



Maszyny i procesy produkcyjne

redakcja
Antoni Świć
Arkadiusz Gola

MONOGRAFIE

Maszyny i procesy produkcyjne

Monografie – Politechnika Lubelska



Politechnika Lubelska
Wydział Mechaniczny
ul. Nadbystrzycka 36
20-618 LUBLIN

Maszyny i procesy produkcyjne

redakcja
Antoni Świć
Arkadiusz Gola



Politechnika Lubelska
Lublin 2015

Recenzenci:

dr hab. inż. Marian Marek Janczarek, prof. Politechniki Lubelskiej

prof. dr hab. inż. Bogdan Palczewski

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2015

ISBN: 978-83-7947-138-6

Wydawca: Politechnika Lubelska

ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin

Realizacja: Biblioteka Politechniki Lubelskiej

Ośrodek ds. Wydawnictw i Biblioteki Cyfrowej

ul. Nadbystrzycka 36A, 20-618 Lublin

tel. (81) 538-46-59, email: wydawca@pollub.pl

www.biblioteka.pollub.pl

Druk: TOP Agencja Reklamowa Agnieszka Łuczak

www.agencjatorp.pl

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL www.bc.pollub.pl

Nakład: 100 egz.

SPIS TREŚCI

Marek Błaszczak

PROJEKT NARZĘDZIA ZWIĘKSZAJĄCEGO EFEKTYWNOŚCI
OPRACOWYWANIA PROCESU TECHNOLOGICZNEGO
OBRÓBKI CIEPLNEJ..... 7

Myron Czerniec, Jerzy Kielbiński, Jurij Czerniec

OSZACOWANIE PARAMETRÓW KONTAKTU ORAZ RESURSU
PRZEKŁADNI WALCOWEJ Z UWZGLĘDNIENIEM
KOREKCJI UŻĘBIENIA 18

Miroslaw Malec, Tomasz Cieplak, Paweł Ławskawski

THE POSSIBILITY OF MODIFICATION THE PRODUCT
IN ASPECT OF ITS DURABILITY IMPROVEMENT EXEMPLIFIED
BY VASCULAR CLAMPS 28

А. Харченко, Е. Владецкая, С. Братан

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ
В УСЛОВИЯХ МЕХАНООБРАБАТЫВАЮЩИХ УЧАСТКОВ
ПЛАВУЧИХ РЕМОНТНЫХ МАСТЕРСКИХ 45

Waldemar Samociuk, Dorota Samociuk, Dariusz Wołos, Zbigniew Krzysiak

BEZPIECZEŃSTWO MASZYN ZGODNE Z DYREKTYWĄ
MASZYNOWĄ 2006/42/WE – PROCEDURY OCENY ZGODNOŚCI
Z WYMAGANIAMI 58

Г. В. Невар, О. В. Филипович

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ
СРЕДНЕГО ДИАМЕТРА РЕЗЬБЫ ШПИЛЕК..... 71

А. Харченко, Е. Владецкая, В. Долгин, С. Братан

РЕАКЦИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ПРОИЗВОЛЬНЫЙ
СИГНАЛ НА ПРИМЕРЕ СТАНКА В УСЛОВИЯХ ПЛАВУЧЕЙ
РЕМОНТНОЙ МАСТЕРСКОЙ 86

Waldemar Samociuk, Zbigniew Krzysiak, Grzegorz Bartnik, Dorota Samociuk

BEZPIECZEŃSTWO MASZYN ZGODNE Z DYREKTYWĄ
MASZYNOWĄ 2006/42/WE – OCENA RYZYKA DLA UKŁADU
LOGICZNEGO REALIZUJĄCEGO FUNKCJĘ BEZPIECZEŃSTWA..... 99

Katarzyna Kiryczuk, Piotr Penkała

ANALIZA BIOMECHANICZNA STAWU BIODROWEGO 115

Daniel Gąska, Katarzyna Ciemny

WYBRANE ASPEKTY ROZWOJU ROBOTÓW MEDYCZNYCH 126

PROJEKT NARZĘDZIA ZWIĘKSZAJĄCEGO EFEKTYWNOŚCI OPRACOWYWANIA PROCESU TECHNOLOGICZNEGO OBRÓBKİ CIEPLNEJ

1. WSTĘP

Technolog dla zaprojektowanego rozwiązania konstrukcyjnego dokonuje weryfikacji doboru materiałów wyjściowych do procesu wytwórczego oraz zgodnie ze sztuką inżynierską określa sposób i parametry jego realizacji.

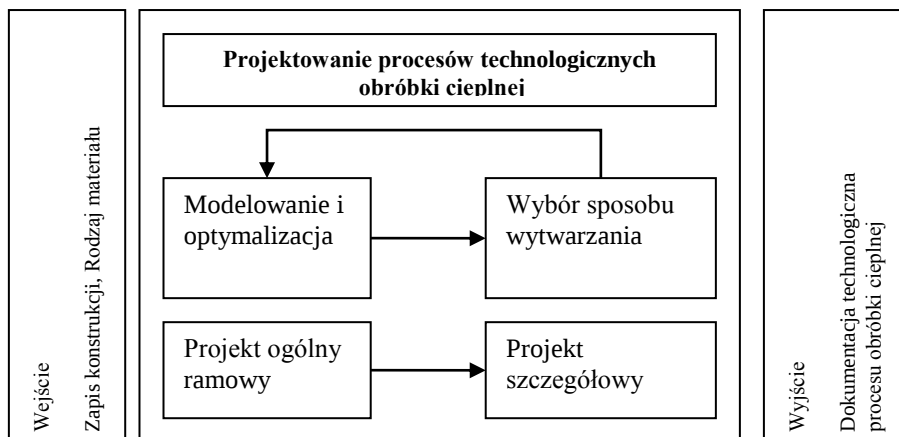
Projektowanie technologii realizując się prowadząc analizy różnych wariantów procesów technologicznych pozwalających w optymalny sposób uzyskać wymagana w procesie projektowym własności wyrobu. Zastosowanie każdej z możliwych technologii wytwarzania spełniających określone kryteria konstruktorskie musi gwarantować z takim samym prawdopodobieństwem uzyskanie oczekiwanych własności wyrobu. Dobór nie każdego rozwiązania procesu technologicznego spośród możliwych w danych warunkach zapewnia osiągnięcie najkorzystniejszych efektów ekonomiczno-technologicznych.

Dobór poszczególnych parametrów operacji i zabiegów technologicznych, a także środków produkcji jest najważniejszym działaniem w procesie projektowania procesu technologicznego pozwalającym uzyskać zaplanowane własności wyrobu.

Projektowanie technologii jest procesem iteracyjnym. Daną wejściową do jego realizacji jest zapis konstrukcji, natomiast wyjściową proces technologiczny. Proces technologiczny charakteryzuje określony porządek wewnętrzny, zwany strukturą procesu rys. 1.

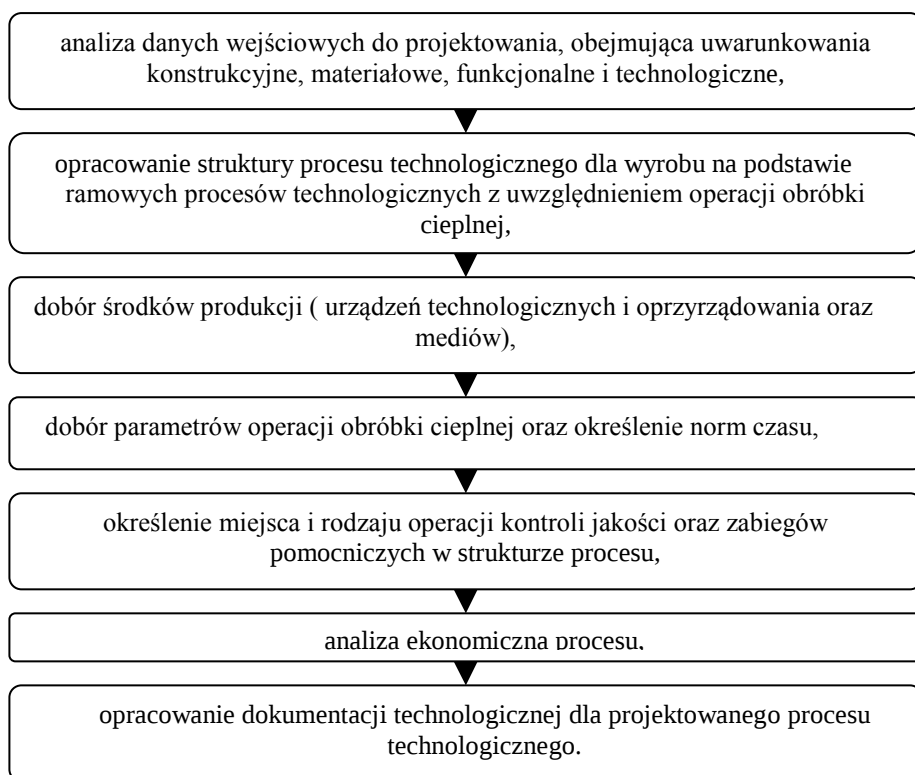
Projektowanie ma na celu opracowanie uporządkowanych struktur operacji i zabiegów, stanowiących szczególną postać procedury realizacji procesu wytwarzania wyrobu. W fazach modelowania i optymalizacji projektowania możliwe są wszelkie alternatywne rozwiązania struktury procesu, wpływ różnych wariantów na uzyskanie określonych własności użytkowych oraz koszt wytworzenia.

¹ Instytut Technologicznych Systemów Informatycznych, Politechnika Lubelska, 20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 36, e-mail: m.blaszczak@pollub.pl



Rys. 1. Struktura procesu technologicznego

Moduły projektowania procesu technologicznego obróbki cieplnej przedstawia schemat ideowy:



Schemat 1. Moduły projektowania procesu technologicznego obróbki cieplnej

Istotne znaczenie w procesie projektowania ma także wielkość produkcji, która determinuje wybór środków produkcji. W procesie projektowania technologicznego, na podstawie charakterystyk właściwości materiału prowadzi się ocenę możliwości jego zastosowania z uwzględnieniem kryteriów wymaganych przez konstruktora. W procesie projektowania technologicznego szczególnie istotny jest odpowiedni dobór środków produkcji do realizacji zaplanowanych operacji zarówno w aspekcie technicznym jak i ekonomicznym. Warunki techniczne decydują o możliwości przeprowadzenia danej operacji zgodnie z przyjętymi założeniami, natomiast warunki ekonomiczne charakteryzują koszt wytwarzania w procesach.

Wielkość produkcji w determinuje zastosowane oprzyrządowanie techniczne i technologiczne. W produkcji jednostkowej i małoseryjnej stosuje się zazwyczaj standardowe środki techniczne służące do realizacji danej operacji. Wraz ze wzrostem wielkości produkcji stosuje się oprzyrządowanie i środki techniczne bardziej specjalistyczne i ukierunkowane na realizację określonych działań w trybie o zróżnicowanym poziomie automatyzacji. Wiąże się to ze zwiększeniem kosztów ze względu na konieczność ich oddzielnego projektowania i wykonania. W przypadku produkcji wielkoseryjnej i masowej stosuje się koncentrację technologiczną przez zastosowanie specjalistycznych linii obróbkowych.

Kolejnym elementem, który brany jest pod uwagę podczas opracowywania procesu technologicznego stanowią urządzenia grzewcze i chłodzące do obróbki cieplnej oraz oprzyrządowanie specjalistyczne zależne w głównej mierze od wielkości produkcji. Dodatkowymi kryteriami, jakie brane są pod uwagę jest współpraca urządzeń technologicznych z innymi w elementami łańcucha technologicznego, ich wydajność oraz możliwości logistyczne.

Ważnym elementem procesu technologicznego, który wpływa w dużym stopniu na zastosowanie określonych urządzeń jest kształt wyrobu zaklasyfikowany do trzech grup wsadu. Pierwszą grupę stanowią elementy o prostym kształcie najczęściej geometrycznie symetryczne. W drugiej grupie znalazły się koła zębate i widelki. Pozostałe drobne elementy o kształtach prostych figur geometrycznych stanowią trzecią grupę i należą do niej sworznie, śruby, kołki.

Oprzyrządowanie specjalistyczne stanowią różnego rodzaju wieszaki, pojemniki, palety skrzynie i kosze. W tabeli 1 przedstawiono zależność typu pieca i grupy wsadu w zależności od rodzaju pracy.

Istotne do osiągnięcia planowanych własności wyrobu jest zaplanowanie w strukturze procesu operacji kontrolnych. Rozmieszczenie punktów kontrolnych w każdym procesie wymaga analizy związków między skutkami a przyczynami. Proces pozostaje pod kontrolą gdy wpływ przypadkowych, związanych z jego realizacją zdarzeń jest ograniczony do możliwie małego zakresu.

Tab. 1. Grupa wsadu i rodzaj pieca

Typ pracy	Typ pieca	Grupa wsadu		
		I	II	III
nieciągła	Piec komorowy	x	+	+
	Piec komorowy z przedsionkiem hartowniczym	x	+	+
	Piec wgłębny	+	x	o
ciągła	Piec z rusztem wstrząsowym	=	=	x
	Piec przepychowy	x	+	=
x – podstawowe + – równorzędne z podstawowym w szczególnych przypadkach o – możliwe ale niezalecane = – niewłaściwe				

Operacje kontroli obejmują wykonanie badań mechanicznych oraz pomiary grubości warstwy utwardzonej w procesach obróbki cieplno – chemicznej.

Kolejną fazą jest oszacowanie kosztów procesów, które wykonuje się najczęściej po zakończeniu całego etapu. Wysokie zróżnicowanie czynników produkcji do których zalicza się m.in. pracę ludzką, materiały, energię czyli wielkości często nieporównywalnych wymaga zastosowania uniwersalnego miernika pieniężnego. Koszty uwzględniane w całym procesie projektowania technologii stanowią 75%, stwarza to możliwości wskazania rozwiązań alternatywnych, co w znacznym stopniu zwiększa efektywność finansową wytwarzania.

Kalkulacja kosztów powinna uwzględnić zarówno koszty planowane jak i faktycznie poniesione przypadające na jednostkę produktu. Ocena kosztów wykonania przebiega w dwu grupach. Pierwszą stanowią koszty technologiczne związane w technologią wykonania, natomiast drugą grupę stanowią koszty wynikające z działalności przedsiębiorstwa niezależne od przyjętego wariantu technologicznego

2. METODYKA

Przygotowanie narzędzia do obliczeń związanych z obróbką cieplną wykorzystano środowisko programistyczne Visual Basic 2010, ze względu na dostępność w wersji oraz możliwości prostego i jednocześnie rozbudowanego interfejsu użytkownika. Prowadzone obliczenia przekrojów i objętości brył na podstawie powszechnie znanych wzorów z dokładnością do 10^{-6} m. Wydajność dla pieców okresowych:

$$W = \frac{G}{t_p} [kg / h] \text{ lub } [sztuk / h] \quad (1)$$

Dla pieców przepychowych ze wsadem ułożonym na panwiach lub koszach:

$$W = \frac{m(g \cdot n + g_1)}{t_p} = \frac{60(g \cdot n + g_1)}{t_p} [kg/h], \quad (2)$$

gdzie: m – liczba koszów lub panwi,
 n – liczba przedmiotów,
 g – masa jednego przedmiotu,
 g_1 – masa jednej panwi lub kosza.

Określenie mocy znamionowej pieca elektrycznego określa równanie

$$N_{\max} = (1,25 \div 1,4) \frac{W \cdot (C_2 \cdot t_2 - C_1 \cdot t_1) \cdot 100}{\eta \cdot 360} [kW], \quad (3)$$

gdzie: W – wydajność pieca przy optymalnym wykorzystaniu,
 C_1 – średnie ciepło właściwe materiału grzanego w zakresie temperatur od 0°C do t_1 i od 0°C do t_2 [$\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$],
 C_2 – średnie ciepło właściwe materiału grzanego w zakresie temperatur od 0°C do t_1 i od 0°C do t_2 [$\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$],
 t_1 – temperatura wsadu przed załadowaniem [$^\circ\text{C}$],
 t_2 – temperatura wsadu po nagrzaniu [$^\circ\text{C}$],
 η – całkowita sprawność cieplna pieca [%],
 3600 – równoważnik cieplny energii elektrycznej (nie stosuje się w przypadku pieców gazowych); $1\text{kWh} = 3600\text{Jl}$.

Kolejnym elementem, którego parametry należy uwzględnić w procesie technologicznym obróbki cieplnej są wanny hartownicze. Obliczenie wymaganej pojemności cieczy chłodzącej prowadzi się wg wzoru

$$V_o = \frac{M \cdot (C_2 \cdot t_2 - C_1 \cdot t_1)}{C_3(t_3 - t_4)} [md^3] \quad (4)$$

gdzie: M – masa jednocześnie chłodzonego wsadu [kg],
 t_1 – temperatura wsadu po chłodzeniu [$^\circ\text{C}$],
 t_2 – temperatura wsadu gorącego [$^\circ\text{C}$],
 C_1, C_2 – (jak w równaniu 2.3),
 t_3 – temperatura początkowa cieczy chłodzącej [$^\circ\text{C}$],
 t_4 – temperatura początkowa cieczy chłodzącej [$^\circ\text{C}$],
 C_3 – ciepło właściwe cieczy chłodzącej [$\text{J/dm}^3 \cdot ^\circ\text{C}$].

Stąd pojemność wanny hartowniczej wynosi:

$$V = 1,2 \text{ } 1,3 \text{ } V_0 \text{ [dm}^3\text{]} \quad (5)$$

3. MODEL PROJEKTOWY

1. Planowanie – najbardziej skutecznych i wydajnych metod realizacji faz cyklu życia;
2. Zdefiniowanie systemu - określenie zakresu i granic stosowania danej aplikacji, wskazanie jej użytkowników oraz obszarów zastosowań;
3. Zbieranie i analiza wymagań pochodzących od użytkowników – „testerów” i wynikających z obszarów zastosowań;
4. Projektowanie koncektualne, logiczne i fizyczne
 - Projektowanie interfejsów użytkowników wraz z łączami do innych programów użytkowych;
 - Tworzenie prototypów (opcjonalnie) – budowanie działającego modelu aplikacji, który pozwala użytkownikom zobrazować i ocenić sposób działania i wygląd końcowego systemu;
 - Testowanie i ocena - przeprowadzane według zaplanowanej strategii i najlepiej przy użyciu realnych danych.

4. KONCEPCJA PROGRAMU WSPIERAJĄCEGO PROJEKTOWANIE OBRÓBKII CIEPLNEJ

Program został utworzony w środowisku Visual Basic jako aplikacja systemu operacyjnego Windows ze względu na mało skomplikowany, intuicyjny interfejs co stwarza możliwość adaptacji rozwiązań do poszczególnych stanowisk technologicznych. Stanowi on matrycę do ewentualnego rozwijania i poszerzania możliwości, ponieważ kod źródłowy jest otwarty niemniej jednak zabezpieczony przed zmianami mającymi wpływ na jego stabilność działania i wydajność.

Elementem wyjściowym zaproponowanej koncepcji programu jest wprowadzenie parametrów geometrycznych koncepcji technologicznej projektowanego elementu. W pierwszej kolejności konieczna jest identyfikacja elementu pod kątem jego klasy i typu. Po ich określeniu aktywują się parametry opisujące konieczne do określenia masy przedmiotu. Kolejnym krokiem jest wybór materiału z grupy metale, tworzywa wielkocząsteczkowe, ceramika lub zdefiniowania i wprowadzenia własnej grupy np. kompozyt.

Na rysunku 2 przedstawiono bazowe okno dialogowe, które umożliwia również zapis otrzymanych wyników do pliku. Zapisywany plik jest plikiem tekstowym z znacznikami podziału kolumn, możliwi to konwersję danych do podstawowych formatów tabelarycznych pakietów biurowych.

The screenshot shows a window titled 'Katech 1.0'. It contains a section 'Geometria wyrobu' with a 'Klasa części' dropdown set to 'wybierz', a 'Rodzaj części' dropdown set to 'wybierz', and a 'Podaj liczbę średnic' input set to '4'. Below are four rows for diameters: 'Średnica 1', 'Średnica 2', 'Średnica 3', and 'Średnica 4', each with 'L' and '(mm)' input fields. A 'MATERIAL' section follows with 'Wybierz rodzaj materiału' set to 'wybierz', and 'Gęstość' and 'MASA' fields with 'jednostka' and 'wybierz' dropdowns. At the bottom are buttons: 'Home', 'Poprzednia', 'Następna', 'ZAPISZ', and 'Koniec'.

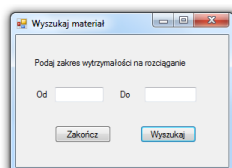
Rys. 2. Okno dialogowe do obliczeń objętości i masy materiału

Po określeniu cech geometrycznych następnym ekranem jest dobór parametrów obróbki cieplnej. W wersji podstawowej zaproponowany jest algorytm do procesu hartowania. Określenie parametrów obróbki cieplnej (rys. 3).

The screenshot shows a window titled 'Obróbka cieplna - parametry'. It has a 'Materiał' input field with a link 'Baza materiałów - Total Materia...'. Below are buttons 'ZMIENŃ', 'Cofnij', and 'Wyszukaj'. Further down are inputs for 'Pm (na zimno)' and 'Pm (na gorąco)'. A section for 'Urządzenie' and 'Przyrząd' has dropdowns set to 'wybierz'. Below are 'Wład do pieca [kg]' and 'Wład do przyrządu [kg]' with 'Zmień' buttons. 'Temperatura (zalecana)' has a 'Zmień' button, followed by 'Odchyłka' and '(+/-) w %'. 'Sposób nagrzewania' has a dropdown, and 'Liczba przedziałów wygrzewania' has an input field. 'Czas nagrzewania' and 'Wygrzewanie' have inputs with '[min]' units, and a link 'Wykresy CTP'. 'Ośrodek chłodzący' has a dropdown set to 'wybierz', and 'Zalecana ilość' has an input with '[l]' units. At the bottom are buttons: 'Home', 'Cofnij', 'Następny', 'Zapisz', and 'Koniec'.

Rys. 3. Okno doboru parametrów obróbki cieplnej

W tym etapie technolog wprowadza nazwę materiału wg polskiej normy, a jeśli proponowany materiał nie posiada oznaczenia istnieje możliwość wyszukania w odpowiedniku w bazie Total Materia. Wyszukiwanie i dobór określonego materiału można również przeprowadzić podając zakres wytrzymałości na rozciąganie R_m (rys. 4). Wyszukiwanie odbywa się z bazy programu i otrzymany rezultat wprowadzany jest do okna dialogowego „Materiał”.



Rys. 4. Okno dialogowe wyszukiwania materiału na podstawie zakresu wytrzymałości na rozciąganie

Bazę materiałową można uzupełniać o kolejne rekordy poprzez wprowadzanie bezpośrednie w formularzu. Aby zapobiec utracie danych z bazy lub wprowadzeniu błędnych parametrów każda zmiana jest weryfikowana przy kolejnym uruchomieniu programu. Baza posiada również zabezpieczenie hasłem, które uniemożliwia zmianę danych z poziomu innych aplikacji obsługujących bazy danych.

Kolejnym etapem jest wybór urządzenia grzewczego możliwy jest wybór pomiędzy urządzeniami na paliwo gazowe lub elektryczne. Istnieje też możliwość dodania pieca ogrzewanego paliwem stałym (koksem) jednak ten typ jest niezalecany.

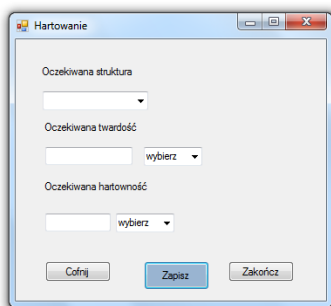
Następnym analizowanym parametrem jest dobór wielkości przedmiotu lub przedmiotów do objętości pieca grzewczego. W przypadku gdy jest to jeden element w oknie „wsad do pieca” pojawia się jego waga wyliczona w początkowym etapie analizy. Możliwe jest również zastosowanie przyrządów umożliwiających nagrzewanie większej liczby elementów jednocześnie. Po wybraniu odpowiedniego przyrządu np. kosza aktywuje się okno „wsad do przyrządu” wielkość tę podajemy w kilogramach z uwzględnieniem masy przyrządu. W zależności od stopnia złożoności kształtu oraz procesu technologicznego, wielkości te można zmieniać

Dalsza analiza obejmuje dobór parametrów obróbki cieplnej, a w szczególności temperatury, do jakiej należy nagrzać wsad. Wielkość ta zostanie uzupełniona na podstawie wielkości katalogowych dla danego typu materiału. Element ten również można zmieniać podając odchyłkę procentową dla określenia histerezy posiadanego układu grzewczego.

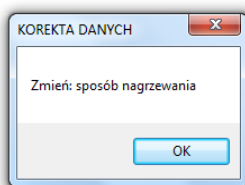
Czas nagrzewania jak i wygrzewania technolog może wprowadzić na podstawie własnego doświadczenia lub na podstawie wykresów korzystając z łącza do bazy Total Materia.

Końcowym etapem opracowania procesu technologicznego jest dobór rodzaju i ilości jak ośrodka chłodzącego. Możliwe jest wybranie hartowania w wodzie, oleju mineralnym, emulsji wodno-olejowej, wodnym roztworze polimeru, stopionych solach, stopionych ługach. Rodzaj ośrodka chłodzącego również można zmieniać w zależności od procesu technologicznego. W celu uzyskania specyficznych cech przedmiotu możemy wprowadzić nagrzewanie i wygrzewanie stopniowe poprzez określenie interwałów nagrzewania i wygrzewania. Parametry te technolog powinien określić na podstawie wykresów lub korzystając z własnego doświadczenia.

Na rys. 5 przedstawiono okno dialogowe umożliwiające wybór metody hartowania najbardziej odpowiedni dla zakładanych cech wyrobu. Ważnym elementem procesu hartowania jest uzyskanie odpowiedniej struktury martenzytycznej lub bainitycznej. Dotrzymanie założeń odnośnie struktury oraz twardość jak i hartowności wynika bezpośrednio ze składu chemicznego materiału w szczególności węgla jak i dodatków stopowych.



Rys. 5. Okno z prognozowanymi właściwościami przedmiotów



Rys. 6. Okno informujące o korekcie wcześniejszych danych

Wartości wynikowe otrzymane jako prognozowane możemy ukierunkować ze względu na rodzaj struktury. Wprowadzając zmiany otrzymanego wyniku wyliczone wcześniej parametry zostają skorygowane. W przypadku gdy proponowana wielkość lub kryterium jest trudna do uzyskania pojawia się informacyjne okno dialogowe które z parametrów należy zmienić rys 6.

Efektem końcowym jest raport w postaci pliku tekstowego z obliczonymi parametrami.

Po opracowaniu założeń do procesu technologicznego obróbki cieplnej możliwe jest wstępne oszacowanie kosztów. W oknie dialogowym, które generowane po zakończeniu całego procesu możemy mieć ogląd na koszty zależne od wielkości produkcji, rodzaju zastosowanych materiałów eksploatacyjnych i urządzeń rys. 7.

Rys. 7. Okno dialogowe szacunkowych kosztów

Nie wszystkie parametry można oszacować z tego też względu wprowadzono koszty niekwalifikowane do których w algorytmie wprowadzono współczynniki amortyzacji dygresywnej środków trwałych dla danego gniazda obróbkowego.

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Proponowane rozwiązanie umożliwia skrócenie czasu przygotowania dokumentacji projektowej procesu technologicznego obróbki cieplnej. Jako element testowy zaproponowano narzędzie wspierające przygotowanie operacji hartowania. Budowa oraz algorytmy opierają się na otwartym kodzie co umożliwia jego dalszy rozwój poprzez zwiększanie ilości procesów oraz poszerzanie bazy materiałowej będącej integralną częścią tego programu. Mając świadomość iż na rynku znajdują się podobne programy zaproponowano narzędzie – szablon, które nie tylko informuje w formie encyklopedycznej o pewnych parametrach lecz również stwarza możliwość kreowania lub wprowadzania do procesów technologicznych zależności lub środków dzięki którym możliwe jest uzyskanie specyficznych lub niepowtarzalnych cech wyrobu często uzyskanych w sposób przypadkowych. Możliwość zapisu poszczególnych etapów procesu w odrębnych katalogach stwarza możliwość większego skoncentrowania się na elementach procesu. Odtworzenie poszczególnych etapów jest dość proste ponieważ pliki zapisywane są z aktualną datą oraz godziną. Umożliwia to synchronizację danych mimo, iż zapisane są w plikach tekstowych.

Szacowane koszty procesu pozwalają przy stałych parametrach eksploatacyjnych oszacować wskaźnik ekonomiczny. Wielkość ta może w sposób pośredni wpływać na parametry procesu. Proces doboru i optymalizacji można rozszerzyć wprowadzając dodatkowe elementy systemów doradczych w postaci iteracyjnej lub zawansowanych SSN. Element traktowany jest jako możliwe znaczne usprawnienie problemów decyzyjnych i zastosowany przy projektowaniu raczej nowych wyrobów.

LITERATURA

- [1] SZEWIECZEK D., KARKOSZKA T., KRUPIŃSKA B., ROSZAK M.: *Wprowadzenie do projektowania procesów obróbki cieplnej metali i stopów*. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2009.
- [2] BUDZYNOWSKI T., OSTROWSKI B., POPRZECZKA A., ZIEWIEC W.: *Komputerowe systemy informatyczne w inżynierii materiałów konstrukcyjnych*. Wyd. Politechniki Radomskiej, Radom 2002.
- [3] SKARA W.: *Metodologia procesu projektowo – konstrukcyjnego opartego na wiedzy*. Wyd. Politechniki Śląskiej. Gliwice 2007.
- [4] BLICHARSKI M.: *Inżynieria materiałowa*. Wyd. WNT, Warszawa 2012.
- [5] NOWAKOWSKI P.: *Wybrane techniki komputerowe w projektowaniu i wytwarzaniu*. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2006.
- [6] ADRIAN H.: *Numeryczne modelowanie procesów obróbki cieplnej*. Wyd. AGH, Kraków 2011.
- [7] PAJĄK E., ŻYWICKI K., LEŚNIAK K.: *Symulacja wytwarzania. Materiały pomocnicze do zajęć laboratoryjnych*. Wyd. Politechnika Poznańska, Poznań 2005.
- [8] PACYNA J.: *Komputerowe projektowanie metali i stopów*. Seria wykład, wyd. AGH, Kraków 2010.

OSZACOWANIE PARAMETRÓW KONTAKTU ORAZ RESURSU PRZEKŁADNI WALCOWEJ Z UWZGLĘDNIENIEM KOREKCJI UZĘBIENIA

Oszacowanie trwałości przekładni zębatych na stadium ich projektowania z uwzględnieniem tak ich parametrów konstrukcyjnych (w tym korekcji uzębienia) oraz eksploatacyjnych, jak zużycia zębów oraz warunków ich interakcji w trakcie zazębiania się ma bardzo ważne znaczenie użytkowe. Ponieważ w trakcie pracy przekładni walcowej o zębach prostych występuje dwu – jedno – dwuparowe zazębienie, to na podstawie metody autorskiej [1–3] przeprowadzono badania wpływu warunków zazębienia (jego parowości oraz zmiany promieni krzywizny zarysów zębów w wyniku zużycia) tak na maksymalne naciski stykowe, jak i na zużycie oraz resurs przekładni. W literaturze podano pewne wyniki badania wpływu korekcji technologicznej na naciski kontaktowe [4–6], jednak brak badań jego wpływu na zużycie zębów oraz resurs przekładni.

Zużycie zębów powoduje zwiększenie promieni krzywizny ρ_{jh} ich zarysów, w wyniku czego maksymalne naciski kontaktowe $p_{jh\max}$ maleją, a szerokość pól styku $2b_{jh}$ wzrasta. Ich wartości w trakcie zużycia ustala się według zmodyfikowanych wzorów Hertza:

$$p_{jh\max} = 0,564\sqrt{N' / \theta\rho_{jh}}, \quad 2b_{jh} = 2,256\sqrt{\theta N'\rho_{jh}}, \quad (1)$$

gdzie: $j = 0, 1, 2, 3, \dots, s$ – punkty styku współpracujących zarysów zębów,
 $j = 0, j = s$ odpowiadają pierwszemu oraz ostatniemu punktowi zazębienia zębów,

$$N' = N / b_w w,$$

$$N = 9550PK_g / r_{w1}n_1 \cos \alpha_w - \text{siła międzyzębna},$$

¹ Instytut Technologicznych Systemów Informatycznych, Politechnika Lubelska

² Instytut Technologicznych Systemów Informatycznych, Politechnika Lubelska

³ Państwowy Uniwersytet Pedagogiczny w Drohobyczu, 82100 Drohobycz ul. Iwana Franki 24, tel./fax.: (03803244) 38111, e-mail: kic@drohobych.net

r_{w1} – promień toczny zębnika,
 α_w – kąt przyporu zazębienia korygowanego,
 P – moc na wale czynnym (zębniku),
 n_1 – liczba obrotów wału czynnego,
 K_g – współczynnik dynamiczny; $\theta = (1 - \mu_1^2) / E_1 + (1 - \mu_2^2) / E_2$,
 E, μ – moduły Younga oraz współczynniki Poissona materiałów kół zębatach,
 b_w – szerokość zębatki,
 w – liczba par zazębnień uczestniczących jednocześnie w przekazywaniu mocy,
 $\rho_{jh} = \frac{\rho_{1jh}\rho_{2jh}}{\rho_{1jh} + \rho_{2jh}}$ – zredukowany promień krzywizny zarysów zębów przekładni zmienny w wyniku ich zużycia,
 ρ_{1jh}, ρ_{2jh} – odpowiednio zmienne promienie krzywizny zarysów zębatki oraz koła zębatego.

Wyjściowy zredukowany promień krzywizny zębów przekładni walcowej:

$$\rho_j = \frac{\rho_{1j}\rho_{2j}}{\rho_{1j} + \rho_{2j}}, \quad (2)$$

gdzie: ρ_{1j}, ρ_{2j} – odpowiednio promienie krzywizny bocznych zarysów zębów zębnika i koła zębatego.

Wzory na promienie krzywizny zębów zębnika i koła zębatego o zarysach korygowanych przekładni walcowej w j -tym punkcie zazębienia mają postać:

$$\rho_{1j} = r_{b1} \operatorname{tg} \alpha_{1j}, \quad \rho_{2j} = r_{w2} \sqrt{\left(r_{2j} / r_{w2}\right)^2 - \cos^2 \alpha_w}, \quad (3)$$

gdzie: $r_{b1} = r_1 \cos \alpha$, $r_1 = mz_1$, $\alpha_{1j} = \arctan(\tan \alpha_{10} + j \Delta \varphi)$,

$$\tan \alpha_{10} = (1 + u) \tan \alpha_w - \frac{u}{\cos \alpha_w} \sqrt{\left(r_{20} / r_{w2}\right)^2 - \cos^2 \alpha_w},$$

$$r_{b2} = r_2 \cos \alpha, \quad r_2 = mz_2, \quad r_{20} = r_{a2} - r, \quad r_{a2} = r_2 + m, \quad r = 0,2m,$$

$$\tan \alpha_{1s} = \sqrt{\left(r_{1s} / r_{w1}\right)^2 - \cos^2 \alpha_w} \quad r_{1s} = r_{a1} - r = r_{a1} - 0,2m, \quad r_{a1} = r_1 + m.$$

$$r_{2j} = \sqrt{a_w^2 + r_{1j}^2 - 2a_w r_{1j} \cos(\alpha_w - \alpha_{1j})}, a_w = (z_1 + z_2)m / 2,$$

$$r_{1j} = r_{w1} \cos \alpha_w / \cos \alpha_{1j}, \cos \alpha_{20} = \frac{r_{w2}}{r_{20}} \cos \alpha_w,$$

$$\tan \alpha_{2s} = \left(1 + \frac{1}{u}\right) \tan \alpha_w - \frac{1}{u \cos \alpha_w} \sqrt{\left(\frac{r_{1s}}{r_{w1}}\right)^2 - \cos^2 \alpha_w}.$$

gdzie: r_1, r_2 – odpowiednio promienie kół podziałowych zębnika oraz koła zębatego,

r_{b1}, r_{b2} – promienie kół zasadniczych zębnika i koła zębatego,

r_{a1}, r_{a2} – promienie kół wierzchołkowych zębów,

r – promień zaokrąglenia wierzchołków zębów kół,

u – liczba przełożenia,

$\Delta\phi$ – kąt pomiędzy punktem wejścia zębów w zazębienie (p. 0),

a kolejnym wybranym punktem 1, 1 oraz 2 itd),

$\alpha = 20^\circ$ – kąt zazębienia,

m – moduł zazębienia,

z_1, z_2 – liczba zębów kół,

α_{10} – kąt, odpowiadający 1-emu punktowi linii przyporu,

α_{1s} – kąt, odpowiadający położeniu ostatniego punktu zazębienia zębów zębnika na linii przyporu,

α_{20}, α_{2s} – kąty, określające położenie pierwszego i ostatniego punktu zazębienia zęba koła zębatego na linii przyporu,

a_w – odległość między osiami.

W przypadku korekcji technologicznej należy uwzględnić parametry zazębienia korygowanego, a mianowicie promienie wierzchołków zębów:

$$r_{a1} = r_1 + (1 + x_1)m, \quad r_{a2} = r_2 + (1 + x_2)m \quad (4)$$

gdzie: $x_1 = -x_2$ – współczynniki przesunięcia zarysów; dla tego rodzaju korekcji uzębienia w wyżej podanych wzorach $r_{w1} = r_1, r_{w2} = r_2, \alpha_w = \alpha$.

Kąty przejścia od zazębienia dwuparowego ($\Delta\phi_{1F_2}$) do jednoparowego oraz znowu do dwuparowego ($\Delta\phi_{1F_1}$) w przekładni walcowej korygowanej o zębach prostych są obliczane tak:

$$\Delta\varphi_{1F_2} = \varphi_{10} - \varphi_{1F_2}, \Delta\varphi_{1F_1} = \varphi_{10} + \varphi_{1F_1} \quad (5)$$

gdzie: $\varphi_{1F_2} = \tan \alpha_{F_2} - \tan \alpha_w$, $\varphi_{1F_1} = \tan \alpha_{F_1} - \tan \alpha_w$, $\varphi_{10} = \tan \alpha_{10} - \tan \alpha_w$;

$$\tan \alpha_{F_2} = \frac{r_{w1} \sin \alpha_w - (p_b - e_1)}{r_1 \cos \alpha}, \tan \alpha_{F_1} = \frac{r_{w1} \sin \alpha_w - (p_b - e_2)}{r_1 \cos \alpha};$$

$p_b = \pi m \cos \alpha_w$ – podziałka uzębienia;

$$e_1 = \sqrt{r_{1s}^2 - r_{b1}^2} - r_{w1} \sin \alpha_w, e_2 = \sqrt{r_{20}^2 - r_{b2}^2} - r_{w2} \sin \alpha_w.$$

Kąt $\Delta\varphi_{1E}$ odpowiadający wyjściu z zazębienia będzie:

$$\Delta\varphi_{1E} = \varphi_{10} + \varphi_{1E} \quad (6)$$

gdzie: $\varphi_{1E} = \tan \alpha_E - \tan \alpha_w$, $\alpha_E = \arccos(r_{b1} / r_{1s})$.

W celu zmniejszenia trwałości obliczeń została wykorzystana blokowa metoda obliczeń, gdzie nie uwzględnia się w każdym obrocie kół zębatach (cyklu zazębienia) zmiana promieni krzywizny zarysów zębów, maksymalnych nacisków kontaktowych, szerokości pola styku, a po pewnej liczbie obrotów (bloku interakcji). W następnych bloku zmiany te są uwzględniane według wzoru (7), a według nowych wartości ρ_{kjh} przeprowadza się kolejny krok obliczeń wskazanych parametrów oraz zużycia liniowego zębów.

Zmienne promienie krzywizny ρ_{kjh} obliczają się zgodnie ze wzorem [2]:

$$\rho_{kjh} = \rho_{kj} + E_k \sum_{B_1}^{B_{\max}} D_{kjB} K_{kjB}^{-1}, \quad k = 1; 2 \quad (7)$$

gdzie: $k = 1; 2$ – numeracja kół zębatach (1 – zębniak, 2 – koło zębate),

B – liczba obrotów kół (rozmiar bloku cykli współdziałań zębów), przy których warunki styku pozostają stałe; rozmiar bloku może być wybrany następująco: $B = 1$ obrót – rozwiązanie dokładne, $B = n_1$ (obr./min), $B = n_1$ (obr./godz), $B = n_1$ obr. w ciągu 10 godz. itp.; B_1 i $B_{\max}$ – odpowiednio pierwszy oraz ostatni blok obliczeń,

E_k – bezwymiarowe stałe, zależne od wielkości zużycia dopuszczalnego h_{k*} zębów,

$D_{kjB} = K_{kjB}^2$ – stała, wartość której pozostaje niezmienną w bloku, zaś ulega zmianie w każdym następnym bloku.

Zmiana krzywizny zarysów zębów w wyniku ich zużycia w ciągu każdego osobnego bloku interakcji będzie:

$$K_{kjB} = 8 \sum_{j=1}^B h'_{kjn} / l_{kj}^2, \quad (8)$$

gdzie: $n = n_k = 1, 2, 3, \dots$ – liczba obrotów kół zębatych.

Jednostkowe liniowe zużycie h'_{kjn} zębów w dowolnym punkcie j zarysów oblicza się w każdym kolejnym obrocie bloku za czas t'_{jh} i podlega kumulacji. Szerokość pola styku $2b_{jh}$ ustała się w obrocie $n_k - 1$ lub bloku $B - 1$ zgodnie z (1). Więc:

$$h'_{kjn} = \frac{v_j t'_{jh} (fp_{jh\max})^{m_k}}{C_k (0.35R_m)^{m_k}} \quad (9)$$

gdzie: $v_j = v$ – prędkość poślizgu w kolejnych punktach j zarysów zębów;
 $t'_{jh} = 2b_{jh} / v_0$ – czas kontaktu przy przemieszczaniu się punktu j styku zębów na szerokości pola ich styku $2b_{jh}$ wzdłuż zarysu;
 $v_0 = \omega_1 r_1 \sin \alpha_t$ – prędkość przemieszczenia się punktu styku wzdłuż zarysu zęba;
 ω_1 – prędkość kątowa zębnika;
 R_m – doraźna wytrzymałość materiału przy rozciąganiu;
 C_k, m_k – wskaźniki odporności na zużycie materiałów w parze tribologicznej.

Prędkość poślizgu w zazębieniu oblicza się według następującego wzoru:

$$v_j = \omega_1 r_{b1} (tg \alpha_{t1j} - tg \alpha_{t2j}). \quad (10)$$

Długość cięciwy zastępującej ewolwentę pomiędzy punktami $j - 1, j + 1$ oblicza się według wzoru:

$$l_{kj} = 2\rho_{kjh} \sin \varepsilon_{kjh} = \text{const}, \quad (11)$$

gdzie: $\varepsilon_{kjh} = S_{kj} / \rho_{kjh}$ – kąt między punktami j i $j + 1$;

$$S_{kj} = \left| \frac{mz_k}{4} \left(\frac{1}{\cos^2 \alpha_{kj}} - \frac{1}{\cos^2 \alpha_{k,j+1}} \right) \cos \alpha \right| - \text{długość ewolwenty między}$$

punktami $j, j+1$;

α_j, α_{j+1} – kąty zazębienia wybranych punktów ewolwenty $j, j+1$;

$$\alpha_{1j} = \arctan(\tan \alpha_{10} + j\Delta\varphi), \quad \alpha_{1,j+1} = \arctan(\tan \alpha_{10} + (j+1)\Delta\varphi);$$

$$\alpha_{2j} = \arccos\left(\frac{r_{w2}}{r_{2j}} \cos \alpha_w\right), \quad \alpha_{2,j+1} = \arccos\left(\frac{r_{w2}}{r_{2,j+1}} \cos \alpha_w\right).$$

Więc po każdej interakcji lub bloku interakcji wszystkie parametry obliczeniowe będą zmieniać się, a mianowicie $h_{1j}, h_{2j}, \rho_{1jh}, \rho_{2jh}, \rho_{jh}, p_{jh\max}, 2b_{jh}, t'_{jh}$.

Dla przyjętej liczby obrotów n_{1s} zębatego oraz n_{2s} koła zębatego, którym odpowiadać będzie odpowiednia liczba bloków, zużycia sumaryczne h_{1jn} oraz h_{2jn} zębów w punktach j kontaktu obliczają się następująco:

$$h_{1jn} = \sum_1^{n_{1s}} h_{1jB}, \quad h_{2jn} = \sum_1^{n_{2s}} h_{2jB}, \quad (12)$$

gdzie: $n_{2s} = n_{1s} / u$, $h_{kjB} = \sum h'_{kj}$ – zużycie zębów w każdym bloku.

Resurs $t_{B\min}$ pracy przekładni dla liczby obrotów n_{1s} lub n_{2s} kół ustala się tak:

$$t_{B\min} = n_{1s} / 60n_1 = n_{2s} / 60n_2. \quad (13)$$

W uproszczonym przypadku zakładając, że naciski kontaktowe nie ulegają zmianie (rys.1a), resurs $t_{\min}$ przekładni przy dopuszczalnym zużyciu h_{k*} zębów oblicza się następująco:

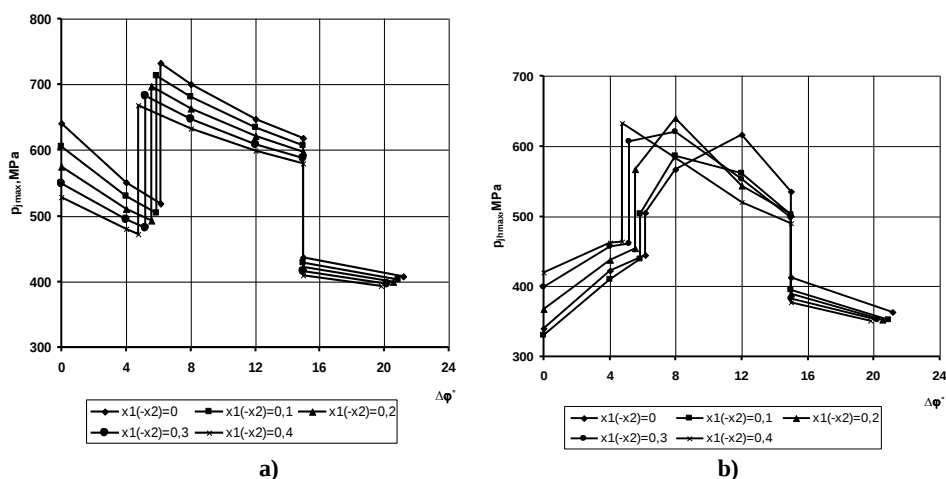
$$t = h_{k*} / \bar{h}_{kj}, \quad (14)$$

gdzie: $\bar{h}_{kj} = 60n_k h'_{kj}$ – zużycie liniowe zębów w punktach j ich zarysów w ciągu godziny pracy przekładni; minimalny resurs $t_{\min}$ będzie dla największego zużycia $\bar{h}_{kj}$ zarysu w tych punktach.

Rozwiązanie numeryczne przeprowadzono dla następujących danych: $z_1 = 24$; $b_w = 230$ mm; $P = 670$ kW; $K_g = 1,6$; $m = 16$ mm; $u = 4$; $n_1 = 400$ obr/min; $h_{1*} = 1,4$ mm – zużycie dopuszczalne zębów zębatki; $h_{2*} = 2,0$ mm – zużycie dopuszczalne zębów koła zębatego; $f = 0,05$ (tarcie graniczne); smarowanie – olej przekładniowy z lepkością kinematyczną $\nu_{+100^\circ} = 7...12$ cSt; współczynniki korekcji $x_1 = -x_2 = 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4$; $a_w = 960$ mm; $B = 2400000$ obrotów; krok $\Delta\varphi = 4^\circ$.

Materiały kół zębatych: zębnik – stal 38XNJA nawęglanie lub węgloazotowanie na głębokość 1,6...2,4 mm, 58 ± 3 HRC; $\tilde{N}_1 = 5,5 \cdot 10^6$, $m_1 = 1,9$; koło zębate – stal 55F (hartowanie objętościowe z wysokim odpuszczaniem), 280–321 HB; $C_2 = 0,4 \cdot 10^6$, $m_2 = 2,2$; $E = 2,1 \cdot 10^5$ MPa, $\mu = 0,3$.

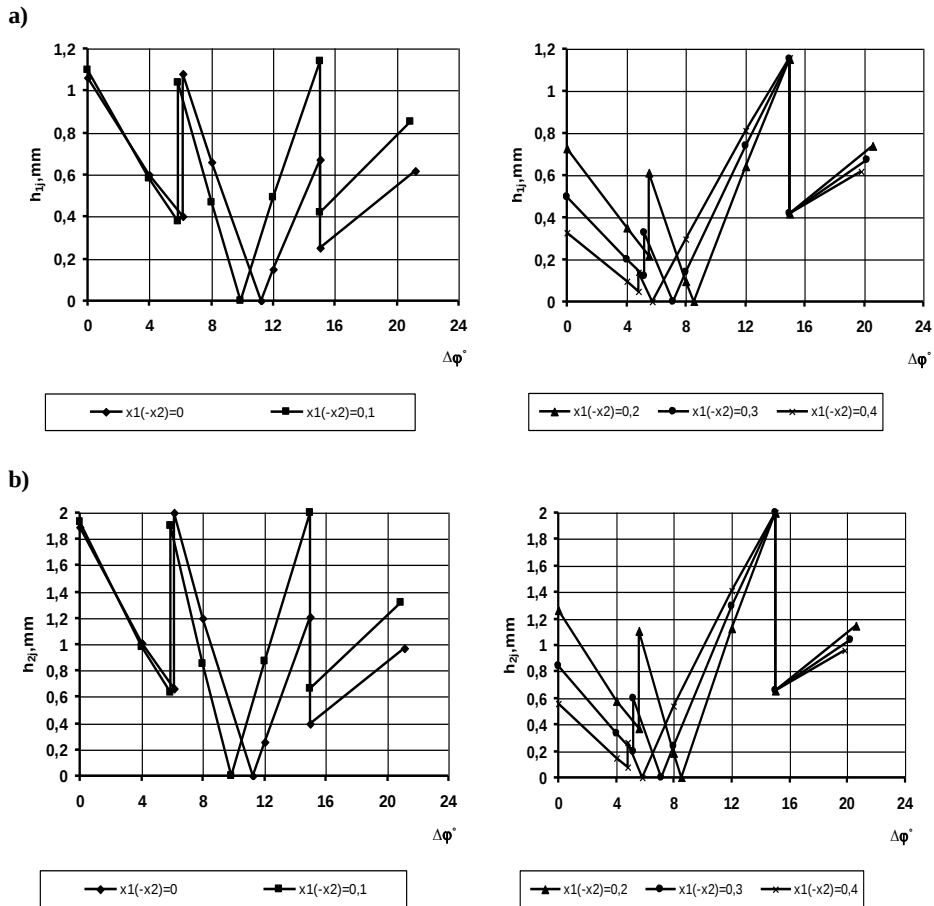
Wyniki rozwiązania zagadnienia przedstawiono na rys.1–4. Na rys.1a wskazano zależność wstępnych maksymalnych nacisków kontaktowych $p_{j\max}$ od kąta $\Delta\varphi$ obrotu zębatki w przypadku korekcji uzębienia. Natomiast na rys. 1b – maksymalne naciski tribokontaktowe $p_{jh\max}$ w punktach $j = 0, 1, 2, \dots$ odpowiadającym $\Delta\varphi = 0, 4^\circ, 8^\circ, \dots$, przy zużyciu dopuszczalnym h_{2*} zębów koła zębatego.



Rys. 1. Wstępne maksymalne naciski kontaktowe oraz tribokontaktowe w zazębieniu

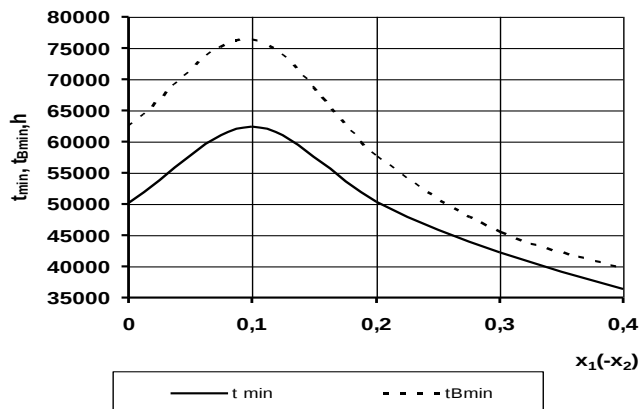
Największe maksymalne naciski kontaktowe powstają na wejściu w zazębienie jednoparowe (rys. 1a). Korekcja uzębienia powoduje obniżenie ich wielkości do 15%. W wyniku zużywania zębów naciski $p_{j\max}$ ulegają znacznej zmianie w pierwszej fazie zazębienia dwuparowego (rys. 1b). Natomiast w fazie zazębienia dwuparowego ich zmiana jest zróżnicowaną zależną od współczynników korekcji $x_1 = -x_2$ zębów. Jednak tutaj niezależnie od charakteru zmiany $p_{j\max}$ w wyniku zużycia największe naciski pozostają dość znacznej wielkości. W fazie drugiej zazębienia dwuparowego zmiany te są zdecydowanie mniejsze.

Przebieg zużycia liniowego h_{1j} zębów zębatki oraz h_{2j} zębów koła zębatego z uwzględnieniem korekcji uzębienia zależnie od kąta obrotu kół przedstawiono na rys. 2.



Zużycie zębów zależy od wartości współczynników korekcji. Gdy $x_1 = -x_2 = 0$ zużycie dopuszczalne zębów koła oraz maksymalne zużycie zębów zębatki osiąga się na wejściu w zazębienie jednoparowe. Zwiększenie współczynników powoduje, że zużycia te będą w punkcie wyjścia z zazębienia jednoparowego. W przekładni niekorygowanej zęby kół osiągają prawie jednakowe zużycie na wejściu w zazębienie dwuparowe i jednoparowe. W przypadku $x_1 = -x_2 = 0,1$ zużycie o równej wielkości występuje na na wejściu w zazębienie dwuparowe, jednoparowe oraz na wyjście z zazębienia jednoparowego. Zęby koła zębatego zużywają się o 1,75...1,85 razy szybciej zębów zębatki.

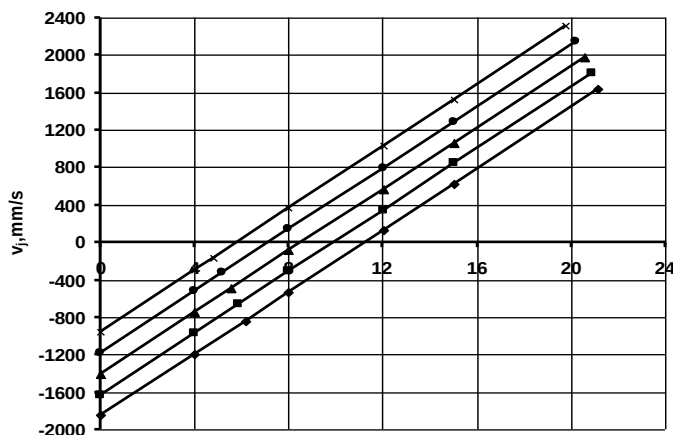
Na rys. 3 przedstawiono zależność resursu przekładni od współczynników korekcji: t_{min} przy zmianie krzywizny zarysów zębów na skutek zużywania obliczonego z wykorzystaniem blokowej metody obliczeń; t_{min} ustalonego z warunku $p_{j\text{max}} = \text{const}$.



Rys. 3. Resurs przekładni

Największy resurs będzie w przypadku współczynników korekcji $x_1 = -x_2 = 0,1$. W tym przypadku resurs przekładni jest większy o 22,4% w stosunku do przekładni niekorygowanej. Jeżeli uwzględnia się zmianę $p_{j\text{max}}$ w wyniku zużycia zębów, to resurs przekładni podwyższa się o 1,245...1,09 razy.

Prędkości poślizgu v_j ulegają zmianie w wyniku korekcji uzębienia (rys. 4).



Rys. 4. Prędkości poślizgu w zazębieniu

Obserwuje się jej zmniejszenie na wejściu zębów w zazębienie oraz zwiększenie na wyjściu z niego, co powoduje, że zużycie dopuszczalne koła zębatego w przekładniach z korekcją uzębienia wystąpi na wejściu z zazębienia jednoparowego.

PODSUMOWANIE

Według opracowanej metody z uwzględnieniem rzeczywistych warunków pracy przekładni przebadano: zmianę wstępnych maksymalnych nacisków kontaktowych p_{jmax} w trakcie interakcji zębów; ich transformację p_{jhmax} po zużyciu dopuszczalnym zębów koła zębatego; przebieg liniowego zużycia h_{1J} , h_{2J} zębów kół; wpływ korekcji uzębienia na minimalny ресурс przekładni tak przy stałych naciskach kontaktowych p_{jmax} , jak i ich zmianie w wyniku zużycia.

LITERATURA

- [1] CHERNETS M. V., JAREMA R. J.: *Generalized value method of teeth correction influence on resource, wear and contact durability of cylindrical involute gears*. Materials Science, no. 4, 2011, pp. 56–58.
- [2] CHERNETS M.V., YAREMA R.Y., CHERNETS Y.M.: *A method for the evaluation of the influence of correction and wear of the teeth of a cylindrical gear on its durability and strength*. Part 1, Service life and wear, Materials Science, no. 3, 2012, pp. 289–300.
- [3] CHERNETS M. V., YAREMA R. Y., CHERNETS Y. M.: *A method for the evaluation of the influence of correction and wear of the teeth of a cylindrical gear on its durability and strength*. Part 2, Contact strength, Materials Science, no. 3, 2012, p. 752–756.
- [4] PASTA A., MARIOTTI VIRZI G.: *Finite element method analysis of a spur gear with a corrected profile*. J. Strain Analysis, vol. 42, 2007, pp. 281–292.
- [5] ZWOLAK J., MARTYNA M.: *Analiza naprężeń kontaktowych i naprężeń zginających występujących w przekładniach zębatych power shift*. Tribologia, vol. 42, no. 3, 2011, s. 155–165.
- [6] ZWOLAK J., WITTEK M.: *Optimalizacja parametrów geometrycznych kół zębatych w aspekcie minimalizacji naprężeń kontaktowych*. Tribologia, vol. 45, no. 6, 2011, s. 283–291.

THE POSSIBILITY OF MODIFICATION THE PRODUCT IN ASPECT OF ITS DURABILITY IMPROVEMENT EXEMPLIFIED BY VASCULAR CLAMPS

Surgical instruments belong to an extensive group of medical makings. The complexity of human organism requires the usage of versatile utensils – both functional and geometrical. Their variety improves both the precision and comfort of the user; also, it has an enormous influence on the quality of surgeries or treatments performed with them. The surgical instruments are characterized by the irregularity and complexity of their exploitation. Moreover, they are used in a chemically active environment and are subjected to high temperatures. This is why the production of the utensils requires rigorous control and the usage of specially selected materials, in order to gain indefectible tools[6]. When a surgeon is about to perform an operation, he must be certain his instruments will not fail. He is responsible for the life and health of a human being. His skills as well as the quality of the utensils have enormous influence on the success of the surgery. Each product has to be unfailing. The situation in which an instrument gets damaged during the operation is unacceptable. The possibility of fracture formation on the surface of grasping and, a fortiori, working parts of a utensil cannot be tolerated. This is why their exploitation reliability is one of the most important qualities of the medical equipment [4;6].

1. A CLAMP CRILE TYPE AND ITS STRUCTURE

A clamp crile type is a utensil used for grasping and closing a blood vessel in order to stop bleeding during a surgery. This type of instruments appearing in different configurations of working part is depicted in the figure 1a. The diversity of its working parts, ergonomic build and proper quality of the

¹ Faculty of Fundamentals of Technology, Lublin University of Technology

² Faculty of Management, Department of Enterprise Organization, Lublin University of Technology

³ Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Lublin University of Technology

product decrease the difficulty in use. Vascular clamps possess working and grasping parts (rings). The former one has jaws with serration which are helping with stabilisation of blood vessels or tissue, preventing them from smashing.

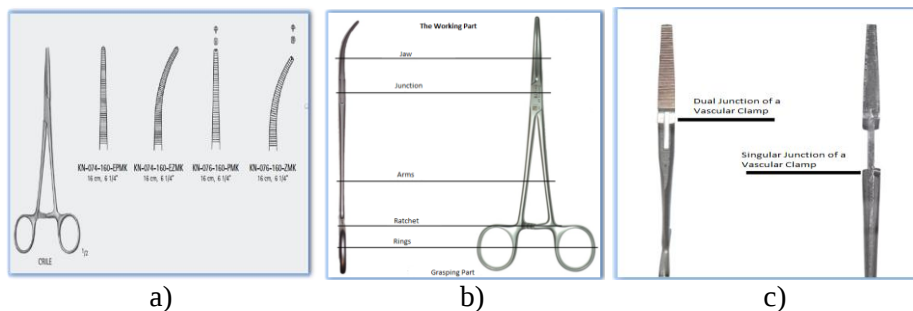


Fig. 1. a) Clamp – type crile – the division of its working part, b) The structure of a clamp c) The elements of a clamp, the structure of its junction [1]

Also, they have a junction linked by a rivet, by which both clamp's parts move relatively to each other. Due to that, it is possible to grasp and control the amount of strength to be used in order to open or close a utility. Another element, called 'ratchet', gears itself, so it would not get open autogenously after decreasing the pressure put on it, as shown in figure 1b [6]. A vascular clamp Crile type (figure 1b) consists of two parts and a rivet linking two of its halves. The same semi-finished product's several details take various shapes during the machining process. One of them has dual junction, through which a part with a single-junction is threaded in later stages of production (figure 1c). A semi-finished product in a form of drop forging, which constitutes an input material, is made of X20Cr13 steel. It is a material resistant to corrosion. It undergoes a mechanical, thermal and chemical treatment during the production process in order to provide the longest possible time of exploitation. The main stages of production are depicted in figure 2.

On the basis of production data taken from the system monitoring its course and all dislocations of details, the authors has spotted an abnormal tendency to clamps jaws' fracture. Those cracks disqualify an instrument from further use and decrease the company's income. This kind of damage appears as a result of finishing works after thermal processing.

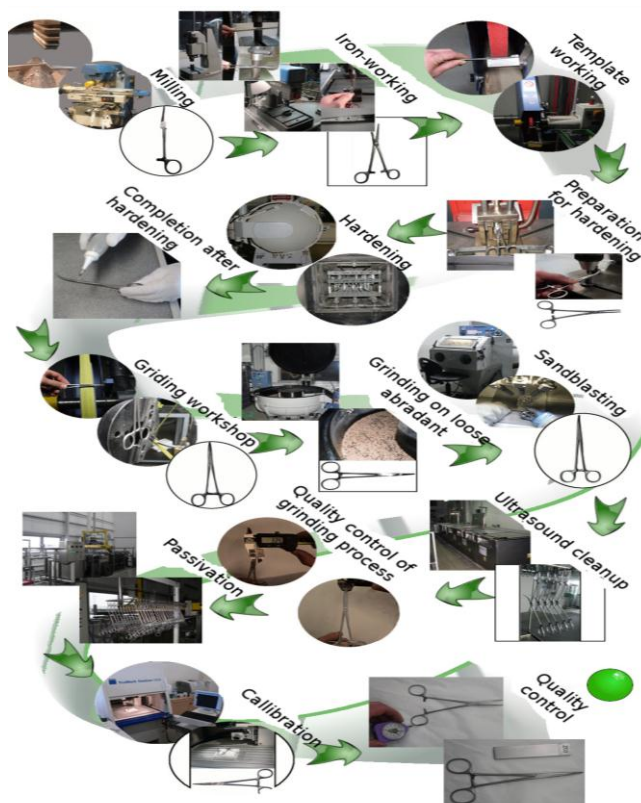


Fig. 2. A scheme of the main production stages

2. THE STAGES OF PRODUCTION PROCESS INFLUENCING THE PRODUCT'S IMPACT RESISTANCE

The production of a vascular clamp begins with the manufacturing process of forging semi-finished product in shape of flat steels. A material, heated to the plasticity temperature, undergoes the drop forging process. The next batch of forgings are annealed in order to get rid of stress after the forging process. The next stage is mechanical processing. A forging undergoes the milling process on the conventional moulder stations where individual parts of a clamp are processed. This operation is divided into processing sockets, each dealing with one of two halves a surgical utility. A production batch on a mechanical department usually consists of 300 pieces. During this stage a semi-finished product is constructed as a single junction. Unfortunately, due to its build in this stage a notch appears on each item. The device used to create a junction – a slotting mill (figure 3) – has an edge which makes a transition equal to 90° (figure 4). If jaws are merged with a junction, it may become a vulnerable spot in which fractures occur.



Fig. 3. Slotting mill – used to milling single junction clamps

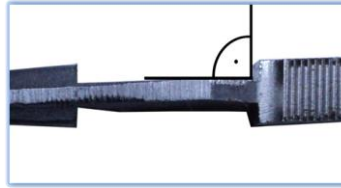


Fig. 4. The element of junction's geometry

Next phase consists of the montage of two milled semi-finished products. The first step is to determine their mutual collaboration and to link them with a rivet. Previously, the residue created in the process of milling, is removed. Next, the sharp edges are grinded with a file by making small phases. It makes the whole process, including installation and adjusting the elements, easier and more precise.

After the threading of a detail with the single junction through a dual one and closing the whole structure, details are being set accordingly to each other. The shanks and rings are straightened; the parts where the halves are leaning on each other, making proper folding impossible, are rasped. A worker tightens the jaws in a way that, while a ratchet is clenched, makes the ends of the jaws touch each other. During further closing of a utility, the jaws should close evenly. Performing this activity requires hammering the jaws bending them the direction of clamps' closing. The jaw changes its placement towards the junction. Next, a worker closes an instrument and hammers again in order to match the serration of both halves, thus slackens the previous deflection. The whole process results in multiple bidirectional load, which defines the fatigue of the components. It strains the durability of a junction and may cause further jaw fracture. After iron-working the details undergo thermal processing, during which the structure of steel changes from ferritic to martensitic. As the toughness of the material increases, so does its fragility. The details are hardened in the temperature of 960°C and then tempered in 300°C. The processed thermal materials are later on complemented. The hardening strains could cause deformations, which could change the way in which an instrument may perform. This is why a worker must restore its proper functions. Through hammering, which was mentioned before, heaviness of a junction and contact of the jaws are fixed. At this stage fractures on the jaws' surface appear.

3. THE COURSE OF RESEARCH AND ITS RESULTS

The mechanically processed semi-finished products were used during the research. Their shape and appearance match the details designed for production. In order to perform an investigation, there was a semi-product with a single junction chosen. Due to its construction, the element may endure lesser amount of load, so it is more susceptible to fractures. The samples were divided into five examination groups considering factors which may influence their impact resistance. For comparison purposes, the impact resistance's measurement results of normalised samples made of steel X20Cr13 with a "U" notch were presented (figure 5a). Those are shown on the basis of hardening furnace validation examining research by Aesculap Chifa Company.

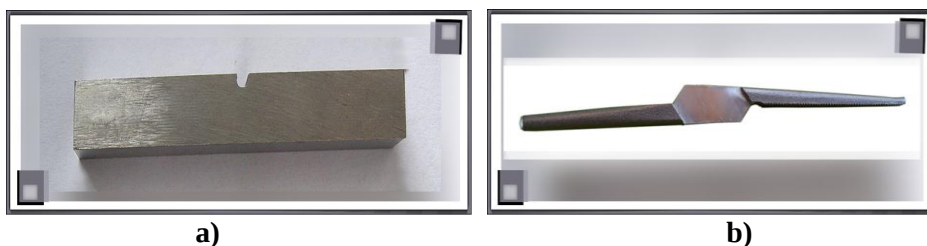


Fig. 5. a) A normalized sample used to test impact resistance from the validation of hardening furnace, b) A sample to examine impact resistance

According to the variability of parameters, eight groups were distinguished with eight samples in each of them. The number of samples with the highest hardness level were increased to ten. As a result of an investigation, one of them was rejected due to the fact that it was displaced while examined. The first stage of samples' preparation was to saw the residue after the milling process. The junction was treated with sandpaper with gradation level of 150. Next, the ring was cut off in the middle of the semi-finished product's arm in a way that the detail could fit into the bearing (figure 5b). Such prepared samples underwent thermal processing in a program, which performs automatically, accordingly to the set value of normal production course of the process with input charge (?). The next step was to measure the hardness of each sample. Details with hardness in range from 42,5 HRC to 43,4 HRC in order to perform the research. The subsequent group consisted of the products with hardness in range from 46,3 HRC to 47,4 HRC; they were chosen from the highest hardness scope after thermal processing. Later on, the influence of a notch on the impact resistance was checked out through removing it (removal of dimensional transition). The point where jaws and junction merge was sawn in a way that it minimized sharp transition. Also, previously annealed and thermally processed impact resistance samples were examined. The size of a cross-section in a most vulnerable place – a notch – equals 3,24mm x 4,28mm (figure 6, figure 7).

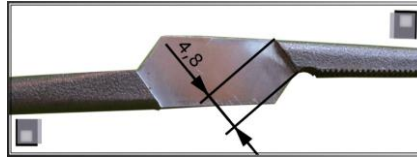


Fig. 6. Width of junction in the notch placement

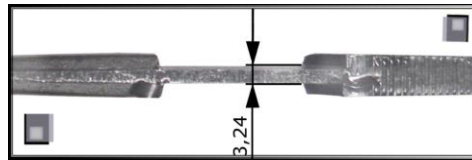


Fig. 7. Girth of the junction

The research was conducted at examining station with the use of Charpy's hammer. After utensil calibration several measurements were performed. Every three surveys of the of the instrument indication was verified basing on aseptic trial in order to gain appropriate results. The sample put into bearing was set in a way that the applied force was of perpendicular direction accordingly to clamp's axis and aimed in parallel to the junction's surface. This setting enabled a usage of an adjusted handle in a format of a lamina holding the examined object in appropriate position (figure 8). The sample was placed towards the hammer's blade in a way that the impact force focuses on a junction's most vulnerable spot.



Fig. 8. The placement of a sample in a bearing

The conducted research of impact resistance with the use of appropriately prepared samples was put in the tables. They also include a number of both samples and trials, so each shape, kind, look of fissure used to analyse the endurance and visual evaluation of the damage could be verified. For a comparable estimation, there were also used research results taken from normalised samples according to PN-79/H-04370. Before, in order to ensure the examining of accuracy,

each sample underwent hardness measurements. Then, their impact resistance was verified. The measurements results were calculated. The cross-section area value of notch placement transferring the load equals:

$$S_0 = 0,15228 \text{ cm}^2$$

After placing the results in a table, the workload used in order to break a sample was calculated; the same was done with their impact resistance using the condition presented below:

$$KC=K/S_0 \text{ [J/m}^2\text{]}$$

It is worth to mention that, according to the technological documentation of the product, its hardness during this stage ought to reach the range from 42HRC to 47HRC. The results were depicted in both figures and tables (table 1). A sample of 0 identification number did not undergo thermal processing.

Tab. 1. The results of normalized samples measurements considering impact resistance

L.p.	Sample number	Sample's fracture load K[J]	Sample's impact resistance KC[J/cm²]
1	8	24,5	49
2	7	26	52
3	3	26,5	53
4	2	28	56
5	6	28	56
6	4	28,5	57
7	5	30	60
8	1	30	60
9	9	38	76
10	0	49	98

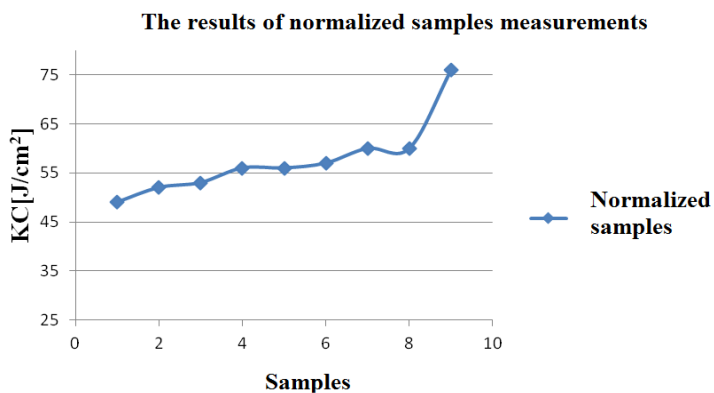


Fig. 9. A graph describing the impact resistance of normalized samples

The average value of the results presented in tables are shown in the scatter diagram above. The data was arranged in an ascending order.

Tab. 2. The average value of the results of impact resistance samples tests from the normal production process, toughness (42,5 HRC to 43,4 HRC)

L.p.	Trial number	K[J]	KC [J/cm ²]
1	2	5,30	34,79
2	1	5,79	38,01
3	4	5,89	38,65
4	6	5,89	38,65
5	5	5,98	39,30
6	3	6,08	39,94

Tab. 3. The average value of the results of impact resistance tests samples with increased toughness (46,3 HRC to 47,4 HRC)

L.p.	Trial number	K[J]	KC [J/cm²]
1	2	4,32	28,35
2	3	4,91	32,21
3	4	5,00	32,85
4	5	5,30	34,79
5	6	5,40	35,43
6	7	5,49	36,08
7	1	5,79	38,01
8	8	5,98	39,30
9	9	6,08	39,94

Tab. 4. The average value of the results of impact resistance tests samples with minimalized influence of notch (toughness in range from 42,5 HRC to 43,4 HRC)

L.p.	Trial number	K[J]	KC [J/cm²]
1	4	6,28	41,23
2	7	6,38	41,87
3	2	6,47	42,52
4	5	6,67	43,81
5	6	7,46	48,96
6	1	7,65	50,25

Tab. 5. The average value of the results of impact resistance tests samples after the annealing process, (toughness in range from 42,5 HRC to 43,4 HRC)

L.p.	Trial number	K[J]	KC [J/cm²]
1	4	5,89	38,65
2	3	6,18	40,59
3	1	6,28	41,23
4	7	6,38	41,87
5	2	6,47	42,52
6	5	6,67	43,81

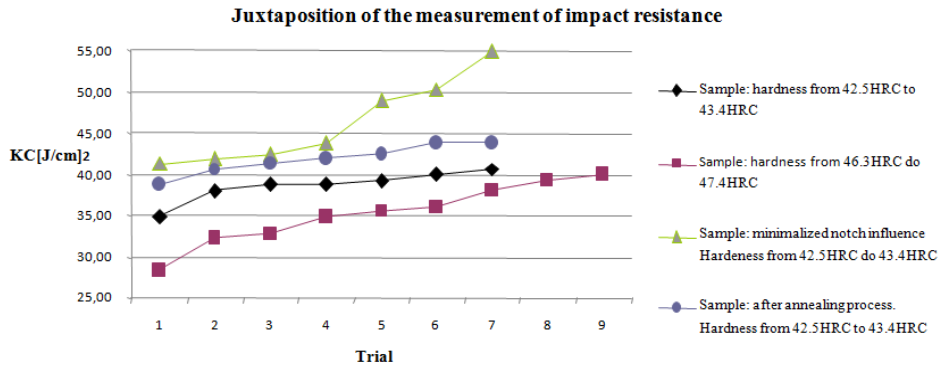


Fig. 10. A graph depicting the measurement of impact resistance

In order to verify the accuracy of details execution and the elimination of neuralgic production stages, iron-works underwent an analysis. The first step was to mount instruments – a manipulation during which a proper contact of clamp's jaws is set. The strained part was loaded due to which it was deformed in the most vulnerable spot. The working load causes strains in jaws junction. If serrations do not touch each other after closing the ratchet, causing the lack of contact and "glaring" of the jaws, a worker will try to restore its proper functionality. Hammering the closed jaws forces them to fit each other; this leads to creating additional strain. While installing, there may occur situations in which a jaw is bent in secured with aluminium slip jaws vice. Multiple jaw setting may be treated as fatigue. The used force may be destructive for such a small junction's cross-section. In order to verify this possibility, an impact resistance test of cyclically loaded samples has to be performed. To do this, the semi-finished products were gathered and later loaded symmetrically. As a result of its impact, the jaw bends to the arm. The radius was determined by the size of singular arm deflection during the montage. A worker who not only performed the iron-works, but also installed semi-finished products, shared the data from before and after montage. Thanks to it, the size of deflection was identified (figure 11). It equals $0,8\text{mm} \pm 0,3\text{mm}$. Next, through jaws placement in a handle, simulations of clamp's cyclic loads were made. Then, a utility was loaded accordingly to the deflection value determined during the montage stage. Later on, an antithetical force was put on an instrument in order to simulate a jaw's restrain. It is done by hammering a closed jaw.



Fig. 11. Cyclic load performance

The number of load cycles impacting the samples was changed. In order to verify the influence of micro damages in the notch placement, a number of bilateral loads was performed. The thermally processed samples, made along with production sets, underwent impact resistance tests. Its results are depicted in table 6.

Tab. 6. The average value of the results of impact resistance tests of cyclically loaded samples (toughness in range from 42,5 HRC to 43,4 HRC)

Number of loads	Trial 1		Trial 2		Trial 3	
	K [J]	KC [J/cm ²]	K [J]	KC [J/cm ²]	K [J]	KC [J/cm ²]
5 cycles	3,92	25,77	4,41	28,99	4,71	30,92
10 cycles	2,45	16,11	2,45	16,11	2,84	18,68
15 cycles	0,98	6,44	1,28	8,37	1,67	10,95
20 cycles	3,92	25,77	0,88	5,80	0,78	5,15

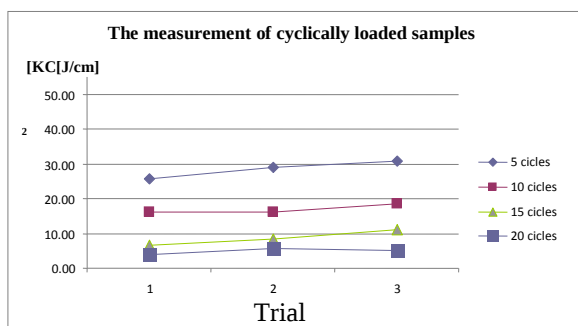


Fig. 12. A graph depicting the measurements results of cyclically loaded samples

The graph shows average results of impact resistance on the basis of loaded samples, depicting the elements joining stage. During the production process a worker assembles the details as a result of one trial. However, sometimes lack of experience may lead to a clamp being set several times. Increasing number of straining and restraining loads working on a jaw may have a negative influence on a clamp's impact resistance and its future exploitation properties.

After the tests, the samples were gathered for visual examination. Chrome steel used in the vascular clamps production process has proper features after thermal machining. Through reduction of the grain size, its toughness and durability increases; its plasticity and impact resistance merit falls down. As a result of sudden loads put on samples while testing on Charpy's hammer, the jaw breaks; the fissure's edges become sharp and fragile (figure 13 a, b, c).

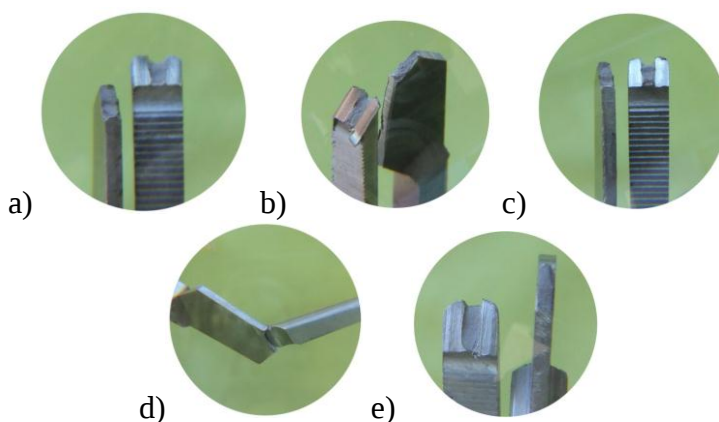


Fig. 13. a) Fracture of a sample with toughness 43HRC; b) Fracture of a sample with toughness 47HRC; c) Fracture of an annealed sample; d) A sample with eliminated influence of a notch; e) A sample submitted to 10 cycles of loads

The sample measurement with eliminated notch influence shows an increased tolerance on load impacts. What is depicted in figure 13d is that the hammer did not manage to break it completely. The strain accumulation was impossible due to the fact that they spread evenly. It is proven by fissure's edge not creating a straight line along a jaw - junction transition, but instead of it – a rounded one. A sample, which underwent cyclic load session, is more vulnerable to a dynamic load. In the figure 13e one may observe fatigue fracture. It is showed that the material started to break because of the external forces. It is visible that the cross - section area is decreased, in contrary to the notch influence. Accordingly to the tests results, it drastically worsens an instrument's durability. During the initial stage of the research, measurements of clamps' impact resistance were performed, considering the force working perpendicularly to the junction. This method would lead to show the junction's endurance in relation to the load put on it.

A clamp, while the montage on iron-working posts or completion stage, should not be as suddenly loaded as during this part of examination. But such situations cannot be excluded and this is why an attempt to examine junction's durability has been made. This is why the clamp's junction surface should be directed towards hammer's blade. The force put on a sample placed on a hammer's bearing has an effect in the middle of a junction, not on a notch. This happens because the construction of a measurement device and the shape of a sample. Due to that, a precise examination was impossible to perform, but from the other point of consideration, it enabled to distinguish the differences in case of the influence of an impact outside the notch. Yet the fissure always appeared at the jaw - junction transition. The results depicted in table 7 are aiming to compare the methods presented above. Also, they point out the way the impact resistance changes accordingly to the force working on a given cross - section.

Tab. 7. The average value taken from the results of impact resistance samples' measurements loaded perpendicularly to the junction surface

L.p.	Trial number	K[J]	KC [J/cm ²]
1	9	5,00	32,85
2	1	5,49	36,08
3	5	7,26	47,67
4	2	7,46	48,96
5	8	7,46	48,96
6	3	8,24	54,11
7	4	9,03	59,27
8	7	9,03	59,27
9	6	9,61	63,13

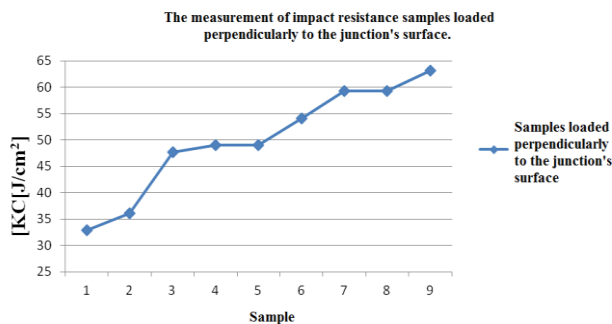


Fig. 14. A graph depicting the measurement of impact resistance samples loaded perpendicularly to the junction's surface

The analysis depicting the measurement results proves that the samples with eliminated notch impact through radius are more resistant to mechanical damage. The strains appear to spread evenly. Due to this, the utility's durability increases.

4. SUGGESTIONS CONCERNING THE CHANGES DURING SURGICAL UTENSILS PRODUCTION

The research results point out the correctness of thermal processing and increased impact resistance in case of the samples with hardness equal to 43 HRC. They should meet the endurance requirements demanded during each production stage. It is possible to decrease the probability of fissures appearance on the jaw surface, thus minimizing the number of factors influencing its impact resistance. A change of junction's structure plays the biggest role. As a result of mechanical processing with a use of doublespinner shaper and creating the junction's surface with slotting mill, a sudden junction – jaw transition is made. The first proposal is to use a milling cutter with a properly adjusted blade. It would round the surfaces, thus eliminating the strain accumulation. After such manipulation, the second part of a clamp – that is an arm with a dual junction – has to be thoroughly prepared. A chamfering of dual junction's internal edges may be required, so the material would not lean against the rounded part. The time needed for processing does not change, thus the costs of upgrading it are not going to rise. Only the way of milling cutters sharpening is going to change.

The material, which is used to create a vascular clamp, undergoes a matrix forging process, during which it is heated in order to increase the plasticity of steel. Moreover, as a result of squeezing and cooling, it is hardened. The forging hardens because required cooling temperature is reached quickly. In case of chrome steel it is done by air cooling. This is why the details after forging process undergo annealing operation. The charge put into an annealing furnace may appear to be defective, if internal temperature distribution is taken into consideration. This possibility increases when vaster number of details constitutes the charge. It may result in further differences in demanded impact resistance.

An attempt to register the value of samples hardness deflections after thermal machining ought to help in estimating the stability of process parameters; this should be done in order to point out the possible need of improvement. The hardness research is based on a statistic quality control performed after hardening process. With a help of Rockwell's hardness two items from each production set is tested. The registration and analysis of the hardness measurement results would help to distinguish the changes which could influence the quality of a product. Possible variables consist of parameter deflection of a provided

material used to produce a clamp's forging, the stability and precision of both measuring and adjusting devices used to control a hardening furnace.

In order to keep the production at a high level, it is essential to verify and register its quality and competence of the workers responsible for the manufacturing performance on the creation. To support the quality management, particular systems are used. It may be exemplified by ISO standards evaluating the topics of Human Resources and Production Management. These systems are used in order to register the level of production errors. The workers are being trained to perform the actions, during which the impact resistance can be decreased.

5. SAMPLES EXAMINATION AFTER CHANGES IMPLEMENTATION AND ITS RESULTS

After the results analysis of so far performed research, it is confirmed that there is a possibility of implementing at least two advantageous changes in vascular clamps production process. With a consideration of those assumptions, another samples were made. They underwent the profile milling process. Because of technological issues it was possible to create a rounding radius in the jaw – junction transition equal to $R=1\text{mm}$. It could be done as a result of adequately profiled milling cutter's cutting edge. Using it allowed to create a junction's surface with a universal milling machine, thus the notch's influence was restrained. The durability increased due to avoiding of strain accumulation. The milling cutter, which was used to produce the samples, initially was withdrawn because of its level of expenditure. For research purposes, it was possible to improve the quality of its blades. Due to this, the milling cutter could be used in a universal milling machine. The previous damage was inflicted by the lack of effective sharpening and utilizing it to clamps production

Two most efficient methods of quality improvement were executed in order to increase the level of samples durability. Firstly, they underwent the annealing procedure; later on were hardened and cooled down accordingly to the usual production process. Through the measured parameters of a hardening furnace verification, the analysis of thermal processing accuracy was performed. Samples hardness was measured directly after the machining; the results were in range from 42,5HRC to 43,8HRC. The values suited the product's technological documentation. Also, the impact resistance tests were performed; they point out the improvement of material properties and the importance of implemented changes. The measurement results are depicted in table 9. Graph 15 shows the comparison of impact resistance outcome.

Tab. 2. The average values of the measurement results of impact resistance samples after implementing the changes (toughness of clamps's elements in range from 42,5 HRC to 43,8 HRC)

L.p.	Trial number	K[J]	KC [J/cm2]
1	9	6,28	41,23
2	1	6,52	42,84
3	5	6,57	43,16
4	2	6,67	43,81
5	8	6,67	43,81
6	3	6,77	44,45
7	4	7,01	46,06
8	7	7,06	46,38

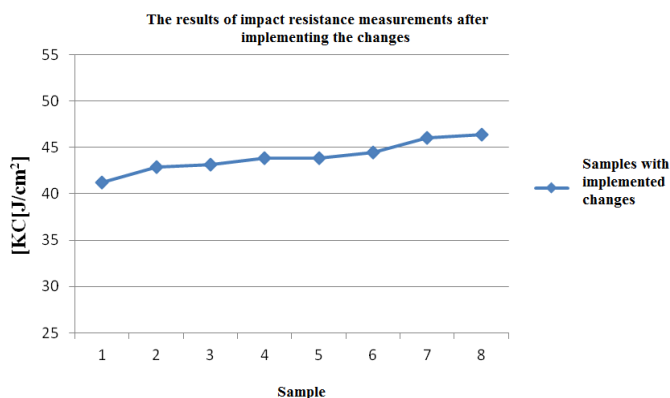


Fig. 15. A graph depicting the results of impact resistance measurements after implementing the changes

6. SUMMARY AND CONCLUSION

The production of surgical instruments, which fits the ISO requirements, demands the use of appropriate procedures and quality control. This includes process documentation supervision, regarding the parameters or a worker's actions. A quality control is a specific production stage, aiming at confirming the compatibility with documentation. Some of the utilities' properties may be assessed only by specific tests. Often, just one examination is enough to determine the range of quality improvement and the properties of the detail after machining process. It includes: metallographic steel examination, impact resistance analysis

or temperature distribution in a furnace. This sort of examination should be performed regularly in order to ensure the product's quality and meet with ISO expectations. These tests allow to see both the size of devices parameters and the quality of the material provided by the suppliers.

Conducting the impact resistance research of the prepared samples allowed to examine the implied modifications and their efficiency a vascular clamps production. Although this way of production quality control may be performed as a single test, it cannot function in a regular way. As the impact resistance measurement proves, increasing the material's durability has a bad influence on its impact resistance. A clamp's resistance increases against expenditure when rubbing; however, it becomes more vulnerable to fractures. This is why samples with hardness in range between 42,5HRC and 43,4HRC show higher tolerance on impact resistance loads. The given hardness scope is both compatible with production regulations and beneficial as far as the utility's endurance is concerned.

Geometrical changes, proposed by the authors, as a result of the research have positive influence on the impact resistance of the samples. It concerns mostly the way in which the instrument is constructed, as it decrease the strain acceleration. As a result, the number of defective products falls down.

The annealing process standardises the steel structure. Also, the utility's tolerance on unexpected impact load improves. On the other hand, after the forging process it is hard to proceed with an easy and precise annealing. The registration of the thermal machining course allows to limit the parameters changeability. What is more, the structure of the material remains the same, what results in further quality improvement.

Cyclic loads vastly influence the reached impact resistance of an analysed sample. The results of the measured samples show that even just five cycles of variable loads during the montage process may significantly injure the homogenous material structure, thus decreasing the durability of a product.

REFERENCES

- [1] AESCULAP CHIFA: *Katalog narzędzi chirurgicznych*. Wyd. Wrzesień, 2009.
- [2] DOBRZAŃSKI L. A.: *Podstawy nauki o materiałach*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2012.
- [3] GAWLIK J.: *Metody i strategie nadzorowania jakości wyrobów*. Wydawnictwo Wrocławskiej Rady FSNT NOT, Wrocław 2009.
- [4] GIEŻYŃSKA-DOLNA M., ADAMUS J., SZYPROWSKI J., SOBOCIŃSKI M.: *Inżynieria biomateriałów. Odporność na zużycie narzędzi medycznych*. Nr 38–42/2004.
- [5] PASZENDA Z., TYRLIK-HELD J.: *Instrumentarium chirurgiczne*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2003.
- [6] POLSKA AKADEMIA NAUK, KOMITET BUDOWY MASZYN: *Zmęczenie i mechanika pękania*. Wydawnictwo Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy, 2008.
- [7] SOBCZYK M.: *Statystyka*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2002.

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ В УСЛОВИЯХ МЕХАНООБРАБАТЫВАЮЩИХ УЧАСТКОВ ПЛАВУЧИХ РЕМОНТНЫХ МАСТЕРСКИХ

1. АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ

При ремонте морских и речных транспортных средств широкое применение находят такие передвижные механические комплексы, как плавучие ремонтные мастерские (ПРМ), на палубах которых размещены различные участки, в том числе и механообрабатывающие, включающие практически все виды станочного оборудования. Особенностью эксплуатации указанного оборудования является наличие вибраций, вызванных действием различных источников, приводящее к снижению точности и чистоты обработки, а также и к другим нарушениям технологических процессов. Наличие колебаний в отклонениях расположения шероховатости поверхности, объясняются возмущающими воздействиями в технологических процессах, нестабильностью технологической системы за счет изменения внешних факторов, часть из которых не контролируется в процессе обработки. Эта проблема особенно актуальна для условий работы такого высокоточного технологического оборудования в ПРМ, как шлифовальные станки.

Целью работы является повышение качества обработки при шлифовании путем снижения уровня вынужденных колебаний станка за счет повышения эффективности виброизоляции его несущей системы на основе исследований процесса обработки в условиях ПРМ и с учетом мероприятий, принимаемых на этапах проектирования.

¹ Севастопольский государственный университет ул. Университетская 33, г. Севастополь, e-mail: khao@list.ru, sergbratan@gmail.com

2. МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Общая модель формирования технологической системы шлифовального станка с учетом поставленной цели представлена на рис.1.

Повышение точности шлифования за счет повышения эффективности виброизоляции станка в условиях ПРМ может быть достигнуто при условии выполнения следующих этапов (рис. 2).

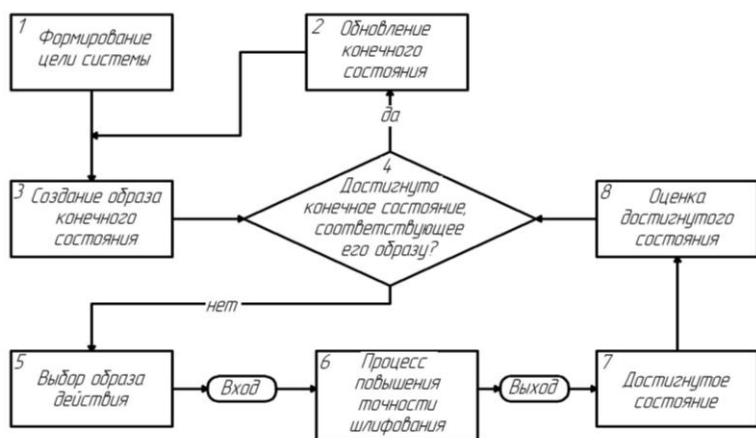


Рис. 1. Общая модель формирования рациональной технологической системы шлифовального станка

На первом этапе необходимо выполнить анализ вибрационных взаимодействий станка в условиях работы ПРМ [1, 2]; на втором этапе – разработать математическую модель динамической системы станка [3]; на третьем – определить динамические свойства и внешние воздействия от другого оборудования и окружающей среды, передаваемые через поверхность палубы несущей системе станка; на четвертом этапе необходимо выполнить морфологический анализ системы виброизолирующего устройства шлифовального станка; на пятом – провести оценку надежности синтезированных рациональных вариантов виброизолирующих устройств; на шестом – выполнить структурно-параметрическую оптимизацию этих устройств; на седьмом этапе – разработать рекомендации по повышению точности процесса шлифования в условиях ПРМ на основе высокоэффективных виброизолирующих устройств.

При системном анализе динамической системы оборудования ПРМ кроме воздействий внешнего оборудования, характерных для работы в стационарных условиях участка (цеха), таких как компрессоры, вентиляторы, насосы, транспортно-загрузочные устройства, создающих

гармоническое воздействие на основание с частотой вращения приводных двигателей ($f = 12...48,5 \text{ с}^{-1}$) и оборудование, создающее импульсное воздействие на основание – прессовое, долбежные и строгальные станки, необходимо учитывать такие воздействия внешней среды, как колебания водной поверхности, передающие вибрационные воздействия через плавучее основание и поверхность палубы на оборудование.

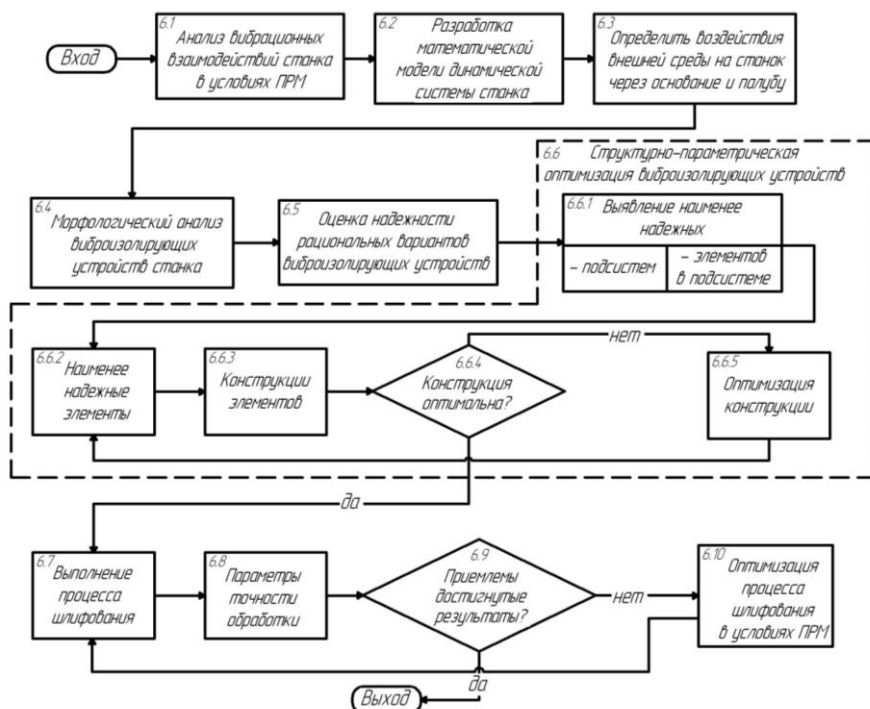


Рис. 2. Алгоритм повышения точности процесса шлифования в условиях ПРМ

При декомпозиции механической обработки в ПРМ выделяют подсистемы: «Источник колебаний» и подсистема «Объект виброзащиты», которые соединены между собой связями, вызывающими колебания объекта от динамических воздействий. Знакопеременные напряжения, вызванные вибрационными воздействиями, приводят к накоплению повреждений в материале, что вызывает появление усталостных трещин и разрушения. Кроме усталостных разрушений в механических системах наблюдаются такие явления, как ослабление неподвижных соединений, смещение сопряженных поверхностей соединений деталей машин. При этом происходит изменение структуры поверхностных слоев сопрягаемых деталей, их износ и, как результат, уменьшение силы трения в соединении, что вызывает изменение диссипативных свойств объекта, смещает его собственные частоты и т.п.

Так, в системе металлорежущего станка, например, плоскошлифовального, при его работе происходят сложные вибрационные воздействия, как стационарные, так и нестационарные, в результате колебательных процессов (кинетических и силовых). Можно предположить также наличие ударных воздействий – механических кратковременных в результате работы внешнего оборудования одновременно с процессом обработки, а также длительного действия за счет качки при колебаниях водной поверхности, передаваемых плавучим основанием через поверхность палубы технологическому оборудованию.

Период работы оборудования должен обеспечиваться удержанием плавучей ремонтной мастерской в заданном месте в условиях воздействия внешней среды – ветра, течения и морского волнения. В случае прекращения мер по удержанию, возмущающие силы могут привести к приостановке работ, к аварийным ситуациям и к выходу из строя технологического оборудования

Для обеспечения работоспособности оборудования необходимо обеспечивать возможность компенсации колебаний создаваемых технологическим оборудованием вследствие смещений плавучей ремонтной мастерской в результате внешних возмущений, которые определяются сезонными условиями заданных акваторий. В частности, скорость течения может достигать 1,5 м/с, степень морского волнения – 5...6 баллов, скорость ветра – 25 м/с и более. Стабилизация плавучего основания может быть частично осуществлена с достаточной степенью точности традиционными методами - успокоителями качки (цистернами со свободными поверхностями, расположенными вдоль бортов и сообщающихся между собой через устройства, поглощающие энергию потока перетекающей жидкости; управляемыми или неуправляемыми скуловидными килями или рулями).

На плавучее основание ПРМ воздействуют возмущающие силы ветра, течения и морского волнения. Воздействие ветра может быть оценено путем измерения скорости и направления ветра румбоаномоментами, установленными на плавучем основании, и расчета аэродинамических сил по известным соотношениям, подробно рассмотренным в работе [4].

Проведенный анализ и декомпозиция системы станка позволили выявить подсистемы и связи между ними, вызывающие колебания объекта под действием сил динамических воздействий.

Для определения динамических характеристик несущей системы, а именно, амплитудно-частотных и амплитудно-фазовых частотных характеристик, необходимо наличие динамических моделей технологической системы станка, которые строятся на основе конкретной расчетной схемы.

Одна из предлагаемых схем [2] позволяет проиллюстрировать динамику перемещений центров круга, заготовки и изменения фактической глубины резания в процессе круглого шлифования.

Повышение качества обработки деталей непосредственно связано с необходимостью ослабления вынужденных колебаний станка, передаваемых через поверхность палубы от внешних источников. Как правило, на палубах плавучих ремонтных мастерских фиксация станков обеспечивается фундаментом, который не обеспечивает достаточного уровня виброизоляции вследствие значительных колебательных воздействий, как от внешнего оборудования, так и от внешней среды через плавучее основание и поверхность палубы.

Для поиска рациональных технических решений по конструкции виброизолирующих устройств станка используем метод морфологического анализа, достаточно полно разработанного для решения технических задач, в частности проектирования станков, их узлов и механизмов [5].

Однако, для нашего случая этот метод в чистом виде использовать невозможно из-за очевидных недостатков его последнего этапа- выбора рационального варианта, при котором не учитываются реальные условия функционирования виброизолирующих устройств.

Поэтому морфологический анализ, базирующийся на последовательном переборе возможных вариантов элементов виброизолирующего устройства, принимаем в качестве аппарата на этапе создания рациональной ТС шлифовального станка для формирования множества структур системы виброизолирующего устройства (рисунок 3) и оценки этих вариантов по укрупненным показателям. Для этого воспользуемся построением морфологической матрицы (таблица 1), подробно рассматривая признаки и характеристики подсистем и элементов, а также выявляя связи между ними.

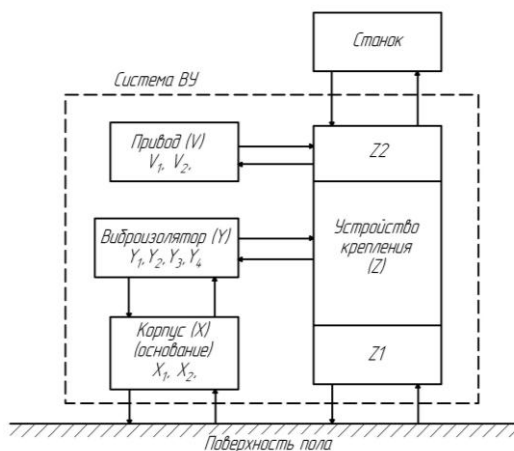


Рис. 3. Структурная схема системы виброизолирующего устройства (ВУ)

Таб. 1. Морфологическая матрица системы виброизолирующего устройства

Подсистема	Признаки	Элемент/Свойство
1	2	3
Корпус (X) (основание)	X1. Форма	X ₁₁ Диск
		X ₁₂ Цилиндр
		X ₁₃ Квадрат
		X ₁₄ Призма
		X ₁₅ Корпус
		X ₁₆ Пирамида
		X ₁₇ Комбинированный
	X2. Материал	X ₂₁ Металл
		X ₂₂ Пластик
		X ₂₃ Углеродное волокно
		X ₂₄ Другие неметаллы
Виброизолятор (Y)	Y1. Материал	Y ₁₁ Резина
		Y ₁₂ Капролон
		Y ₁₃ Полиуретан
		Y ₁₄ Эластомер
		Y ₁₅ Металл
		Y ₁₆ Другие
	Y2. Форма	Y ₂₁ Цилиндр
		Y ₂₂ Тор
		Y ₂₃ Конус
		Y ₂₄ Спираль
		Y ₂₅ Тарелка
		Y ₂₆ Переменного сечения
		Y ₂₇ С внутренней полостью
		Y ₂₈ Усечённой формы
		Y ₂₉ В виде мембраны
		Y ₂₁₀ В виде поршня
		Y ₂₁₁ Другие
	Y3. Рабочее тело	Y ₃₁ Масло
		Y ₃₂ Воздух
		Y ₃₃ Отсутствует
	Y4. Принцип действия	Y ₄₁ Растяжение-сжатие материала
		Y ₄₂ Изгибные деформации
		Y ₄₃ Перемещение рабочего тела
Устройство крепления (Z)	Z1. К полу	Z ₁₁ Механическое
		Z ₁₂ Жёсткая фиксация
		Z ₁₃ Отсутствует
	Z2. К станку	Z ₂₁ Механическое
		Z ₂₂ Жёсткая фиксация
		Z ₂₃ Упруго-механическая фиксация

После заполнения морфологической матрицы перейдем к синтезу вариантов структуры виброизолирующего устройства. Методика поиска оптимальной структуры системы при заданных требованиях состоит в следующем. Вначале из множества признаков $n = 1, 2, \dots, N$ подсистемы «корпус» (X), который имеет следующие признаки – форма, материал, выделим наиболее приемлемые элементы для создания виброизолирующего устройства (ВУ).

При синтезе варианта, ВУ применимы различные типы перечисленных элементов, которые обеспечат правильное функционирование системы, но имеют различные характеристики (надёжность, габаритные размеры, масса, стоимость).

Продолжение таблицы 1

Подсистема	Признаки	Элемент/Свойство
1	2	3
Привод (V)	V1. Вид привода	V ₁₁ Электромагнитный
		V ₁₂ Гидравлический
		V ₁₃ Пневматический
		V ₁₄ Комбинированный
		V ₁₅ Ручной
		V ₁₆ Отсутствует
	V2. Вид передачи	V ₂₁ Непосредственно
		V ₂₂ Рычажной системой
		V ₂₃ Другие

Обозначение и расшифровка параметров X_{nm} , Y_{kl} , Z_{df} , V_{qw} для виброизолирующего устройства приведены в морфологической матрице, представленной в таблице 1. Характеристики элементов из указанной таблицы выбираем в качестве основы для построения графа на рис. 4, характеризующего множество возможных вариантов подсистем ВУ, которое равно числу путей в графе.

С учётом большого количества вариантов синтез решения осуществляем, начиная с выбора вариантов подсистем, включая всё более и более существенные признаки. Кроме того, следует руководствоваться списком технических требований, определяющихся в первую очередь свойствами синтезируемой системы.

В качестве примера зададимся конкретными свойствами технологической системы круглошлифовального станка 3Г71М, эксплуатируемого в условиях ПРМ:

- масса - 3400 кг;
- операция – плоское шлифование;
- диапазон частот собственных колебаний – $f_z \leq 20$ Гц;
- диапазон частот вынужденных колебаний – $f \leq 10$ Гц.

Вначале осуществляем выбор вариантов подсистемы «корпус».

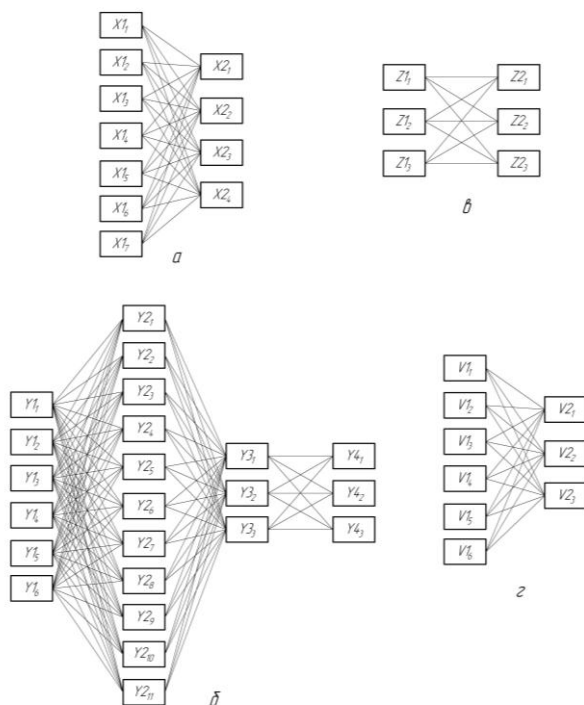


Рис. 4. Графы возможных структурных вариантов подсистем виброизолирующего устройства: а – корпус (X), б – виброизолятор (Y), в – устройство крепления (Z), г – привод (V)

Проводим выбор требований, предъявляемых к корпусу виброизолирующего устройства с учётом его основных функций, а также качественных показателей K_i^I , характеризующих технологичность, прочность, себестоимость.

Таковыми требованиями являются:

- прочность (повышенная – $K_1^I = 1$, высокая – $K_1^I = 0,75$, средняя – $K_1^I = 0,5$);
- технологичность (высокая – $K_2^I = 1,0$, низкая – $K_2^I = 0,5$);
- себестоимость (высокая – $K_3^I = 0,5$, средняя – $K_3^I = 0,75$, малая – $K_3^I = 1,0$).

По формуле:

$$K_c = 1 - \sum_{i=1}^n \frac{1 - K_i}{n} \quad (1)$$

Определяем суммарный качественный показатель для каждой из возможных структур. Наибольшие численные значения ($K_x = 0,93$) принадлежат синтезированному варианту:

$$X' = X_{117} \left| \begin{array}{c} X_{11} \\ X_{12} \end{array} \right| \rightarrow X_{21}. \quad (2)$$

Выбранный вариант представляет собой металлический корпус комбинированной формы – цилиндр с диском в нижней части.

Качественные показатели K_i^{II} в соответствии со следующими техническими требованиями:

- виброизолирующие свойства (высокие – $K_1^{II} = 1,0$, средние – $K_1^{II} = 0,75$, минимально необходимые $K_1^{II} = 0,5$);
- спектр гашения колебаний (широкий – $K_2^{II} = 1,0$, средний – $K_2^{II} = 0,75$, узкий – $K_2^{II} = 0,5$);
- конструктивная сложность (высокая – $K_3^{II} = 0,5$, средней сложности – $K_3^{II} = 0,75$, простая – $K_3^{II} = 1,0$).

По аналогии с предыдущей подсистемой определим суммарный качественный показатель для «виброизолятора». Наибольшая величина $K_y = 0,84$ принадлежит структуре:

$$Y' = Y_{11} \rightarrow \left| \begin{array}{c} Y_{21} \\ Y_{27} \\ Y_{210} \end{array} \right| \rightarrow Y_{31} \rightarrow \left| \begin{array}{c} Y_{41} \\ Y_{42} \\ Y_{43} \end{array} \right|. \quad (3)$$

Виброизолятор выполнен из резинового материала в виде цилиндра с внутренней полостью с поршнем и рабочим телом (масло), использующими принципы растяжения-сжатия, изгибных деформаций, а также перемещения рабочего тела через дросселирующие отверстия.

Устройство крепления (Z) выбирается из заданных условий функционирования и может осуществляться присоединением к полу (Z1) и к станку (Z2).

По наибольшему качественному показателю K_i^{III} структуру устройства крепления выбираем на основании технических требований:

- надёжность фиксации от горизонтальных перемещений (высокая – $K_1^{III} = 1,0$ средняя – $K_1^{III} = 0,75$, низкая – $K_1^{III} = 0,5$);
- сложность конструкции (высокая – $K_2^{III} = 0,5$; средняя $K_2^{III} = 0,75$, малая – $K_2^{III} = 1,0$);
- 3) возможность переустановки (отсутствует – $K_3^{III} = 0,5$, имеется $K_3^{III} = 1,0$).

Максимальный суммарный показатель $k_z = 0,92$ получил вариант подсистемы «устройство крепления»:

$$Z' = Z1_1 \rightarrow Z2_3 \quad (4)$$

Структура Z_1 имеет механическое крепление к полу цеха (к палубе ПРМ) и упруго-механическую фиксацию к станку.

Затем выбираем подсистему «привод» (V). При этом руководствуемся списком технических требований по наибольшему качественному показателю K_i^{IV} :

- демпфирующие свойства (высокие - $K_1^{IV} = 1,0$;
средние - $K_1^{IV} = 0,75$; низкие - $K_1^{IV} = 0,5$);
- сложность конструктивной реализации (высокая - $K_2^{IV} = 0,5$;
средняя - $K_2^{IV} = 0,75$; малая - $K_2^{IV} = 1,0$);
- возможность компактной и автономной установки
(имеется - $K_3^{IV} = 1,0$; отсутствует - $K_3^{IV} = 0,5$).

Максимальный суммарный качественный показатель $K_v = 0,92$ получил следующий вариант подсистемы привода:

$$V^1 = V1_2 \rightarrow V2_2. \quad (5)$$

Привод выбран гидравлический с рычажной системой передачи прижимного усилия. На основе проведенного анализа подмножество синтезированных структур системы виброизолирующего устройства представим в виде графика на рис. 5. Общее сочетание вариантов может быть различным, поэтому с учетом перспективы создания элементов из серийно выпускаемого оборудования путем модернизации и распределения его технологических возможностей, используя оценки качества подсистем, приведенные выше, выбираем рациональный структурный вариант:

$$X^I \rightarrow Y^I \rightarrow Z^I \rightarrow V^I. \quad (6)$$

Проведенные мероприятия позволяют решить задачу синтеза на уровне структурно-компоновочной оптимизации. Этап параметрического синтеза и проведение дополнительных теоретических и практических исследований реальных конструкций виброизолирующих устройств, выполненные в Севастопольском национальном техническом университете, позволили создать новую конструкцию виброизолирующего устройства металло-режущего станка плавучей ремонтной мастерской [6], показанное на рис. 6.

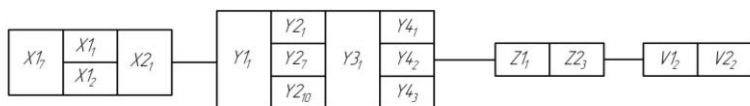


Рис. 5. Структура рационального варианта системы виброизолирующего устройства по качественным показателям

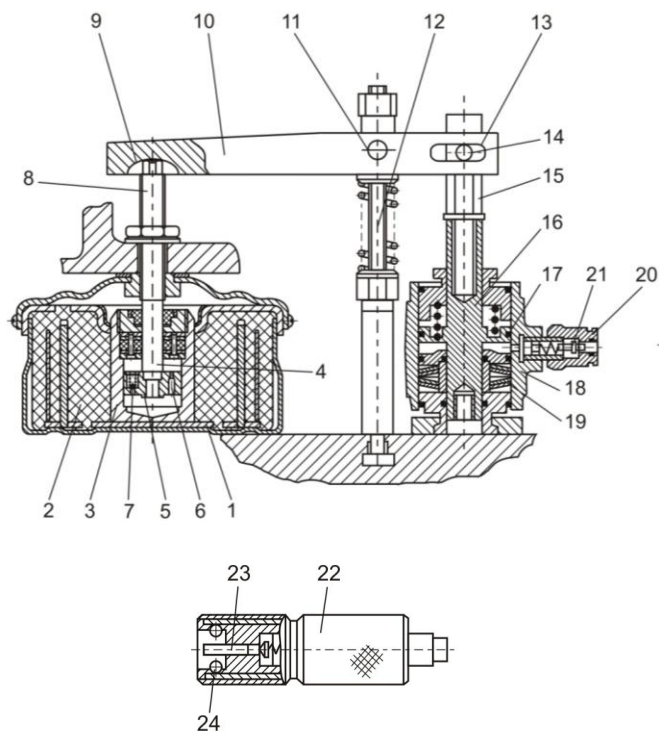


Рис. 6. Общий вид виброизолирующего устройства: 1 – основание; 2 – резиновый элемент; 3 – цилиндр; 4 – шток; 5 – поршень; 6 – калиброванное отверстие; 7 – клапан сжатия; 8 – регулировочный винт; 9 – сферическая поверхность лунки; 10 – прихват; 11 – ось; 12 – стойка; 13 – продольный паз; 14 – ось; 15 – опора; 16 – опорный шток; 17 – поршень; 18 – гидроцилиндр; 19 – пружинный аккумулятор; 20 – малая полумуфта; 21 – клапан; 22 – большая полумуфта; 23 – клапанный штырь; 24 – шарики

Разработанное устройство повышает надёжность виброзащиты металлорежущих станков, установленных и работающих в условиях ПРМ от внешних колебаний, в том числе и от волнений водной поверхности, упрощает возможность монтажа и демонтажа технологического оборудования ПРМ повышает качество обработки деталей за счёт

снижения высоты волнистости (W_z) поверхности путем уменьшения вынужденных и собственных колебаний (рис. 7) на режимах $S_{np} = 20$ м/мин, $S_{non} = 5$ мм/ход, $t = 0,008$ мм при плоском шлифовании (станок 3Г71М, материал – сталь Х12М).

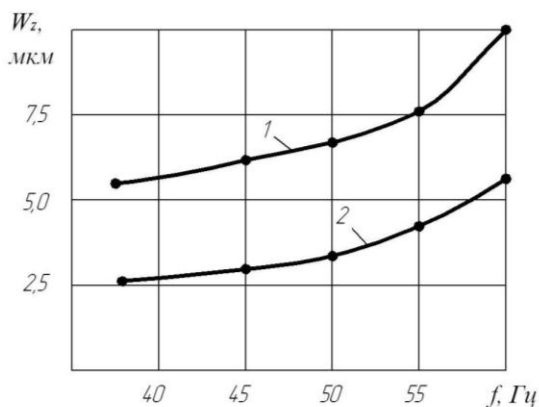


Рис. 7. Зависимость высоты волнистости обрабатываемой поверхности от частоты f вынужденных колебаний: 1 – станок на фундаменте; 2 – станок на виброизолирующей опоре новой конструкции

3. ВЫВОДЫ

Проведенные в работе теоретические и экспериментальные исследования позволили обеспечить снижение волнистости поверхности обработки ($W_z = 2,5 \dots 5,3$ мкм) при плоском шлифовании за счет повышения виброустойчивости шлифовального станка, устанавливаемого на виброизолирующих опорах новой конструкции, разработанных для условий механообрабатывающих участков плавучих ремонтных мастерских. Задачей дальнейших исследований является определение параметров потоков отказов и восстановлений синтезированного устройства для оценки его надежности при гашении колебаний от источников внешних возмущений.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] ВЛАДЕЦКАЯ Е.А.: *Повышение виброустойчивости шлифовальных станков плавучих ремонтных мастерских*. Е. А. Владецкая, С.М. Братан, А. О. Харченко, Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. Вип.7., Харків: НТУ «ХПІ», 2012. с. 103–111.
- [2] БРАТАН С. М.: *Анализ влияния колебаний, передаваемых через фундамент станка, на качество процесса шлифования*. С М. Братан, Е.А. Владецкая, Вестник НТУ «ХПИ», Сб. научн. трудов., № 35, 2008. с. 13–22.
- [3] ВЛАДЕЦКАЯ Е. А.: *Определение состояния равновесия динамической системы при круглом шлифовании*. Е. А. Владецкая, С. М. Братан, Д. А. Каинов, Оптимизация производственных процессов: сб. науч. тр., Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2009, № 11, с. 102–106.
- [4] ВЛАДЕЦКАЯ Е. А.: *Повышение виброустойчивости механообрабатывающего оборудования плавучих ремонтных мастерских*. Е. А. Владецкая, А. О. Харченко, С.М. Братан., Вісник СевНТУ. Вип. 107: Машиноприладобудування та транспорт: зб.наук.пр., Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2010, с. 33–40.
- [5] КУЗНЕЦОВ Ю. Н.: *Теория технических систем*. Ю .Н. Кузнецов, Ю. К. Новоселов, И. В. Луцив., Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2010, 252 с.
- [6] ПАТ. № 51621 Україна, МПК В23Q 1/00, *Віброізолюючий пристрій металорізального верстата плавучої ремонтної майстерні*, О. О. Харченко, К. О. Владецька, С. М. Братан, Д. О. Владецький, опубл. 26.07.2010, Бюл. № 14.

BEZPIECZEŃSTWO MASZYN ZGODNE Z DYREKTYWĄ MASZYNOWĄ 2006/42/WE – PROCEDURY OCENY ZGODNOŚCI Z WYMAGANIAMI

1. WSTĘP

Podstawą wspólnego europejskiego rynku jest swoboda przepływu towarów i usług. Swoboda nie oznacza jednak dowolności. Państwa członkowskie Wspólnoty Europejskiej są bowiem odpowiedzialne za zapewnienie na swoim terytorium ochrony zdrowia i bezpieczeństwa ludzi, w szczególności pracowników i konsumentów. Stworzono więc ramy prawne przepływu, w których głównymi regulatorami są bezpieczeństwo, ochrona zdrowia i ochrona środowiska. Pojęcia te legły u podstaw „dyrektyw nowego podejścia”, które ujednolicają zasadnicze wymagania dotyczące bezpieczeństwa w odniesieniu do różnych grup wyrobów, wprowadzanych do obrotu na terenie Unii Europejskiej. Szczegółowe rozwiązania techniczne, umożliwiające spełnienie zasadniczych wymagań, są zawarte w europejskich normach zharmonizowanych. Chociaż stosowanie norm zharmonizowanych jest dowolne, ułatwia jednak wykazanie zgodności z wymaganiami zasadniczymi dyrektyw podczas przeprowadzania procedur oceny zgodności, tworząc domniemanie zgodności.

Powyższe oznacza, że przed pierwszym udostępnieniem na rynku Wspólnoty wyrobu objętego przepisami danej dyrektywy, konieczne jest wykazanie i uzewnętrznienie jego zgodności z wymaganiami zawartymi w tej przedmiotowej dyrektywie. Obecnie opracowano i opublikowano kilkadziesiąt dyrektyw tego typu. Jedną z nich jest dyrektywa 2006/42/WE Parlamentu Europejskiego z dnia 17 maja 2006 r. w sprawie maszyn, potocznie zwana dyrektywą maszynową – MD.

¹ Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, 20-612 Lublin, ul. Głęboka 28,
e-mail: waldemar.samociuk@up.lublin.pl

² Polimex Energetyka Sp. z o.o., e-mail: dorota.samociuk@polimex-energetyka.pl

³ Politechnika Lubelska, 20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 36

⁴ Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, 20-612 Lublin, ul. Głęboka 28,
e-mail: zbigniew.krzysiak@up.lublin.pl

Do ważności dyrektyw na terenie poszczególnych państw konieczne jest wprowadzenie ich w życie aktem prawa krajowego – w Polsce stało się to rozporządzeniem Ministra Gospodarki z dnia 21 października 2008 w sprawie zasadniczych wymagań dla maszyn (Dz.U. Nr 199, poz. 1228).

W swojej treści dyrektywa 2006/42/WE zawiera:

- wymagania zasadnicze w zakresie bezpieczeństwa i ochrony zdrowia dotyczące projektowania i wytwarzania maszyn;
- wymagania dotyczące dokumentacji technicznej;
- procedury oceny zgodności;
- wymagania dotyczące oznakowania maszyn;
- deklarację zgodności;
- wzór oznakowania CE.

Dyrektywa 2006/42/WE ma zastosowanie do następujących produktów:

- maszyn;
- wyposażenia wymiennego;
- elementów bezpieczeństwa;
- osprzętu do podnoszenia;
- łańcuchów, lin i pasów;
- odłączalnych urządzeń do mechanicznego przenoszenia napędu;
- maszyn nieukończonych.

Z zakresu niniejszej dyrektywy wyłączonych jest szereg elementów, np. części zamienne dostarczone przez producenta oryginalnej maszyny bądź też urządzeń podlegających pod inne przepisy, np.: przeznaczonych do użytku na terenie wesołych miasteczek lub parków rozrywki; przeznaczonych do celów jądrowych, broń, szereg środków transportu, maszyny do zastosowań w wojsku i policji, do celów badawczych, górnicze urządzenia wyciągowe, sprzęt elektryczny i elektroniczny (np.: urządzenia gospodarstwa domowego, sprzęt audiowizualny, sprzęt informatyczny, maszyny biurowe), silniki elektryczne, sprzęt elektryczny wysokiego napięcia (art.1 ust.2).

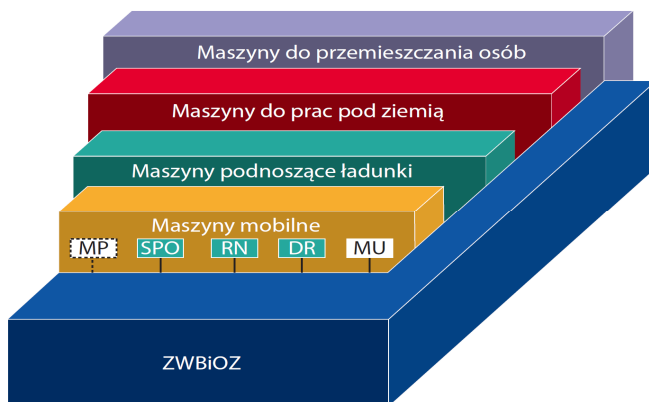
W dyrektywie podano następującą definicję maszyn:

- zespół, wyposażony lub przeznaczony do wyposażenia w mechanizm napędowy inny niż bezpośrednio wykorzystujący siłę mięśni ludzkich lub zwierzęcych, składający się ze sprzężonych części lub elementów, z których przynajmniej jedna wykonuje ruch, połączonych w całość mającą konkretne zastosowanie;
- zespół, o którym mowa w pkt.1, z pominięciem elementów przeznaczonych do jego podłączenia w miejscu pracy lub do podłączenia do źródeł energii i napędu;
- zespół, o którym mowa w pkt.1 i 2 gotowy do zainstalowania i zdolny do funkcjonowania jedynie po zamontowaniu na środkach transportu lub zainstalowaniu w budynku lub na konstrukcji;

- zespoły maszyn, o których mowa w pkt. 1, 2 i 3, lub maszyny nieukończone, które w celu osiągnięcia określonego efektu końcowego zostały zestawione i są sterowane w taki sposób, że działają jako zintegrowana całość;
- zespół sprzężonych części lub elementów, z których przynajmniej jedna wykonuje ruch, połączonych w całość, przeznaczony do podnoszenia ładunków, którego jedynym źródłem mocy jest bezpośrednie wykorzystanie siły mięśni ludzkich.

2. ZASADNICZE WYMAGANIA W ZAKRESIE OCHRONY ZDROWIA I BEZPIECZEŃSTWA ODNOSZĄCE SIĘ DO PROJEKTOWANIA I WYKONYWANIA MASZYN

Zasadnicze wymagania w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa, odnoszące się do projektowania i wykonywania maszyn zostały zamieszczone w załączniku I dyrektywy maszynowej. Wymagania te składają się z kilku części. Pierwsza część ma zakres ogólny i ma zastosowanie do wszystkich rodzajów maszyn. Kolejne części odnoszą się do niektórych typów maszyn, których dotyczą bardziej określone zagrożenia. Na rys. 1 przedstawiono strukturę wymagań dyrektywy maszynowej w zależności od podziału maszyn, opracowaną przez Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.



Rys. 1. Struktura zasadniczych wymagań ujętych w dyrektywie 2006/42/WE – wymagania zasadnicze odnoszące się do: ZWBioZ – wszystkich maszyn, SPO – stosowanych w przemyśle spożywczym, kosmetycznym i farmaceutycznym, RN – przenośnych trzymanyh w rękę, MU – maszyn udarowych; DR – do obróbki drewna i materiałów o podobnych właściwościach fizycznych, MP – do stosowania pestycydów [1]

Zasadnicze wymagania w zakresie bezpieczeństwa, odnoszące się do wszystkich powyższych grup maszyn zostały poruszone w artykule pt. "Bezpieczeństwo maszyn zgodne z dyrektywą maszynową 2006/42/WE – ocena ryzyka dla układu logicznego realizującego funkcję bezpieczeństwa".

3. WPROWADZENIE MASZINY DO OBROTU

Zgodnie z zasadą swobodnego przepływu, nie można ograniczać ani utrudniać przepływu towarów pomiędzy państwami Wspólnoty, czyli stwarzać barier we wprowadzaniu towarów do obrotu. Za wprowadzenie do obrotu uznaje się udostępnienie wyrobu na rynku Wspólnoty. Jednakże, aby stało się to możliwe, producent lub jego przedstawiciel musi, zgodnie z dyrektywą maszynową zapewnić, że maszyna spełnia odpowiednie zasadnicze wymagania w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa określone w załączniku I, ale dodatkowo także:

- opracować dokumentację techniczną określoną w załączniku VII część A;
- dostarczyć niezbędnych informacji, takich jak instrukcje;
- przeprowadzić właściwe procedury oceny zgodności zgodnie z art. 12;
- sporządzić deklarację zgodności WE zgodnie z załącznikiem II część 1 sekcja A i zapewnić, że została dołączona do maszyny;
- umieścić na maszynie oznakowanie CE zgodnie z art. 16.

4. PROCEDURY OCENY ZGODNOŚCI Z WYMAGANIAMI

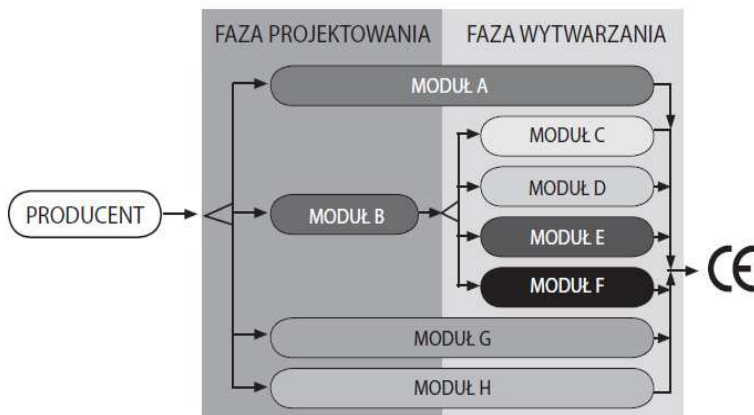
Producent lub jego upoważniony przedstawiciel wykazuje zgodność maszyny z zasadniczymi wymaganiami dyrektywy maszynowej w drodze procedur określonych w dyrektywie. Procedury te są oparte o tzw. moduły oceny zgodności, zostały określone na podstawie decyzji Rady 93/465/EWG z dnia 22 lipca 1993 r. dotyczącej modułów stosowanych w różnych fazach procedur oceny zgodności oraz zasad umieszczania i używania oznakowania zgodności WE. Moduły zgodności opisane w powyższej decyzji pokazuje tabela 1. Jednostki notyfikowane, uczestniczące w ocenie zgodności w ramach niektórych procedur to niezależne jednostki strony trzeciej, czyli niezależne zarówno od producenta, jak też od potencjalnych klientów. Termin „notyfikowana” odnosi się do faktu, że państwa członkowskie powiadamiają o jednostkach Komisję oraz inne państwa członkowskie. Przed notyfikacją jednostki dokonującej oceny zgodności, Komisja musi nadać jej czterocyfrowy numer identyfikacyjny.

Tabela 1: Podstawowe moduły oceny zgodności [2]

A	Wewnętrzna kontrola produkcji	Obejmuje wewnętrzną kontrolę projektu i produkcji. Moduł ten nie wymaga od notyfikowanej jednostki podjęcia działań.
B	Kontrola typu	Obejmuje fazę projektowania; po module B musi nastąpić moduł przewidujący przeprowadzenie oceny w fazie produkcji. Certyfikat kontroli typu WE jest wydawany przez notyfikowaną jednostkę .
C	Zgodność z typem	Obejmuje fazę produkcji i następuje po module B. Zapewnia zgodność z typem posiadającym certyfikat kontroli typu WE wydany zgodnie z modulem B. Moduł C nie wymaga od notyfikowanej jednostki podjęcia działań.
D	Zapewnienie jakości produkcji	Obejmuje fazę produkcji i następuje po module B. Wywodzi się z normy zapewnienia jakości EN ISO 9002 i przewiduje interwencję notyfikowanej jednostki odpowiedzialnej za zatwierdzanie i kontrolę systemu jakości wprowadzonego przez wytwórcę.
E	Zapewnienie jakości wyrobu	Obejmuje fazę produkcji i następuje po module B. Wywodzi się z normy zapewnienia jakości EN ISO 9003 i przewiduje interwencję notyfikowanej jednostki odpowiedzialnej za zatwierdzanie i kontrolę systemu jakości wprowadzonego przez wytwórcę.
F	Weryfikacja wyrobu	Obejmuje fazę produkcji i następuje po module B. Notyfikowana jednostka sprawdza zgodność z typem posiadającym certyfikat europejskiej kontroli typu wydany zgodnie z modulem B i wydaje świadectwo zgodności.
G	Weryfikacja jednostkowa	Obejmuje fazę projektowania i produkcji. Każdy pojedynczy wyrób jest badany przez notyfikowaną jednostkę, weryfikacja jednostkowa projektu i produkcji każdego wyrobu kontrolowanego przez notyfikowaną jednostkę, która wydaje certyfikat zgodności.
H	Pełne zapewnienie jakości	Obejmuje fazę projektowania i produkcji. Wywodzi się z normy zapewnienia jakości EN ISO 9001 i przewiduje interwencję notyfikowanej jednostki odpowiedzialnej za zatwierdzanie i kontrolę systemu jakości wprowadzonego przez wytwórcę.

Na rys. 2 przedstawiono schematycznie procedury oceny zgodności w zależności od fazy procesu produkcyjnego[2].

Uproszczony schemat realizacji procedur zgodności



Rys. 2. Zastosowanie modułów oceny zgodności w zależności od faz procesu produkcyjnego

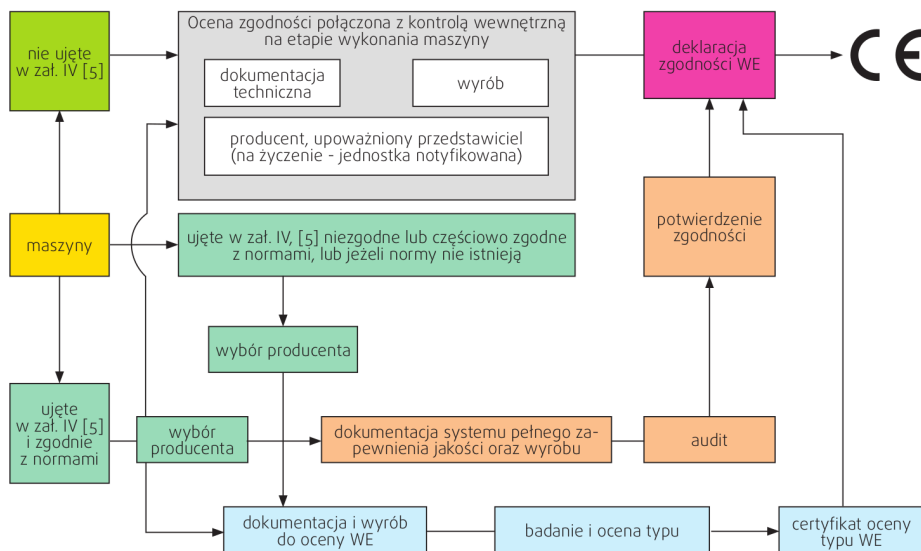
Dyrektywa uzależnia wybór procedury oceny zgodności od poziomu ryzyka związanego z używaniem danej maszyny, przy czym ryzyko oznacza kombinację prawdopodobieństwa wystąpienia i stopnia obrażeń lub uszczerbku na zdrowiu [3, 4], które mogą zaistnieć w sytuacjach niebezpiecznych.

Generalnie, to producenci są w pełni odpowiedzialni za certyfikowanie zgodności wyprodukowanych przez siebie maszyn z przepisami niniejszej dyrektywy. Jednakże w stosunku do niektórych typów maszyn o wyższym współczynniku ryzyka lub maszyn pełniących krytyczną funkcję ochronną wskazane zostały surowsze procedury certyfikacyjne. Maszyny te zostały wymienione w załączniku IV.

Należą do nich m. in.: pilarki do drewna i materiałów podobnych lub do obróbki mięsa i podobnych materiałów, strugarki, frezerki, grubiarki i wyrówniarki do drewna, prasy, wtryskarki, maszyny do robót podziemnych, urządzenia do podnoszenia osób lub osób i towarów, maszyny montażowe i inne udarowe uruchamiane za pomocą nabożów, podnośniki do obsługi pojazdów, śmieciarki, urządzenia do mechanicznego przenoszenia napędu wraz z osłonami. Spośród wymienionych w tym załączniku można wyróżnić urządzenia, konstrukcje i układy spełniające funkcje bezpieczeństwa takie jak: urządzenia ochronne przeznaczone do wykrywania obecności osób, ruchome osłony blokujące przeznaczone do zastosowania jako zabezpieczenie w maszynach, układy logiczne zapewniające funkcje bezpieczeństwa, konstrukcje chroniące przed skutkami wywrócenia (ROPS) i przed spadającymi przedmiotami (FOPS).

Zgodnie z dyrektywą maszynową ocena zgodności może być prowadzona według procedur odpowiadających modułom A, B i H. W odniesieniu do maszyn wymienionych w załączniku IV wybór właściwej procedury jest w dużej mierze uzależniony od faktu, czy maszyna została wyprodukowana na podstawie norm zharmonizowanych czy też nie. Dwie ze wskazanych w dyrektywie procedur przewidują udział jednostki notyfikowanej w ocenie zgodności.

Procedury oceny zgodności z dyrektywą maszynową przedstawiono schematycznie na rys. 3.



Rys. 3. Schemat procedur oceny zgodności według dyrektywy 2006/42/WE [1]

Po przeprowadzeniu oceny, na potwierdzenie zgodności z wymogami dyrektywy, maszyny muszą zostać wyposażone w deklarację zgodności oraz oznaczone znakiem CE.

4.1. OCENA ZGODNOŚCI POŁĄCZONA Z KONTROLĄ WEWNĘTRZNĄ W FAZIE WYTWARZANIA MASZINY

Jest to procedura podstawowa, stosowana do:

- wszystkich maszyn nie wymienionych w załączniku IV;
- maszyn wymienionych w załączniku IV, jeśli zostały wyprodukowane zgodnie z normami zharmonizowanymi.

Procedura ta nie wymaga udziału jednostki notyfikowanej w ocenie zgodności. To producent musi podjąć wszelkie niezbędne środki, aby proces produkcji zapewniał zgodność wytworzonych maszyn z odpowiednimi wymaganiami.

Producent albo jego upoważniony przedstawiciel opracowuje dokumentację techniczną określoną w załączniku VII część A dla każdego reprezentatywnego typu z danej serii oraz zapewnia i oświadcza, że dana maszyna spełnia odpowiednie wymagania dyrektywy maszynowej.

4.2. BADANIE TYPU WE

W badaniu typu jednostka notyfikowana stwierdza i zaświadcza, że reprezentatywny wzorzec (typ) maszyny określonej w załączniku IV dyrektywy MD spełnia przepisy tej dyrektywy.

Jednostka notyfikowana bada dokumentację techniczną, sprawdza czy dany typ został wyprodukowany zgodnie z tą dokumentacją i ustala, które elementy zostały zaprojektowane zgodnie z odpowiednimi postanowieniami norm oraz elementy, których projekt nie opiera się na odpowiednich postanowieniach norm. Jeżeli nie zostały zastosowane normy zharmonizowane, przeprowadza lub zleca przeprowadzenie odpowiednich kontroli, pomiarów i badań w celu ustalenia czy przyjęte rozwiązania spełniają zasadnicze wymagania niniejszej dyrektywy w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa.

Na jednostce notyfikowanej spoczywa stały obowiązek zapewnienia, że certyfikat badania typu WE pozostaje ważny. Powiadamia ona producenta o wszelkich istotnych zmianach, które mogłyby mieć wpływ na ważność certyfikatu. Na producencie danej maszyny spoczywa stały obowiązek zapewnienia, że maszyna ta odpowiada aktualnemu stanowi wiedzy technicznej. W przypadku gdy ważność certyfikatu badania typu WE nie została odnowiona, producent zaprzestaje wprowadzania do obrotu danej maszyny.

4.3. PEŁNE ZAPEWNIENIE JAKOŚCI

Jednostka notyfikowana ocenia i zatwierdza system jakości wytwórcy i monitoruje jego stosowanie. System taki powinien obejmować projektowanie, wytwarzanie, końcową kontrolę i badania. W praktyce najczęściej jest on oparty na normie EN ISO 9001, która jest normą zharmonizowaną. System jakości musi zapewniać zgodność maszyny z przepisami dyrektywy MD. Wszystkie elementy, wymagania i przepisy przyjęte przez producenta muszą być udokumentowane w systematyczny i uporządkowany sposób w postaci procedur i instrukcji.

W szczególności dokumentacja systemu musi obejmować następujące elementy i ich opisy:

- cele dotyczące jakości, strukturę organizacyjną, zakresy odpowiedzialności i uprawnień kierownictwa w odniesieniu do konstrukcji i jakości maszyn,
- techniczne specyfikacje projektowe, w tym normy zharmonizowane, jakie będą stosowane, a jeżeli normy zharmonizowane nie będą w pełni stosowane, środki, jakie zostaną podjęte w celu spełnienia zasadniczych wymagań dyrektywy,
- techniki kontroli projektowania i techniki weryfikacji konstrukcji, procesów i działań systematycznych, które będą stosowane przy projektowaniu maszyn objętych niniejszą dyrektywą,
- odpowiednie techniki wytwarzania, techniki kontroli i zapewnienia jakości, procesów i systematycznie podejmowanych działań, jakie będą stosowane,
- kontrole i badania, które będą przeprowadzone przed, w trakcie i po wytworzeniu oraz częstotliwości, z jaką będą przeprowadzane,
- zapisy dotyczące jakości, takie jak sprawozdania z kontroli, dane dotyczące badań, dane dotyczące kalibracji, sprawozdania dotyczące kwalifikacji danego personelu,
- środki monitorowania uzyskania wymaganej jakości projektowania i jakości maszyn.

Dokumentacja systemu jakości musi dostarczać dowodów skutecznego działania systemu, takich jak programy jakości, plany jakości, księgi jakości i zapisy.

Jednostka notyfikowana ocenia system jakości w trybie auditu, aby ustalić, czy spełnia on powyższe wymagania. Procedura auditu obejmuje przeprowadzenie kontroli w pomieszczeniach producenta. Producent umożliwia auditorom dostęp do miejsc projektowania, produkcji, kontroli, badań oraz magazynowania oraz dostarcza im wszelkich niezbędnych informacji i dokumentów.

Producent zobowiązuje się do wypełniania obowiązków wynikających z zatwierdzonego systemu jakości oraz zapewnienia, że pozostanie on właściwy i skuteczny.

Jednostka notyfikowana utrzymuje nadzór nad systemem jakości wytwórcy. W ramach nadzoru przeprowadza okresowe audyty w celu upewnienia się, że producent utrzymuje i stosuje system jakości. Ponadto może także dokonać niezapowiedzianych wizytacji u producenta.

4.4. DOKUMENTACJA TECHNICZNA MASZYN

Istotne jest, aby przed sporządzeniem deklaracji zgodności WE, producent lub jego upoważniony przedstawiciel opracował dokumentację techniczno-konstrukcyjną.

Dokumentacja techniczna (zał. VIIA MD) musi obejmować projekt, wytworzenie i działanie maszyny w zakresie koniecznym do oceny zgodności. Poza ogólną dokumentacją konstrukcyjną, dokumentacja techniczna powinna zawierać rysunek zestawieniowy maszyny i schematy obwodów sterowania, jak również istotne opisy i objaśnienia, niezbędne do zrozumienia działania maszyny, rysunki szczegółowe, wraz z dołączonymi obliczeniami, wynikami badań, certyfikatami itp., niezbędne do sprawdzenia zgodności maszyny z zasadniczymi wymaganiami w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa.

Ponadto dokumentacja powinna zawierać:

- ocenę ryzyka przedstawiającą zastosowaną procedurę, zawierającą opis środków zapobiegawczych wdrożonych w celu wyeliminowania rozpoznanych zagrożeń lub zmniejszenia ryzyka oraz wskazanie ryzyka resztkowego związanego z maszyną,
- wykaz zastosowanych norm i inne specyfikacje techniczne, wskazujące zasadnicze wymagania w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa objęte tymi normami,
- sprawozdania techniczne podające wyniki wszystkich badań przeprowadzonych albo przez producenta albo przez jednostkę wybraną przez producenta lub jego upoważnionego przedstawiciela,
- egzemplarz deklaracji zgodności WE.

Cała powyższa dokumentacja nie musi być stale dostępna w formie materialnej; należy jednak udostępnić ją na życzenie.

4.5. DEKLARACJA ZGODNOŚCI WE DLA MASZYN

Deklaracja zgodności WE powinna zawierać podstawowe informacje umożliwiające organom nadzoru rynku przeprowadzanie niezbędnych kontroli, a w szczególności:

- nazwę producenta maszyny i, w stosownych przypadkach, jego upoważnionego przedstawiciela;
- dane osoby upoważnionej do sporządzenia dokumentacji technicznej;
- określenie przeprowadzonej procedury oceny zgodności, a w razie potrzeby, potwierdzenie tożsamości jednostki notyfikowanej;
- inne dyrektywy, które wykorzystano w celu zastosowania bardziej szczegółowych przepisów dotyczących pewnych zagrożeń;
- w stosownych przypadkach – zastosowane normy zharmonizowane lub inne specyfikacje techniczne.

Deklaracja ta odnosi się wyłącznie do maszyny w stanie, w jakim została wprowadzona do obrotu i nie obejmuje części składowych dodanych przez użytkownika końcowego lub przeprowadzonych przez niego późniejszych działań.

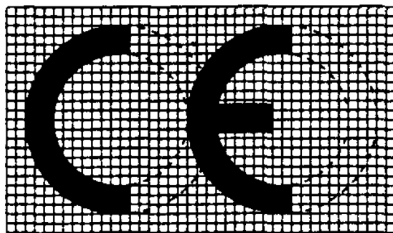
Deklaracja zgodności WE musi zawierać wyraźne oświadczenie, że maszyna spełnia wszystkie odpowiednie postanowienia niniejszej dyrektywy, a w stosownych przypadkach podobne zdanie zawierające oświadczenie o zgodności z innymi dyrektywami wspólnotowymi lub odpowiednimi przepisami, które maszyna musi spełniać. Odniesienia te muszą być odniesieniami opublikowanymi w Dzienniku Urzędowym Unii Europejskiej.

Producent maszyny lub jego upoważniony przedstawiciel zachowują oryginał deklaracji zgodności WE przez okres przynajmniej dziesięciu lat od daty produkcji ostatniego egzemplarza maszyny.

4.6. OZNAKOWANIE CE

Oznakowanie CE jest jedynym oznakowaniem gwarantującym, że maszyna odpowiada wymaganiom dyrektywy maszynowej. Wszystkie inne oznakowania, które mogłyby wprowadzić w błąd co do znaczenia lub formy oznakowania CE są zakazane.

Oznakowanie zgodności składa się z liter „CE”, w postaci pokazanej na rys. 4.



Rys. 4. Schemat oznaczenia zgodności „CE”

Oznakowanie CE musi być umieszczone w bezpośredniej bliskości nazwy producenta lub jego upoważnionego przedstawiciela. W celu uniknięcia pomyłek i niejasności, oznakowanie CE i znak producenta powinny być nanoszone za pomocą tej samej techniki.

W przypadku zastosowania procedury pełnego zapewnienia jakości po oznakowaniu CE umieszczany jest numer identyfikacyjny jednostki notyfikowanej.

W przypadku, gdy dana maszyna podlega także innym dyrektywom dotyczącym innych aspektów i nakładającym wymóg umieszczenia oznakowania CE, oznakowanie to wskazuje, że dana maszyna spełnia także przepisy tych innych dyrektyw.

5. KONSEKWENCJA NIEZASTOSOWANIA SIĘ DO WYMAGAŃ DYREKTYWY

Uznaje się, że niezgodne z dyrektywami nowego podejścia, w tym z dyrektywą maszynową są następujące sytuacje:

- umieszczenie oznakowania CE na produktach nieobjętych dyrektywą;
- umieszczenie oznakowania CE bez przeprowadzenia oceny zgodności;
- umieszczenie oznakowania innego niż oznakowanie CE;
- brak oznakowania CE lub brak deklaracji zgodności WE.

W przypadku, gdy zostanie stwierdzona niezgodność oznakowania z odpowiednimi przepisami dyrektywy, producent lub jego upoważniony przedstawiciel jest zobowiązany do doprowadzenia produktu do zgodności oraz do zaprzestania naruszenia.

W przypadku utrzymywania się niezgodności Państwo Członkowskie podejmuje wszelkie odpowiednie środki w celu wycofania maszyn z obrotu, zakazania wprowadzania ich do obrotu lub oddania do użytku, lub ograniczenia ich swobodnego przepływu. Niezwłocznie powiadamia Komisję i inne Państwa Członkowskie o każdym podjętym środku i wskazuje powody decyzji, a w szczególności przyczyny niezgodność, jako:

- niespełnienie zasadniczych wymagań,
- nieprawidłowe zastosowanie norm zharmonizowanych,
- braki w samych normach zharmonizowanych.

Komisja konsultuje się z zainteresowanymi stronami i rozważa, czy środki podjęte przez Państwo Członkowskie były uzasadnione.

W przypadku, gdy przyczyną niezgodności są braki w normach zharmonizowanych, Komisja, po przeprowadzeniu właściwej procedury, podejmuje decyzję co do danej normy zharmonizowanej, np. o opublikowaniu, niepublikowaniu, opublikowaniu z ograniczeniem, utrzymaniu, utrzymaniu z ograniczeniem lub wycofaniu odniesienia do danej normy zharmonizowanej.

Każde państwo Wspólnoty stworzyło system nadzoru rynku do kontroli wyrobów wprowadzanych i pozostających w obrocie. W Polsce powołane do nadzoru są m.in.: Państwowa Inspekcja Pracy, Inspekcja Handlowa, Wyższy Urząd Górniczy, Urzędy Morskie, itp. Organy te mogą, na podstawie wyników kontroli, nakazać usunięcie niezgodności lub wydać decyzję administracyjną ograniczającą lub zakazującą obrotu aż do zniszczenia wyrobu włącznie. Oprócz sankcji administracyjnych, możliwa jest również odpowiedzialność karna w postaci grzywny do wysokości 100 tys. złotych.

6. PODSUMOWANIE

Wdrożenie dyrektywy maszynowej 2006/42/WE wnosi znaczący wkład w podniesienie bezpieczeństwa użytkowania maszyn. Jednakże spełnienie wymagań dyrektywy maszynowej nie oznacza, że producent produkowanej maszyny może zaprzestać prac nad podniesieniem jej bezpieczeństwa. Wręcz przeciwnie, powinien być w ciągłej gotowości do wdrażania nowych technik i technologii służących poprawie bezpieczeństwa zgodnie z obowiązującymi przepisami oraz standardami przyjętymi w odpowiedniej branży.

LITERATURA

- [1] *Zapewnienie zgodności maszyn z wymaganiami zasadniczymi w zakresie bezpieczeństwa i ochrony zdrowia. Wskazówki dla producentów, dostawców i użytkowników maszyn.* Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa, 2010-12-07.
- [2] http://www.mg.gov.pl/NR/rdonlyres/BBABE9C1-4EC3-4C27-90DC-18213DDF0A32/56883/przewodnik_Dyr_nowego_podejscia1999.pdf
- [3] MARKOWSKI A. (red.): *Zapobieganie stratom w przemyśle, część III, Zarządzanie bezpieczeństwem procesowym.* Łódź, 2000.
- [4] MARKOWSKI A.: *Zarządzanie ryzykiem w przemyśle chemicznym w świetle dyrektyw Seveso i ATEX.* Zakład Bezpieczeństwa Procesowego i Ekologicznego Warsztaty MANHAZ, Politechnika Łódzka, 2004.

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СРЕДНЕГО ДИАМЕТРА РЕЗЬБЫ ШПИЛЕК

1. АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ

Резьбу с натягом по среднему диаметру широко применяют для получения неподвижных резьбовых соединений типа шпилька–корпус. Такие соединения широко используются, например, для крепления головки блока цилиндров к блоку цилиндров двигателей внутреннего сгорания, крышки к корпусу редукторов, коробок скоростей и т.д.

Посадки с гарантированным натягом требуют установления весьма малых величин допусков по среднему диаметру. При больших допусках и натяге, близким к наименьшему предельному, не гарантируется отсутствие проворачивания шпилек в гнезде. При возможном наибольшем предельном натяге может произойти разрушение шпильки или срезание резьбы гнезд. В этой связи на средний диаметр резьбы установлены высокие степени точности. Для обеспечения однородного натяга, лежащего в заданных пределах, обычно используется селективное комплектование и сборка, при этом резьбовые детали сортируются на группы (две или три), а соединения собираются из одноименных групп (что соответствует алгоритму одновариантного комплектования).

Основными параметрами качества резьбовых соединений с натягом являются их прочность и надежность. На качество таких соединений, от которого зависят функциональные характеристики узлов, при использовании селективной сборки оказывают влияние следующие основные факторы [1,2]:

- конструктивные (обоснованный выбор номинальных значений диаметра, шага резьбы, длины свинчивания и др.);

¹ Севастопольский государственный университет ул. Университетская 33,
г. Севастополь, e-mail: phiol@ukr.net

- технология изготовления, определяющая точность основных параметров геометрии резьбовых деталей (средний диаметр резьбы, шаг и угол профиля, отклонение формы, шероховатость поверхности и др.);
- качество измерения среднего диаметра при сортировке – совокупность свойств измерений, обуславливающих соответствие средств, метода, методики, условий измерений и состояния единства измерений требованиям измерительной задачи;
- качество сборки.

Остановимся более подробно на метрологическом факторе. Средства измерительной техники используются в процессе селективного комплектования и сборки для сортировки деталей на размерные группы. Указанная операция, проводимая со 100% объема деталей, осуществляется путем измерения одного параметра (среднего диаметра) и определения принадлежности каждой из деталей типа к определенной селективной группе по результатам измерения. При известных истинных значениях параметров становится возможным безошибочно распределить детали по селективным группам. Однако, на практике это производится по действительным значениям, полученным по результатам измерений с допустимой погрешностью. Погрешности измерений нарушают правильность сортировки деталей по селективным группам и снижают собираемость и качество сборочных комплектов. В результате может возникнуть ошибочная разбраковка: попадание детали в одну из соседних селективных групп вместо требуемой группы, куда бы она попала при проведении сортировки по истинным значениям при отсутствии погрешности измерения. В свою очередь, ошибки сортировки будут сказываться на качестве изделий: при использовании одновариантного алгоритма комплектования, изделия, полученные из таких деталей, будут заведомо бракованными по выходному параметру (натягу), точность которого пытаются достичь методом групповой взаимозаменяемости и селективной сборки.

В данной работе рассматривается процесс измерения деталей с наружной резьбой – шпилек. Шпилька – цилиндрическое изделие, на обоих концах которого имеется резьба треугольного профиля, однозаходная, чаще – правая. Одним концом (посадочным или ввинчиваемым) шпилька ввертывается в отверстие корпусной детали, а на другой конец (стяжной или гаечный) навертывается гайка. Шпильки служат для соединения деталей в таких местах, где головки болтов по конструктивным соображениям нежелательны, то есть в случаях недостатка места у деталей для размещения головки болта или большой разницы в толщине соединяемых деталей (когда одна из деталей имеет значительную толщину, и применять в этом случае слишком длинный болт неэкономично).

Целью работы является разработка автоматизированного устройства измерения среднего диаметра резьбы шпилек при обоснованном выборе количества измерительных контактных наконечников для обеспечения минимальной величины погрешности измерения.

Для достижения указанной цели необходимо ряд взаимосвязанных задач:

- оценить погрешность косвенного измерения среднего диаметра резьбы ввинчиваемого конца шпильки;
- разработать конструкцию автоматизированного устройства для измерения среднего диаметра резьбы.

2. АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ИЗМЕРЕНИЯ СРЕДНЕГО ДИАМЕТРА РЕЗЬБЫ

Измерение среднего диаметра наружной резьбы d_2 шпильки, в зависимости от требуемой точности, производительности и экономической целесообразности, производится приборами с резьбовыми вставками, проекционными приборами, пневматическими приборами, контактными приборами с помощью трех проволочек, со сферическими, призматическими, коническими и другими наконечниками (рис. 1) [2,3].

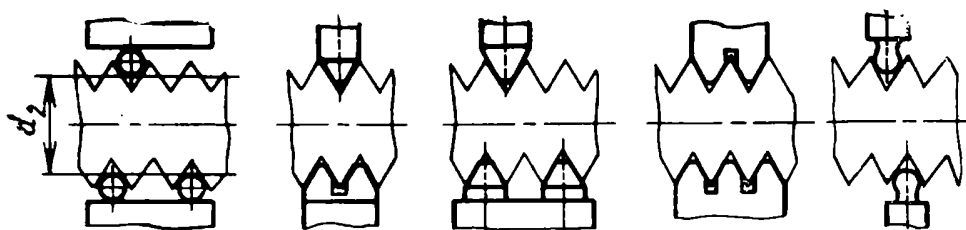


Рис. 1. Наконечники для измерения диаметра d_2 для наружных резьб

Метод измерения среднего диаметра резьбы с помощью проволочек получил очень широкое распространение и позволяет определять средний диаметр независимо от погрешностей других параметров резьбы. Проволочки закладывают во впадины резьбы и, пользуясь контактными прибором, измеряют размер M (рис. 2) [3].

Зависимость между средним диаметром d_2 и результатом измерения размера M вычисляется по формулам (для резьб с симметричным профилем с шагом P и углом профиля α):

- при измерении тремя проволочками, мм (рис. 2,а)

$$d_2 = M - d_{i\delta} \left(1 + \frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}} \right) + \frac{1}{2} P \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}; \quad (1)$$

- при измерении двумя проволочками (рис. 2,б), мм

$$d_2 = M - d_{i\delta} \left(1 + \frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}} \right) + \frac{1}{2} P \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} - \frac{P^2}{8(M - d_{i\delta})}; \quad (2)$$

- - при измерении одной проволочкой (рис. 2,в)

$$d_2 = M + M' - d_{i\delta} \left(1 + \frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}} \right) + \frac{1}{2} P \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} - d, \quad (3)$$

где: M' – результат измерения среднего диаметра во втором положении (после поворота на 180°) измеряемого объекта, мм;

$d_{i\delta}$ – диаметр проволочки, мм;

d – наружный диаметр резьбы, измеренный с той же точностью, что и размер M , мм.

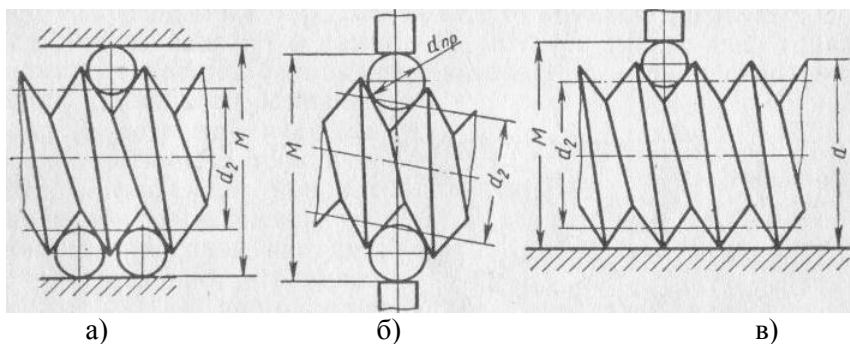


Рис. 2. Метод измерения d_2 при помощи проволочек

Аналог данного метода можно использовать в автоматизированных измерительных системах, где проволочками являются твердосплавные измерительные наконечники условно цилиндрической формы, вмонтированные в губки измерительной скобы.

Задача, как уже было отмечено ранее, состоит в выборе средства измерительной техники, обеспечивающее наименьшее значение погрешности измерения с целью уменьшения погрешности ошибочной разбраковки. Фактически при неизменной конструкции автоматизированного устройства, задача сводится к выбору оптимального количества наконечников (проволочек) при известных отклонениях параметров, входящих в формулы (1)...(3), номинальные значения которых меняются в заданных диапазонах.

Косвенные измерения – это измерения, при которых искомое значение величины находят путем согласованных измерений других величин, связанных с измеряемой величиной известной зависимостью. Эти другие величины получаются в результате прямых измерений. В метрологии искомые величины нередко находят вычислениями как функции измеренных величин. Очевидно, что погрешность функции будет зависеть от погрешности аргументов, по которым она была вычислена, и от вида функции.

Рассмотрим вопросы вычисления среднеквадратических отклонений (σ , с.к.о.) случайных составляющих погрешностей измерения по известным среднеквадратическим отклонениям погрешностей аргументов. При решении этой задачи встречаются два случая: коррелированных и некоррелированных аргументов.

Две или несколько случайных величин называются коррелированными, если коэффициенты корреляции парной статистической связи не равны нулю; в противном случае они некоррелированные. Например, случайные величины $x_1, x_2 \dots x_n$ считаются некоррелированными, если коэффициенты корреляции $r_{x_1x_2} = r_{x_1x_3} = r_{x_2x_3} = 0$ и коррелированными, если $r_{x_1x_2} \neq 0; r_{x_1x_3} \neq 0; r_{x_2x_3} \neq 0$ [4].

Анализ погрешностей косвенных измерений в большинстве случаев заключается в расчете числовых характеристик погрешности определения измеряемой величины по заданным характеристикам погрешностей измерений аргументов. Косвенные измерения заключаются в расчете истинного значения измеряемой величины $y = f(x_1; x_2; \dots; x_n)$ по истинным значениям аргументов $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$. В ходе эксперимента получают результаты X_i измерений аргументов, связанные с истинными значениями соотношением $X_i = x_i - \Delta_i$, где Δ_i – погрешность измерения x_i .

Следовательно,

$$y - \Delta = f(x_1 - \Delta_1; x_2 - \Delta_2; \dots; x_n - \Delta_n),$$

где: y – результат косвенных измерений,
 Δ – погрешность.

Если погрешности малы по сравнению с соответствующими результатами, т. е. $\frac{\Delta_i}{x_i} \ll 1$, то можно воспользоваться разложением в степенной ряд, ограничившись членами, содержащими погрешность не более чем во второй степени

$$y - \Delta = f(x_1; x_2; x_n) - \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \Delta_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_i^2} \right) \Delta_i^2 - \sum_{i=1, i < j}^n \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} \right) \Delta_i \Delta_j.$$

Случайная погрешность косвенных измерений вычисляется по формуле

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \varepsilon_i.$$

Возведем полученное равенство в квадрат и определим математическое ожидание от левой и правой частей

$$\overline{\varepsilon^2} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \overline{\varepsilon_i^2} + 2 \sum_{i=1, i < j}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \right) \overline{\varepsilon_i \varepsilon_j}.$$

Откуда

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_i^2 + 2 \sum_{i=1, i < j}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \right) \sigma_i \sigma_j r_{ij}. \quad (4)$$

Для некоррелированных погрешностей

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_i^2.$$

Законы суммирования среднеквадратических отклонений справедливы при любых законах распределения случайных погрешностей. Приведем частные случаи вычисления погрешностей [4].

Если зависимость y от x_i имеет вид суммы

$$y = \sum_{i=1}^n a_i x_i,$$

то для некоррелированных погрешностей

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n a_i^2 \sigma_{x_i}^2. \quad (5)$$

Рассмотрим случай, когда зависимость y от x_i имеет вид произведения

$$y = A x_1^{\alpha_1} x_2^{\alpha_2} \dots x_n^{\alpha_n}$$

Среднеквадратическое отклонение вычислим согласно (2.4)

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\alpha_i}{x_i} \right)^2 y^2 \sigma_{x_i}^2 + 2 \sum_{i=1}^n \sum_{i < j} \left(\frac{\alpha_i}{x_i} y \right) \left(\frac{\alpha_j}{x_j} y \right) \sigma_{x_i} \sigma_{x_j} r_{ij}.$$

Поделив правую и левую части на y^2 , получим

$$\gamma^2 = \sum_{i=1}^n \alpha_i^2 \gamma_{x_i}^2 + 2 \sum_{i=1}^n \sum_{i < j} \alpha_i \alpha_j \gamma_{x_i} \gamma_{x_j} r_{ij},$$

где $\gamma_{x_i} = \frac{\sigma_{x_i}}{x_i}$ и $\gamma_{x_j} = \frac{\sigma_{x_j}}{x_j}$ – относительные с.к.о. результатов измерений y и x_i соответственно.

Если погрешности не коррелированы, то

$$\gamma^2 = \sum_{i=1}^n \alpha_i^2 \gamma_{x_i}^2 \quad (6)$$

Определим погрешности косвенных измерений среднего диаметра резьбы по имеющимся аналитическим зависимостям между значениями функции и аргументов (1)...(3). Для определения случайных составляющих погрешности, необходимо знать погрешности аргументов данных функций:

- погрешность измерения параметра M (с.к.о. σ_M);
- погрешность измерения шага резьбы P (с.к.о. σ_P);
- погрешность изготовления проволоочки (с.к.о. $\sigma_{d_{пр}}$);
- погрешность измерения наружного диаметра резьбы (с.к.о. σ_d).

Для упрощения анализа пренебрегаем погрешностью измерения угла профиля [5]. Тогда при измерении тремя проволочками

$$d_z = M - d_{пр} \left(1 + \frac{1}{1/2} \right) + \frac{1}{2} P \frac{\cos 30^\circ}{\sin 30^\circ} = M - 3d_{пр} + \frac{\sqrt{3}}{2} P. \quad (7)$$

Для случая использования двух одинаковых проволочек (диаметром $d_{пр1}$) и одной проволочки другого диаметра ($d_{пр2}$) формула (7) примет вид

$$d_z = M_z - \frac{3}{2} (d_{пр1} + d_{пр2}) + 0,866P. \quad (8)$$

Используя выражение (8), получаем

$$y = f(x_1, x_2, x_3, x_4), \quad y = \sum_{j=1}^4 a_j x_j$$

где

$$\begin{aligned} x_1 &= M, & x_2 &= d_{пр1}, & x_3 &= d_{пр2}, & x_4 &= P \\ a_1 &= 1, & a_2 &= -\frac{3}{2}, & a_3 &= -\frac{3}{2}, & a_4 &= \frac{\sqrt{3}}{2}. \end{aligned}$$

Для определения среднеквадратического отклонения погрешности величины Y , заданной суммой независимых величин x_i с определенными коэффициентами a_i воспользуемся формулой (5).

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^4 a_i^2 \sigma_i^2}$$

$$a_1^2 = 1, \quad a_2^2 = \frac{9}{4}, \quad a_3^2 = \frac{9}{4}, \quad a_4^2 = \frac{3}{4}$$

$$\sigma_3 = \sqrt{\sigma_M^2 + \frac{9}{4}\sigma_{d_{np1}}^2 + \frac{9}{4}\sigma_{d_{np2}}^2 + \frac{3}{4}\sigma_P^2} \quad (9)$$

При измерении двумя проволочками

$$d_2 = M - 3d_{np} + \frac{\sqrt{3}}{2}P - \frac{P^2}{8(M - d_{np})}.$$

Данное выражение представляем в виде

$$F = \sum a_i x_i,$$

Где

$$x_1 = M, \quad x_2 = d_{np}, \quad x_3 = P$$

$$a_1 = 1, \quad a_2 = -3, \quad a_3 = -\frac{\sqrt{3}}{2}, \quad a_4 = -\frac{1}{8}$$

Определим погрешность σ_{x_4} величины x_4 , равной

$$x_4 = \frac{P^2}{y} \quad (10)$$

Прологарифмируем по основанию e , напомним

$$\ln x_4 = \ln P + \ln P - \ln y.$$

Учитывая, что

$$\frac{d(\ln P)}{dP} = \frac{1}{P}, \quad \frac{d(\ln y)}{dy} = \frac{1}{y}, \quad \frac{d(\ln x_4)}{dx_4} = \frac{1}{x_4},$$

получим

$$\left(\frac{\sigma_{x_4}}{x_4}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_P}{P}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_P}{P}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{y}\right)^2$$

$$\sigma_{x_4}^2 = 2x_4^2 \left(\frac{\sigma_P}{P}\right)^2 + x_4^2 \left(\frac{\sigma_y}{y}\right)^2$$

Подставляем (10) в последнее выражение

$$\sigma_{x_4} = \sqrt{2 \frac{P^4}{y^2} \cdot \frac{1}{P^2} \sigma_P^2 + \frac{P^4}{y^2} \cdot \frac{1}{y^2} \sigma_y^2} = \sqrt{2 \frac{P^2}{y^2} \sigma_P^2 + \frac{P^4}{y^4} \sigma_y^2} \quad (11)$$

Рассмотрим величину y

$$y = M - d_{\text{пр}} = \sum b_i z_i ,$$

где

$$z_1 = M, \quad z_2 = d_{\text{пр}}, \quad b_1 = 1, \quad b_2 = -1$$

$$\sigma_y^2 = \sigma_M^2 + \sigma_{d_{\text{пр}}}^2$$

Подставим это выражение в (11), получим

$$\sigma_{x_4}^2 = 2 \frac{P^2}{y^2} \sigma_P^2 + \frac{P^4}{y^4} (\sigma_M^2 + \sigma_{d_{\text{пр}}}^2).$$

Тогда

$$\sigma_2 = \sqrt{\left(\sigma_M^2 + 9\sigma_{d_{\text{пр}}}^2 + \frac{3}{4}\sigma_P^2 + \frac{P^2}{64y^2} \left[2\sigma_P^2 + \frac{P^2}{y^2 (\sigma_M^2 + \sigma_{d_{\text{пр}}}^2)} \right] \right)}, \quad (12)$$

Где

$$y = M - d_{\text{пр}}$$

При измерении одной проволочкой

$$d_2 = M + M' - d_{\text{пр}} \left(1 + \frac{1}{1/2}\right) + \frac{1}{2} P \frac{\cos 30^\circ}{\sin 30^\circ} - d = M + M' - 3d_{\text{пр}} + \frac{\sqrt{3}}{2} P - d$$

Аналогично написанному ранее

$$y = \sum_{j=1}^4 a_j x_j,$$

где

$$\begin{aligned} x_1 &= M, & x_2 &= M', & x_3 &= d_{\text{пр}}, & x_4 &= P, & x_5 &= d, \\ a_1 &= 1, & a_2 &= 1, & a_3 &= -3, & a_4 &= \frac{\sqrt{3}}{2}, & a_5 &= -1. \end{aligned}$$

$$\sigma_1 = \sqrt{\sum_{i=1}^4 a_i^2 \sigma_i^2} = \sqrt{\sigma_M^2 + \sigma_{M'}^2 + 9\sigma_{d_{\text{пр}}}^2 + \frac{3}{4}\sigma_P^2 + \sigma_d^2} \quad (13)$$

Основными составляющими погрешностей, среднеквадратические отклонения которых входят в формулы (9), (12), (13), являются:

- инструментальная погрешность;
- погрешность базирования;
- погрешность рабочего эталона;
- погрешность объекта контроля;
- температурная погрешность.

Анализ числовых значений погрешностей измерения выявил следующее.

1. Средство измерительной техники с одним наконечником обеспечивает наибольшую погрешность измерения. Это обусловлено необходимостью проводить два дополнительных измерения (M' и d). Таким образом, с.к.о. суммарной погрешности имеет на две составляющие больше, что существенно сказывается на ее величине. Можно также отметить, что наличие этих двух составляющих скажется также и на производительности операции измерения, увеличив ее практически в 2 раза. Следовательно, использование одного наконечника нецелесообразно, т.к. обеспечивает наименьшую производительность и наибольшую вероятность ошибочной разбраковки.

2. С.к.о. погрешностей измерения средствами с двумя и тремя наконечниками практически равны между собой. При использовании средства с двумя наконечниками проблема заключается в точной установке угла поворота оси измеряемой детали. Отклонение этого угла от заданного номинального значения будет вносить дополнительную погрешность базирования детали. С.к.о. погрешности средства с тремя наконечниками имеет немного большую величину (примерно на 5%), что обусловлено, отклонением расстояния между осями наконечников. Если допуск на это расстояние выполнить не удастся, то его придется увеличивать, что в дальнейшем может существенно сказаться на увеличении инструментальной составляющей погрешности.

Таким образом, можно сделать вывод, что наиболее оптимальным (в плане минимума погрешности измерения) в данных условиях является средство измерительной техники, имеющее два наконечника. Это средство и обеспечит наименьшее значение вероятности ошибочной разбраковки.

3. ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И НАСТРОЙКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СТАНЦИИ

На рис. 3 и 4 приведена конструкция измерительного устройства среднего диаметра резьбы шпильки.

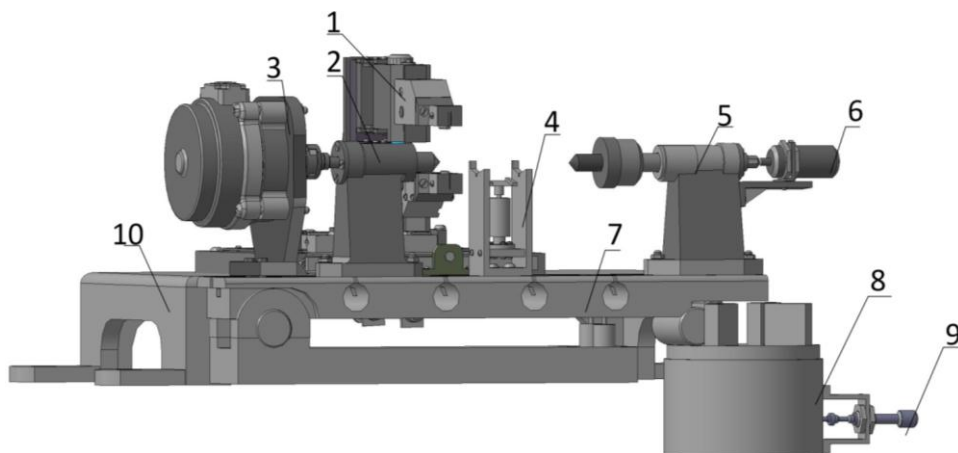


Рис. 3. Твердотельная модель измерительного устройства:

- 1 – скоба индуктивная; 2 – неподвижная бабка; 3 – двигатель; 4 – выгалькиватель;
5 – подвижная бабка; 6 – привод подвижной бабки; 7 – синусная линейка;
8 – поворотный стол; 9 – привод поворотного стола; 10 – станина.

Измерительное устройство состоит из двух бабок: неподвижной 4 и подвижной 5 с вращающимися центрами. Вращательное движение, обеспечиваемое мотор-редуктором 7, передается на центр подвижной бабки 5 с помощью кулачково-дисковой муфты 6. Осевое перемещение центра неподвижной бабки 5 осуществляется посредством пневмоцилиндра 3'. Измерительная скоба 1 закреплена при помощи кронштейна 9 на шариковой направляющей 8. Направляющая 8, управляемая пневмоцилиндром 3, осуществляет подвод измерительной скобы на позицию измерения в продольном направлении. Движение каретки ограничивает стопорный винт 12. Шариковая направляющая 8 установлена на плите 10. Бабки 4 и 5 установлены на синусной линейке 11, которая поднимается на высоту одной из комплекта плоскопараллельных мер, при помощи пневмоприпода 3" и образует угол α . Настройка станции производится путем установки на измерительную позицию рабочего эталона (в качестве рабочего эталона выступает калибр пробка).

Наладка скобы на диаметр детали осуществляется перемещением губок индуктивной скобы 1. Настройка индуктивного преобразователя на измеряемую величину осуществляется настроечным винтом. Арретирование измерительных губок осуществляется с помощью пневмоштока встроенного в подвижную каретку упругого параллелограмма. При измерении двумя проволочками поворотный стол 2 поворачивает к синусной линейке 11 необходимую меру, пневмоарретир 3" поднимает линейку и плавно опускает на меру.

Данное измерительное устройство осуществляет сортировку деталей на пять групп: 1,2,3 группы – годные, брак «+», брак «-».

4. ВЫВОДЫ

Таким образом, решена задача выбора средства измерения среднего диаметра резьбы обеспечивающее минимальную величину погрешности измерения и наименьшее значение вероятности ошибочной разбраковки и, как следствие, наилучшее качество резьбового соединения.

Конкретные результаты работы состоят в следующем.

1. Проведен анализ влияния средства измерения среднего диаметра резьбы на показатели качества резьбовых соединений с натягом, а так же анализ погрешностей, возникающих в результате косвенных измерений среднего диаметра при помощи проволочек.
2. Поставлена и решена задача по выбору средства измерительной техники, обеспечивающего требуемую точность измерений.
3. Разработана конструкция автоматизированного устройства измерения среднего диаметра резьбы.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] ЯКУШЕВ А. И.: *Повышение прочности и надежности резьбовых соединений*. А. И. Якушев, Р. Х. Мустаев, Р. Р. Мавлютов., М.: Машиностроение, 1979, 214 с.
- [2] ЯКУШЕВ А. И.: *Влияние технологии изготовления и основных параметров резьбы на прочность резьбовых соединений*. А. И. Якушев, М.: Оборонгиз, 1956, 191 с.
- [3] ИВАНОВ А.Г.: *Измерительные приборы в машиностроении*. А. Г. Иванов, М.: Машиностроение, 1964, 521 с.
- [4] ДВОРЯШИН Б. В.: *Основы метрологии и радиоизмерения: Учеб. пособие для вузов*. Б. В. Дворяшин, М.: Радио и связь, 1993, 320 с.: ил.
- [5] ГОРОДЕЦКИЙ Ю. Г.: *Конструкции, расчет и эксплуатация измерительных инструментов и приборов*. Ю. Г. Городецкий, М.: Машиностроение, 1971, 376 с.

РЕАКЦИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ПРОИЗВОЛЬНЫЙ СИГНАЛ НА ПРИМЕРЕ СТАНКА В УСЛОВИЯХ ПЛАВУЧЕЙ РЕМОНТНОЙ МАСТЕРСКОЙ

1. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Анализ реакции динамических систем на сигнал произвольной формы представляет собой особую задачу. Ее решение возможно путем разложения сигнала и представления его в полигармонической форме. При этом возникает проблема определения требуемого числа гармонических составляющих и вычисления значений их амплитуд, что осложняет решение задачи и приводит к появлению погрешности. Возможен рекуррентный метод [1] анализа реакции динамической системы по ее операторной передаточной функции, исключающий процедуру преобразования сигнала.

2. АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Вопросам исследования реакции динамической системы на внешние воздействия посвящено большое количество работ, накоплен справочный материал, в частности по защите технических объектов от вибраций и ударов [2]. Разработан математический аппарат для автоматического управления различными техническими и технологическими объектами и системами, позволяющий использовать численные методы анализа и синтеза систем и объектов в конкретных примерах [3]. Однако возникающие новые задачи, связанные с виброустойчивостью таких технических объектов, как станки, работающие в условиях плавучей ремонтной мастерской, автомобильные системы, требуют новых подходов к моделированию реакций их динамических систем на сигналы произвольной формы.

¹ Севастопольский государственный университет, ул. Университетская 33,
г. Севастополь, e-mail: khao@list.ru, sergbratan@gmail.com

Цель статьи состоит в получении численной процедуры вычисления реакции линейной системы с сосредоточенными параметрами на сигнал произвольной формы без преобразования входного сигнала.

3. ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Рассмотрим процедуру получения решения в обобщенной форме. Для входного сигнала X звена с операторной передаточной функцией:

$$W(p) = \frac{C(p)}{Z(p)},$$

где: $C(p) = b_0 + b_1 p + b_2 p^2 + \dots + b_m p^m$ – оператор воздействия;
 p – оператор Лапласа;

$Z(p) = a_0 + a_1 p + a_2 p^2 + \dots + a_n p^n$ – собственный оператор, допустимо описание связи входного X и выходного Y сигналов в форме

$$X(b_0 + b_1 p + b_2 p^2 + \dots + b_m p^m) = Y(a_0 + a_1 p + a_2 p^2 + \dots + a_n p^n). \quad (1)$$

Задача состоит в получении решения уравнения (1) относительно выходного сигнала Y при известном входном сигнале X , коэффициентах $b_0, \dots, b_m$ и $a_0, \dots, a_n$. Запишем одно из возможных решений уравнения (1) в операторной форме

$$Y = \frac{Xb_0 - Ya_0}{a_n p^n} + \frac{Xb_1 - Ya_1}{a_n p^{n-1}} + \dots + \frac{Xb_m - Ya_m}{a_n p^{n-m}} - \frac{Ya_{m-1}}{a_n p^{n-m-1}} - \dots - \frac{Ya_{n-1}}{a_n p}; \quad n > m. \quad (2)$$

Для получения решения во временной области необходимо выполнить интегрирование, так как p^{-q} означает q – кратное интегрирование слагаемых, содержащих $q = 1, \dots, n$.

С этой целью уравнение (2) представим в тождественной форме

$$Y = a_n^{-1} \left(p^{-n}(Xb_0 - Ya_0) + p^{1-n}(Xb_1 - Ya_1) + \dots + \right. \\ \left. + p^{m-n}(Xb_m - Ya_m) - p^{1+m-n}Ya_{m-1} - \dots - p^{-1}Ya_{n-1} \right); \quad n > m.$$

Выполняя последовательно интегрирование с некоторым шагом по времени h , найдем дискретные значения выходного сигнала $Y(t)$ для значений $t = 0, h, 2h, \dots, zh$, где z – число значений, на которые разбит временной интервал.

Пример. На рисунке 1 изображена кинематическая схема звена второго порядка, которая может быть применена при моделировании технологических процессов, динамических систем станков, автомобилей, систем виброизоляции объектов, где m – масса, кг; c – жесткость, Н/м; λ – сопротивление потерь, Нс/м; y – изменение положения центра тяжести, м; H – положение центра тяжести, м.

На основании изложенной методики представим процедуру преобразования дифференциального уравнения системы, изображенной на рис. 1.

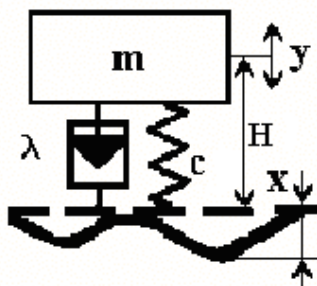


Рис. 1. Кинематическая схема

Дифференциальное уравнение динамической системы с учетом введенных обозначений запишем в виде

$$\begin{aligned}
 my'' + \lambda y' + cy &= kx; \\
 y'' &= \frac{\partial^2}{\partial t^2} y; \quad y' = \frac{\partial}{\partial t} y; \\
 m \left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} y \right) + \lambda \left(\frac{\partial}{\partial t} y \right) + cy &= kx;
 \end{aligned}$$

Сведем к операторной форме полученное выражение, учтя связь производной с дифференциалом, введя символ (оператор) дифференцирования p

$$py = \frac{\partial}{\partial t} y; \quad p^2 y = \frac{\partial^2}{\partial t^2} y;$$

$$m p^2 y + \lambda p y + c y = k x.$$

Перейдем к стандартной (безразмерной) форме

$$\begin{aligned} a_2 &= m / c ; \quad a_1 = \lambda / c ; \quad k / c = 1; \\ a_2 p^2 y + a_1 p y + y &= x . \end{aligned} \quad (3)$$

Разделив переменные x и y

$$y(a_2 p^2 + a_1 p + 1) = x ,$$

получим операторную передаточную функцию

$$W_1(p) = \frac{1}{a_2 p^2 + a_1 p + 1} ,$$

по которой для сравнения можно вычислить реакцию на стандартный сигнал. Получим решение уравнения (3) в рекурсивной форме

$$\begin{aligned} m p^2 y &= c(x - y) - \lambda p y; \\ y &= c(x - y) / m p^2 - \lambda y / m p; \\ y &= (c(x - y) / p - \lambda y) / m p. \end{aligned}$$

Выполним интегрирование по методу Эйлера

$$\begin{aligned} y &= y + c(x - Y) h; \\ Y &= Y + (y - \lambda Y) h / m. \end{aligned} \quad (4)$$

Перейдем к рекуррентной форме

$$\begin{aligned} y[i] &= y[i-1] + c(x[i] - Y[i-1]) h; \\ Y[i] &= Y[i-1] + (y[i] - \lambda Y[i-1]) h / m, \end{aligned} \quad (5)$$

где: $i = 1, \dots, z$.

Одно из полученных решений (4) и (5), либо их комбинация могут быть применены для вычисления реакции системы на произвольный дискретно заданный входной сигнал.

Пример-1. Имитационная модель. Для иллюстрации результатов анализа реакции системы подвески автомобиля в качестве примера выбраны параметры автомобиля ВАЗ-2109:

$M_a=950$:	# Масса автомобиля, кг
$M_g=300$:	# Грузоподъемность, кг
$K_z=0,5$;	# Коэффициент загрузки
$m=(M_a+M_g*K_z)/4$;	# Приведенная масса, кг
$D_h=0,169$:	# Осадка под нагрузкой, м
$c=4353$;	# Жесткость рессоры, Н/м
$\xi_i=0,5$:	# Коэффициент демпфирования
$L=1094$:	# Сопротивление амортизаторов, Нс/м
$H=0,35$:	# Положение кузова, м
$D_x=H/9$:	# Максимальная величина неровностей, м

Задав временной интервал t_0 и число реализаций z , найдем шаг дискретизации по времени h . При известном значении h по формуле (5) вычислим значения $Y_i = Y(t_i)$, где $t_i = ih$; $i = 0, \dots, z$. Для заданных моментов времени t_i получим значения $X_i = X(t_i)$, что позволяет построить графики входного воздействия $X(t)$ и реакции подвески $Y(t)$.

На рис. 2 изображены графики рельефа поверхности дорожного покрытия $X(t)$ и реакции подвески $Y(t)$ при номинальных параметрах.

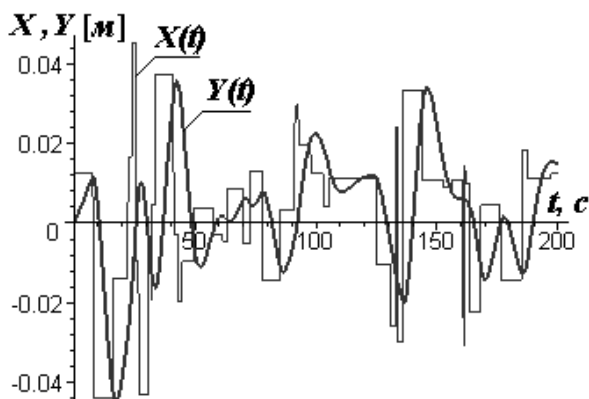


Рис. 2. Реакция системы при номинальных параметрах

На рис. 3 изображены графики рельефа поверхности дорожного покрытия $X(t)$, реакции подвески при номинальных параметрах $Y(t)$ и при уменьшении c $Y_c(t)$.

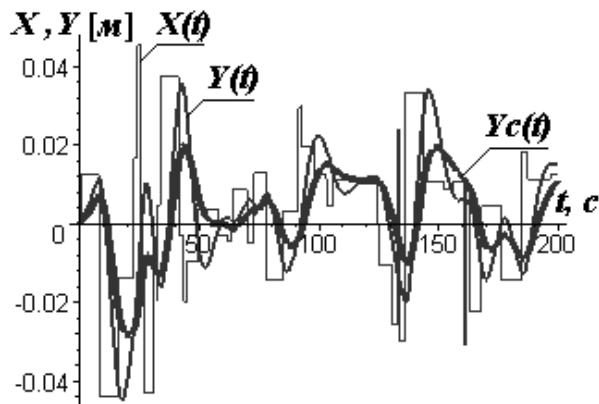


Рис. 3. Реакция системы при уменьшении C

На рис. 4 изображены графики рельефа поверхности дорожного покрытия $X(t)$, реакции подвески при номинальных параметрах $Y(t)$ и при уменьшении m $Ym(t)$.

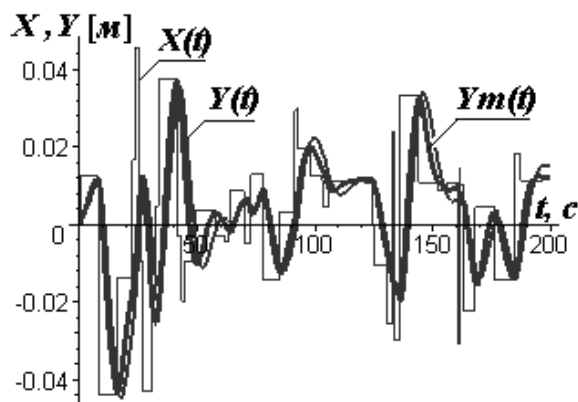


Рис. 4. Реакция системы при уменьшении m

На рис. 5 изображены графики рельефа поверхности дорожного покрытия $X(t)$, реакции подвески при номинальных параметрах $Y(t)$ и при увеличении λ $Y\lambda(t)$.

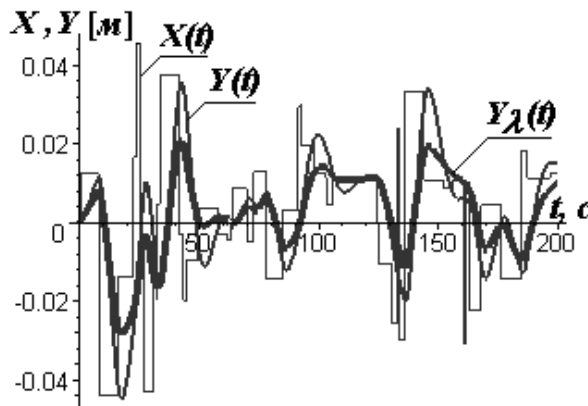


Рис. 5. Реакция системы при увеличении λ

4. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ

При анализе влияния параметров на свойства подвески, находящейся под воздействием случайных возмущений, связанных с неровностями покрытия, уместен статистический подход сравнения статистических характеристик входного сигнала, обусловленного случайными изменениями рельефа покрытия, с выходным сигналом, характеризующим изменение положения центра тяжести приведенной массы. В зависимости от цели анализа такими характеристиками могут быть начальные и центральные моменты k -го порядка. Наиболее приемлемыми для анализа качества работы подвески является дисперсия или стандартное отклонение в качестве меры оценки степени влияния на качество работы подвески значений ее параметров.

Сравнивая, например, дисперсии входного воздействия $D(X)$ и реакции подвески $D(Y)$, можно судить о качестве работы подвески. Введем коэффициент демпфирования

$$K = D(X)/D(Y),$$

который отражает степень демпфирования. Его величина будет расти по мере снижения $D(Y)$. Для вычисления дисперсии применена стандартная Maple – процедура вычисления дисперсии $Dx:=\text{describe}[\text{variance}][\text{seq}(X[i],i=1..z)]:$ для вычисления дисперсии входного воздействия и $Dy:=\text{describe}[\text{variance}][\text{seq}(Y[i],i=1..z)]:$ для вычисления дисперсии реакции подвески.

В результате вычислений получены следующие значения коэффициентов демпфирования:

$K_n = 1,63$ для номинальных параметров подвески,

$K_c = 3,27$ при уменьшении жесткости c в два раза,

$K_m = 1,74$ при уменьшении приведенной массы подвески m в два раза,

$K_\lambda = 3,38$ при увеличении сопротивления амортизаторов подвески λ в два раза.

Пример-2. Рассмотрим пример моделирования технологической системы плоскошлифовального станка мод.3Г71М, оснащенной демпфирующим устройством (рис. 6), [5], с параметрами:

$Ma=3450$;	# Масса системы, кг
$Mg=30$;	# Масса детали (заготовки), кг
$Kz=0.5$;	# Коэффициент загрузки
$m0=Ma+Mg*Kz$;	# Приведенная масса, кг
$c0=500$;	# Жесткость системы, Н/м
$L0=1000$;	# Сопротивление потерь, Нс/м
$Dx=.0035$;	# Максимальное значение шумовой составляющей по методике, рассмотренной в примере-1.

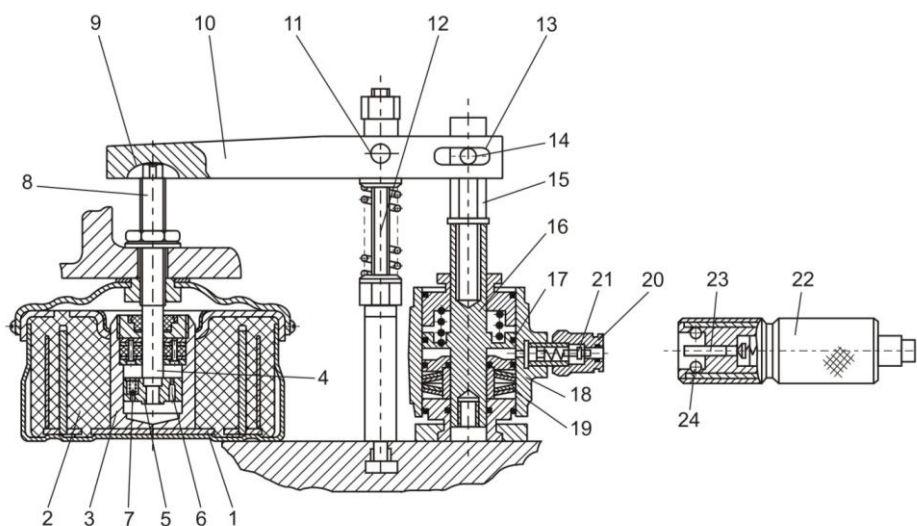


Рис. 6. Общий вид демпфирующего устройства плоскошлифовального станка:

- 1 – основание; 2 – резиновый элемент; 3 – цилиндр; 4 – шток; 5 – поршень;
- 6 – калиброванное отверстие; 7 – клапан сжатия; 8 – регулировочный винт;
- 9 – сферическая поверхность лунки; 10 – прихват; 11 – ось; 12 – стойка;
- 13 – продольный паз; 14 – ось; 15 – опора; 16 – опорный шток; 17 – поршень;
- 18 – гидроцилиндр; 19 – пружинный аккумулятор; 20 – малая полумуфта;
- 21 – клапан; 22 – большая полумуфта; 23 – клапанный штырь; 24 – шарики

На рис. 7а и б изображены графики помехи $X(t)$, действующей на систему, и результат демпфирования $Y(t)$ при номинальных параметрах, а на рисунке 6б изображен график результата демпфирования $Yc(t)$ при $c = c/2$.

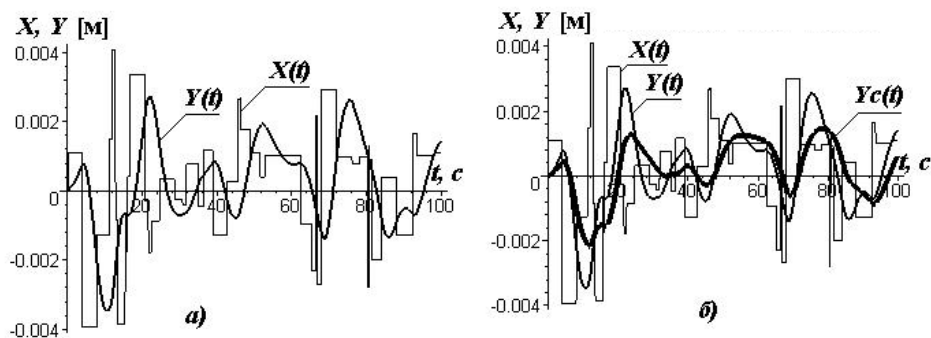


Рис. 7. Графики реакции системы при: а) номинальных параметрах системы;
б) значении $c = c/2$

Для оценки влияния изменения параметров технологической системы приведены на рис. 8а и б графики реакции системы при изменениях остальных параметров $m = m/2$ и $\lambda = 2\lambda$.

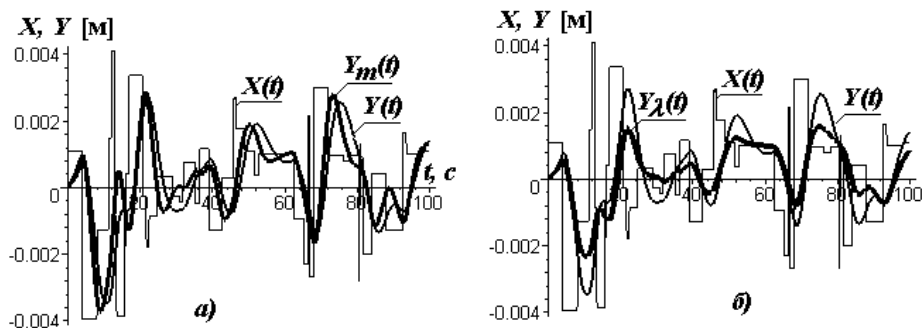


Рис. 8. Графики реакции системы при: а) значении $m = m/2$;
б) значении $\lambda = 2\lambda$

В результате вычислений получены следующие значения коэффициентов демпфирования:

$K_n = 1,78$ для номинальных параметров подвески,

$K_c = 3,75$ при уменьшении жесткости c в два раза,

$K_m = 1,86$ при уменьшении приведенной массы подвески m в два раза,

$K_\lambda = 3,79$ при увеличении сопротивления амортизаторов подвески λ в два раза.

5. ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ДИСКРЕТНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ.

Для оценки величины погрешности дискретного преобразования передаточная функция системы приведена к стандартной форме

$$W_2(p) = \frac{1}{a_0 + a_1 p + a_2 p^2},$$

где $a_0 = 1$; $a_1 = \lambda/c$; $a_2 = m/c$.

На рис. 9а изображены графики переходных характеристик, где $Y(t)$ – переходная характеристика, вычисленная в результате дискретного представления, а $y(t)$ – переходная характеристика, полученная в результате обратного преобразования Лапласа.

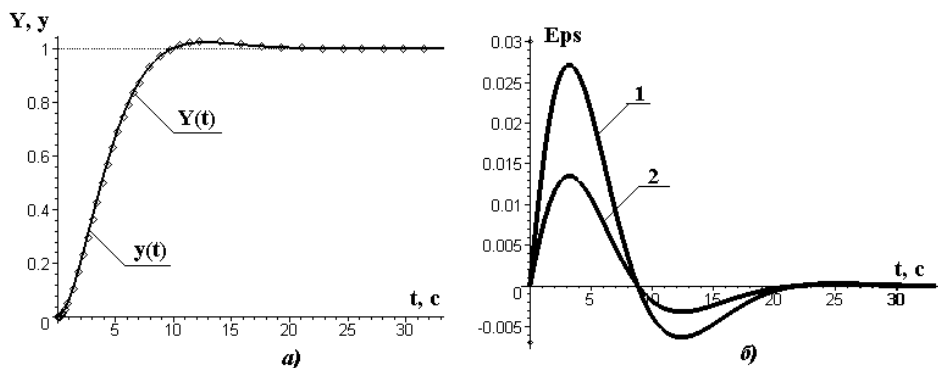


Рис. 9. Графики переходных характеристик

На рисунке 9б изображены графики погрешности $Eps(t) = Y(t) - y(t)$, где кривая 1 – получена при шаге дискретизации больше в два раза шага дискретизации, соответствующего кривой 2.

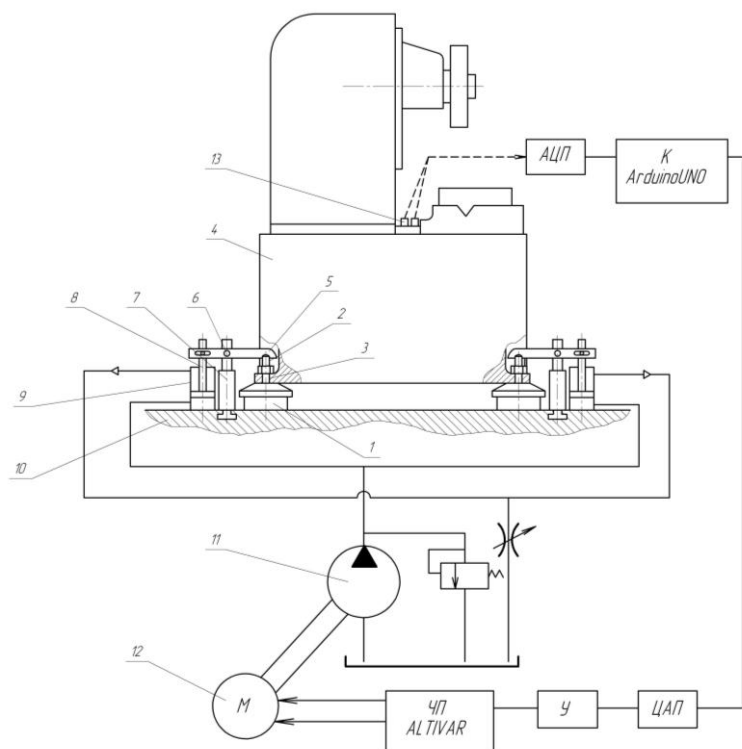


Рис.10. Схема устройства автоматической виброзащиты станка, работающего в условиях плавучей ремонтной мастерской

С учетом проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработано устройство (рис.10) автоматической виброзащиты металлорежущего станка, например, шлифовального, для работы в условиях плавучей ремонтной мастерской. Металлорежущий станок устанавливают на общей поверхности, например палубы механообрабатывающего участка плавучей ремонтной мастерской на четырех виброизолирующих опорах 1, выполненных в виде основания с резиновым элементом и установленным в осевом отверстии цилиндром с рабочей жидкостью, поршнем со штоком 2, размещенным и зафиксированным в отверстиях станины 3 станка 4. В процессе воздействия на станину станка 4 колебаний от внешних источников (компрессоры, оборудование, вентиляторы, станки) через поверхность палубы передаются колебательные воздействия через опору 1 и цилиндр со штоком 2, обеспечивая гашение колебаний, то есть механическое и гидравлическое демпфирование. Поскольку плавучие ремонтные мастерские подвергаются влиянию колебаний морской (речной) поверхности, размещенное

на палубах технологическое оборудование подвергается опасности сдвига при отрыве опоры 1 от поверхности палубы. Для предотвращения сдвига и перекоса станка верхнюю часть штока 2 поджимают прижимом 5, размещенным на оси 6 стойки 7. Задней частью прижим 5 взаимодействует со штоком 8 антивибрационного гидроцилиндра 9, закрепленного на поверхности 10 палубы вместе со стойкой 7. Нижняя полость антивибрационного гидроцилиндра 9 связана с гидронасосом 11, работающим от асинхронного электродвигателя 12. Однако внешние воздействия не являются постоянными как по частоте, так и по амплитуде. Для исключения вредного влияния этих колебаний на процесс обработки, в частности, для снижения волнистости при шлифовании деталей, установленные на направляющих станины 3 вибродатчики 13 преобразуют вибрации в электрические сигналы, которые через аналого-цифровой преобразователь (АЦП) передаются на вход программируемого логического контроллера ArduinoUNO. Указанный контроллер через цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) и усилитель, а также частотный преобразователь (ЧП) Altivar, регулируя частоту вращения электродвигателя 12 и насоса 11, соответственно увеличивает или уменьшает давление в бесштоковой полости антивибрационного гидроцилиндра 9, тем самым увеличивая или уменьшая жесткость виброизолирующей опоры воздействием через прижим 5 на шток 2. Контроллер ArduinoUNO настраивается таким образом, что при появлении на выходе вибродатчиков 13 низкочастотных высокоамплитудных вибраций, выходящих за пределы расчетных (нормальных), генерируются соответствующие сигналы на выходе контроллера, позволяющие повысить жесткость виброопоры путем увеличения давления рабочей жидкости в антивибрационном гидроцилиндре 9 за счет увеличения давления в напорном трубопроводе от насоса 11 с электродвигателем 12 и ЧП Altivar.

Устройство позволяет обеспечить автоматическое управление демпфированием виброизолирующей опоры металлорежущего станка при внешних воздействиях, в том числе и от колебаний водной поверхности; повысить динамические качества станка и надежность его виброзащиты при работе в условиях плавучих ремонтных мастерских; обеспечить возможность регулировки управляющих воздействий на жесткость виброизолирующих опор в широком диапазоне путем использования современной платформы ArduinoUNO, имеющей 14 цифровых входов и 6 выходов, кварцевый генератор, разъем USB, силовой разъем, разъем ICSP и устройство перезагрузки; повысить качество обработки деталей за счет снижения погрешностей их формы путем уменьшения вибрационных воздействий, гашению которых способствует виброизолирующая механо-гидравлическая опора с автоматическим регулированием жесткости в зависимости от сигналов с вибродатчиков, размещенных на незначительном удалении от рабочей зоны станка.

6. ВЫВОДЫ

Рассмотренный метод позволяет вычислить реакцию системы на произвольный входной сигнал без процедур его преобразования. Погрешность полученного численного решения зависит от величины шага квантования. Введенный коэффициент демпфирования позволяет оценить качество работы подвески и эффект от ввода коррекции ее параметров. Для реализации метода предложен ряд конструктивных решений по обеспечению эффективного управления демпфированием виброизолирующей опоры металлорежущего станка при внешних воздействиях.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] БЕСЕКЕРСКИЙ В. А.: *Теория систем автоматического управления*. В. А. Бесекерский, Е. П. Попов, Санкт-Петербург: Профессия, 2003, 744 с.
- [2] ФРОЛОВА К. В.: *Вибрации в технике. Справочник*. В 6-ти т. Т. 6 Защита от вибраций и ударов, Машиностроение, 1981, 456 с.
- [3] ДОЛГИН В. П.: *Автоматическое управление техническими и технологическими объектами и системами. Численные методы анализа и синтеза систем и объектов*. В. П. Долгин. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2003, 320 с.
- [4] ВЛАДЕЦКАЯ Е. А. *Повышение виброустойчивости шлифовальных станков плавающих ремонтных мастерских*. Е. А. Владецкая, С. М. Братан, А. О. Харченко, Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. Вип.7. – Харків: НТУ «ХПІ», 2012. – с. 103–111.
- [5] Пат. № 51621 Україна, МПК В23Q 1/00, *Віброізолюючий пристрій метало-різального верстата плаваючої ремонтної майстерні*. О. О. Харченко, К. О. Владецька, С. М. Братан, Д. О. Владецький; заявник та патентовласник Севастопольський національний технічний університет, № 201000394; заявл. 18.01.2010; опубл. 26.07.2010, Бюл. №14.

BEZPIECZEŃSTWO MASZYN ZGODNE Z DYREKTYWĄ MASZYNOWĄ 2006/42/WE – OCENA RYZYKA DLA UKŁADU LOGICZNEGO REALIZUJĄCEGO FUNKCJĘ BEZPIECZEŃSTWA

1. WSTĘP

Postęp technologiczny i społeczny jest związany z ciągłym podnoszeniem poczucia bezpieczeństwa w każdym aspekcie funkcjonowania ludzkości. Nie jest inaczej w zastosowaniach maszyn. Wymagania zasadnicze w zakresie bezpieczeństwa i ochrony zdrowia dotyczące projektowania i wytwarzania maszyn zostały zawarte w dyrektywie 2006/42/WE Parlamentu Europejskiego z dnia 17 maja 2006 r. zwanej dyrektywą maszynową (MD).

Spełnienie przez maszynę wymagań zawartych w powyższej i związanych z nią dyrektywach (tzw. dyrektywach nowego podejścia) gwarantuje producentom swobodny dostęp do wszystkich rynków państw Unii Europejskiej (UE).

Podstawą nowego podejścia jest budowanie maszyn z zasady bezpiecznych. Obowiązkowe stosowanie dyrektywy 2006/42/WE zmusza producentów maszyn do wykonywania analiz ryzyka na etapie projektowania. Przed wprowadzeniem maszyny do obrotu, tzn. przed pierwszym udostępnieniem wyrobu na rynku wspólnoty, producent lub jego przedstawiciel musi wykazać zgodność maszyny z zasadniczymi wymaganiami dyrektywy MD. Dodatkowo, wskazane jest stosowanie norm zharmonizowanych [1], pomimo że normy zharmonizowane posiadają niewiążący status. Wykazanie zgodności upoważnia producenta do wystawienia Deklaracji Zgodności WE i oznaczenia maszyny znakiem CE.

¹ Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, 20-612 Lublin, ul. Głęboka 28,
e-mail: waldemar.samociuk@up.lublin.pl

² Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, 20-612 Lublin, ul. Głęboka 28,
e-mail: zbigniew.krzysiak@up.lublin.pl

³ Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, 20-612 Lublin, ul. Głęboka 28,
e-mail: grzegorz.bartnik@up.lublin.pl

⁴ Polimex Energetyka Sp. z o.o., e-mail: dorota.samociuk@polimex-energetyka.pl

Dyrektywa określa procedury oceny zgodności w zależności od poziomu ryzyka związanego z używaniem danej maszyny, przy czym ryzyko oznacza kombinację prawdopodobieństwa i stopnia obrażeń lub uszczerbku na zdrowiu, które mogą zaistnieć w sytuacjach niebezpiecznych. Procedury te, tzw. moduły oceny zgodności, powinny być zgodne z decyzją Rady 93/465/EWG z dnia 22 lipca 1993 r.

2. ZASADNICZE WYMAGANIA W ZAKRESIE OCHRONY ZDROWIA I BEZPIECZEŃSTWA ODNOSZĄCE SIĘ DO PROJEKTOWANIA I WYKONYWANIA MASZYN

Każda maszyna musi być zaprojektowana i wykonana z uwzględnieniem wyników oceny ryzyka. W załączniku I MD został przedstawiony iteracyjny proces oceny ryzyka i redukcji ryzyka, za pomocą którego producent lub jego upoważniony przedstawiciel:

- określa ograniczenia dotyczące maszyny (także dla sytuacji niewłaściwego jej użycia);
- określa zagrożenia, jakie może stwarzać maszyna i związane z tym niebezpieczne sytuacje (scenariusze awaryjne);
- szacuje ryzyko, biorąc pod uwagę stopień możliwych obrażeń lub uszczerbku na zdrowiu i prawdopodobieństwo ich wystąpienia;
- ocenia ryzyko, mając na celu ustalenie czy wymagana jest redukcja ryzyka;
- eliminuje zagrożenia lub zmniejsza ryzyko związane z takimi zagrożeniami poprzez zastosowanie środków ochronnych, zgodnie z zasadami bezpieczeństwa kompleksowego.

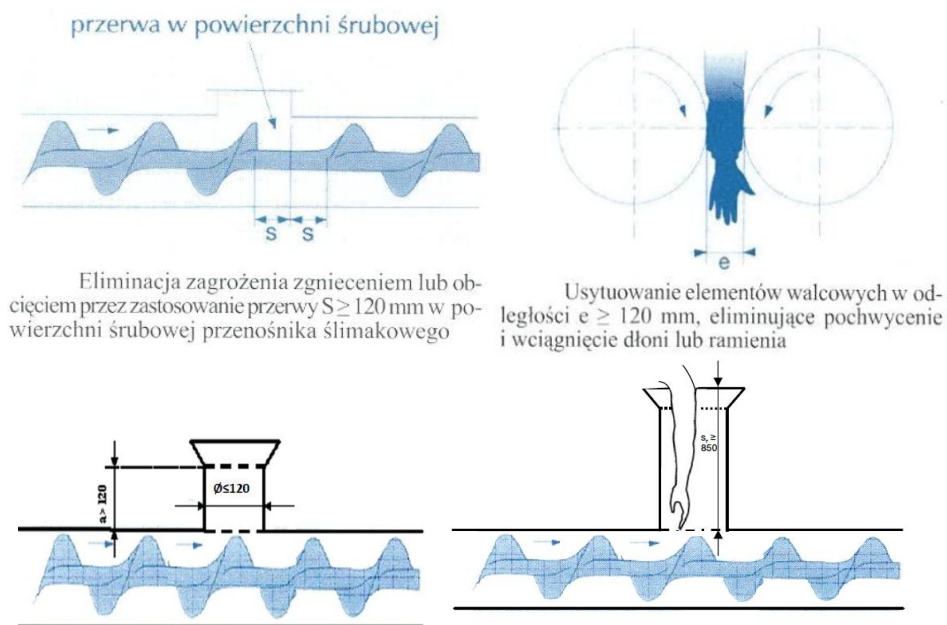
Podczas projektowania i eksploatacji maszyny należy zwrócić uwagę na materiały użyte do wykonania maszyny oraz na powstające produkty, by nie stwarzały niepotrzebnego zagrożenia. Maszyna powinna posiadać odpowiednie oświetlenie zarówno zewnętrzne jak i wewnętrzne. Konstrukcja maszyny powinna być zaprojektowana z uwzględnieniem wymogów ergonomicznych, ułatwiających jej obsługę i transport. Dopuszczalny hałas, jaki wytwarza maszyna został opisany w części dotyczącej instrukcji obsługi i dokumentacji maszyny.

Zasadnicze wymagania w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa odnoszące się do projektowania i wykonywania maszyn zamieszczone w załączniku I MD składają się z kilku części. Pierwsza część ma zakres ogólny i ma zastosowanie do wszystkich rodzajów maszyn. Kolejne części odnoszą się do niektórych typów bardziej określonych zagrożeń.

2.1. ZASADY BEZPIECZEŃSTWA KOMPLEKSOWEGO

Maszyna musi być zaprojektowana i wykonana w taki sposób, aby nadawała się do wykonywania założonej funkcji oraz mogła być eksploatowana bez narażenia osób na ryzyko. Producent musi wziąć pod uwagę nie tylko zamierzone zastosowanie maszyny, ale także możliwe do przewidzenia niewłaściwe użycie, jeżeli takie użycie powodowałoby ryzyko. Przedsięwzięte środki muszą mieć na celu wyeliminowanie wszelkiego ryzyka w okresie całego założonego okresu eksploatacji maszyny, z jej transportem, montażem, demontażem, unieruchomieniem i złomowaniem łącznie.

Producent powinien mieć na celu wyeliminowanie lub zminimalizowanie ryzyka, tak dalece jak to jest możliwe (projektowanie i wykonywanie maszyn bezpiecznych z samego założenia, na rys. 1. przedstawiono przykłady).

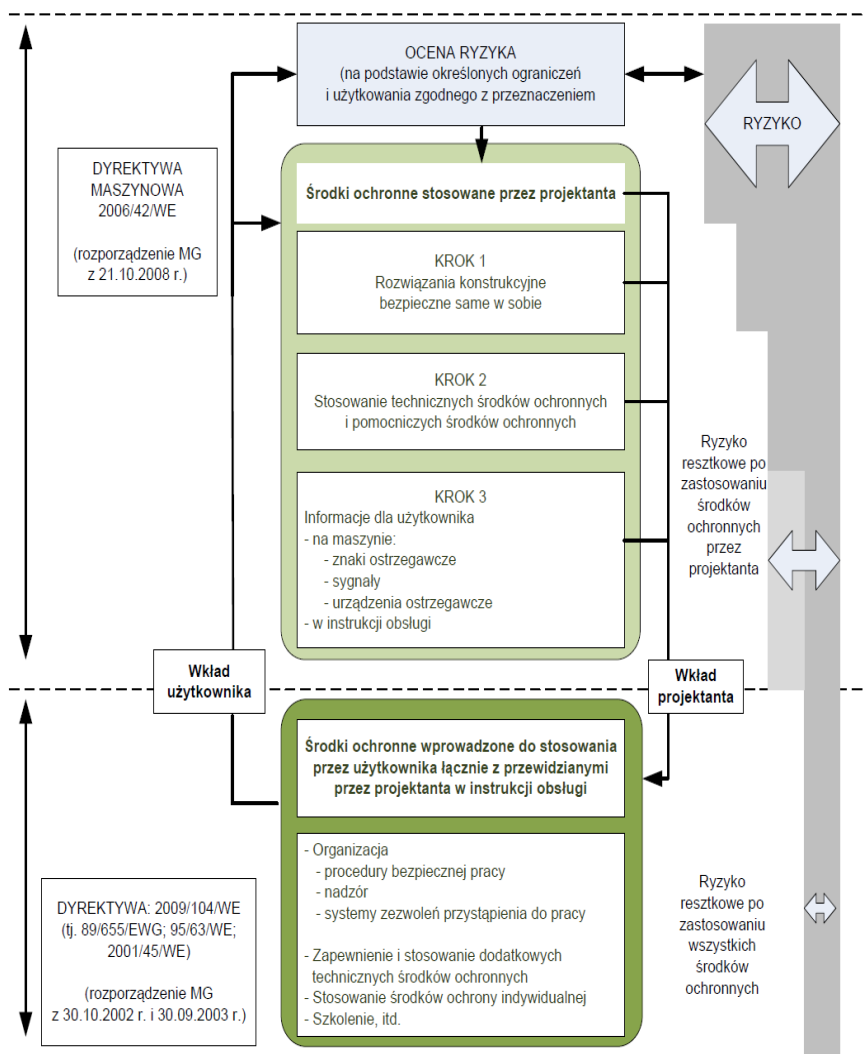


Rys. 1. Unikanie zagrożeń – rozwiązania bezpieczne same w sobie [2]

W związku z ryzykiem, którego nie można wyeliminować poprzez rozwiązania bezpieczne same w sobie należy zastosować konieczne środki ochronne, np. polegające na odseparowaniu przestrzeni roboczej maszyny i strefy aktywności ludzkiej.

Zwykle pozostaje jednak ryzyko resztkowe [3], należy zatem informować użytkowników o nim poprzez przeszkolenie oraz określenie potrzeby stosowania środków ochrony osobistej. Także w instrukcjach należy zwrócić użytkownikowi uwagę na niedozwolone sposoby użytkowania maszyn.

Zasady bezpieczeństwa kompleksowego wymienione w dyrektywie maszynowej można przedstawić w trzech krokach (jak to zostało przedstawione na rys. 2). Ryzyko resztkowe pozostające po zastosowaniu środków ochronnych przewidzianych przez producenta da się jeszcze zmniejszyć poprzez zastosowanie środków przedstawionych m.in. w tzw. dyrektywie społecznej (2009/104/WE). Drogę eliminacji (redukcji) ryzyka omówioną PN-EN ISO12100 przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Zmniejszanie ryzyka wg PN-EN ISO 12100 [2]

2.2. ELEMENTY STEROWNICZE

Na bezpieczeństwo maszyn duży wpływ ma ich sterowanie, dlatego elementy sterownicze muszą być odpowiednio rozmieszczone, wyraźnie widoczne i rozpoznawalne, nie budzące wątpliwości co do funkcji jaką pełnią oraz, we właściwych przypadkach, oznaczone piktogramami.

Układ sterowania musi uniemożliwiać uruchomienie maszyny, jeżeli jakakolwiek osoba znajduje się w strefie niebezpiecznej. Jeżeli operator nie ma możliwości stwierdzenia obecności osób w strefie zagrożenia, uruchomienie maszyny musi być poprzedzone dźwiękowym lub optycznym sygnałem ostrzegawczym.

Jeżeli istnieje kilka stanowisk sterowania, układ sterowania musi być zaprojektowany w taki sposób, aby używanie jednego stanowiska wykluczało używanie pozostałych, z wyjątkiem elementów sterowniczych zatrzymujących oraz urządzeń do zatrzymywania awaryjnego. Każde stanowisko pracy musi być wyposażone w element sterowniczy umożliwiający zatrzymanie niektórych lub wszystkich funkcji maszyny, w zależności od istniejącego zagrożenia.

Uruchomienie maszyny musi być możliwe jedynie przez zamierzone uaktywnienie elementu sterowniczego przewidzianego do tego celu. W przypadku maszyny funkcjonującej w trybie automatycznym, uruchomienie maszyny, ponowne uruchomienie maszyny po jej zatrzymaniu lub zmiana w warunkach pracy maszyny mogą być możliwe bez ingerencji pod warunkiem, że nie prowadzi to do sytuacji zagrożenia.

W przypadku gdy z przyczyn eksploatacyjnych wymagany jest element sterowniczy zatrzymujący, który nie odłącza zasilania odpowiednich napędów uruchamiających, stan zatrzymania musi być monitorowany i utrzymywany.

Maszyna musi być wyposażona w co najmniej jedno urządzenie do zatrzymywania awaryjnego. Jednak od tej zasady są wyjątki, gdy urządzenie takie nie obniżyłoby ryzyka oraz dla maszyn przenośnych trzymanyh w rękę lub prowadzonych ręcznie.

Z chwilą ustania aktywnego działania urządzenia po zatrzymaniu awaryjnym urządzenie powinno być zablokowane aż do momentu, w którym zablokowanie to zostanie w sposób zamierzony zniesione. Odblokowanie urządzenia nie może jednak ponownie uruchomić maszyny, a jedynie umożliwiać jej uruchomienie.

Wybrany tryb sterowania lub pracy musi odłączać wszystkie inne tryby sterowania lub pracy z wyjątkiem zatrzymania awaryjnego. Jeżeli maszyna może być wykorzystana w kilku trybach sterowania lub pracy, wymagających różnych środków ochronnych lub procedur roboczych, musi być wyposażona w przełącznik wyboru trybu, który można zablokować w każdym położeniu. Każde położenie takiego przełącznika wyboru musi być wyraźnie rozpoznawalne i musi odpowiadać tylko jednemu trybowi pracy lub sterowania. Przełącznik wyboru można zastąpić inną metodą wybierania, która ogranicza użycie niektórych funkcji maszyny do określonych kategorii operatorów.

Jeżeli przy niektórych pracach maszyna musi działać przy przeniesionych lub usuniętych osłonach lub unieruchomionym urządzeniu ochronnym, przełącznik wyboru trybu sterowania lub pracy może pozwolić na uruchamianie niebezpiecznych funkcji jedynie przez elementy sterownicze wymagające stałego podtrzymania, jedynie w warunkach obniżonego ryzyka oraz zapobiegać jakimkolwiek uruchomieniu niebezpiecznych funkcji przez zamierzone lub niezamierzone działanie na czujniki maszyny. Jeżeli powyższe warunki nie mogą być spełnione jednocześnie, przełącznik wyboru trybu sterowania lub pracy musi uruchomić pozostałe środki ochronne zaprojektowane w celu zapewnienia bezpiecznej strefy interwencji.

Przerwa w zasilaniu, przywrócenie zasilania po przerwie lub dowolnego rodzaju wahania w zasilaniu maszyny nie mogą prowadzić do niebezpiecznej sytuacji. Należy zwrócić szczególną uwagę na następujące kwestie:

- maszyna nie może uruchamiać się nieoczekiwanie,
- parametry maszyny nie mogą zmieniać się w niekontrolowany sposób,
- żadna ruchoma część maszyny nie może odpadać lub zostać wyrzucona,
- zatrzymywanie jakichkolwiek części ruchomych nie może zostać zakłócone,
- urządzenia ochronne muszą pozostawać w pełni skuteczne lub wydać polecenie zatrzymania.

2.3. OCHRONA PRZED ZAGROŻENIAMI MECHANICZNYMI

Maszyny, ich elementy i wyposażenie muszą być wystarczająco stateczne. Różne części maszyny i elementy je łączące muszą być zdolne do wytrzymania obciążeń, w szczególności w odniesieniu do zjawisk zmęczenia materiału, starzenia, korozji i ścierania. W przypadku, gdy mimo podjętych środków ostrożności ryzyko pęknięcia lub rozerwania nadal występuje, odpowiednie części muszą być zamontowane, umiejscowione lub zabezpieczone tak, aby w takim przypadku ich odłamki pozostawały wewnątrz osłony.

Należy wyeliminować ryzyko powodowane przez przedmioty spadające lub wyrzucane. Dostępne części maszyny nie mogą mieć żadnych ostrych krawędzi, naroży ani chropowatych powierzchni, które mogą spowodować obrażenia. Ruchome części maszyny nie powinny stykać się, co mogłoby spowodować wypadek.

2.4. WYMAGANE WŁAŚCIWOŚCI OSŁON I URZĄDZEŃ OCHRONNYCH

Osłony i urządzenia ochronne muszą być solidnej konstrukcji oraz muszą być pewnie przymocowane na swoim miejscu. Nie powinny powodować nadmiernych utrudnień w obserwacji procesu produkcyjnego oraz powinny umożliwiać wykonanie koniecznych prac związanych z mocowaniem

lub wymianą narzędzi oraz konserwacją. Tam, gdzie to jest możliwe powinny być zamontowane osłony stałe, które można zdemontować jedynie za pomocą odpowiednich narzędzi.

Ruchome osłony blokujące muszą być sprzężone z urządzeniem blokującym, które zapobiega uruchomieniu niebezpiecznych funkcji maszyny oraz wydaje polecenie zatrzymania. W przypadku, gdy operator może znaleźć się w strefie niebezpiecznej, ruchome osłony muszą być połączone z urządzeniem ryglującym osłony jako uzupełnienie urządzenia blokującego, aby zapobiec uruchomieniu niebezpiecznych funkcji do chwili zamknięcia i zaryglowania osłon. Osłony powinny pozostawać zamknięte i zaryglowane dopóki nie ustanie ryzyko obrażeń. Brak lub uszkodzenie osłon nie powinien uruchamiać niebezpiecznych funkcji maszyny.

Osłony nastawne ograniczające dostęp do tych fragmentów części ruchomych, które są niezbędne do wykonania pracy, muszą być łatwe do nastawiania bez użycia narzędzi.

2.5. RYZYKO ZWIĄZANE Z INNYMI ZAGROŻENIAMI

Maszyny muszą być zaprojektowane i wykonane tak, aby zapobiegać:

- gromadzeniu się potencjalnie niebezpiecznych ładunków elektrostatycznych;
- wdychaniu, spożyciu, zetknięciu ze skórą, oczami lub błoną śluzową oraz przeniknięciu przez skórę materiałów i substancji niebezpiecznych.

2.6. KONSERWACJA

Punkty regulacji i konserwacji powinny być umieszczone poza strefami niebezpiecznymi. Regulację, konserwację, naprawy, czyszczenia i inne czynności serwisowe powinno się przeprowadzać podczas postoju maszyny.

Maszyny muszą być wyposażone w urządzenia odłączające je od wszystkich źródeł energii. Urządzenia takie muszą być wyraźnie oznakowane. Koniecznie należy zapewnić możliwość ich zablokowania, jeżeli ponowne podłączenie mogłoby zagrażać osobom.

2.7. INFORMACJE

Informacje i ostrzeżenia umieszczone na maszynie powinny być przewidziane w formie łatwo zrozumiałych symboli lub piktogramów. Wszelkie pisemne lub ustne informacje i ostrzeżenia muszą być wyrażone w języku lub językach oficjalnych państw Wspólnoty, w których maszyna jest wprowadzana do obrotu lub oddana do użytku.

Nie można stosować nadmiaru informacji mogących przeciążyć operatora. Wyświetlacz ekranowy i inne interaktywne środki komunikacji pomiędzy operatorem a maszyną muszą być łatwe w zrozumieniu i użyciu.

Dla maszyn lub ich części, które są przemieszczane podczas użytkowania przy pomocy urządzeń podnoszących musi być wskazana masa.

Wszystkie maszyny muszą być zaopatrzone w instrukcje. Jeżeli „Oryginalna instrukcja” nie istnieje w języku lub językach oficjalnych, musi zostać dostarczone tłumaczenie. W drodze wyjątku instrukcja konserwacji może być dostarczona tylko w jednym z języków wspólnotowych, zrozumiałym dla tego personelu.

Każda instrukcja obsługi musi zawierać m.in.: deklarację zgodności WE lub dokument przedstawiający treść deklaracji zgodności WE, rysunki, schematy, opisy i objaśnienia niezbędne do użytkowania, konserwacji i naprawy maszyny oraz sprawdzenia prawidłowości jej działania; ostrzeżenia dotyczące niedozwolonych sposobów użytkowania maszyn, metodę działania stosowaną w razie wypadku lub awarii; instrukcje w sprawie środków ochronnych. Instrukcja powinna także zawierać informacje dotyczące promieniowania emitowanego na operatora i osoby narażone, gdy maszyna może emitować promieniowanie niejonizujące.

3. DODATKOWE ZASADNICZE WYMOGI W ZAKRESIE OCHRONY ZDROWIA I BEZPIECZEŃSTWA DOTYCZĄCE NIEKTÓRYCH KATEGORII MASZYN

Szereg maszyn musi, oprócz wymagań zasadniczych, spełniać także wymagania dodatkowe.

Maszyny przeznaczone do stosowania w kontakcie z produktami spożywczymi, kosmetycznymi lub farmaceutycznymi muszą uniemożliwiać wywołanie infekcji, choroby lub zarażenia. Muszą więc być łatwe do oczyszczenia i zdezynfekowania każdorazowo przed ich użyciem. W przypadku, gdy nie jest to możliwe, należy używać części jednorazowego użytku. Instrukcje muszą wskazywać zalecane środki i metody czyszczenia, dezynfekcji i płukania całych maszyn.

Maszyny przenośne trzymane w ręku lub prowadzone ręcznie muszą mieć odpowiednio dużą powierzchnię podpierającą, tak aby zapewniały stateczność maszyny. Maszyna powinna być wyposażona w ręczne elementy sterownicze uruchamiania i zatrzymywania, rozmieszczone w sposób umożliwiający operatorowi posługiwanie się nimi bez zwalniania uchwytów, z wyjątkiem przypadków, gdy jest to technicznie niemożliwe oraz gdy maszyna jest wyposażona w niezależne urządzenie sterownicze. Instrukcje muszą zawierać informacje dotyczące całkowitej wartości drgań, działających na układ dłoń/ramię.

Przenośne maszyny udarowe, montażowe i inne muszą zostać zaprojektowane i wykonane w taki sposób, że energia jest przekazywana do elementu uderzanego poprzez pośrednią część składową, która nie opuszcza urządzenia oraz urządzenie zwalniające zapobiega uderzeniu dopóki maszyna nie znajdzie się w prawidłowym położeniu z odpowiednim naciskiem na materiał bazowy.

Maszyny do obróbki drewna i materiałów o podobnych właściwościach muszą być tak zaprojektowane, aby można było bezpiecznie umieścić w niej i prowadzić przedmiot obrabiany bez możliwości wyrzucania go lub, jeżeli nie da się tego osiągnąć, aby takie wyrzucenie nie stwarzało ryzyka dla operatora lub osób narażonych. Maszyna musi być wyposażona w hamulec automatyczny, który zatrzymuje narzędzie w wystarczająco krótkim czasie.

3.1. DODATKOWE ZASADNICZE WYMOGI W ZAKRESIE OCHRONY ZDROWIA I BEZPIECZEŃSTWA ZAPOBIEGAJĄCE ZAGROŻENIOM POWODOWANYM PRZEZ PRZEMIESZCZANIE SIĘ MASZYN

Należy wyeliminować niezamierzony ruch maszyny podczas uruchamiania silnika. Awaria zasilania układu kierowniczego ze wspomaganie powinna umożliwić kierowanie maszyną przez czas niezbędny do jej zatrzymania. Maszyna powinna być tak zaprojektowana i wykonana, aby można było bez trudności odłączać akumulator za pomocą łatwo dostępnego narzędzia przewidzianego do tego celu. Maszyny muszą być oznakowane i wyposażone w stosowne znaki ostrzegawcze i sygnały.

Kierowca musi mieć możliwość zmniejszania prędkości i zatrzymania maszyny samobieżnej przy użyciu hamulca głównego lub, gdy ma to uzasadnienie, należy dodatkowo zainstalować urządzenie awaryjne umożliwiające zmniejszenie prędkości i zatrzymanie maszyny.

Zdalnie sterowane maszyny muszą być wyposażone w urządzenia do zatrzymania działania automatycznie i niezwłocznie w sytuacjach, gdy kierowca traci kontrolę nad sterowaniem lub wykryto defekt w części systemu związanej z bezpieczeństwem.

3.2. DODATKOWE ZASADNICZE WYMOGI W ZAKRESIE OCHRONY ZDROWIA I BEZPIECZEŃSTWA ZAPOBIEGAJĄCE ZAGROŻENIOM ZWIĄZANYM Z PODNOSZENIEM

Maszyny muszą być poddane bez uszkodzenia próbom dynamicznym pod maksymalnym obciążeniem równym udźwigowi pomnożonemu przez współczynnik przeciążenia dla prób dynamicznych. Wartość tego współczynnika wynosi z reguły 1,1. Z zasady, próby te przeprowadza się przy założonych prędkościach nominalnych.

Wartość współczynnika bezpieczeństwa dla lin wynosi z reguły 5, dla łańcuchów do podnoszenia 4, a dla lin lub zawiesi włókiennych zależy od materiału, metody wykonania, wymiarów i zastosowania; jego wartość wynosi z reguły 7.

Ładunki nie mogą przesuwać się w sposób stwarzający niebezpieczeństwo lub nieoczekiwane spadać, nawet w przypadku częściowego lub całkowitego odcięcia zasilania lub, kiedy operator przestaje kierować maszyną.

Urządzenia chwytające muszą być zaprojektowane i wykonane w taki sposób, aby zapobiegać przypadkowemu upuszczeniu ładunku.

Liny nośne, liny napędne i liny nośno-napędne muszą być podtrzymywane przez obciążniki lub przez urządzenie pozwalające na nieprzerwaną kontrolę naciągu.

Dodatkowe szczegółowe wymagania określono w odniesieniu do maszyn stosowanych do podnoszenia z napędem innym niż ręczny.

3.3. DODATKOWE ZASADNICZE WYMAGI W ZAKRESIE OCHRONY ZDROWIA I BEZPIECZEŃSTWA W ODNIESIENIU DO MASZYN PRZEZNACZONYCH DO PRACY POD ZIEMIĄ

Zmechanizowane obudowy kroczące muszą utrzymywać określony kierunek ruchu i nie mogą ulegać poślizgowi podczas obciążenia ani po usunięciu ładunku. Muszą one być wyposażone w zakotwiczenia płyt górnych poszczególnych stojaków hydraulicznych.

Urządzenia sterujące przyspieszeniem i hamowaniem maszyn poruszających się po szynach muszą być obsługiwane ręczne. Jednakże urządzenia czuwakowe mogą być sterowane nożnie. Urządzenia sterownicze zmechanizowanej obudowy kroczącej muszą być umieszczone w taki sposób, aby w czasie przemieszczania się obudowy operator znajdował się pod osłoną nieruchomego segmentu obudowy.

Maszyny samobieżne poruszające się po szynach muszą być wyposażone w urządzenia czuwakowe działające na obwód sterujący ruchem maszyny w taki sposób, aby ruch został zatrzymany jeżeli kierowca utracił nad nim kontrolę.

3.4. DODATKOWE ZASADNICZE WYMAGI W ZAKRESIE OCHRONY ZDROWIA I BEZPIECZEŃSTWA DOTYCZĄCE MASZYN STWARZAJĄCYCH SZCZEGÓLNE ZAGROŻENIE POWODOWANE PODNOSZENIEM OSÓB

Podstawa ładunkowa musi zapewniać wytrzymałość i przestrzeń odpowiadające maksymalnej dopuszczalnej liczbie osób i maksymalnemu udźwigowi. Współczynniki bezpieczeństwa dla elementów składowych określone dla podnoszenia towarów muszą zostać zwiększone, z reguły dwukrotnie.

Maszyna przeznaczona do podnoszenia osób lub osób i towarów musi być wyposażona w system zawieszenia lub podparcia podstawy ładunkowej, aby zapobiec ryzyku jej spadku. Do zawieszenia podstawy ładunkowej z reguły wymagane są co najmniej dwie niezależne liny lub łańcuchy, każde ciągną z własnym zamocowaniem.

Jeżeli wymagania w zakresie bezpieczeństwa nie nakazują stosowania innych rozwiązań, przyjmuje się ogólną zasadę, że podstawa ładunkowa musi umożliwiać osobom znajdującym się w jej wnętrzu możliwość sterowania ruchem w górę lub w dół oraz, w odpowiednich przypadkach, w innych kierunkach. W czasie ruchu maszyny omawiane urządzenia sterownicze muszą być nadrzędne w stosunku do wszelkich innych urządzeń sterujących, z wyjątkiem urządzeń do zatrzymania awaryjnego.

4. ORIENTACYJNY WYKAZ ELEMENTÓW BEZPIECZEŃSTWA

W załączniku V dyrektywy maszynowej (MD) zostały wymienione elementy bezpieczeństwa. Jest to lista otwarta i poza tradycyjnymi systemami ochronnymi typu „zabezpieczenia mechaniczne” wymieniono m.in.:

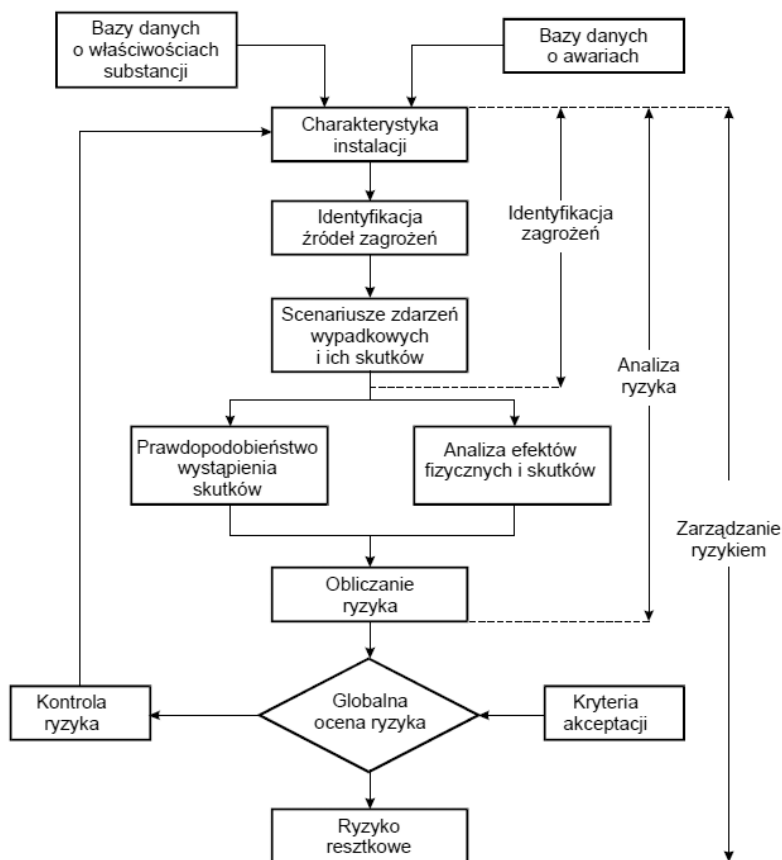
- urządzenia ochronne przeznaczone do wykrywania obecności osób;
- napędzane mechanicznie ruchome osłony blokujące;
- układy logiczne zapewniające funkcje bezpieczeństwa;
- zawory z dodatkowymi środkami do wykrywania uszkodzeń, przeznaczone do sterowania niebezpiecznymi ruchami maszyny;
- urządzenia monitorujące do kontroli obciążenia i przemieszczania w maszynach podnoszących;
- urządzenia do zatrzymywania awaryjnego;
- ograniczniki energii i urządzenia nadmiarowe;
- oburęczne urządzenie sterujące;
- elementy składowe maszyn zaprojektowanych do podnoszenia lub opuszczania osób pomiędzy różnymi przystankami.

5. PRZYKŁAD: UKŁAD LOGICZNY REALIZUJĄCY FUNKCJĘ BEZPIECZEŃSTWA SŁUŻĄCĄ ZABEZPIECZENIU PRZEPEŁNIENIA ZBIORNIKA Z AMONIAKIEM CIEKŁYM.

Magazynowanie amoniaku niesie szczególnie wysokie zagrożenia, zarówno dla ludzi jak i środowiska [4]. Duża ilość wypadków śmiertelnych z jego udziałem wymusza szczególną troskę przy realizacji zabezpieczeń dla tego typu instalacji. W tym celu zaprojektowano warstwę zabezpieczeń realizowaną za pomocą sterownika bezpieczeństwa (układu logicznego).

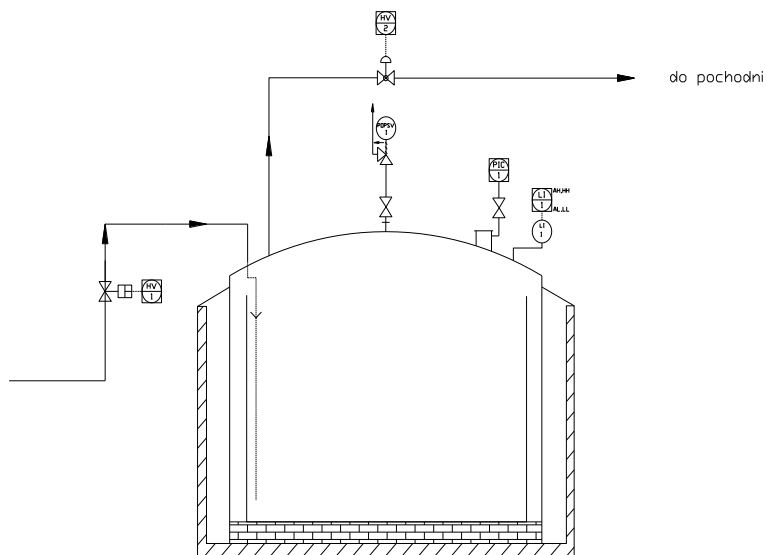
Układy logiczne zapewniające funkcje bezpieczeństwa zostały wymienione w zał. IV i V MD oraz omówione w przewodniku [5].

W pracy zaprezentowano przykład redukcji ryzyka dla instalacji przechowywania ciekłego amoniaku dla projektowanej nowej instalacji. Dla tej instalacji oszacowano i oceniono ryzyko zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 3.



Rys. 3. Zarządzanie ryzykiem

Analizowana instalacja (rys. 4) posiada zabezpieczenie realizowane za pomocą sterownika bezpieczeństwa (zgodnego z SIL3 [6]) wykorzystującego pomiar poziomu amoniaku LI1 zgodnego z SIL2 oraz zaworu odcinającego dopływ amoniaku do zbiornika HV1 zgodnego z SIL3.



Rys. 4. Schemat instalacji procesu

Ryzyko awarii rozumiane jest jako funkcja dwóch zmiennych – prawdopodobieństwa (szansy, częstotliwości) wystąpienia określonego zdarzenia i skali (rozmiarów, skutków) awarii w przypadku jej wystąpienia. Wartość ryzyka można wyrazić jako iloczyn skutków i prawdopodobieństwa w następujący sposób:

$$R = S \times C,$$

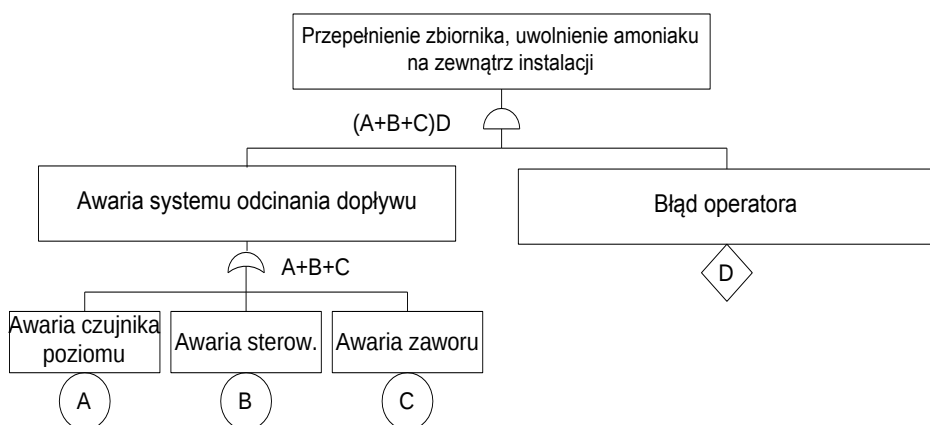
gdzie: R – poziom ryzyka,
 C – częstość występowania,
 S – skutki awarii.

W pracy przyjęto pięć kategorii skutków. Ich podział przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Kategorie skutków

Kategoria skutków	Pracownicy	Ludność	Środowisko	Straty majątkowe
Kat. I Pomijalne	B drobne urazy	Brak	Brak	Minimalne
Kat. II Małe	Pojedyncze średnie urazy	Odory, hałas	Małe, odnotowane w raportach	do 100 000 zł
Kat. III Średnie	Średnie i ciężkie urazy	Małe urazy	Średnie zniszczenia	do 1 000 000 zł
Kat. IV Duże	Poważne urazy	Średnie urazy	Poważne zniszczenia	do 8 000 000 zł
Kat. V Katastroficzne	Ofiary śmiertelne	Poważne urazy	Katastrofa ekologiczna	> 8 mln. zł

Do dalszych analiz zdarzeń awaryjnych zastosowano matrycę przedstawioną w tabeli 2. Ryzyko liczone zgodnie z powyższym wzorem wstawiane jest do tablicy i na podstawie wyznaczonych wartości klasyfikowane jest dane zdarzenie awaryjne. Za pomocą analizy drzewa błęd FTA (rys. 5) wyznaczono prawdopodobieństwo awarii układu, które wyniosło $p = 1.06 \times 10^{-3}$. Częstość klasyfikujemy na 5-tym poziomie $c = 5$. Zatem otrzymane ryzyko posiada wartość: $R = 5 \times 5 = 25$. Oceniamy ryzyko jako nieakceptowane. Wymagana jest więc redukcja ryzyka. Postanowiono zastosować podwójny czujnik poziomu. Dla takiego rozwiązania osiągnięto wartość prawdopodobieństwa awarii $p = 7 \times 10^{-5}$. Ryzyko zatem wynosi $R = 3 \times 5 = 15$. Osiągnięto redukcję ryzyka do poziomu akceptowalnego [7].



Rys. 5. Drzewo błęd FTA dla ryzyka przepełnienia instalacji stokażu amoniaku

Tab. 2. Matryca ryzyka

			SKUTKI „S” (kategoria)				
			1	2	3	4	5
CZĘSTOŚĆ „C”	7	bardzo często $c \geq 10^{-1}$	7	14	21	28	35
	6	często $10^{-2} \leq c < 10^{-1}$	6	12	18	24	30
	5	dość często $10^{-3} \leq c < 10^{-2}$	5	10	15	20	25
	4	umiarkowanie $10^{-4} \leq c < 10^{-3}$	4	8	12	16	20
	3	rzadko $10^{-5} \leq c < 10^{-4}$	3	6	9	12	15
	2	bardzo rzadko $10^{-6} \leq c < 10^{-5}$	2	4	6	8	10
	1	pomijalnie rzadko $c < 10^{-6}$	1	2	3	4	5

6. PODSUMOWANIE

Wdrożenie dyrektywy maszynowej 2006/42/WE wnosi znaczący wkład w podniesienie bezpieczeństwa eksploatacji maszyn.

Projektowanie bezpiecznych maszyn musi być oparte o analizę ryzyka. Wymusza to na producencie zastosowanie metod obliczeniowych, na podstawie których musi dostosowywać warstwy zabezpieczeń do występującego ryzyka. Spełnienie wymagań dyrektywy MD nie oznacza, że producent maszyny może zaprzestać prac nad podniesieniem jej bezpieczeństwa. Wręcz przeciwnie, powinien być w ciągłej gotowości do wdrażania nowych technik i technologii służących poprawie bezpieczeństwa.

LITERATURA

- [1] GIERASIMIUK J.: *Wymagania zasadnicze oraz tryb i procedury oceny zgodności maszyn i elementów bezpieczeństwa*. Bezpieczeństwo Pracy, Nr 3/2004.
- [2] http://www.paragraf34.pl/public/file/KBP_2014_PIP_Midera.pdf
- [3] http://www.paragraf34.pl/public/file/kbp_2014_not_gierasimiuk.pdf
- [4] *Zapewnienie zgodności maszyn z wymaganiami zasadniczymi w zakresie bezpieczeństwa i ochrony zdrowia*. Wskazówki dla producentów, dostawców i użytkowników maszyn. Warszawa, 2010-12-07.
- [5] MARKOWSKI A. (red.): *Zapobieganie stratom w przemyśle*. Część III, Zarządzanie bezpieczeństwem procesowym, Łódź, 2000.
- [6] MARKOWSKI A.: *Zarządzanie ryzykiem w przemyśle chemicznym w świetle dyrektyw Seveso i ATEX*. Zakład Bezpieczeństwa Procesowego i Ekologicznego Warsztaty MANHAZ, Politechnika Łódzka, 2004.

- [7] FRASER I.: *Guide to application of the Machinery Directive 2006/42/EC*. EUROPEAN COMMISSION ENTERPRISE AND INDUSTRY, 2010.
- [8] GŁOWICKI M.: *Sterowniki bezpieczeństwa przegląd właściwości pod kątem funkcji bezpieczeństwa*. Automatyka, 1–2/2015.
- [9] GILL A.: *Koncepcja zastosowania reguł decyzyjnych w doborze środków redukcji ryzyka zagrożeń*. Bezpieczeństwo i analiza ryzyka, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej seria TRANSPORT, z. 96, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2013.

ANALIZA BIOMECHANICZNA STAWU BIODROWEGO

1. WSTĘP

Staw biodrowy zapewnia odpowiedni zakres ruchów kończyny dolnej i pośredniczy w przenoszeniu obciążeń z kręgosłupa, poprzez miednicę, na kość udową. Jest stawem prostym (składającym się z dwóch kości) łączącym miednicę z kością udową. Tworzącymi go elementami kostnymi są panewka kości miedniczej i głowa kości udowej. Oprócz nich układ tego stawu tworzą elementy chrzęstne, pokrywające powierzchnie stawowe, oraz elementy włókniste w postaci więzadła wewnątrzstawowego, torebki stawowej wyścielonej od wewnątrz błoną maziową i wzmocnionej więzadłami zewnątrz-torebkowymi [1].

2. KINEMATYKA STAWU BIODROWEGO

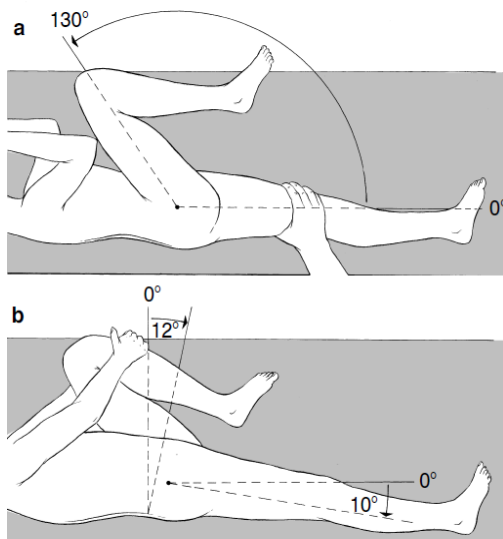
Staw biodrowy w kategoriach mechaniki jest przegubem kulistym pracującym w warunkach tarcia ślizgowego ze smarowaniem, posiadającym trzy stopnie swobody i zapewniającym duży zakres ruchów. Występowanie dodatkowych stopni swobody, spowodowane niepełnym jego zamknięciem jest określane jako niestabilność stawu biodrowego [2]. Ruchy w stawie są możliwe w trzech płaszczyznach (lub wokół trzech prostopadłych do siebie osi) przechodzących przez środek stawu – anatomiczny środek głowy kości udowej. Ruchy w obrębie stawu biodrowego są ze sobą, w mniejszym lub większym stopniu, sprzężone, a także łączą się z ruchami stawu kolanowego i kręgosłupa [3].

¹ Instytut Technologicznych Systemów Informacyjnych, Politechnika Lubelska, 20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 36, e-mail: katarzyna.kiryczuk@pollub.edu.pl

² Instytut Technologicznych Systemów Informacyjnych, Politechnika Lubelska, 20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 36, e-mail: p.penkala@pollub.pl

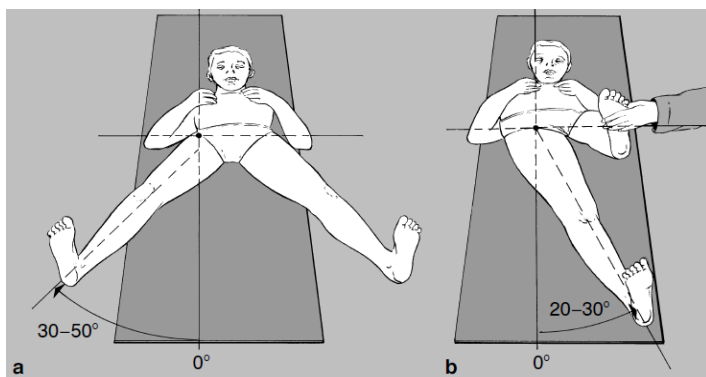
Wszystkie ruchy stawu biodrowego można rozpatrywać odniesieniu do trzech płaszczyzn:

- w płaszczyźnie strzałkowej (wokół osi poprzecznej) – odpowiadającej za ruchy zgięcia i wyprostowania (Rys. 1) w zakresie ok. 130° – 0° – 10° . Zgięcie mierzy się przy zgiętym stawie kolanowym, a pełny wyprost można osiągnąć tylko przy wyprostowanym kolanie.



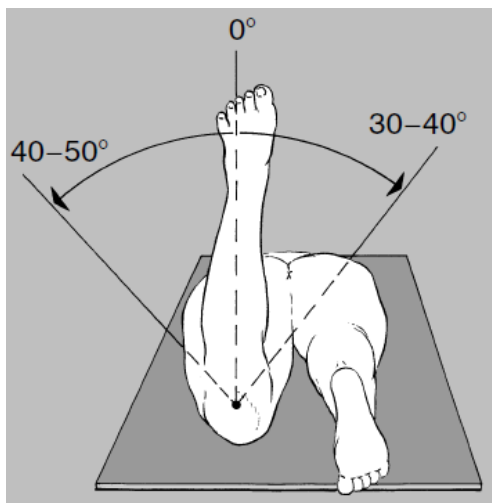
Rys. 1. Zginanie (a)/prostowanie (b) w stawie biodrowym w pozycji leżącej na plecach [15]

- w płaszczyźnie czołowej (wokół osi strzałkowej) – odpowiadającej za ruchy odwodzenia i przywodzenia (Rys. 2) w zakresie ok. 40° – 0° – 25° w pozycji leżącej na plecach;



Rys. 2. Odwodzenie (a)/przywodzenie (b) w stawie biodrowym w pozycji leżącej na plecach [15]

- w płaszczyźnie poprzecznej (wokół osi podłużnej) – odpowiadającej za rotację na zewnątrz i do wewnątrz (Rys. 3) w zakresie 45° – 0 – 35° w pozycji leżącej na brzuchu [4].

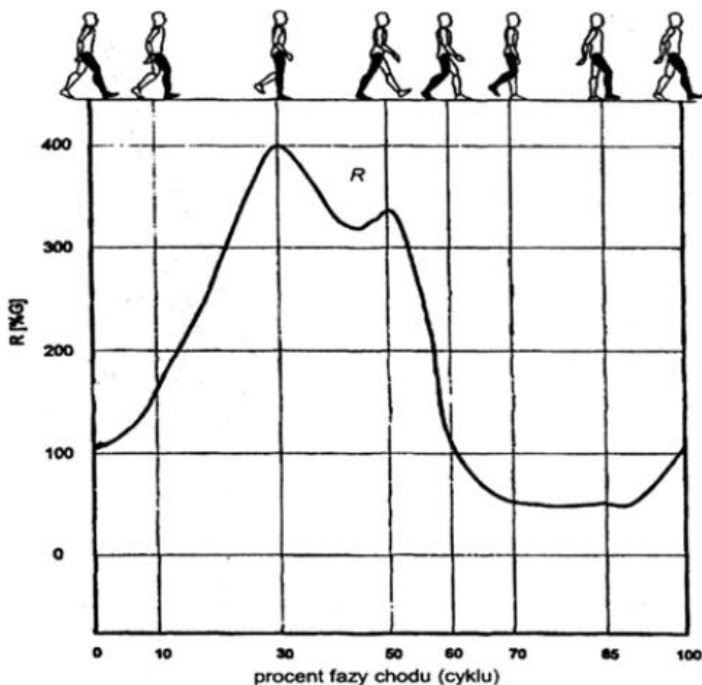


Rys. 3. Rotacja wewnętrzna/zewnętrzna w stawie biodrowym w pozycji leżącej na brzuchu [4]

3. ANALIZA OBCIĄŻEŃ STAWU BIODROWEGO

Staw biodrowy jest jednym z najbardziej narażonych na zmiany przeciążeniowo-zwyrodnieniowe elementów układu kostnego człowieka. Spełnia on ważną rolę w przenoszeniu obciążeń ciała na kończynę dolną, zarówno w czasie stania, jak też w czasie ruchu. Dla stawu biodrowego prawidłowa, pionowa postawa ciała stanowi położenie krańcowe, gdyż obciążenia przekraczają dwukrotnie masę ciała. Położeniem, w którym wszystkie włókna torebki stawowej są odprężone, jest ułożenie uda w miernym zgięciu, odwiedzeniu i obrocie na zewnątrz. Pozycję tą nazywamy położeniem pośrednim, głowa kości udowej znajduje się wtedy w najgłębszym miejscu panewki [5]. Obciążenia w czasie marszu przekraczają czterokrotnie masę ciała, a w czasie biegu aż sześciokrotnie [6].

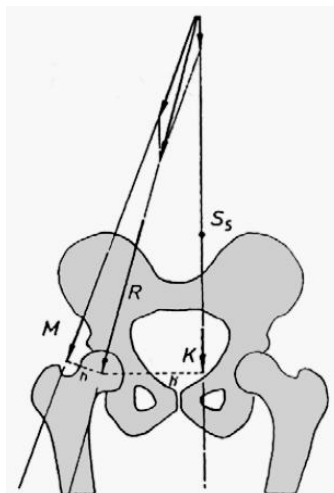
Wartości obciążeń (Rys. 4) oraz ich kierunki zmieniają się w zależności od faz styku stopy z podłożem. Pojawiają się wtedy ruchy w innych płaszczyznach: skłon/przeprost, odwodzenie/przywodzenie nogi, a także ruchy rotacyjne. Zmianie położenia ulega również środek ciężkości ciała, który przemieszcza się w stronę przeciwną do kończyny obciążonej [7].



Rys. 4. Rozkład procentowy obciążeń ($R[\%G]$) działających na staw biodrowy w poszczególnych fazach chodu [8]

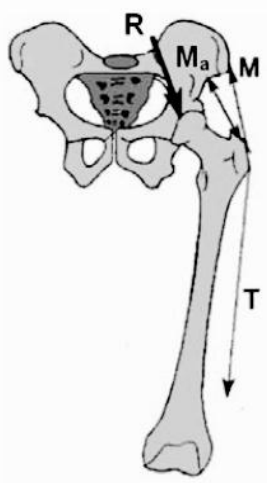
Obciążenia powierzchni stawowych są wynikiem wielu oddziaływań zewnętrznych i wewnętrznych. Do sił zewnętrznych zalicza się siłę przyciągania ziemskiego wynikającą z masy ciała, oddziaływania podporowe oraz siły wynikające z oddziaływań innych ciał na ciało człowieka. Siły wewnętrzne to reakcje pochodzące od współdziałania elementów układów kostno-stawowego, więzadłowego i mięśniowego. Ocena kierunków i wartości tych sił jest skomplikowana, dlatego opisuje się je w sposób uproszczony. Rozważania nad ruchem i siłami działającymi na staw biodrowy doprowadziły do powstania wielu modeli obciążeń [7].

Jednym z pierwszych modeli obciążeń stawu biodrowego był model wg Pauwels'a (Rys. 5). Uwzględnia on jedynie stabilizację stawu w płaszczyźnie czołowej przez dwie grupy mięśniowe. Uznał, że jednymi z największych w tym stawie są obciążenia oddziałujące podczas stania na jednej kończynie dolnej, jak w fazie podporowej chodu. Za środek obrotu stawu przyjął środek głowy kości udowej i wokół niej rozważał układ sił. Na powierzchni głowy powstaje reakcja będąca wynikiem równoważenia ciężaru ciała znajdującego się powyżej stawu biodrowego przez napięcie mięśni pośladkowych. Według Pauwels'a pasmo biodrowo-piszczelowe połączone z krętarzem większym i stawem kolanowym zapobiega jedynie nadmiernemu zginaniu kości udowej.



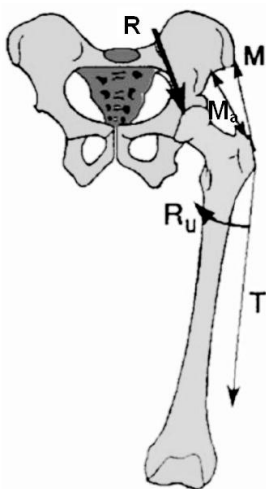
Rys. 5. Model obciążenia stawu biodrowego w fazie podporowej chodu wg Pauwels'a [8]:
 S_s – środek ciężkości ciała, K – wypadkowa oddziaływania masy ciała, M – oddziaływanie
 mięśni odwodzących, R – reakcja wypadkowa oddziaływania na głowę kości udowej

Na bazie modelu Pauwelsa'a powstał model Maquet'a (Rys. 6). Maquet odmiennie przedstawił rolę pasma biodrowo-piszczelowego. Według niego biegnie ono od stawu kolanowego do kości miednicy, czym wykazuje większą zgodność z anatomią. A po powierzchni krętarza większego pasmo ślizga się powodując powstanie reakcji zwróconej prostopadłe do powierzchni krętarza w kierunku przyśrodkowym. Siła ta dodatkowo stabilizuje staw.



Rys. 6. Model obciążenia stawu biodrowego wg Maquet'a [8]: M_a – oddziaływanie mięśni
 odwodzących, M i T – oddziaływanie pasma biodrowo-piszczelowego (ślizganie się
 po krętarzu), R – reakcja wypadkowa oddziaływania na głowę kości udowej

Oba poprzednie modele przedstawiają działający układ sił jedynie w płaszczyźnie czołowej. Rzeczywista sytuacja jest bardziej złożona i obejmuje również oddziaływania w pozostałych płaszczyznach. Będziński w swoim interpretacji (Rys. 7) opartej na modelu Maquet'a uwzględnił oddziaływanie mięśni rotujących kość udową względem miednicy. Pasma biodrowo-piszczelowe zachowało możliwość przesuwania się po powierzchni krętarza większego [8].



Rys. 7. Model obciążenia stawu biodrowego wg Będzińskiego [8]: M_a – oddziaływanie mięśni odwodzących, M i T – oddziaływanie pasma biodrowo-piszczelowego (ślizganie się po krętarzu), R_u – siły rotacyjne, R – reakcja wypadkowa oddziaływania na głowę kości udowej

Oprócz wymienionych modeli powstały również prace analizujące inne grupy mięśniowe oraz sytuacje bardziej złożone niż stanie na jednej kończynie dolnej, takie jak wstawanie z krzesła, wchodzenie i schodzenie po schodach. Współcześnie modele obciążeń uzyskuje się metodami numerycznymi pozwalającymi uwzględnić większość grup mięśniowych biorących udział w ruchu kończyny dolnej i przenoszeniu obciążeń w sytuacjach statycznych i dynamicznych [8].

4. OBCIĄŻENIA DZIAŁAJĄCE NA STAW BIODROWY

Zarówno staw biodrowy naturalny, jak i sztuczny, podlega obciążeniom i zużyciu. W celu obliczenia siły wypadkowej oddziałującej na głowę kości udowej w zależności od masy ciała przyjęto model obciążenia według Pauwels'a [8] rozpatrujący przypadek fazy podporowej chodu (stania na jednej kończynie dolnej).

Podczas podparcia na jednej nodze staw biodrowy przenosi obciążenia pochodzące od głowy, tułowia, kończyn górnych oraz drugiej kończyny, które w sumie stanowią 81% masy ciała człowieka [8]:

$$K = 0,81 \cdot F_c, \quad (1)$$

gdzie: K – siła oddziaływania masy ciała na głowę kości udowej [N],
 F_c – siła ciężkości działająca na ciało [N].

Siła ciężkości działająca na ciało człowieka o masie m :

$$F_c = m \cdot g, \quad (2)$$

gdzie: m – masa ciała [kg],
 g – przyspieszenie ziemskie.

- dla osoby o masie 50 kg:

$$F_{c1} = 50 \text{ kg} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 50 \text{ kg} \cdot 9,8 \frac{\text{N}}{\text{kg}} = 490 \text{ N}$$

- dla osoby o masie 70 kg:

$$F_{c2} = 70 \text{ kg} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 70 \text{ kg} \cdot 9,8 \frac{\text{N}}{\text{kg}} = 686 \text{ N}$$

- dla osoby o masie 90 kg:

$$F_{c3} = 90 \text{ kg} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 90 \text{ kg} \cdot 9,8 \frac{\text{N}}{\text{kg}} = 882 \text{ N}$$

Siła oddziaływania masy ciała na głowę kości udowej wynosi:

- dla osoby o masie 50 kg:

$$K_1 = 0,81 \cdot 490 \text{ N} = 396,9 \text{ N} \cong 397 \text{ N}$$

- dla osoby o masie 70 kg:

$$K_2 = 0,81 \cdot 686 \text{ N} = 555,66 \text{ N} \cong 556 \text{ N}$$

- dla osoby o masie 90 kg:

$$K_3 = 0,81 \cdot 882 \text{ N} = 714,42 \text{ N} \cong 714 \text{ N}$$

Dodatkowo na staw działają siły pochodzące od mięśni okołostawowych. Maksymalna siła wytwarzana przez mięsień M_{MAX} zależy od wielu czynników, w tym znacznie od przekroju fizjologicznego A mięśnia (przekrój poprzeczny w najszerszym miejscu brzośca mięśnia wyznaczony płaszczyzną prostopadłą do przebiegu włókien mięśniowych) [9]. Siła mięśniowa jest proporcjonalna do tego przekroju:

$$M_{MAX} = \sigma \cdot A , \quad (3)$$

gdzie: M_{MAX} – maksymalna siła wytwarzana przez mięsień [N],

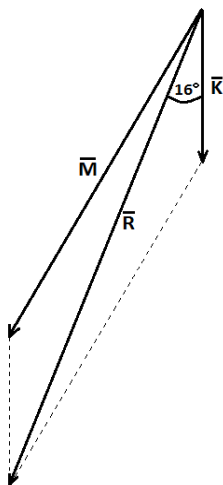
A – przekrój fizjologiczny mięśnia [m^2],

σ – stała naprężenia jednostkowego (bezwzględna siła mięśniowa, siła jednostkowa mięśnia) wynosząca dla kręgowców $\sigma = 0,3 \cdot 10^6 Pa$ [9].

Tyłna grupa mięśni uda dla młodego mężczyzny (wającego przeciętnie $m = 70 kg$) ma przekrój fizjologiczny wynoszący $A = 1,5 \cdot 10^{-2} m^2$ [9], wtedy maksymalna siła wytwarzana przez mięsień wynosi:

$$M_{MAX} = 0,3 \cdot 10^6 \frac{N}{m^2} \cdot 1,5 \cdot 10^{-2} m^2 = 0,45 \cdot 10^4 N = 4500 N$$

Reakcja wypadkowa oddziaływania na głowę kości udowej wg Pauwels'a wynika z oddziaływania masy ciała oraz siły, z jaką działają na staw mięśnie okołostawowe. Wektor wypadkowej siły R [Rys. 8] podczas stania na jednej kończynie przyłożony jest pod kątem 16° w punkcie anatomicznego środka głowy [8].



Rys. 8. Wyznaczanie wektora wypadkowego oddziaływania na głowę kości udowej [opracowanie własne na podstawie modelu Pauwels'a]

W celu obliczenia wartości siły wypadkowej R należy skorzystać z twierdzenia cosinusów:

$$M^2 = R^2 + K^2 - 2RK \cos \alpha \quad (4)$$

Następnie rozwiązać równanie kwadratowe:

- dla osoby o masie 50 kg:

$$4500^2 = R_1^2 + 397^2 - 2R_1 \cdot 397 \cdot \cos 16^\circ$$

$$R_1^2 - 763R_1 - 20\,092\,391 = 0$$

$$\Delta = 80\,951\,733$$

$$\sqrt{\Delta} = 8997$$

$$R_{1a} = -4117 \text{ N} \quad R_{1b} = 4880 \text{ N}$$

- dla osoby o masie 70 kg:

$$4500^2 = R_2^2 + 556^2 - 2R_2 \cdot 556 \cdot \cos 16^\circ$$

$$R_2^2 - 1069R_2 - 19\,940\,864 = 0$$

$$\Delta = 80\,906\,217$$

$$\sqrt{\Delta} = 8995$$

$$R_{2a} = -3963 \text{ N} \quad R_{2b} = 5032 \text{ N}$$

- dla osoby o masie 90 kg:

$$4500^2 = R_3^2 + 714^2 - 2R_3 \cdot 714 \cdot \cos 16^\circ$$

$$R_3^2 - 1372R_3 - 19\,740\,204 = 0$$

$$\Delta = 80\,843\,200$$

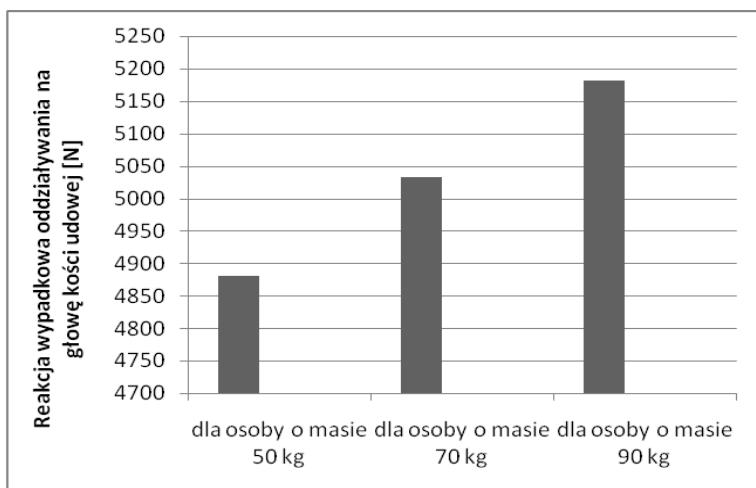
$$\sqrt{\Delta} = 8991$$

$$R_{3a} = -3809,5 \text{ N} \quad R_{3b} = 5181,5 \text{ N}$$

Reakcja wypadkowa oddziaływania na głowę kości udowej (Rys. 9) wynosi:

- dla osoby o masie 50 kg wynosi 4880 N,
- dla osoby o masie 70 kg wynosi 5032 N,
- dla osoby o masie 90 kg wynosi 5181,5 N,

Wektory R_a o wartości ujemnej mają zwrot w przeciwną stronę niż wektor wypadkowy na rysunku.



Rys. 9. Reakcja wypadkowa oddziaływania na głowę kości udowej w zależności od masy ciała

5. PODSUMOWANIE

Staw biodrowy stanowi bardzo istotny element łańcucha biokinematycznego kończy dolnej i jest poddawany dużym obciążeniom zmiennym wynikającym z ruchów lokomocyjnych. Obciążenia te wynikają z aktywności fizycznej, a więc oddziaływań zewnętrznych oraz reakcji pochodzących od współdziałania elementów układu kostno-stawowego, układu więzadłowego i układu mięśniowego.

W opracowaniu podjęto próbę wyznaczenia reakcji wypadkowej działającej na staw biodrowy, po uwzględnieniu masy człowieka. Z analizy wynika, że masa nie ma zbyt dużego wpływu na wartość siły, jednak wpływ innych czynników jest bardzo istotny. Wartość reakcji wypadkowej działającej na staw biodrowy osiąga wartość ponad 5000 N.

LITERATURA

- [1] NICIEJEWSKI K.: *Choroba zwyrodnieniowa stawów biodrowych w aspekcie zmian rozkładu chemicznego oraz zmian konfiguracji przestrzennej kolagenu badanej tkanki kostnej*. Rozprawa doktorska, Wydział Lekarski I Uniwersytetu Medycznego im. Karola Marcinkowskiego w Poznaniu, Katedra i Zakład Fizjologii, Poznań 2011.
- [2] HARRIS W. H.: *The problem is osteolysis*. Clinical Orthopaedics and Related Research, vol. 311, Feb. 1995, 46-53.
- [3] POZOWSKI A.: *Alloplastyka stawu biodrowego*. Górnicki Wydawnictwo Medyczne, Wrocław 2011.
- [4] HEPP W. R., DEBRUNNER H. U.: *Diagnostyka w ortopedii*, wyd. polskie, red. GAŻDZIK T., Wydawnictwo Lekarskie PZWL, Warszawa 2008.

- [5] BĘDZIŃSKI R.: *Mechanika Techniczna*. Tom XII. Biomechanika. Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, Warszawa 2011.
- [6] WOŹNIAK W.: *Anatomia człowieka*. Podręcznik dla studentów i lekarzy, wyd. II pop. I uzup., Elsevier Urban & Partner, Wrocław 2003.
- [7] MADEJ T.: *Modelowanie strefy ruchowej endoprotezy stawu biodrowego w aspekcie biomateriałów*. Rozprawa doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Katedra Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Kraków 2008.
- [8] BĘDZIŃSKI R.: *Biomechanika inżynierska. Zagadnienia wybrane*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1997.
- [9] TUSZYŃSKI J. A., DIXON J. M.: *Biomedical Applications of Introductory Physics*. John Wiley & Sons Inc, New York 2002.

WYBRANE ASPEKTY ROZWOJU ROBOTÓW MEDYCZNYCH

1. WSTĘP

Nowoczesna technologia, wykorzystująca szybkie procesory i algorytmy do cyfrowego przetwarzania i kompresji sygnałów, umożliwia przesyłanie obrazów o wysokiej rozdzielczości, a także interaktywną transmisję audiowizualną pozwalającą uzyskać szybkie i stabilne połączenie telekomunikacyjne co znalazło zastosowanie w telechirurgii gdzie zadania chirurgiczne są wykonywane przez robota medycznego, wyposażonego w mechatroniczne narzędzia chirurgiczne sterowanego przez lekarza znajdującego się w innej lokalizacji za pomocą konsoli zawierającej manipulatory [11]. Ruchy manipulatorów przesyłane są za pomocą bezpiecznego połączenia telekomunikacyjnego do urządzenia na sali operacyjnej, które zamienia je na precyzyjne akcje narzędzi chirurgicznych. Chirurg przez cały czas trwania operacji otrzymuje sygnał audiowizualny wraz z pomiarami życiowymi pacjenta rejestrowanymi przez sensory w które wyposażony jest robot.

Robotyka medyczna jest dynamicznie rozwijającą się częścią chirurgii małoinwazyjnej. Pomimo, że jest to relatywnie nowa technologia na całym świecie działa już ponad 3000 robotów, a liczba rocznie wykonywanych operacji zbliża się do 530 tysięcy (wzrost o 16% do roku 2012) [3].

¹ Instytut Technologicznych Systemów Informacyjnych, Politechnika Lubelska, 20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 36, e-mail: d.gaska@pollub.pl

² Członek International Society for Medical Robotics ISMR, Instytut Technologicznych Systemów Informacyjnych, Politechnika Lubelska, 20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 36, e-mail: katarzyna@studio63.com.pl

2. HISTORIA

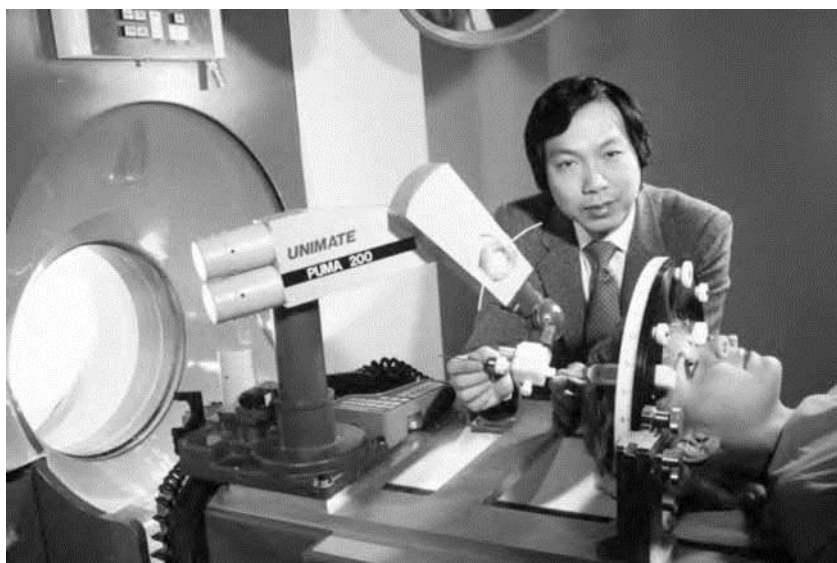
Pomysł na budowę robotów medycznych powstał w NASA jako jeden z projektów związanych z planami podboju kosmosu i programem wojen gwiazdnych realizowanym przez Pentagon. Roboty chirurgiczne oraz tzw. inteligentne sale operacyjne miały stanowić podstawę wysoko specjalistycznej opieki medycznej na statkach kosmicznych i bazach orbitalnych [2, 6, 8].

1921 – Czeski pisarz Karel Čapek po raz pierwszy użył słowa „robot” w swojej sztuce „R.U.R” (Rossum's Universal Robots). Robot to jedno z niewielu słów słowiańskiego pochodzenia, które weszło do współczesnego słownika technicznego.

1971 – Opracowanie robota Stanford Arm na Uniwersytecie Stanford.

1973 – Opracowanie pierwszego języka programowania robotów (WAVE) na Uniwersytecie Stanford.

1985 – Pierwsza operacja chirurgiczna przy użyciu zmodyfikowanego robota przemysłowego PUMA 200 wyposażonego w laser chirurgiczny wykonana przez zespół kierowany przez doktora Kwoh’a w Long Beach Memorial Hospital. Robot służył do pozycjonowania igły biopsyjnej. Zabieg był wspomagany przez tomograf komputerowy, dzięki któremu chirurg dysponował obrazem 3D mózgu pacjenta. Yik San Kwoh w Long Beach Hospital w Kalifornii.



Rys. 1. Yik San Kwoh w Long Beach Hospital

1989 – Powstaje firma Computer Motion – przyszły producent robota ZEUS i AESOP.

1991 – Przecewkowa resekcja gruczołu krokowego (TURP) przy wykorzystaniu robota Puma 560.

1992 – John Adler demonstruje koncepcje robota CyberKnife, do radioterapii.

1994 – Firma Computer Motion, Inc. z Kaliforni wprowadziła na rynek pierwszy system zdalnego pozycjonowania endoskopu – AESOP (Automated Endoscopic System for Optimal Positioning). Jest to pierwszy robot, który uzyskał pozwolenie FDA (Food and Drug Administration) w 1993, do wprowadzenia na rynek medyczny.

1995 – Frederic Moll, Robert Younge i John Freund organizują firmę Intuitive Surgical w oparciu o osiągnięcia SRI International (dawniej znany jako Stanford Research Institute).

1997 – Pierwsza operacja robotem – Cadiere i Himpens w Brukseli zastosowali prototyp robota da Vinci (Intuitive Surgical, Sunnyvale, CA) do operacji resekcji pęcherzyka żółciowego.

1999 – Douglas Boyd z London Health Sciences Centre's (LHSC) wykonał pierwszy na świecie zabieg pomostowania naczyń wieńcowych na bijącym sercu przy zamkniętej klatce piersiowej – stosując robota ZEUS. Następnie wykonał pierwszy hybrydowy zabieg rewaskularyzacji serca robotem.

2000 – da Vinci zostaje pierwszym robotem chirurgicznym, który otrzymał akceptację FDA dla prowadzenia operacji laparoskopowych w USA:

- Francois Laborde z L'Institut Mutualiste Montsouris Chiosy wykonywał po raz pierwszy zabieg kardiochirurgii dziecięcej (PDA) z wykorzystaniem robota ZEUS.
- Z inicjatywy dr Zbigniewa Nawrata rozpoczęcie projektu RobIn Heart przez Fundację Rozwoju Kardiochirurgii w Zabrze. Kierowania pierwszym projektem sfinansowanym przez Komitet Badań Naukowych podjął się znakomity kardiochirurg, entuzjasta innowacyjnych technologii medycznych, prof. Zbigniew Religa.

2001 – CyberKnife otrzymał akceptację FDA jako pierwszy na świecie robot do radioterapii.

- Robot ZEUS otrzymał akceptację FDA dla prowadzenia operacji laparoskopowych w USA.
- Dokonano transkontynentalnej (7 tys. km) operacji wycięcia pęcherzyka żółciowego przy pomocy robota ZEUS (Intuitive Surgical, Inc).

2005 – Tactile Technologies, z Rehvot w Izraelu naukowcy zbudowali robota dentystę – to pierwszy krok do zautomatyzowania procedur dentystycznych.

2010 – Założenie Międzynarodowego Stowarzyszenia na rzecz Robotyki Medycznej w Zabrzu (International Society for Medical Robotics).

2014 – wprowadzenie na rynek robota da Vinci Xi oraz nowych narzędzi.

2.1. PIERWSZE KONSTRUKCJE TELEMANIPULATORÓW

Ruchomość narządów oraz zmienna anatomia utrudniają zaprogramowanie urządzeń do wykonywania operacji chirurgicznych, uwaga konstruktorów skupiła się na budowie urządzenia sterowanego przez chirurga – telemanipulatora [11].

W 1993 roku założono firmę Computer Motion, która zajęła się tworzeniem oprogramowania do kontroli ruchu ramienia robotowego [2, 6, 12]. Rezultatem ich pracy było powstanie systemu AESOP składającego się z automatycznego ramienia kontrolującego położenie i ruchy kamery podczas klasycznej laparoskopii. System był sterowany nożnym lub ręcznym kontrolerem a w późniejszym okresie również głosem [10, 12]. Computer Motion na bazie doświadczeń z systemem AESOP, zbudował następnie robota ZEUS. Robot składał się z kontrolowanego głosem ramienia dla kamery endoskopowej i dwóch dodatkowych, sterowanych przez chirurga, ramion wyposażonych w różnorodne narzędzia chirurgiczne. W roku 1998, używając systemu ZEUS, wykonano pierwszą całkowicie robotową operację – zespolenie jajowodu, a rok później operację pomostowania tętnic wieńcowych [6].

W tym samym czasie kolejna grupa badaczy, przy wsparciu grantu Departamentu Obrony USA oraz w oparciu o licencję innych instytucji badawczych, rozpoczęła pracę nad stworzeniem robota chirurgicznego do użytku cywilnego. W 1995 w USA powstała firma Intuitive Surgical International. Prace inżynierów doprowadziły do powstania prototypów robota chirurgicznego „Lenny” i „Monna”, a następnie do stworzenia pierwszej generacji systemu da Vinci. Pierwszy komercyjny robot da Vinci rozpoczął pracę w 1998 roku w Leipzig University Heart Center w Niemczech.

Pierwszą operację w zakresie jamy brzusznej, przeprowadzoną w 1997 roku, z użyciem systemu da Vinci, była laparoskopowa cholecystektomia. W 1999 roku za pomocą robota kardiochirurgicznego ZEUS wykonano pierwszą operację założenia bypass'u na bijącym sercu [6].

2.2. TRANSATLANTYCKA OPERACJA TELECHIRURGICZNA – OPERACJA LINDBERGHIA

7 września 2001 roku została przeprowadzona transatlantycka operacja chirurgiczna polegająca na usunięciu woreczka żółciowego przez chirurgów znajdujących się w Nowym Jorku (USA) u pacjentki leżącej w szpitalu w Strasburgu (Francja) [6, 7].



Rys. 2. Sala operacyjna w Strasburgu



Rys. 3. Jacques Marescaux sterujący robotem

Całe przedsięwzięcie udało się zorganizować dzięki zaangażowaniu 40-osobowej, francusko-amerykańskiej grupy naukowców z francuskiego Instytutu ds. walki z rakiem narządów trawienia, amerykańskiego konsorcjum Computer Motion oraz France Telecom.

Trójramiennym robotem, znajdującym się przy pacjentce w Strasburgu, sterowano za pomocą konsoli będącej w rękach chirurga Jacques Marescaux w Nowym Jorku. Tego rodzaju operacja wymaga zapewnienia minimalnego opóźnienia między tym, co widzą chirurdzy na ekranie wysokiej rozdzielczości (wykorzystano dwa wideoterminaly Sony PCS-6000) w Nowym Jorku, a rzeczywistym ruchem robota medycznego w Strasburgu [4].

Aby osiągnąć ten cel, użyto światłowodu France Telecom leżącego na dnie Atlantyku, technologii ATM (transfer 10 Mb/s) oraz umieszczonych po obu stronach Atlantyku wieloprotokołowych urządzeń firmy RAD Data Communications z serii ACE-2002, zapewniających dostęp do sieci ATM. Opóźnienie wyniosło ok. 155 ms.

3. KLASYFIKACJA ZROBOTYZOWANYCH SYSTEMÓW MEDYCZNYCH

Istnieje wiele możliwych klasyfikacji zrobotyzowanych systemów medycznych. Roboty medyczne możemy podzielić na: chirurgiczne, rehabilitacyjne, bioroboty (roboty naśladujące ludzi lub zwierzęta, wykorzystywane dla celów poznawczych – neurofizjologii, patologii mózgu czy samoorganizacji społecznej – a także zrobotyzowane elementy zastępcze organizmu człowieka) [5, 8, 11].

Lekarze najchętniej stosują podział ze względu na dział medycyny, w którym dany robot ma zastosowanie: neurochirurgia, ortopedia, urologia, chirurgia szczękowo-twarzowa, radiochirurgia, chirurgia oka, kardiochirurgia oraz ginekologia.

Powyższe podziały choć wygodne nie pokazują roli, jaką odgrywa robot na sali operacyjnej. Kolejnym kryterium podziału robotów jest rola, jaką robot odgrywa na sali operacyjnej czy też w trakcie leczenia, podział został zaproponowany przez Taylora w 1998 r.

- Roboty zastępujące asystenta w czasie operacji. Przy ich pomocy chirurg może samodzielnie sterować położeniem kamery endoskopowej.
- Telemanipulatory. Obecnie stosowane są klinicznie amerykańskie roboty da Vinci (Intuitive Surgical Inc). W Polsce powstała rodzina prototypowych robotów o nazwie RobIn Heart.
- Roboty nawigacyjne (bierne). Służą do dokładnego pozycjonowania i utrzymują prawidłowy tor narzędzia. Stosowane są głównie w procedurach neurochirurgicznych.
- Roboty pracujące jako narzędzia wykonawcze w systemie odwzorowania trajektorii określone podczas planowania przedoperacyjnego (nawigacyjne czynne) stosowane do operacji radiochirurgicznych, neurochirurgicznych oraz operacji ortopedycznych.
- Roboty biochirurgiczne. Powstają roboty do manipulacji komórkowej. W wielu ośrodkach naukowych prowadzone są badania nad manipulacją wybranych struktur i elementów wewnątrz komórek.

3.1. ROBOTY ZASTĘPUJĄCE CHIRURGA ASYSTENTA

Jednym z kierunków rozwoju chirurgii jest zmniejszenie urazu pooperacyjnego. W związku z tym coraz więcej operacji jest wykonywanych technikami laparoskopowymi [2, 11].

Podczas takich operacji chirurg operator prowadzący operację manipuluje narzędziami laparoskopowymi, a chirurg asystent trzyma kamerę laparoskopową. Zadanie chirurga asystenta polega na kierowaniu kamery na obszar operowany w sposób zgodny z poleceniami głównego chirurga. Taka praca jest bardzo wyczerpująca, gdyż występują długie okresy napięcia mięśni i bezruchu. Innym problemem związanym z trzymaniem kamery laparoskopowej jest zmienianie jej położenia w celu obserwacji różnych, czasami dość odległych obszarów wewnątrz ciała pacjenta.

Niedogodności te spowodowały, że zaczęto budować roboty medyczne mające zastępować chirurga asystenta w trzymaniu kamery podczas operacji laparoskopowych. Najpoważniejszym problemem konstrukcyjnym takich robotów jest rozwiązanie systemu sterowania – generowania poleceń ruchu robota. Chirurg prowadzący operację trzyma w rękach narzędzia laparoskopowe, więc nie może jednocześnie sterować robotem. Opracowano wiele konkurujących ze sobą metod sterowania.

Najpopularniejsza i najbardziej zgodna z dotychczasowymi doświadczeniami chirurgów jest metoda sterowania głosem. Chirurg wydaje polecenia zarówno generowania ruchu (w górę, w dół, w prawo, w lewo, w głąb, na zewnątrz),

jak i zatrzymywania robota (stop). Często robot ma również możliwość zapamiętywania niektórych położeń po to, by później można było automatycznie do nich powrócić.

Bardzo ważnym aspektem konstrukcyjnym części mechanicznej manipulatorów do trzymania kamery laparoskopowej jest konieczność przeprowadzenia kamery przez jeden, ściśle określony punkt w ciele pacjenta - otwór w jego powłokach skórnych. Aby to zrealizować, stosuje się odpowiednią strukturę kinematyczną manipulatora: stałopunktowość pasywną, stałopunktowość kinematyczną i stałopunktowość aktywną. W większości manipulatorów zastępujących asystenta chirurga stosuje się stałopunktowość pasywną.

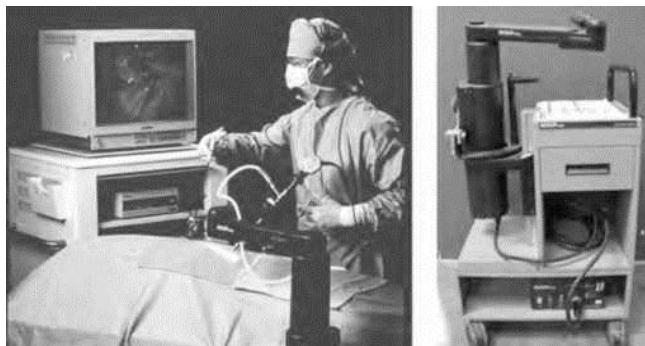
Istotną cechą tej grupy robotów są stosunkowo małe wymagania dotyczące ich sztywności i dokładności. Obszar obserwowany przez kamerę ma zwykle wielkość kilku–kilkunastu centymetrów, więc niedokładności rzędu milimetra są praktycznie niezauważalne; również ugięcia robota mogą być tego rzędu. Pozwala to na stosowanie bardzo lekkich konstrukcji.

Najczęściej stosowane roboty tej kategorii to AESOP™ i EndoAsist™. Opracowywane są też inne konstrukcje, takie jak LER™, RobIn Heart Visio i Wirles Laparoscopy Robot [11].

3.2. AESOP

AESOP był pierwszym dostępnym komercyjnie robotem medycznym. Został on opracowany przez firmę Computer Motion, Inc. Przeznaczony był do trzymania kamery laparoskopowej podczas operacji [2,10,13]. We wszystkich zastosowaniach operacje z wykorzystaniem robota okazały się krótsze, bardziej powtarzalne, a pozycjonowanie endoskopu bardziej stabilne. Ruch kamery jest sterowany przez chirurga za pomocą ręki, nogi lub głosu. Spośród trzech metod najczęściej stosowane jest sterowanie głosem, (badania kliniczne dowiodły największej efektywności tego sposobu). Robot jest przystosowany do współpracy z innymi produktami firmy Computer Motions, Inc., czyli z ramionami narzędziowymi ZEUS, systemem HERMES do sterowania salą operacyjną za pomocą głosu i systemem SOKRATES do zdalnego prowadzenia operacji chirurgicznych.

AESOP ma postać jednego ramienia o kinetyce typu SCARA. Na zakończeniu ramienia znajduje się kiść o dwóch swobodnych (nienapędzanych) przegubach. Na kiści jest zamocowany laparoskop. Położenie laparoskopu jest określane przez pozycję ramienia (kiści) i położenie portu. Poprzez kiść jest doprowadzony układ przeniesienia napędu do obrotu laparoskopu wokół jego osi.



Rys. 4. Robot-asystent AESOP 100

Robot o strukturze kinematycznej SCARA (Selective Compliant Articulated Robot for Assembly) zostały sklasyfikowane do grupy robotów monolitycznych o szeregowej strukturze kinematycznej. Roboty SCARA – posiadają trzy osie, przy czym dwie o ruchu obrotowym równoległym względem siebie, jedną postępową. Dzięki swojej budowie pozwalają na precyzyjny i szybki montaż lub pakowanie

3.3. TELEANIPULATORY

Teleanipulatory są wykorzystywane do przeprowadzania chirurgicznych operacji laparoskopowych. Są one naturalnym uzupełnieniem manipulatorów trzymających kamerę laparoskopową i zastępują przy stole operacyjnym chirurga [11].

Celem konstruowania teleanipulatorów chirurgicznych było wykorzystanie ich do zdalnego (na duże odległości) przeprowadzania operacji.

Klasyczna operacja narzędziami laparoskopowymi jest dla chirurga dość kłopotliwa. Do podstawowych niedogodności należy zaliczyć ograniczoną manipulacyjność (liczbę stopni swobody) narzędzi laparoskopowych, lustrzane odwrócenie kierunku ruchu, małą dokładność ruchu, niewygodną stojącą pozycję i nienaturalne ruchy dłońmi.

Teleanipulatory chirurgiczne likwidują bądź w znaczący sposób minimalizują wszystkie te niedogodności: zwiększają manipulacyjność narzędzi, umożliwiają intuicyjne sterowanie nimi, poprawiają ergonomię pracy chirurga i zwiększają dokładność ruchów.

Aktualnie klinicznie stosowany jest teleanipulator da Vinci firmy Intuitive Surgical i ZEUS firmy Computer Motion. Oprócz tego wiele konstrukcji jest jeszcze opracowywanych, m.in. RobIn Heart, Endobot, RTW, Stedy Hand.

3.3.1. DA VINCI

W styczniu 1998 roku po raz pierwszy został wykorzystany przez zespół francuski do pierwszej na świecie endoskopowej operacji pojedynczego pomostu wieńcowego, a już w maju tego samego roku pierwszej operacji wewnątrz serca – plastykę zastawki mitralnej [3, 11, 14].

Został on wyprodukowany przez firmę Intuitive Surgical z Kalifornii – USA. Konstrukcja da Vinci opiera się na opracowanym w Massachusetts Institute of Technology telemanipulatorze The Black Falcon. Manipulator da Vinci do 2005 r. był produkowany w wersji trzyramiennej, później rozbudowanej do wersji czteroramienniej. Obecnie jest również dostępna wersja robota da Vinci Xi o nieco odmiennym wyglądzie i udoskonalonym napędzie liniowym, ale także czteroramienna.



Rys. 5. Robot chirurgiczny da Vinci Xi

Sterowanie odbywa się ze specjalnej konsoli wyposażonej w dwa zadajniki z siłowym sprzężeniem zwrotnym, dwa monitory z odpowiednim układem optycznym, umożliwiającym widzenie stereoskopowe, oraz zestaw przycisków i pedałów do uaktywniania różnych funkcji systemu. Konsola jest podłączona poprzez układ sterowania do manipulatora. Jedno z ramion manipulatora jest wykorzystywane do trzymania kamery laparoskopowej, a pozostałe do trzymania narzędzi. Jedną z ważniejszych innowacji telemanipulatora da Vinci jest kamera z dwoma torami wizyjnymi, przesuniętymi względem siebie o ok. 4 mm. Daje to możliwość uzyskania stereowizji, dzięki której chirurg ma możliwość oceny głębi widzenia. Sterowanie ramieniem kamery odbywa się okresowo,

przez przełączanie jednego z zadajników do tego ramienia. Podobnie w przypadku wersji czteroramiennej może odbywać się sterowanie trzecim ramieniem narzędziowym. Sprzedawane są też wersje z dodatkową konsolą, przy której siedzi chirurg asystent i steruje trzecim ramieniem narzędziowym oraz kamerą [11].

Ramiona telemanipulatora są montowane do pionowej kolumny przymocowanej do ruchomej podstawy. Spełniają one zasadę stałopunktowości kinematycznej. W każdym ramieniu można wyróżnić sześć biernych stopni swobody, trzy czynne stopnie swobody oraz w przypadku ramion narzędziowych cztery czynne stopnie swobody związane z narzędziem. Bienne stopnie swobody mają strukturę kinematyczną typu SCARA. Przeguby biernych stopni swobody nie są wyposażone w silniki, natomiast wykorzystują hamulce elektromagnetyczne do blokowania ruchu. Czynne stopnie swobody mają kinematykę typu sferycznego, ze środkiem sfery wysuniętym poza obręb mechanizmu. Pierwszy stopień swobody to obrót wokół osi odchylonej o ok. 45 stopni od pionu, drugi – to obrót wokół osi prostopadłej do poprzedniej, z wykorzystaniem mechanizmu równoległowodowego do odsunięcia osi obrotu, a trzeci - to ruch liniowy wzdłuż osi prostopadłej do poprzedniej; tym ruchem jest wprowadzana kamera lub narzędzie do ciała pacjenta przez punkt przecięcia pierwszych dwóch osi. Stopnie swobody narzędzia umożliwiają jego obrót wokół osi, obrót pierwszego członu kiści wokół osi prostopadłej do osi narzędzia i niezależny obrót obydwu szczęk wokół osi prostopadłej do poprzedniej.

Przygotowanie robota do operacji rozpoczyna się od przysunięcia kolumny do stołu chirurgicznego i jej unieruchomienia. Następnie chirurg doprowadza każde z ramion do pozycji, w której punkt przecięcia osi czynnych stopni swobody ramienia pokrywa się z otworem w ciele pacjenta. Aby to uczynić, zwalnia za pomocą przycisku umieszczonego na ramieniu hamulce na przegubach biernych stopni swobody ramienia i porusza ręcznie tymi przegubami. Dalsze sterowanie telemanipulatorem odbywa się z konsoli. W trakcie pracy robota wymiana narzędzi jest dokonywana ręcznie przez instrumentariuszkę [3, 13].

W telemanipulatorze da Vinci jest stosowane siłowe sprzężenie zwrotne, ale tylko w przypadku występowania bardzo dużych sił. Wynika to z faktu, że narzędzie nie jest wyposażone w czujniki siły, a informacje o obciążeniu czerpie jedynie z pomiaru prądu płynącego w silnikach. Praktycznym efektem stosowania tego sprzężenia zwrotnego jest wyczuwanie przez chirurga kolizji ramion, gdyż siły wywołane przez tkanki miękkie są zbyt małe, by je wykryć przez pomiar prądu (opory układu przeniesienia napędu oraz siły pochodzące od żeber są zwykle znacznie większe).

3.4. KLASYFIKACJA NARZĘDZI I ICH OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA

Z uwagi na rodzaj operacji wykonywanych przez roboty medyczne można wyróżnić dwie podstawowe grupy ich narzędzi: narzędzia do wykonywania operacji ortopedycznych oraz narzędzia do operacji laparoskopowych. Narzędzia do wykonywania operacji ortopedycznych to zwykle frezy i wiertła napędzane silnikiem na sprężone powietrze [7, 11].

Zupełnie inaczej przedstawia się sytuacja w przypadku zrobotyzowanych narzędzi do operacji laparoskopowych. Można powiedzieć, że ich konstrukcja stanowiła krok do przodu w rozwoju narzędzi chirurgicznych, a opracowane rozwiązania stały się inspiracją do tworzenia nowych, częściowo zautomatyzowanych narzędzi stosowanych w klasycznej chirurgii.

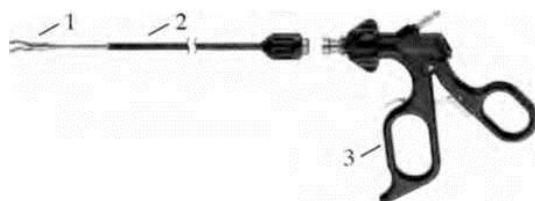
Rozwój narzędzi medycznych jest ściśle związany z rozwojem medycyny. W chirurgii klasycznej używanych jest bardzo wiele typów narzędzi – od prostych, jak skalpele, imadła do trzymania igieł, haki, szczypczyki, po bardziej złożone, jak klipsownice, skalpele koagulacyjne i harmoniczne itp.

Narzędzia stosowane w robotach medycznych można również podzielić na narzędzia o jednym elemencie czynnym (skalpele, haki, dłuta) i narzędzia o dwóch elementach czynnych (imadła, pincety, nożyczki). Mają one odpowiednio 6 lub 7 stopni swobody. Klasyczne narzędzia są pozycjonowane, a w przypadku drugiej grupy także zamykane/otwierane bezpośrednio przez chirurga. Dzięki zwinności jego dłoni narzędzie może być precyzyjnie przemieszczane we wszystkich stopniach swobody. Pojawienie się chirurgii laparoskopowej z jednej strony przyniosło duże korzyści, gdyż ograniczyło urazy pooperacyjne pacjentów, z drugiej jednak bardzo utrudniło pracę chirurga i spowodowało, że jego narzędzia stały się bardziej skomplikowane.

Klasyczny instrument chirurgiczny stosowany w laparoskopii składa się z efektora, czyli części zakończonej końcówką wykonawczą 3, ergonomicznego uchwytu do manipulacji narzędziem 1 oraz elementu w postaci tulei 2, łączącego te dwie części. Z uwagi na odsunięcie od siebie efektora i uchwytu, konieczne jest zastosowanie znacznie bardziej rozbudowanego niż w klasycznych narzędziach układu przeniesienia napędu zamykania szczęk efektora. Mała średnica narzędzia powoduje również znaczne ograniczenie przenoszonych sił. Chwytając rękojeść, chirurg ma możliwość manipulowania narzędziem. Ponieważ jednak tuleja narzędzia przechodzi przez otwór w ciele pacjenta, zmniejsza to o 2 liczbę stopni swobody narzędzia – chirurg może pozycjonować narzędzie, ale nie ma wpływu na orientację narzędzia, oprócz obrotu wokół jego osi. Problem ten rozwiązuje się na dwa sposoby:

- Pierwszy polega na stosowaniu zestawu narzędzi o różnych kątach pochyleń i obrotu szczęk. Stwarza to jednak konieczność częstej zmiany narzędzi podczas operacji i ją wydłuża.

- Drugi sposób polega na wykorzystywaniu narzędzi o dodatkowych stopniach swobody. W praktyce chirurgicznej nie jest to jednak sposób często stosowany, prawdopodobnie z uwagi na nienaturalne sterowanie tymi przegubami.



Rys. 6. Budowa narzędzia laparoskopowego

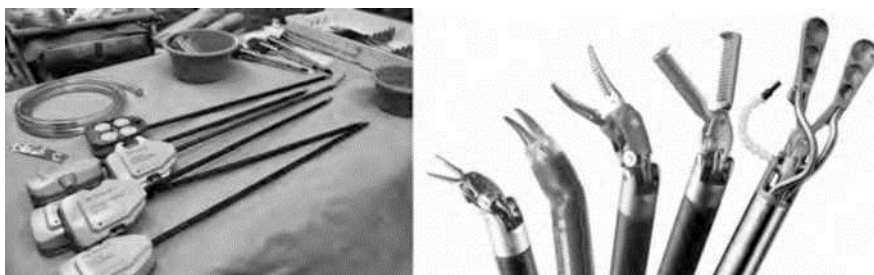
Drugim problemem związanym z oddaleniem dłoni chirurga od narzędzia jest konieczność stosowania odpowiedniego układu przeniesienia napędu z rękojeści na końcówkę wykonawczą. Układ ten z jednej strony musi być dostatecznie mały, aby zmieścić się w średnicy narzędzia, a z drugiej musi przenosić odpowiednie siły. Dodatkowymi istotnymi cechami jest łatwość poruszania narzędziem przez chirurga i możliwość sterylizacji. W tradycyjnych instrumentach laparoskopowych, dla większości typów końcówek narzędziowych, układy napędowe opierają się na mechanizmach wykorzystujących ciągną sztywne [1].

Podstawową różnicą, pojawiającą się w przypadku narzędzi laparoskopowych stosowanych w telemanipulatorach, jest zastąpienie napędu ręcznego przez napęd elektryczny. Inny jest też sposób pozycjonowania i mocowania narzędzi. Układ mocujący powinien zapewnić możliwość częstego i szybkiego odłączania i przyłączania narzędzi do ramienia robota przy jednoczesnym zachowaniu sterylności. Zwykle również napędy narzędzi znajdują się w części związanej z ramieniem, a co za tym idzie układ mocujący musi zapewnić możliwość przeniesienia napędu. W konstrukcji zrobotyzowanych narzędzi w niektórych typach telemanipulatorów można stosować klasyczne narzędzia z dołożonym jedynie do uchwytu napędem. Drugi sposób, stosowany w bardziej zaawansowanych telemanipulatorach, to zwiększenie ruchliwości narzędzia, tak aby osiągnąć 5 (robot ZEUS) lub 6 (roboty da Vinci, RobIn Heart, DLR MiroSurge) stopni swobody (oprócz zamykania szczęk), i stworzenie chirurgowi jak największych możliwości manipulacyjnych wewnątrz ciała pacjenta. Realizowane jest to zwykle przez dołożenie kiści składającej się z dodatkowego jednego lub dwóch przegubów. W niektórych rozwiązaniach zamiast jednego z przegubów stosowany jest niezależny ruch każdej ze szczęk, co w efekcie daje ten sam poziom ruchliwości narzędzia. Zwiększenie liczby stopni swobody narzędzia laparoskopowego wiąże się jednak ze znacznymi problemami technicznymi związanymi z przeprowadzeniem napędu.

Wszystkie silniki napędowe narzędzi są zwykle umieszczone na ramieniu robota – poza ciałem pacjenta, a co za tym idzie napęd na dalsze przeguby musi być przeprowadzany przez przeguby wcześniejsze. W takiej sytuacji najczęściej wykorzystywane są układy przeniesienia napędu oparte na cięgnach podatnych.

3.4.1. Budowa narzędzi robota da Vinci

Układ przekazania napędu na narzędzie w robocie da Vinci składa się podobnie jak w robocie ZEUS z trzech podstawowych elementów: końcówki narzędziowej 3, wykazującej 3 stopnie swobody, łącznika w postaci długiej tulei o średnicy 8,5 mm, mającej możliwość obrotu względem własnej osi, oraz z zespołu przekazania napędu na efektor (interfejs) [11]. W robocie tym jest wykorzystywanych podczas operacji wiele rodzajów narzędzi, z których każde jest podobne do przedstawionego na rysunku 9. Narzędzia wymienia ręcznie instrumentariuszka, co trwa od 30 do 120 s. W większości narzędzi kąt otwarcia szczęk wynosi ok. 30 stopni, a kąty obrotu na każdym z przegubów ± 90 stopni. Niestety, ze względów bezpieczeństwa każdy egzemplarz danego rodzaju narzędzia może być użyty co najwyżej 10 razy. Wynika to przede wszystkim z ograniczonej trwałości linek.



Rys. 8. Narzędzia chirurgiczne robota da Vinci

W firmie Intuitive Surgical opracowano również drugi typ szeregu narzędzi o średnicy 5 mm [3]. Ich konstrukcja jest wzorowana na kościach typu trąba słonia. Za tuleją łącznika znajdują się cztery dyski mogące się względem siebie zginać o kąt ok. ± 40 stopni. Każdy z przegubów jest napędzany układem 4 linek, przy czym linki te są poruszane synchronicznie, tak że narzędzie ma również ruchliwość równą 2. Otwieranie szczęk narzędzi jest realizowane za pomocą mechanizmu jarzmowego ze sprężyną powrotną.

4. ZALETY ROBOTÓW CHIRURGICZNYCH

Robot da Vinci oferuje chirurgowi wiele nowych możliwości, które nie były dostępne w chirurgii małoinwazyjnej [3,8,11]. Do najważniejszych zalet należą:

- Instrumenty typu Endowrist – ramiona robota da Vinci wyposażone są w wymienne narzędzia robotowe. Unikalność narzędzi robotowych wynika z faktu, że posiadają one możliwość naśladowania ruchu nadgarstka. Mogą poruszać się w 7 płaszczyznach i obracać o 540 stopni w osi długiej narzędzia.
- Cztery równocześnie pracujące w polu operacyjnym ramiona robotowe – na jednym z ramion zainstalowana jest kamera, a pozostałe trzy ramiona wyposażone są w narzędzia robotowe.
- Obraz pola operacyjnego – przekazywany do konsoli obraz pola operacyjnego jest wysokiej, trójwymiarowej jakości HD. Dodatkowo, obraz pola operacyjnego może być nawet kilkukrotnie powiększony. Dzięki temu operator może identyfikować naczynia i nerwy niemożliwe do zauważenia podczas klasycznej operacji.
- Konsola robotowa i pozycja operatora – chirurg zasiadający za konsolą robota steruje ramionami robota poprzez system manetek i pedałów. Ruchy dłoni i palców są w przenoszone w czasie rzeczywistym na precyzyjne ruchy narzędzi robotowych.
- Sposób sterowania ramionami robota jest bardzo intuicyjny i nie wymaga długiego okresu uczenia się. Dodatkowo, operator zasiada za konsolą w ergonomicznej komfortowej pozycji, a system da Vinci redukuje drżenie jego rąk.
- System umożliwia zmianę skalowania co zwiększa dokładność i precyzję, oznacza to, że ruch dłoni manetką przetwarzany jest na ruch narzędzia robotowego w stosunku 2:1, 3:1 lub innym w zależności od sytuacji klinicznej.
- Podwójna konsola sterująca od modelu da Vinci Si, która umożliwia jednoczesną pracę 2 chirurgów lub może służyć celom edukacyjnym.
- Funkcja obrazowania fluorescencyjnego, którą oferuje teraz robot chirurgiczny da Vinci Si. Rozwiązanie to poprawia widzenie chirurga i pozwala na zwiększenie precyzji i kontroli. Chirurg operujący przy konsoli robota ma w czasie rzeczywistym, możliwość podglądu obrazu operacyjnego w trybie światła białego oraz obrazowanie fluorescencyjne. Firefly™ wykorzystuje technologię bliskiej podczerwieni do wykrycia podanego do krwi barwnika ICG (indocyanine green).

5. ZASTOSOWANIE

Do dzisiaj na świecie trwa poszukiwanie optymalnego obszaru stosowania robotów chirurgicznych [3,13]. Zakres aplikacji tych robotów obejmuje takie zabiegi jak:

- Prostatektomia,
- Operacje kolorektalne,
- Cholecystektomia,
- Chirurgia bariatryczna,
- Histerektomia,
- Adrenalektomia,
- Splenektomia,
- Resekcja żołądka,
- Nefrektomia,
- Wszczepienie protezy Y,
- Pobranie nerki od żywego dawcy i inne.

6. OGRANICZENIA CHIRURGII ROBOTOWEJ

System da Vinci nie jest pozbawiony wad [8,11,14]. Z punktu widzenia chirurga- praktyka do najistotniejszych należą:

- Brak czucia tkankowego – obecna generacja robota nie posiada funkcji „czucia tkankowego” (haptic feedback) i operator musi w czasie operacji polegać wyłącznie na bodźcach wzrokowych.
- Wielkość systemu da Vinci – system składa się z 3 zasadniczych elementów: konsoli, toru wizyjnego i robota. Wymienione elementy połączone są w integralną całość na sali operacyjnej. Jak wynika z praktyki, sala operacyjna przeznaczona do zabiegów z zastosowaniem robota powinna mieć powierzchnię co najmniej 40 m².
- Ograniczony zakres ruchu ramion – ramiona robota mają ograniczony zakres ruchów. Jeżeli pole operacyjne jest ograniczone do jednego rejonu anatomicznego zakres ruchu ramion robota jest wystarczający. W przypadku operacji obejmującej całą jamę brzuszną, co wymaga odłączania robota i zmianę jego pozycji względem stołu operacyjnego.
- Sposób instalacji robota – po zainstalowaniu ramion robota w ciele pacjenta, pozycja robota oraz pozycja stołu operacyjnego muszą pozostać niezmienione, co stanowi pewną niedogodność podczas operacji brzusznych.
- Koszt – koszt zakupu jak i utrzymania systemu da Vinci jest powszechnie znaną wadą robota. Cena całego systemu kształtuje się na poziomie 1,8–2,2 miliona USD, w zależności od wersji. Dodatkowo, obligatoryjny koszt rocznego serwisu robota da Vinci w USA wynosi około 100 tysięcy USD. Narzędzia robotowe mogą być zastosowane tylko do 10 operacji, po czym zostają utylizowane. Generuje to dodatkowe koszty.

7. ASPEKTY PRAWNE

Nie da się ukryć, że zastosowanie chirurgii małoinwazyjnej z użyciem narzędzi laparoskopowych lub robotów chirurgicznych stanowi wyzwanie dla medycyny XXI wieku, choć wiele wątpliwości pojawia się natury etycznej i podejścia pacjenta do takiego zabiegu. W dużej mierze droga od momentu zaprojektowania wyrobu medycznego, jakim niewątpliwie są narzędzia małoinwazyjne (laparoskopowe), czy też roboty, do praktycznego stosowania jest dosyć długa [9,11].

W ochronie pacjenta stoi szereg instytucji, które mające na celu monitorować i zapewnić pacjentów i lekarzy o bezpieczeństwie stosowania danego wyrobu. Są to instytucje na szczeblu narodowym i międzynarodowym, które odwołują się do zagadnień prawnych (Ministerstwo Zdrowia, Urząd Rejestracji Produktów Leczniczych, EMEA, Food and Drug Administration) czy etycznych (Komisje Bioetyczne, oddziały i wyodrębnione jednostki FDA).

Wynika to ze specyfiki stosowania - normy medyczne bardzo rygorystycznie definiują proces wprowadzania nowych urządzeń do praktyki szpitalnej po to, by minimalizować zagrożenie dla pacjenta. Proces wdrażania robota do praktyki klinicznej można podzielić na następujące etapy:

- Testy laboratoryjne.
- Testy na zwierzętach.
- Testy kliniczne na ludziach.
- Uzyskanie atestu odpowiedniej komisji.
- Sprzedaż komercyjna.

Badania kliniczne obejmujące szereg badań trwają zazwyczaj kilka lub kilkanaście lat i mają na celu potwierdzić skuteczność i bezpieczeństwo. Ich przebieg i prowadzenie określa wiele przepisów, które ustanowione są prawem polskim np. Ustawa z dnia 27 lipca 2001 r. o Urzędzie Rejestracji Produktów Leczniczych, Wyrobów Medycznych i Produktów Biobójczych (Dz. U. Nr 126 poz. 1379 ze zm.).

8. KIERUNKI ROZWOJU ROBOTÓW MEDYCZNYCH

Postęp medycyny jest dziś nierozdzielnie związany z postępem techniki [11]. Trudno więc sobie wyobrazić, aby rozwój robotyki medycznej zatrzymał się, skoro są to w zasadzie jego początki. Zastanawiając się, w jakim kierunku będzie postępował ten rozwój, należy wziąć pod uwagę:

- potrzeby medycyny,
- możliwości techniki,
- kwestie ekonomiczne,
- uwarunkowania prawne,
- uwarunkowania społeczne.

Analiza działań w tej dziedzinie ujawniła zdecydowane zróżnicowanie w aktywności firm produkujących sprzęt medyczny (ulepszanie istniejących konstrukcji i niedopuszczanie konkurencji na rynek) oraz niezależnych ośrodków skupionych wokół uczelni wyższych i instytutów badawczych (testowanie nowych rozwiązań):

- Doskonalenie istniejących konstrukcji – drobne zmiany już istniejących konstrukcji pod kątem poprawy ergonomii czy bezpieczeństwa. Zmienia się również zakres stosowania robotów. Lekarze i producenci robotów poszukują coraz to nowych sposobów prowadzenia operacji chirurgicznych.
- Nowe zmysły – dążąc do ograniczenia tej bariery dla zmysłów, jaką jest telemanipulator, konstruktorzy robotów starają się wyposażać je w znacznie bogatszy zestaw czujników i znaleźć metodę przekazywania lekarzom informacji pochodzących z tych czujników.
- Zwiększanie funkcjonalności – pojawia się tendencja do automatyzacji czynności takich jak procedura szycia oraz nadążanie za ruchomymi organami.
- Nowe konstrukcje – zwykle opracowywane na wyższych uczelniach lub w instytutach badawczych. Konstrukcje te charakteryzują się innowacyjnością, wykorzystywaniem nowych technologii czy algorytmów sterowania. W wielu przypadkach konstruktorzy dążą również do ograniczenia kosztów.
- Praca całkowicie wewnątrz ciała pacjenta – pierwszymi przykładami takiego robota są systemy diagnostyczne w postaci kamery umieszczonej w kapsułce, przeznaczone do wykonywania gastroskopii, czy „robaka” do kolonoskopii. Roboty przyszłości miałyby się nie tylko poruszać wewnątrz pacjenta, ale również wykonywać tam różnego typu zabiegi.
- Mikroroboty – wielkość z założenia musi być mniejsza niż 1 mm. Do wytwarzania mikrorobotów zazwyczaj stosuje się technologię MEMS (MicroElectro-Mechanical Systems), czyli zbliżoną do stosowanej przy wytwarzaniu mikroprocesorów.
- Nanoroboty – choć w tej chwili trudno powiedzieć, czy będzie to można nazwać robotyką – jest to zastosowanie nanotechnologii w medycynie. Nanocząsteczki z odpowiednimi przeciwciałami będą w stanie przeszukiwać organizm w celu znalezienia komórek chorobotwórczych lub patologicznych i atakować je od środka.

A w chwili obecnej czekamy na rezultaty pracy naukowców. Wstępne doniesienia wskazują na to, że w niedalekiej przyszłości kilka nowych prototypów robotów takich jak: Amadeus z Titan Medical (Kanada), ARAKNES robot z SSSA BioRobotics Institute i Surgical Robotics S.p.a.'s Surgenius (Włochy), DLR system (Niemcy), Mazor Robotics Ltd's SpineAssist (Izrael) ujrzy światło dzienne. Daje to nadzieje na jeszcze szybszy postęp w robotyce medycznej, powstanie zupełnie nowych odmiennych technologii a przede wszystkim na redukcję kosztów.

9. POLSKA TELECHIRURGIA

W Katedrze Kardiochirurgii w Katowicach, jako pierwszym ośrodku w Polsce, stosowany jest do dziś asystent-robot, AESOP [6,8,11].

W roku 2002, testując przez trzy miesiące wypożyczonego robota – ZEUS (zresztą tego samego, który wykonał pierwszą operację transatlantycką), wykonano pierwsze w Polsce operacje kardiochirurgiczne. Chirurdzy mieli czas, by przetestować robota i zgłosić swoje uwagi producentowi. Najpierw uczyli się pracować z robotem na preparatach, potem przyszedł czas na pacjentów. Udało się wykonać 10 operacji serca za pomocą tego robota. Wykorzystywano go początkowo tylko do pobrania tętnicy piersiowej wewnętrznej. Potem stosowano metodę klasyczną, czyli rozcinano klatkę piersiową między żebrami, docierając do serca. Operacje wykonywał prof. Andrzej Bochenek. Uwagi jakie zgłosili to: „Trójwymiarowy obraz serca, który widać na ekranie, nie jest jeszcze doskonały. Poważnym utrudnieniem jest także brak czucia. Nie wiadomo, z jaką siłą końcówki ramion robota naciskają na operowane miejsce. Jest to poważny problem, który musi być rozwiązany w następnej wersji robota.” – obraz poprawiono, czucia tkankowego niestety jeszcze nie.

Pierwszy w Polsce robot da Vinci Si został zainstalowany w Wojewódzkim Szpitalu Specjalistycznym, Ośrodku Badawczo-Rozwojowym we Wrocławiu, w grudniu 2010 r. W przygotowaniu do rozpoczęcia operacji robotowych zespół chirurgiczny szpitala przebył liczne szkolenia w Europie i w USA. W latach 2010–2014 w WSS wykonano łącznie ponad 170 operacji chirurgicznych przy użyciu systemu da Vinci.

Operacje z zastosowaniem robota da Vinci [13,14]:

- prostatektomia – 55,
- operacje kolorektalne (RH, LH, LAR) – 37,
- cholecystektomia – 14,
- gastric bypass – 12,
- histerektomia – 12,
- splenektomia – 11,
- nefrektomia – 8,
- resekcja mankietowa żołądka – 6,
- adrenalektomia – 6,
- resekcja żołądka inna (nie ze wskazań bariatrycznych) – 4,
- inne – 4,
- wszczepienie protezy Y – 1,
- pobranie nerki od żywego dawcy – 1.

10. PODSUMOWANIE

Roboty chirurgiczne są urządzeniami bardzo nowoczesnymi, stanowią połączenie szczytowych osiągnięć aktoryki, sensoryki i układów sterowania.

Stosowane są do małoinwazyjnych operacji, co powoduje mniejszy uraz oraz mniejsze uszkodzenie pozostałych tkanek.

Robot zwiększa precyzję ruchów operatora poprzez zmniejszenie drżenia dłoni i przeskalowanie jego ruchów, umożliwia przeprowadzenie operacji z jednego cięcia czy też metodą NOTES. Niewątpliwie jest to technologia przyszłości.

Kolejne generacje robota powinny dążyć w kierunku miniaturyzacji oraz zwiększenia zasięgu ramion robotowych jak i nowych, doskonalszych narzędzi robotowych.

Mam nadzieję, że wraz z postępem robotyka zagości na stałe również w polskich szpitalach.

LITERATURA

- [1] AGCAOGLU O., ALIYEV S., KARABULUT K., MITCHELL J., SIPERSTEIN A., BERBER E.: *Robotic versus laparoscopic resection of large adrenal tumors*. Ann Surg Oncol, 2012.
- [2] FICCARA V., CAVALLERI S., NOVARA G. et al.: *Evidence from robot-assisted laparoscopic radical prostatectomy: a systematic review*. Eur. Urol, 2007 (51), pp. 45–55.
- [3] <http://www.intuitive surgical.com>
- [4] <http://www.computerworld.pl/news/42335/Transatlantycka.operacja.telechirurgiczna.html#sthash.GJxdttdow.dpuf>
- [5] JAYNE DG., CULMER PR., BARRIE J., HEWSON R., NEVILLE A.: *Robotic platforms for general and colorectal surgery*. Colorectal Dis., 2011, Nov. Suppl. 7, pp. 78–82.
- [6] KALAN S., CHAUHAN S., COELHO RF. et al.: *History of robotic surgery*. JRS, 2010, 4(3), pp. 141–147.
- [7] MARESCAUX J., LEROY J., RUBINO F. et al.: *Transcontinental robot-assisted remote telesurgery: feasibility and potential applications*. Ann Surg. 2002, 235(4), pp. 487–492.
- [8] NAWRAT Z., PODSEDKOWSKI L., MIANOWSKI K., KOSTKA P., WRÓBLEWSKI P., MAŁOTA Z., RELIGA Z.: *Robin Heart oraz Zeus i Da Vinci – porównanie robotów kardiochirurgicznych*. XIII Krajowa Konferencja Naukowa, Biocybernetyka i inżynieria biomedyczna, Gdańsk, 10-13 września 2003 r., s. 464–469.
- [9] NAWRAT Z.: *Medical Robots – trends & short review*. Roboty Medyczne, M-Studio Zabrze, Zabrze 2007, s. 13–27.
- [10] ODDSDOTTIR M., BIRGISON G.: *AESOP: a voice-controlled camera holder*. In: Ballantyne G. H., Marescaux J., Giulianotti P.C.: *Primer of robotic and telerobotic surgery*, Philadelphia, PA: Lippincott Williams and Wilkins, 2004. pp. 35–41.
- [11] PODSEDKOWSKI L.: *Roboty medyczne*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2010.
- [12] REICHENSPURNER H., DAMIANO R. J., MACK M., et al.: *Use of the voice-controlled and computer-assisted surgical system ZEUS for endoscopic coronary artery bypass grafting*. J. Thorac. Cardiovasc. Surg., 1999, 118(1), pp. 11–6.

- [13] WITKIEWICZ W.: *Dlaczego robot chirurgiczny da Vinci jest potrzebny dla rozwoju polskiej medycyny – pierwsze polskie doświadczenia z zakresu chirurgii robotowej w Wojewódzkim Szpitalu Specjalistycznym we Wrocławiu, w Ośrodku Badawczo-Rozwojowym*. Witkiewicz W., Gawora P.: *Kardiochirurgia i Torakochirurgia Polska*, 2011, 8(3), s. 383–386.
- [14] WITKIEWICZ W.: *Chirurgia robotowa: nowa jakość i przełom w leczeniu czy kosztowny gadżet*. Nowotwory, *Journal of Oncology*, 63(5), 2013, pp. 423–429.