkach, technologia ta znalazła już swoje trwałe miejsce w technikach wytwarzania. Jednak w pracach realizowanych na frezarskich centrach obróbkowych metoda ta jest dość rzadko stosowana. W literaturze światowej z roku na rok pojawiają się doniesienia o zastosowaniu praktycznym nagniatania, jednak złożoność tej metody rodzi wiele pytań, na które rzadko kiedy znajdzie się wszystkie odpowiedzi podobnie jest z narzędziami i wykorzystywanym oprzyrządowaniem.

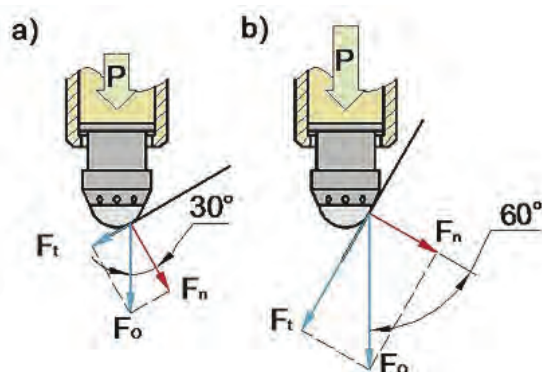
Poniższy artykuł przybliży również możliwość zautomatyzowania procesu nagniatania złożonych przestrzennie powierzchni 3D. Autorzy przedstawiają koncepcję, będącego w fazie budowy, układu sterowania i nadzorowania zautomatyzowanego procesu nagniatania. Koncepcja układu polega na

wprowadzeniu operacji automatycznego sterowania głowicą nagniatającą bez udziału operatora. Jako obiekt do badań posłuży zaprojektowany i zbudowany w Instytucie Technologii Mechanicznej Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie układ narzędzie – zasilacz hydrauliczny. Do sterowania pracą całości wykorzystano nowoczesny programowalny sterownik automatyki.

2. TECHNOLOGIA ORAZ PROBLEMY NAGNIATANIA

W głównej mierze o jakości powierzchni decydować będzie stan SGP otrzymany po frezowaniu, stąd mając na uwadze końcowy efekt łączonej operacji obróbki składającej się z dwóch zabiegów frezowania i nagniatania, należy mieć na uwadze odpowiedni sposób prowadzenia obróbki frezowaniem, tak aby otrzymać efekt synergii na powierzchni gotowego wyrobu. W dalszej części efekt finalny nagniatania zależy od twardości i rodzaju materiału przedmiotu obrabianego, użytej siły nagniatania, kształtu i wielkości elementu nagniatającego oraz odległości pomiędzy kolejnymi śladami po przejściu narzędzia (tzw. posuwem poprzecznym, często nazywany wierszowaniem). Celem uzyskania jednorodnej struktury na powierzchni części, należy utrzymać stałe wartości technologicznych parametrów obróbki. Jest to możliwe jedynie przy zastosowaniu pełnej automatyzacji procesów przemysłowych, a co za tym idzie zastosowania urządzeń sterujących i nadzorujących procesem nagniatania złożonych powierzchni 3D.

Formy wtryskowe, matryce, tłoczniaki w zależności od stopnia ich skomplikowania oraz możliwości technicznych zakładu frezowane są na 3-osiowych frezarkach lub wieloosiowych centrach obróbkowych. Rodzaj dostępnej maszyny determinuje technologię prowadzonej obróbki nagniataniem, a od technologii zależy efekt końcowy. Dla maszyn 3-osiowych sposób prowadzonych prac jest o tyle trudniejszy, że należy wprowadzić dodatkowe sterowanie wartością siły F_o (w osi Z maszyny), tak aby normalna składowa osiowej siły nagniatania F_n miała stałą wartość bez względu na kąt krzywizny α powierzchni obrabianej (rys. 1).



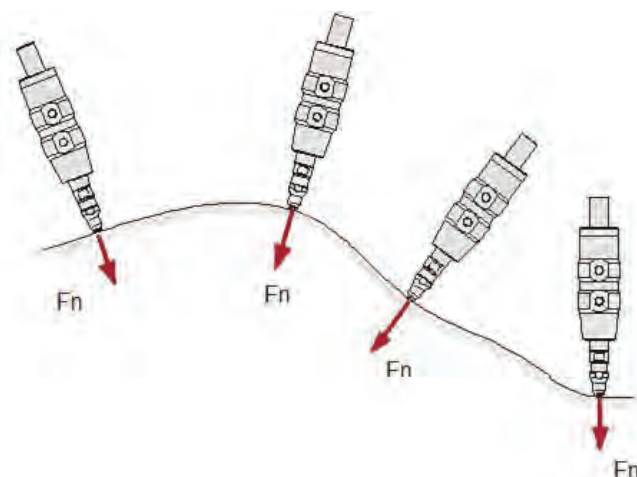
Rys. 1. Zależność efektywnej siły nagniatania F_n od siły osiowej narzędzia F_o i kąta nachylenia powierzchni obrabianej

Jakiegokolwiek odstępstwa od założonej siły nagniatania będą owocowały uzyskaniem odmiennej niż założona SGP, łatwo również przekroczyć żądany stan naprężeń w warstwie wierzchniej. Często negatywny efekt przekroczenia siły podczas obróbki może objawić się łuszczeniem i odpadaniem jej fragmentów dopiero w trakcie eksploatacji części.

Żądaną nastawę bądź korekcję siły nagniatania najłatwiej jest zrealizować za pomocą układów mechanicznych 14, lub hydraulicznych 23. Dlatego dominującą rolę w technologii nagniatania powierzchni przestrzennych złożonych należy przypisać narzędziom z układami sprężystymi oraz hydraulicznymi, gdzie element nagniatający łożyskowany jest w sposób ślizgowy lub hydrostatyczny.

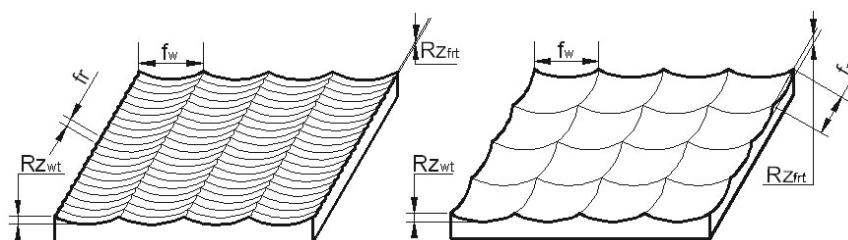
Stosując wieloosiowe centra obróbkowe (np. DECKEL MAHO DMU 60 – maszyna dostępna w ITM ZUT), istnieje możliwość prostopadłego ustawienia narzędzia względem powierzchni przedmiotu obrabianego (rys. 2). W tym przypadku sterowanie wartością siły znacznie się

upraszcza, brak jest konieczności ciągłego nadzoru siły w procesie oraz wprowadzania wcześniej wspomnianych korekt.



Rys. 2. Prostopadle ustawienie narzędzia do powierzchni przedmiotu obrabianego – obrabiarka wieloosiowa

Kolejnym problemem technologicznym procesu nagniatania jest posuw poprzeczny. Posuw poprzeczny jest tym parametrem technologicznym, który w decydującym stopniu determinuje wysokość nierówności powierzchni, zarówno przy frezowaniu f_{wf} jak i podczas nagniatania f_{wn} . Najczęściej do obróbki powierzchni przestrzennych złożonych wykorzystywane są frezy kuliste lub torusowe, w takim przypadku powstaje struktura geometryczna powierzchni schematycznie przedstawiona na rys. 3.



Rys. 3. Struktura powierzchni po frezowaniu narzędziami kulistymi i torusowymi

Teoretyczną wysokość powstałych nierówności w kierunku posuwu można wyrazić za pomocą zależności:

$$R_{z_{frt}} = \frac{f_r^2}{4 \cdot D_{ef}} \quad (1)$$

Podobnie w kierunku prostopadłym:

$$R_{z_{fwt}} = \frac{f_w^2}{4 \cdot d_p} \quad (2)$$

gdzie: f_r – posuw na obrót,
 f_w – posuw poprzeczny (odległość wierszy),
 d_p – średnica płytki.

Pożądaną jest, aby po frezowaniu parametry chropowatości powierzchni mierzone w obu kierunkach były zbliżone do siebie.

$$R_{z_{fwt}} \cong R_{z_{frt}} \quad (3)$$

Chcąc uzyskać powierzchnię o jednorodnej strukturze w każdym z kierunków wymagane jest bardzo gęste wierszowanie, co znacznie wydłuża czas główny obróbki, wpływając na małą wydajność. Narzędzia skrawające mają zwykle z góry ograniczoną maksymalną wartość posuwu na

ostrze, dlatego chcąc zapewnić ekonomicznie uzasadnioną wydajność frezowania należy w praktyce odejść od warunku (3). W praktyce zazwyczaj mamy do czynienia z powierzchniami typu:

$$R_{z, fw} > R_{z, fr} \quad (4)$$

Wcześniej zrealizowane badania [1, 3] potwierdzają, że na tak przygotowanych powierzchniach (4) najlepszy efekt daje nagniatanie w kierunku prostopadłym do śladów wierszowania. W przypadku nagniatania w kilku przejściach warto zastanowić się nad doбором strategii, gdyż odpowiednio prowadzone narzędzie już przy dwóch przejściach może dać efekt porównywalny z obróbką trzema przejściami prostopadłymi.

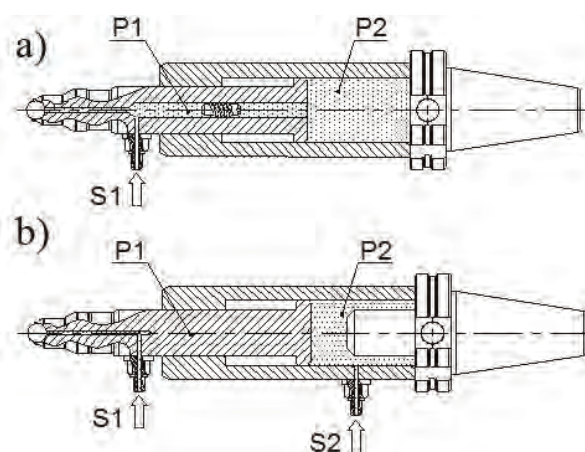
Podczas procesu nagniatania należy pamiętać o średnicy elementu nagniatającego d_k , która jest ściśle powiązana z średnicą freza kulistego lub średnicą płytki freza torusowego. Narzędzie skrawające jest dobrane tak, aby móc obrobić powierzchnię części w narożach, wokół wysp czy też prawidłowo wykonać wybrania. Podobnie jest z narzędziem do nagniatania, regułą powinien być dobór narzędzia o średnicy elementu roboczego identycznej (lub mniejszej) jak narzędzie skrawające.

Średnica elementu nagniatającego będzie z kolei wpływała na wielkość siły użytej w procesie nagniatania. Im większa średnica tym mniejsze naciski na powierzchni przedmiotu obrabianego, zatem mniejsze naprężenia w warstwie wierzchniej. Istnieje ściśle połączona zależność między średnicą elementu nagniatającego a siłą. Im większa średnica tym większych sił należy użyć podczas obróbki celem osiągnięcia zamierzonego efektu SGP.

Z siłą właściwą nagniatania i naprężeniami w warstwie wierzchniej można mówić z chwilą, gdy w jednym przejściu wszystkie wierzchołki profilu zostaną wyrównane, a dna dolin podniesione będą do linii średniej profilu powierzchni.

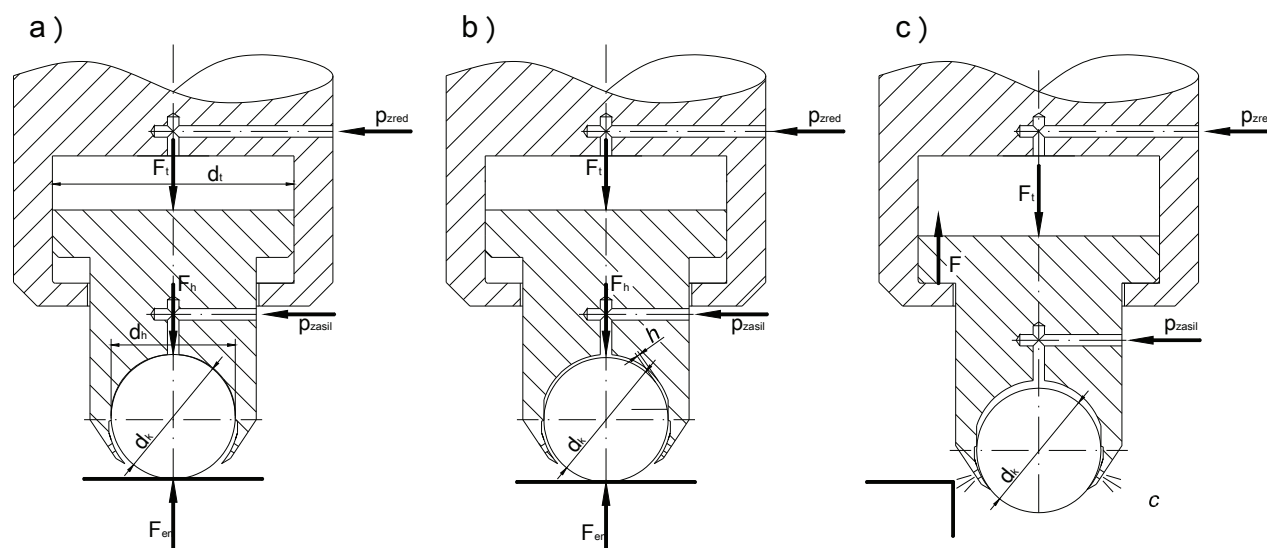
3. NARZĘDZIA NAGNIATAJĄCE

W Instytucie Technologii Mechanicznej ZUT zaprojektowano i wykonano rodzinę narzędzi hydraulicznych z łożyskowaniem hydrostatycznym. W odróżnieniu od narzędzi jednostrumieniowych firmy ECOROLL (rys. 4a), postanowiono skonstruować narzędzia dwustrumieniowe (rys. 4b).



Rys. 4. Rozwiązania konstrukcyjne nagniataków a) jednostrumieniowy S1 – zasilanie centralne, b) dwustrumieniowy S1 – zasilanie łożyska, S2 – zasilanie komory tłokowej

Taka konstrukcja nagniataków do prac badawczych jest bardziej korzystna, ze względu na możliwości regulacji ciśnienia w łożysku hydrostatycznym, dzięki czemu można osiągać warunki od podpory hydrostatycznej, aż po pełne łożysko hydrostatyczne w szerokim zakresie sił F_n . Ideę działania wykonanego narzędzia hydraulicznego z łożyskowaniem hydrostatycznym przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Zasada działania hydraulicznego nagniataka z łożyskowaniem hydrostatycznym

W korpusie narzędzia umieszczony jest tłok o średnicy d_t . Działająca nań ciecz o ciśnieniu p_{zred} generuje na tłoku siłę F_t . W dolnej części tłoka umieszczona jest kulka nagniatająca o średnicy d_k stykająca się z panewką na maksymalnej średnicy d_h . Jeśli w komorze nad kulką ciśnienie zasilania $p_{zasil} = 0$, wówczas cała powstała nad tłokiem siła F_t przenoszona jest poprzez metalowy styk kulki z panewką łożyska. W tym momencie w narzędziu brak jest łożyska hydrostatycznego, występuje jedynie częściowo ociążona podpora hydrostatyczna (rys. 5a). Wzrost ciśnienia p_{zasil} powoduje, zmniejszenie siły przenoszonej przez metaliczny kontakt pary kulka-panewka do wartości $(F - F_h)$, gdzie F_h jest siłą działającą w komorze łożyska hydrostatycznego (rys. 5b). W chwili spełnienia zależności (5) zaistnieją warunki utworzenia się łożyska hydrostatycznego.

$$F_{en} = F_h \quad (5)$$

Wówczas między kulką i panewką wytworzy się szczelina h umożliwiająca przepływ cieczy i powstanie w pełni łożyskowania hydrostatycznego kulki.

W chwili gdy dojdzie do przerwania kontaktu kulki z przedmiotem obrabianym nastąpi przesunięcie się tłoka w skrajne dolne położenia. Wówczas też nastąpi wypływ cieczy z łożyska hydrostatycznego przez promieniowe otwory w dolnej części obejmy kulki, dzięki czemu dojdzie do spadku ciśnienia p_{zasil} zabezpieczając narzędzie przed uszkodzeniem. Całość siły F_t przejmuje korpus narzędzia (rys. 5c). Narzędzie umożliwia swobodny w pewnym zakresie przesuw końcówki nagniataka, po powierzchni przedmiotu obrabianego, bez konieczności sterowania. Jest to niewątpliwie dużą zaletą. Widok głowicy nagniatającej podczas pracy na wspomnianym wcześniej centrum CNC został zamieszczony na rys. 6.



Rys. 6. Widok gotowego do pracy narzędzia nagniatającego zamontowanego na obrabiarce CNC

4. ZASILACZ HYDRAULICZNY

Na potrzeby wykonanych narzędzi nagniatających skonstruowano zasilacz hydrauliczny (rys. 7), który jako medium wykorzystuje ciecz chłodząco – smarującą dostępną w obrabiarce.

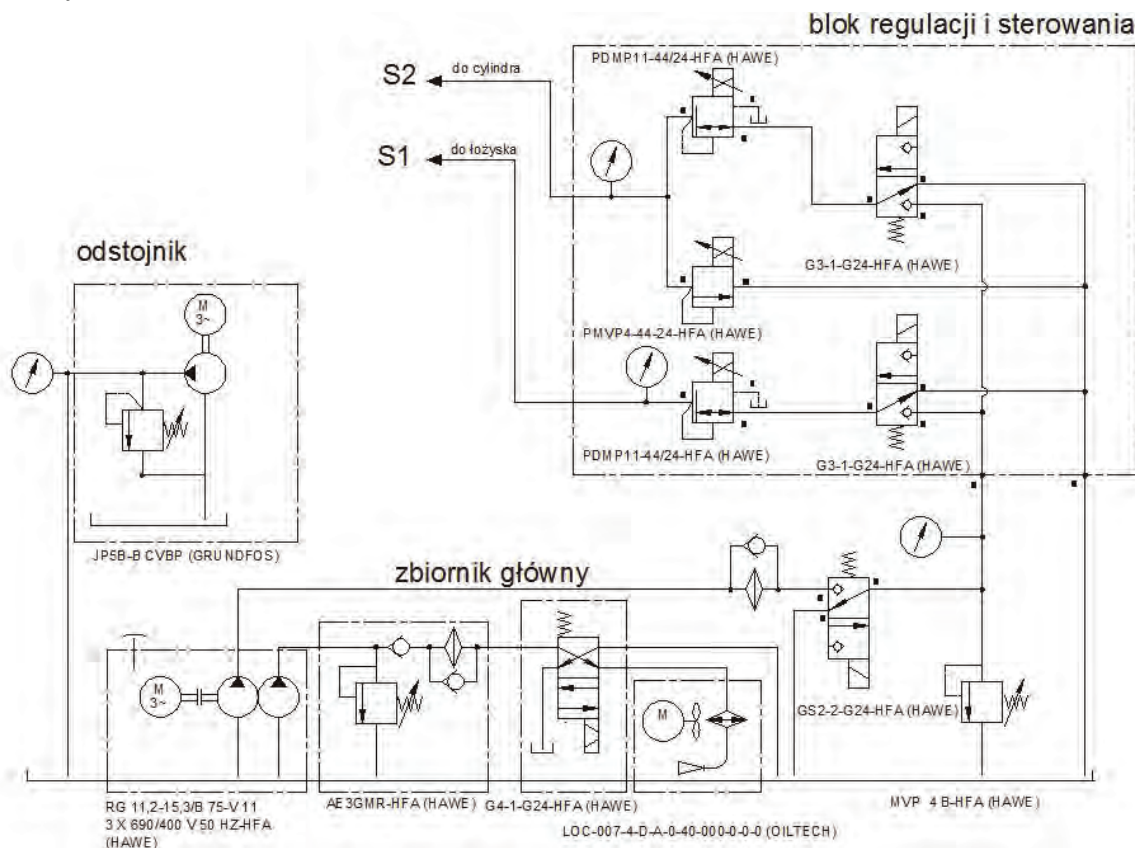


Rys. 7. Widok zasilacza hydraulicznego i centrum CNC podczas prób rozruchowych

Układ obrabiarka- narzędzie-zasilacz pracuje w obiegu otwartym. Oznacza to, że ciecz która wypływa z łożyska hydrostatycznego narzędzia sływa do zbiornika obrabiarki, co pokazano na rys. 8.

Straty cieczy w zasilaczu uzupełniane są poprzez układ ssąco-tłoczący zasilacza, którego celem jest utrzymanie stałego poziomu cieczy w zbiorniku. Zbiornik w zasilaczu podzielony jest na dwie części, wstępna tzw. odstojnik do którego trafia ciecz bezpośrednio z centrum obróbkowego. W tym miejscu ciecz jest również wstępnie filtrowana i przetaczana do właściwego zbiornika, w którym umieszczona jest główna – dwusekcyjna pompa.

Zadaniem pierwszego stopnia pompy jest przetłoczenie cieczy przez układ regeneracji (filtr i chłodnicę) po czym ciecz trafia z powrotem do zbiornika głównego. Stąd poprzez drugi stopień pompy ciecz jest kierowana przez filtr wysokociśnieniowy do bloku hydraulicznego odpowiedzialnego za regulację ciśnienia i natężenia przepływu w obu obiegach zasilania narzędzia (patrz rys. 4b S1 i S2). Zasilacz poprzez przyłącza hydrauliczne i węże elastyczne połączony jest z narzędziem.



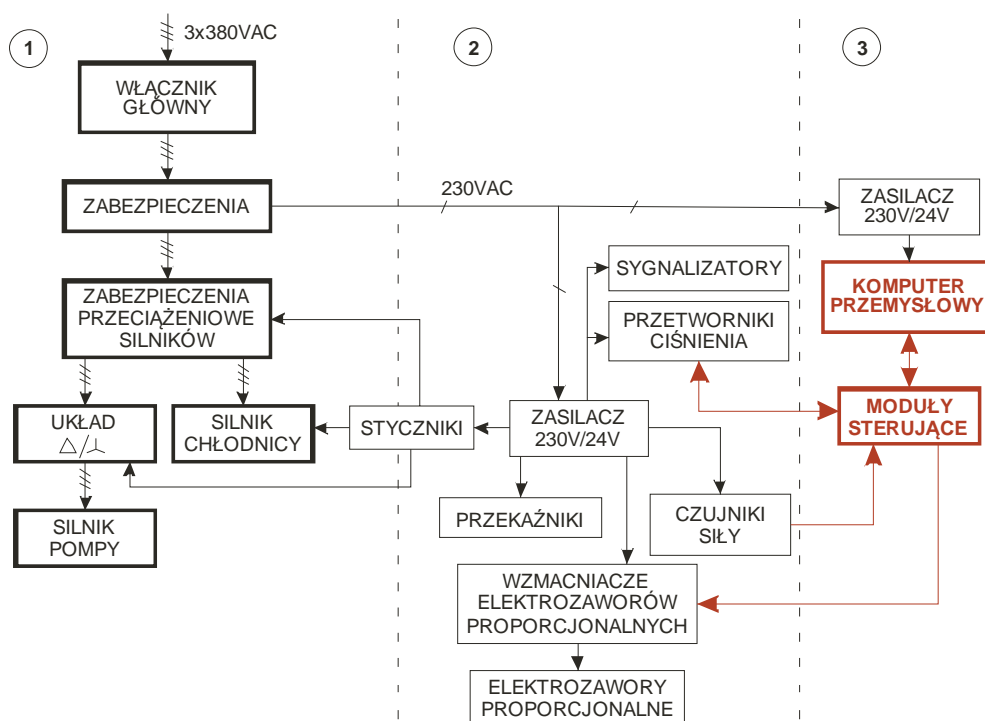
Rys. 8. Schemat zasilacza hydraulicznego wykonanego w ITM ZUT w Szczecinie

5. KONCEPCJA ZAUTOMATYZOWANEGO NARZĘDZIA HYDRAULICZNEGO W PROCESIE NAGNIATANIA

Schemat blokowy zautomatyzowanego układu sterowania przedstawiono na rys. 9. Podsystem sterowania podzielono na trzy podstawowe bloki funkcjonalne: blok zasilania (1), blok sterowania głowicą nagniatającą (2), blok kontroli automatycznego sterowania (3).

Urządzenia znajdujące się w części (1) są zasilane napięciem przemiennym 3×380 V. Elementami wykonawczymi tego bloku są: silnik chłodnicy i pompy. Do silnika napędzającego pompę dołączono dodatkowy układ automatycznego rozruchu silnika gwiazda/trójkąt. Układ ten jest konieczny do rozruchu silnika dużej mocy, jak również łagodnego startu pompy. Włącznik główny łączy bloki zabezpieczeń, w skład których wchodzi układy do kontroli kolejności faz i bezpieczniki przeciwzwarceniowe.

Blok (2) to układ sterowania napięciem stałym +24 V. Zasilacz o odpowiedniej wydajności prądowej dostarcza energii potrzebnej do poprawnej pracy urządzeń znajdujących się w tej części układu sterowania, tj. przekaźniki, wzmacniacze elektrozaworów, czujniki sił oraz przetworniki ciśnienia. Urządzeniami pośrednimi pomiędzy blokiem zasilania (1) a blokiem sterowania głowicą (2) są styczniki, które załączają i/lub wyłączają odpowiednio urządzenia zabezpieczeń przeciążeniowych silników i układ automatycznego załączania trójkąt/gwiazda.



Rys. 9. Schemat blokowy zautomatyzowanego systemu sterowania głowicą nagniatającą

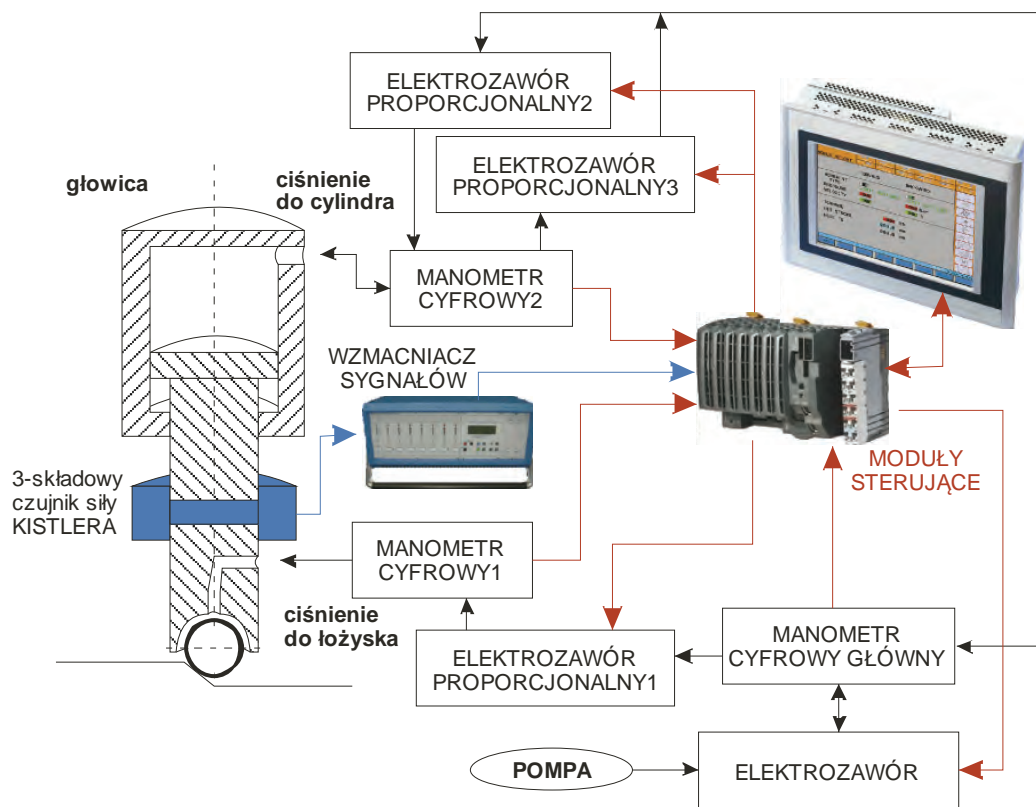
Ostatni blok kontroli automatycznego sterowania (3) to przemysłowy komputer operatorski z panelem dotykowym. Urządzenie to stanowi najnowocześniejsze rozwiązanie Programowalnych Sterowników Automatyki (ang. PAC). Zapisany program w komputerze będzie czuwać nad poprawną wymianą sygnałów sterujących z modułami sterującymi. Do modułów sterujących podłączone są czujniki, przetworniki ciśnienia i elektrozwory. Sygnały sterujące w tej części układu sterowania oznaczone na czerwono będą wysyłane bądź odbierane na podstawie algorytmu sterującego, zaimplementowanego w komputerze przemysłowym. Blok ten pozwoli na regulację i monitoring głowicy nagniatającej w sposób w pełni zautomatyzowany, bez udziału operatora oraz pozwoli na przeprowadzenie różnych badań doświadczalnych polegających na wdrażaniu nowych technik sterowania narzędzi nagniatających. Dzięki modułowej budowie bloku kontroli automatycznego sterowania możliwe będzie prowadzenie badań nad zastosowaniem nowych technik sterowania nie tylko z zakresu klasycznych metod ale również przy zastosowaniu sieci komputerowych.

6. POMIAR CIŚNIENIA I SIŁY

Na rys. 10 przedstawiono schemat blokowy obrazujący ideę pomiaru ciśnienia emulsji i sił działających na głowicę podczas obróbki nagniatania. Czarnymi liniami zaznaczono kierunki płynięcia medium transmisyjnego (emulsji), czerwonymi liniami pokazano przepływ sygnałów elektrycznych dotyczących ciśnienia emulsji, natomiast na niebiesko zaznaczono tor pomiaru siły.

Nadrzędnym urządzeniem zautomatyzowanego sterowania jest komputer przemysłowy PowerPanel firmy Bernecker&Rainer [5]. Komputer przemysłowy wyposażony jest w ekran dotykowy (z ang. *touchscreen*), na którym zaimplementowane będą przyciski i pola edycyjne potrzebne do pełnej wizualizacji sterowania głowicą nagniatającą. Komputer za pomocą przemysłowego protokołu komunikacyjnego odpornego na zakłócenia współpracuje z modułami sterującymi. Połączone równolegle moduły sterujące odpowiedzialne są za prawidłową, szybką i bezkolizyjną wymianę

informacji sterujących pomiędzy komputerem przemysłowym a urządzeniami wykonawczymi. Budowa modułów sterujących umożliwia w przyszłości swobodną rozbudowę systemu sterowania o dodatkowe możliwości np. sterowanie i monitoring z sieci komputerowej.



Rys. 10. Schemat blokowy pomiaru ciśnienia i siły w badanym układzie

Zautomatyzowany system nagniatania opierać się będzie na dwóch niezależnych torach pomiarowych tj. ciśnienia i siły.

W pierwszym etapie pomiaru ciśnienia manometr główny będzie kontrolował ciśnienie wychodzące z pompy. W przypadku zakłóceń wynikających z nieprawidłowej pracy pompy elektrozawór odetnie dopływ emulsji do układu. Manometry cyfrowe 1 i 2 będą czuwać nad stałym ciśnieniem emulsji doprowadzonej do cylindra głowicy i do łożyska. W przypadku zmian ciśnienia emulsji wynikającej ze zmian krzywizny obrabianej powierzchni nastąpi automatyczna korekcja ciśnienia.

Drugi niezależny pomiar to tor siły. Do układu pomiarowego zainstalowany zostanie 3-składowy czujnik siły firmy KISTLER. Czujnik zostanie zamontowany na głowicy w celu pomiaru on-line sił działających na głowicę. Czujnik pozwoli w trzech kierunkach wskazać rozkład sił oraz wskazać siłę wypadkową. Użyteczny sygnał zostanie poddany wstępnej obróbce we wzmacniaczu. Wzmocniony sygnał zostanie przesłany do modułów sterujących w celu podjęcia dalszych procedur sterujących ciśnieniem emulsji w kierunku głowicy nagniatającej.

7. PODSUMOWANIE

Technologia nagniatania dla osiągnięcia zamierzonego efektu SGP wymaga utrzymania na niezmiennym poziomie parametrów opisanych w artykule. Ciągły nadzór nad warunkami obróbki jest nie możliwy do zrealizowania bez udziału komponentów automatyki. Nastawy i korekcje parametrów on-line można zrealizować dzięki zastosowaniu modułowej budowy bloku kontroli

automatycznego sterowania. Budowa podsystemu sterowania na bazie techniki PAC ułatwi w szybki i łatwy sposób zaimplementowanie nowego programu sterującego głowicą nagniatającą, bez potrzeby budowy nowego układu sterującego.

Opracowany algorytm sterujący w komputerze przemysłowym pozwoli na monitorowanie i nadzorowanie różnych typów narzędzi nagniatających podłączonych pod zasilacz z możliwością szybkiego przeprogramowania komputera na potrzeby badanego podsystemu.

Zamiast stosowania nadmiarowych urządzeń sterująco-monitorujących w strukturze podsystemu sterowania, wykorzystywane będą nowoczesne techniki do monitorowania, nadzoru, zabezpieczenia czy wyliczeń wartości zmiennych sterujących i procesowych.

Przeprowadzone w przyszłości badania na tak zaprojektowanym i zbudowanym podsystemie sterowania pozwolą na stwierdzenie ile i jakich sygnałów potrzebuje system zautomatyzowanego nagniatania dla prawidłowego i szybkiego zlokalizowania zmian parametrów i kształtu powierzchni nagniatanych.

BIBLIOGRAFIA

1. Olszak W., Cieloszyk W., Grochała D., Kwaczyński W.: „Próby nagniatania złożonych powierzchni przestrzennych na frezarkach CNC”. Materiały konferencyjne IX Konferencji Naukowej pod patronatem Międzysekcyjnego Zespołu Inżynierii Powierzchni Komitetu Budowy Maszyn PAN i Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej pt. „Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie”. Gdańsk 2005 s. 113–122, ISBN 83-88579-46-0.
2. Olszak W., Mackiewicz J., Grochała D., Kwaczyński W.: „Nagniatanie jako zabieg wykończeniowy po frezowaniu złożonych powierzchni przestrzennych na frezarkach CNC” Materiały konferencyjne Konferencji Naukowo-Technicznej pod patronatem Komisji Budowy Maszyn PAN – oddział w Poznaniu: „Projektowanie Procesów Technologicznych”. Poznań 2006, s. 301–310, ISBN 978-83-903808-7-2.
3. Olszak W., Grochała D.: „Nagniatanie powierzchni 3D na frezarkach CNC”. Monografia pod redakcją W. Przybylskiego z X Konferencji Naukowej pt. „Technologia Obróbki przez Nagniatanie” – Tom II. Gdańsk 2008, s. 387–398, ISBN 978-83-88579-32-5.
4. Shiou F.J., Chuang C.H.: „Precision surface finish of the mold steel PDS5 using an innovative ball burnishing tool embedded with a load cell”. Precision Engineering 2010 r., nr 34, s. 76–84.
5. Materiały promocyjne firmy B&R [<http://www.br-automation.com>]