



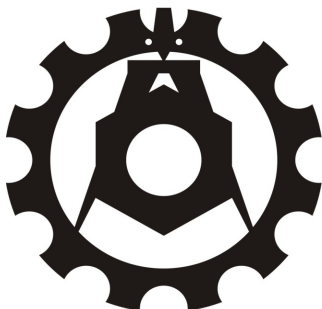
Techniczno-organizacyjne aspekty projektowania procesów i urządzeń

redakcja
Antoni Świć
Arkadiusz Gola

MONOGRAFIE

Techniczno-organizacyjne aspekty projektowania procesów i urządzeń

Monografie – Politechnika Lubelska



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

Techniczno-organizacyjne aspekty projektowania procesów i urządzeń

redakcja
Antoni Świć
Arkadiusz Gola



Politechnika Lubelska
Lublin 2017

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Jerzy Lipski

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

Redakcja techniczna: Łukasz Sobaszek

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2017

ISBN: 978-83-7947-267-3

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.agencjatop.pl

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

Nakład: 50 egz.

SPIS TREŚCI

Milena PŁAZA, Arkadiusz GOLA

IDENTYFIKACJA PROBLEMÓW I DOSKONALENIE PROCESU PRODUKCJI WYROBÓW CUKIERNICZYCH Z WYKORZYSTANIEM WYBRANYCH NARZĘDZI ZARZĄDZANIA JAKOŚCIĄ I LEAN MANUFACTURING	7
---	---

Antoni ŚWIC

KSZTAŁTOWANIE DRÓG TECHNOLOGICZNYCH OBRÓBKI CZĘŚCI W SYSTEMIE WYTWÓRCZYM.....	20
--	----

Piotr PENKAŁA, Kinga JANOWSKA

TECHNIKI ZESPOLENIA ODŁAMÓW W OSTEOSYTEZIE WEWNĘTRZNEJ.....	31
--	----

Piotr PENKAŁA, Tomasz GORECKI

MATERIAŁY UŻYWANE DO STABILIZACJI ZŁAMAŃ.....	42
---	----

Arkadiusz GOLA, Elżbieta MAŁYSZEK, Łukasz SOBASZEK

LOGISTYCZNE DYLEMATY ORGANIZACJI PRZEPIŁYU PRODUKCJI.....	52
--	----

*Jacek CABAN, Wojciech MISZTAL, Andrzej MARCZUK,
eksej ŠEVCOV, Vladimir KOSOLAPOV, Sergej OTROŠKO*

WYDAJNOŚĆ PRZENOŚNIKA ŚLIMAKOWEGO W TRANSPORCIE PSZENICY PASZOWEJ	67
--	----

Myron CHERNETS, Natalia LEBEDEVA

EVALUATION OF DURABILITY OF A PLAIN BEARING WITH SHAFT AND BUSH ROUNDNESS DEVIATIONS	78
---	----

Bohdan PALCHEVSKYI

CAD AUTOMATE PROCEDURE OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT	93
--	----

Olena KHRESTYANPOL

PROJECT PROCEDURE INTEGRATION OF FMS STRUCTURE
SYNTHESIS 101

Piotr BERNAT

STREAMLINING THE OPERATIONS OF A TRANSPORT BUSINESS
BY IT SOLUTIONS 108

*Александр ХАРЧЕНКО, Екатерина ВЛАДЕЦКАЯ,
Сергей БРАТАН, Дмитрий ВЛАДЕЦКИЙ*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНЕШНИХ ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ
ПРИ ШЛИФОВАНИИ ДЕТАЛЕЙ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ
СТЕНДЕ..... 114

Алексей ОСТРЕНКО, Александр ВЕТРОГОН, Андрей ХАРЧЕНКО

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ПОДВЕСКИ АВТОМОБИЛЕЙ ПУТЁМ
МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
АМОРТИЗАТОРОВ..... 126

Андрей ХАРЧЕНКО

ГИДРОДИНАМИКА ТЕЧЕНИЙ У ПОВЕРХНОСТИ
ЭКРАНИРОВАННЫХ ДИСКОВ С ЭЖЕКТОРНЫМИ КАНАЛАМИ
В ПОЛОСТЯХ РОТОРОВ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ 132

Сергей БРАТАН, Александр ХАРЧЕНКО, Екатерина ВЛАДЕЦКАЯ

ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ВИБРОИЗОЛИРУЮЩЕГО
УСТРОЙСТВА ШЛИФОВАЛЬНОГО СТАНКА ПЛАВУЧЕЙ
МАСТЕРСКОЙ 139

Milena PŁAZA *, Arkadiusz GOLA**

IDENTYFIKACJA PROBLEMÓW I DOSKONALENIE PROCESU PRODUKCJI WYROBÓW CUKIERNICZYCH Z WYKORZYSTANIEM WYBRANYCH NARZĘDZI ZARZĄDZANIA JAKOŚCIĄ I LEAN MANUFACTURING

Streszczenie

W artykule przedstawiono możliwość zastosowania narzędzi Lean Manufacturing w procesie doskonalenia procesu produkcji wyrobów cukierniczych. Praca prezentuje kompleksowe podejście, w którym kolejno dokonano diagnozy występujących problemów, a następnie opracowano projekt działań doskonalących. Do diagnozy występujących problemów zastosowano metodę FMEA – należącą do rodziny metod z obszaru zarządzania jakością. W odpowiedzi na zidentyfikowane problemy zaproponowano wdrożenie takich narzędzi doskonalących jak 5S, TPM oraz Kaizen.

1. WSTĘP

W problematyce zarządzania produkcją dużą rolę odgrywają oczekiwania konsumentów wobec rynku [1–2]. Obecny rynek w głównej mierze stara się spełniać wymagania, które są stawiane przez klienta. Konkurencja na rynku oraz panujące tendencje sprawiają, że producenci podejmują działania o charakterze prewencyjnym oraz starają się doskonalić procesy wytwórcze [3–4]. Proces ciągłego doskonalenia przedsiębiorstwa jest ściśle związany z poszukiwaniem rozwiązań, które pozwalają na zwiększenie efektywności produkcji. Jest to możliwe m.in. dzięki zastosowaniu filozofii Lean Manufacturing [5–6]. Celem nadrzędnym niniejszej filozofii jest eliminacja czynników, które generują niepotrzebne koszty. Wśród zalet stosowania Lean Manufacturing można zaobserwować skrócenie czasu produkcji, wzrost jakości produkowanych wyrobów czy też obniżenie kosztów produkcji [7].

* Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, milena.plaza@pollub.edu.pl – student

** Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Instytut Technologicznych Systemów Informacyjnych, a.gola@pollub.pl

W niniejszym artykule przedstawiono możliwość zastosowania narzędzi Lean Manufacturing dla potrzeb doskonalenia procesu produkcji wyrobów cukierniczych. Artykuł składa się z dwóch części: teoretycznej oraz badawczej. Część teoretyczna stanowi charakterystykę systemu Lean Manufacturing oraz ogólną charakterystykę procesu produkcji wyrobu cukierniczego w postaci karmelków. Część badawcza przedstawia diagnozę problemów przedsiębiorstwa i jest połączona z częścią projektową. W części tej znalazły się propozycje rozwiązań, które przedsiębiorstwo może wykorzystać w celu poprawy efektywności produkcji. W artykule znalazły się zidentyfikowane przyczyny oraz skutki występujących wad, a także określone działania korygujące. Problemy z jakimi zmierza się przedsiębiorstwo są spowodowane głównie błędami w przepływie informacji. Zaproponowane w pracy usprawnienia opierają się o możliwość zastosowania takich narzędzi jak 5S, TPM oraz Kaizen.

2. ŹRÓDŁA STRAT W PRZEDSIĘBIORSTWIE I ISTOTA LEAN MANUFACTURING

Lean Manufacturing jest filozofią zakładającą wytwarzanie produktów zgodnie z oczekiwaniami klientów, przy jednoczesnym najmniejszym koszcie, a także optymalnym zużyciu zasobów [8].

Termin „*lean*” jest pochodzenia anglo-amerykańskiego i jest definiowany jako „wyszczuplenie”, „odchudzenie” systemu zarządzania produkcją pod względem reguł postępowania, potrzebnych zasobów materiałowych, utrzymywanych zapasów wyrobów gotowych i produkcji w toku oraz wykorzystywanej przestrzeni hal produkcyjnych. Po raz pierwszy tego terminu użył pod koniec lat osiemdziesiątych John Krafcik, badacz International Motor Vehicle Program. Definicję tą spopularyzował James Womack, który pod koniec lat osiemdziesiątych badał produktywność amerykańskich, europejskich, a także japońskich fabryk. Według niego prekursorem systemu produkcji zapewniającego ciągłość przepływu wyrobów była fabryka Toyota Motor Corporation [9].

Głównym celem filozofii Lean Manufacturing jest skrócenie czasu od złożenia zamówienia do jego realizacji. Jest to możliwe dzięki eliminacji marnotrawstwa, które powstaje w trakcie procesu. Do podstawowych źródeł marnotrawstwa należą [10]:

- nadprodukcja,
- braki i naprawy,
- zbędny transport,
- przestoje,
- zbędna praca,
- niewłaściwe metody wytwarzania.

Do eliminacji marnotrawstwa wykorzystuje się narzędzia Lean Toolbox [11–13]. Do wybranych narzędzi Lean Manufacturing należą:

- metoda 5 S,
- system TPM,
- filozofia Kaizen.

Metoda 5S stanowi technikę szczupłego wytwarzania. Składa się ona z pięciu praktyk, które pozwalają na udoskonalanie, a także utrzymanie dobrze zorganizowanego stanowiska pracy. Nazwa tej metody pochodzi od japońskich słów:

- seiri (sortowanie),
- seiton (systematyka),
- seiso (sprzątanie),
- seketsu (standaryzacja),
- shitsuke (samodyscyplina).

Wdrażanie tej metody powinno być rozpoczęte od przeszkolenia pracowników. Należy pamiętać o tym, żeby uczestnicy zrozumieli potrzebę wdrożenia tej metody [14].

System TPM (*Total Productive Maintenance*) służy do wydłużenia czasu eksploatacji maszyn oraz doskonalenia się procesów. Istotą TPM jest zapewnienie bezawaryjnego funkcjonowania środków techniczno-produkcyjnych przedsiębiorstwa. Celem stosowania systemu TPM jest brak przestojów oraz defektów będących konsekwencją eliminacji marnotrawstwa, doskonalenia procedur oraz sprzętu, aby pozbyć się aktualnych problemów, a także zapobiec powstaniu kolejnych. Ocena bieżącego stanu wykorzystania posiadanego parku maszynowego realizowana jest z wykorzystaniem wskaźnika OEE (*Overall Equipment Effectiveness*). Wskaźnik ten składa się z iloczynu trzech składowych: współczynnika dostępności, współczynnika wydajności oraz współczynnika jakości [15–16]. Rolą pracowników jest przede wszystkim utrzymanie odpowiedniego stanu maszyn, tak aby mogły działać bez żadnych defektów czy awarii. Szczególnie ważne jest, by operatorzy aktywnie włączyli się we wszystkie działania, których celem jest zapobieganie defektom i awariom obsługiwanych przez nich urządzeń. Totalne utrzymanie maszyn dotyczy wszystkich poziomów organizacji, od kierownictwa aż po operatorów w hali produkcyjnej.

Filozofia Kaizen jest określana jako ciągle doskonalenie. Pochodzi ona z połączenia słów „*kai*” – co oznacza zmianę oraz „*zen*” – dobrze. Koncepcja ta narodziła się w Japonii i jest jednym z głównych fundamentów szczupłej produkcji. Podstawowym zadaniem Kaizen jest rozwiązywanie problemów w miejscu ich występowania. Zasada ta dotyczy stanowiska pracy. Dzięki temu systemowi pracownicy mogą z łatwością identyfikować występujące problemy oraz szukać ich rozwiązań. Uzyskanie lepszego wyniku pracy jest możliwe dopiero po usprawnieniu procesu [17].

3. PROCES PRODUKCYJNY KARMEŁKÓW

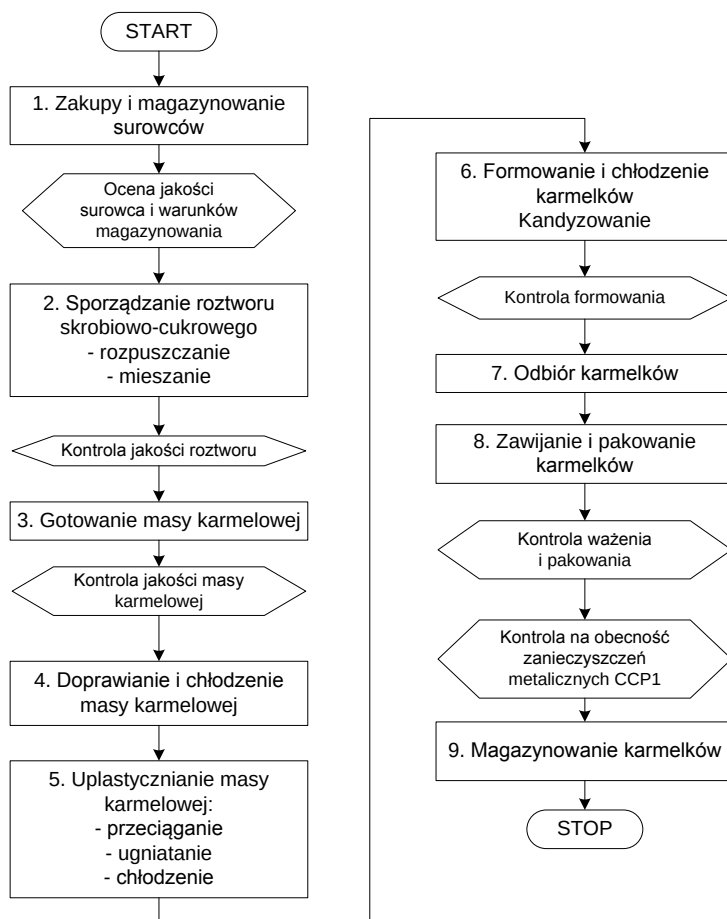
Proces produkcyjny karmelków składa się z 9 etapów (rys. 1). Pierwszym etapem procesu produkcji jest zakup i magazynowanie surowców i półproduktów. Materiały, które są wykorzystywane w procesie produkcji zakupywane są przez Dział Zaopatrzenia Materiałowego. Materiały opakowaniowe i surowce są przed użyciem kontrolowane przez Dział Zarządzania Jakością, który decyduje o dopuszczeniu ich do użycia. Wśród zadań realizowanych na tym etapie wyróżnia się sprawdzanie atestów, specyfikacji, pobranie próbek i wykonanie analiz. Większość surowców ze względu na konieczność zapewnienia płynności produkcji podlega magazynowaniu w odpowiednich i kontrolowanych warunkach, takich jak wilgotność i temperatura. W wytwórni cukierków znajduje się kilka pomieszczeń magazynowych, w których przechowuje się odrębnie surowce, opakowania, surowce łatwo psujące się (chłodnia) oraz surowce aromatyczne.

Kolejnym etapem procesu produkcyjnego jest sporządzanie roztworu cukrowo-syropowego. Proces gotowania roztworu przebiega w wyparce. W produkcji karmelków uwzględnia się również proces recyklingu łomu karmelkowego. Polega on na rozpuszczeniu łomu, jego neutralizacji i oddzieleniu substancji dodatkowych. W wyniku tego procesu uzyskiwany jest roztwór cukru, który jest dodawany do gotowania roztworu cukrowo-glukozowego.

Następnym krokiem jest gotowanie masy karmelowej. W celu otrzymania masy karmelowej poddaje się odparowaniu wody. Proces ten jest prowadzony w aparacie wyparnym. Masa karmelowa zaraz po opuszczeniu wyparki zostaje najpierw zważona, a następnie przewieziona przez mikser, gdzie dozuje się do masy barwniki spożywcze, substancje aromatyczne oraz inne składniki zawarte w recepturze. Po uruchomieniu miksera masa karmelowa podlega wstępnemu mieszaniu. Później doprawiona masa karmelowa kierowana jest do ugniatania mechanicznego.

Kolejnym etapem jest uplastycznienie masy karmelowej. Proces ten ma na celu dokładne wymieszanie i doprowadzenie masy do temperatury, w której ma najlepsze właściwości plastyczne. Proces ten polega na ugniataniu masy karmelowej i odbywa się na ugniatarce mechanicznej. Po ugnieceniu masa jest dzielona na mniejsze części i kierowana do linii formującej lub za pośrednictwem laminarki, która tworzy z masy cienki plaster, wklejana do rolowaczki maszyny formującej.

Kolejnym krokiem jest formowanie i chłodzenie karmelków oraz kandyzowanie. Formowanie odbywa się w agregatach formujących składających się z rolowaczki, wyciągarki batonów, maszyny formującej oraz chłodni. Następnie karmelki po uprzednim uformowaniu i schłodzeniu są zasypywane do zamykających metalowych lub plastikowych pojemników i przechowywane przed zapakowaniem.



**Rys. 1. Algorytm procesu produkcyjnego wyrobów oblewanych czekoladą
(opracowanie własne na podstawie materiałów udostępnionych przez przedsiębiorstwo)**

Produktem ubocznym powstającym w procesie formowania jest łom karmelkowy. Z kolei karmelki, które służą jako korpusy do oblewania czekoladą, przewożone są na hale do oblewania wyrobów czekoladowych.

Następny etap dotyczy zawijania oraz pakowania karmelków. Karmelki po schłodzeniu są pakowane w folie PP, PE, PVC na automatach zawijających, paczkujących lub ręcznie. Większość cukierków jest zawijana mechanicznie na automatach na dwuskręt lub zgrzewana w systemie *flow-pack* (rys. 2). Część asortymentu pakowana jest w torebki lub słoje PET. Wszystkie cukierki po zapakowaniu umieszczane są w opakowaniach zbiorczych-kartonach. Na tym etapie procesu również odbierane są cukierki o niewłaściwych parametrach, które stanowią łom karmelkowy.



Rys. 2. Mechaniczne zawijanie karmelków (zdjęcie własne)

Po zapakowaniu cukierki poddawane są kontroli na zawartość zanieczyszczeń metalicznych na detektorze metali. Każda partia dopiero po uprzednim sprawdzeniu i potwierdzeniu braku zanieczyszczeń może być dopuszczona do sprzedaży. Wyroby gotowe są przechowywane w monitorowanych warunkach. Zgromadzone produkty ustawiane są na zabezpieczonych paletach i wydawane zgodnie z zasadą FIFO.

4. ANALIZA PROCESU I DIAGNOZA WYSTĘPUJĄCYCH PROBLEMÓW

Na podstawie przeprowadzonych wywiadów z pracownikami oraz przy użyciu narzędzia badań, jakim był autorski kwestionariusz ankiety dokonano diagnozy występujących problemów w przedsiębiorstwie. Badania ankietowe zostały przeprowadzone na populacji 60 osób, obejmujących w głównej mierze pracowników pionu produkcji. Wśród osób ankietowanych znaleźli się pracownicy fizyczni, kadra zarządzająca, specjaliści, operatorzy maszyn i urządzeń, a także technolodzy i laboranci.

Wyniki wywiadów przyczyniły się do określenia potencjalnych 19 czynników mogących wpływ na występowanie problemów w funkcjonowaniu przedsiębiorstwa (tab. 1).

Tab. 1. Zestawienie czynników wpływających na problemy występujące w przedsiębiorstwie

Lp.	Czynnik
1	Premie dla pracowników za przestrzeganie wymaganych standardów.
2	Stosowanie kontroli wprowadzonych działań usprawniających.
3	Eliminacja mikroprzestojów.
4	Odprawy z pracownikami, na których są omawiane problemy z poprzedniej zmiany.
5	Funkcjonowanie zasilania.
6	Cykliczne spotkania kierowników w celu omówienia dotychczasowych wyników produkcji.
7	Przestrzeganie standardów wynikających z metody 5S.
8	Przestrzeganie przyjętych standardów w zakresie mycia i konserwacji maszyn.
9	Zaangażowanie kierownictwa w proces doskonalenia.
10	Porządek na stanowisku pracy.
11	Zastosowanie pól odkładczych (oznaczone miejsce do odkładania materiałów i narzędzi).
12	Niezawodność parku maszynowego.
13	Terminowość realizowanych prac prewencyjnych SUR (Służb Utrzymania Ruchu).
14	Rotacja operatorów.
15	Stosowanie się do obowiązujących regulaminów i procedur.
16	Zaangażowanie pracowników produkcyjnych w działania o charakterze usprawniającym.
17	Stosowanie oprogramowania wspomagającego planowanie produkcji.
18	Terminowa realizacja zamówień.
19	Odpowiednia identyfikacja elementów wyposażenia.

Wśród zestawionych czynników wpływających na efektywność przedsiębiorstwa produkcyjnego wyróżnia się m.in. występowanie mikroprzestojów, rozumianych jako czasowe zatrzymanie maszyny lub urządzenia na okres czasu do 5 minut. To zjawisko, które może pojawiać się z dużą częstotliwością zmniejsza wydajność danej maszyny.

Do innych problemów, z którymi zмага się przedsiębiorstwo jest wysoki poziom rotacji operatorów. Jest ona skutkiem zwalniania się pracowników oraz stosowania zatrudnienia na umowę zlecenie. W przedsiębiorstwie każdy z pracowników odbywa szkolenie w zakresie obsługi danej maszyny. Wyszko-lenie nowego pracownika na dane stanowisko wiąże się z wysokimi kosztami. Łatwiej jest utrzymać danego pracownika niż zatrudniać nowego.

Na podstawie przeprowadzonych wywiadów pracownicy zasygnalizowali, że ważnym aspektem jest również utrzymanie porządku nie tylko w samych halach produkcyjnych, ale również w biurach zakładu.

Innym aspektem wpływającym na działanie przedsiębiorstwa jest brak pól odkładczych. Maszyny oraz urządzenia w hali produkcyjnej nie są w odpowiedni sposób oznaczone co może wpłynąć na problemy z poruszaniem się pracowników.

5. HIERARCHIZACJA PROBLEMÓW I PROJEKT DZIAŁAŃ DOSKONALĄCYCH

Na podstawie zdiagnozowanych problemów występujących w przedsiębiorstwie oraz przy użyciu narzędzia zarządzania jakością, jakim jest analiza FMEA ustalono propozycje działań usprawniających w analizowanej organizacji. Dzięki zastosowanym wywiadam z pracownikami przedsiębiorstwa udało się ustalić, że celem analizy będzie doskonalenie procesu produkcyjnego, a jej obszarem proces produkcyjny oraz inne procesy wspierające działanie przedsiębiorstwa.

W kolejnym kroku zdefiniowano jak proces produkcyjny oraz występujące w nim czynniki wpływają na efektywność produkcji badanego przedsiębiorstwa. W przypadku rozpatrywania metody FMEA w podejściu zorientowanym na efektywność, skutki wad będą określały, jak dana wada wpływa na efektywność organizacji. Po dokonaniu określenia potencjalnych wad, we wszystkich wyróżnionych obszarach przeanalizowano wszystkie możliwe czynniki, które wywołują daną wadę. Określono również możliwe skutki tych wad.

Na podstawie zgromadzonych danych można wywnioskować, że najmniejsze znaczenie ma stosowanie kontroli wprowadzonych działań usprawniających, czy też eliminacja mikroprzestojów. Największe znaczenie natomiast według pracowników pionu produkcyjnego ma odpowiednia identyfikacja wyrobów.

Wśród innych znaczących czynników występują: terminowa realizacja zamówień, stosowanie się do regulaminów i procedur, zaangażowanie pracowników produkcyjnych w działania o charakterze usprawniającym oraz stosowanie oprogramowania wspomagającego planowanie produkcji. Według pracowników odpowiednia identyfikacja wyrobów stanowi ważny aspekt w drodze do poprawy działania firmy. Stosowanie oprogramowania wspomagającego planowanie produkcji może z kolei przyczynić się do lepszej produktywności i przepływu informacji w firmie. Z przeprowadzonych wywiadów wynika, że przepływ informacji w przedsiębiorstwie bywa zaburzony.

Kolejnym etapem podczas tworzenia analizy FMEA było określenie oceny częstości wystąpienia wady, czyli LPW. Im prawdopodobieństwo wystąpienia wady spowodowanej daną przyczyną było większe, tym wartość LPW wzrastała.

Na podstawie zgromadzonych danych zauważono, że najrzadziej występującą wadą jest terminowa realizacja zamówień. Problemy w tym obszarze powstają bardzo sporadycznie ze względu na dobrze funkcjonującą współpracę działów przedsiębiorstwa. Z kolei do najczęściej występujących problemów

zalicza się eliminację mikroprzestojów i rotację operatorów. W celu eliminacji zjawiska mikroprzestojów stosuje się wskaźniki określające stopień wykorzystania parku maszynowego, którym m.in. jest OEE (*Overall Equipment Effectiveness*). Do innych często pojawiających się problemów zalicza się rotację operatorów. Działanie to może również negatywnie wpłynąć na efektywność produkcji. Duża liczba rotacji oraz brak odpowiedniego nadzoru nad niedoświadczonym pracownikiem może przyczynić się do zastoju maszyn, czy też nawet awarii maszyny. Aby łatwiej utrzymać wysoko wykwalifikowanego specjalistę w przedsiębiorstwie należy dopasować mocne strony pracownika do stanowiska na którym się znajduje. W celu określenia osobistych preferencji i zdolności zatrudnionego należy zastosować m. in. testy kompetencji, które mogą być dużym wsparciem. Dzięki temu działaniu możliwy jest wzrost efektywności pracy personelu oraz wzrost zadowolenia z pełnionej funkcji w organizacji.

Wśród innych czynników często wpływających na negatywne zjawiska w przedsiębiorstwie są niewłaściwie prowadzone odprawy z pracownikami, na których omawiane są problemy z poprzedniej zmiany. Aby rozwiązać ten problem należy zaangażować charyzmatycznego lidera, który będzie przedstawiał na jakie szczegóły poprzedniej zmiany pracownicy powinni zwrócić szczególną uwagę, aby uniknąć występujących niezgodności z założonym celem.

W etapie tworzenia dalszej analizy FMEA należało ocenić stopień wykrywalności danej wady. W tym celu zastosowano się tzw. liczbę priorytetową wykrywalności wady (LPO).

Z przeprowadzonego etapu wynika, że najmniej zauważalną wadą w przedsiębiorstwie jest eliminacja mikroprzestojów. Stopień zauważalności tego obszaru wynika z braku przywiązywania uwagi na krótkie przerwy w pracy maszyn. Z kolei do najbardziej zauważalnych wad w przedsiębiorstwie należy odpowiednia identyfikacja wyposażenia technicznego w obszarze produkcji. Proponowanym rozwiązaniem związanym z tą identyfikacją jest ich oznakowanie z wykorzystaniem etykiet zgodnie z zasadą 5S. Etykiety te informują o przeznaczeniu oznaczonych przedmiotów. Wśród zastosowań mamy tu do czynienia z zapasami, wyposażeniem oraz powierzchniami. Umieszczone kartki powinny być umieszczone w taki sposób, aby ułatwić identyfikację tych elementów, które są zbędne.

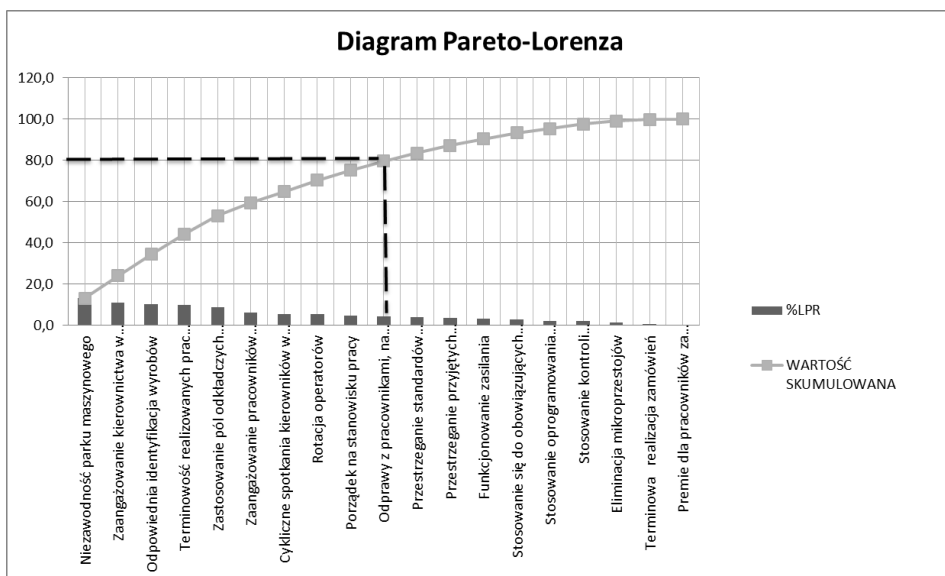
Jednym z zaproponowanych działań dla przedsiębiorstwa mających na celu poprawę efektywności procesów jest wprowadzenie standaryzacji w zakresie organizacji miejsca pracy w biurach działów budynku produkcyjnego. Wśród proponowanych rozwiązań jest m.in. zastosowanie nakładek styropianowych w szufladach w celu uporządkowania akcesoriów biurowych. Pozwoli to na utrzymanie porządku oraz zwiększy łatwość odnajdywania potrzebnych rzeczy.

Kolejnym z aspektów dla którego zaleca się wprowadzenie usprawnień jest zastosowanie pól odkładczych. To rozwiązanie może wpłynąć na wzrost bezpieczeństwa pracowników. Oznaczenie miejsc położenia maszyn i urządzeń na podłodze pozwoli na lepsze poruszanie się pracowników po hali. Wykonanie pól odkładczych można zrealizować za pomocą taśmy bądź metody malowania. W przypadku omawianej firmy najlepszym rozwiązaniem jest użycie taśm, gdyż budynek produkcyjnych jest zażytkowy i na niektóre udogodnienia potrzebna jest zgoda konserwatora zabytków. Obecne umiejscowienie maszyn nie jest oznakowane, co może wpływać na panujący nieporządek.

Na podstawie zgromadzonych danych dokonano hierarchizacji potencjalnych wad występujących w przedsiębiorstwie (tab. 2) oraz dokonano analizy ich istotności z wykorzystaniem metody Pareto-Lorenza (tab. 2, rys. 3).

Tab. 2. Analiza Pareto-Lorenza w zakresie istotności czynników wpływających na efektywność procesu produkcyjnego

Czynnik	LPR	%LPR	Wartość skumulowana
Niezawodność parku maszynowego	504	13,1	13,1
Zaangażowanie kierownictwa w proces doskonalenia	420	10,9	24,0
Odpowiednia identyfikacja wyrobów	400	10,4	34,4
Terminowość realizowanych prac prewencyjnych SUR (Służb Utrzymania Ruchu)	378	9,8	44,2
Zastosowanie pól odkładczych (oznaczone miejsce do odkładania materiałów i narzędzi)	343	8,9	53,1
Zaangażowanie pracowników produkcyjnych w działania o charakterze usprawniającym	240	6,2	59,4
Cykliczne spotkania kierowników w celu omówienia dotychczasowych wyników produkcji	210	5,5	64,8
Rotacja operatorów	210	5,5	70,3
Porządek na stanowisku pracy	189	4,9	75,2
Odprawy z pracownikami, na których są omawiane problemy z poprzedniej zmiany	168	4,4	79,6
Przestrzeganie standardów wynikających z metody 5S	150	3,9	83,5
Przestrzeganie przyjętych standardów w zakresie mycia i konserwacji maszyn	140	3,6	87,1
Funkcjonowanie zasilania	128	3,3	90,4
Stosowanie się do obowiązujących regulaminów i procedur	112	2,9	93,3
Stosowanie oprogramowania wspomagającego planowanie produkcji	80	2,1	95,4
Stosowanie kontroli wprowadzonych działań usprawniających	80	2,1	97,5
Eliminacja mikroprzestojów	60	1,6	99,1
Terminowa realizacja zamówień	27	0,7	99,8
Premie dla pracowników za przestrzeganie wymaganych standardów	9	0,2	100,0



Rys. 3. Diagram Pareto-Lorenza dla niezgodności w procesie działania przedsiębiorstwa (opracowanie własne)

Na podstawie przedstawionego wykresu (rys. 3) wykazano, że 79,6% zagrożeń związanych z aspektami w przedsiębiorstwie dotyczy procesu doskonalenia oraz produkcji. Problemy te dotyczą:

- niezawodności parku maszynowego,
- zaangażowania kierownictwa w proces doskonalenia,
- odpowiedniej identyfikacji wyrobów,
- terminowości realizowanych prac prewencyjnych SUR (Służb Utrzymania Ruchu),
- zastosowania pól odkładczych,
- zaangażowania pracowników produkcyjnych w działania o charakterze usprawniającym,
- cyklicznych spotkań kierowników w celu omówienia dotychczasowych wyników produkcji,
- rotacji operatorów,
- porządku na stanowisku pracy,
- odpraw z pracownikami, na których są omawiane problemy z poprzedniej zmiany.

Wskazane niebezpieczeństwa wymagają wprowadzenia działań o charakterze korygującym oraz prewencyjnym wskazanych we wcześniejszej części pracy.

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

Powyższa praca miała na celu diagnozę problemów występujących w procesie produkcji wyrobów cukierniczych w postaci cukierków – karmelków, a także przedstawienie rozwiązań mających na celu zwiększenie efektywności funkcjonowania analizowanej organizacji.

Identyfikacja problemów została przeprowadzona na bazie uzyskanych wyników badań ankietowych oraz wywiadów z pracownikami a także dzięki własnej obserwacji działania zakładu. Udostępnione przez przedsiębiorstwo dokumenty oraz ich dokładna analiza pozwoliły na sprecyzowanie problemów oraz niezgodności występujących w firmie. Tak zdiagnozowana sytuacja pomogła w określeniu dogodnych rozwiązań, które mogą zostać wdrożone w celu poprawy efektywności przedsiębiorstwa produkcyjnego.

Na podstawie analizy FMEA ustalono, że ok. 80% problemów dotyczy procesu doskonalenia oraz produkcji. Wśród zdiagnozowanych wad na pierwszym miejscu znalazła się niezawodność parku maszynowego. Zjawisko to jest związane z występowaniem awarii maszyn oraz zachowaniem ciągłości produkcji. Przedsiębiorstwo, w celu eliminacji zawadności jako działanie usprawniające może skorzystać z informatycznych systemów kontroli eksploatacji wspierającego pracę działu Utrzymania Ruchu. Jako inne rozwiązanie zaproponowano zastosowanie działań prewencyjnych tj. kontrolę i konserwację maszyn.

Kolejnym z przeważających problemów w przedsiębiorstwie jest brak zaangażowania kierownictwa w proces doskonalenia. W celu eliminacji tego problemu zaproponowano wprowadzenie szkoleń z metodologii Kaizen dla kierownictwa, które mogą podnieść ich kwalifikacje oraz wspomóc proces doskonalenia przedsiębiorstwa.

Odpowiednia identyfikacja wyposażenia i elementów ruchomych stanowi kolejny aspekt, który może wpłynąć na efekty działania produkcji. W celu poprawy identyfikacji zalecono wdrożenie etykiet, aby ułatwić jednoznaczną identyfikację elementów. Ponadto, w ramach wdrażanego systemu 5S zaproponowano wyznaczenie i oznaczenie pól odkładczych. Zastosowanie tego typu rozwiązania pozytywnie wpłynie na porządek panujący na hali produkcyjnej. Oznaczenie miejsc położenia maszyn i urządzeń na podłodze może również wpłynąć na lepsze poruszanie się pracowników po hali oraz ich bezpieczeństwo.

Kolejnym obszarem z jakim zmagają się przedsiębiorstwo jest utrzymanie terminowości realizowanych prac prewencyjnych SUR. Aby poprawić działanie tego aspektu zaproponowano zastosowanie informatycznych systemów kontroli eksploatacji oraz dalsze utrzymanie stosowania miernika OEE.

Utrzymanie porządku na stanowisku pracy jest jednym z założeń wdrażanego systemu 5S. Obszar ten nie dotyczy tylko i wyłącznie pracowników pracujących na hali produkcyjnej. Z problemem tym borykają się również pracownicy biurowi. W celu zwiększenia komfortu środowiska pracy zaproponowano zastosowanie nakładek styropianowych w szufladach. Rozwiązanie to pozwoli na uporządkowanie akcesoriów biurowych, a także pomoże w utrzymaniu porządku oraz łatwości odnajdywania potrzebnych rzeczy.

LITERATURA

- [1] DUDZIAK A., ZAJĄC G.: *Nowoczesne zarządzanie rozwojem produktu w kontekście integracji systemów informatycznych*. Logistyka, 5/2016, s. 115–120.
- [2] RELICH M., ŚWIĆ A., GOLA A.: *A Knowledge-Based Approach to Product Concept Screening*. Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 373, 2015, pp. 341–348.
- [3] GOLA A., SOBASZEK L., ŚWIĆ A.: *Selected Problems of Modern Manufacturing Systems Design and Operation*. [in:] Koukolova L., Świć A. (ed.): Robotics and Manufacturing Systems, Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 2014, pp. 56–68.
- [4] DUDEK M.: *Szczupłe systemy wytwarzania*. Wyd. Difin, Warszawa 2016.
- [5] STADNICKA D.: *Wybrane metody i narzędzia doskonalenia procesów w praktyce*. Oficyna Wyd. Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2016.
- [6] ANTOSZ K., PACANA A., STADNICKA D., ZIELECKI W.: *Lean Manufacturing doskonalenie produkcji*. Oficyna Wyd. Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2015.
- [7] ZHOU J., ZHANG Q., WANG X., XIAO H.: *Lean system design for engineer-to-order manufacturing*. Journal of Shanghai Jiatong University, Vol. 21, No. 6, pp. 702–712.
- [8] SAYER N.J., WILLIAMS B.: *Lean dla bystrzaków*. Wyd. Helion, Gliwice 2015.
- [9] URBANIAK M.: *Kierunki doskonalenia systemów zarządzania jakością*. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, 2010.
- [10] KORNICKI L., KUBIK S.: *Identyfikacja marnotrawstwa na hali produkcyjnej*. ProdPress.com, Wrocław 2008.
- [11] ANTOSZ K.: *Narzędzia Lean Manufacturing*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2013.
- [12] CZERSKA J.: *Podstawowe narzędzia Lean Manufacturing*, Wyd. LeanQ Team, Gdańsk 2014.
- [13] PAWŁOWSKI E., PAWŁOWSKI K., TRZCIELIŃSKI S.: *Metody i narzędzia Lean Manufacturing*. Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2010.
- [14] KOCH T.: *Jak stosować metody Lean Manufacturing (Oszczędnego Wytwarzania) do wprowadzania innowacji*. Agencja Rozwoju Przemysłu, Warszawa 2011.
- [15] KORNICKI L., KUBIK S.: *OEE dla operatorów*. ProdPress, The Productivity Press Development Team, 2009.
- [16] GOLA A., KOSICKA E., DANIEWSKI K., MAZURKIEWICZ D.: *Analiza błędów przy ocenie wskaźnika OEE na przykładzie linii rozlewu butelkowego*. [w:] Knosala R. (red): Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji. Tom II, Wyd. Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole 2016, s. 558–569.
- [17] ŁADOŃSKI W., SZOŁTYSEK K. (red.): *Zarządzanie jakością. Cz. 3, Metody kształtowania jakości w organizacji*. Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego, Wrocław, 2008.

Antoni ŚWIC*

KSZTAŁTOWANIE DRÓG TECHNOLOGICZNYCH OBRÓBKİ CZĘŚCI W SYSTEMIE WYTWÓRCZYM

Streszczenie

Przedstawiono sposób określania wariantowych dróg technologicznych obróbki przedmiotów w elastycznym systemie wytwarzania określonego asortymentu części klasy korpusy. Uwzględnia się wariantowość dróg technologicznych jednakowych części w zależności od stanu systemu produkcyjnego. Umożliwia to bardziej racjonalne wykorzystanie systemu produkcyjnego.

1. PROJEKTOWANIE SYTUACYJNE A TECHNOLOGIA MODUŁOWA

Jak wiadomo, efektywność eksploatacji elastycznego systemu produkcyjnego można w istotny sposób zwiększyć optymalizując procesy technologiczne obrabianych w nim przedmiotów.

Istnieją dwa podstawowe podejścia do projektowania procesów technologicznych obróbki przedmiotów w elastycznym systemie wytwórczym ESW: projektowanie sytuacyjne [1], technologia modułowa [2].

Projektowanie sytuacyjne procesów technologicznych jest jedną z ważniejszych zasad elastycznej technologii, która powinna operatywnie reagować na zmiany sytuacji produkcyjnej. Projektowanie sytuacyjne technologii umożliwia wprowadzanie operatywnych zmian nie tylko do dróg wykonania określonej wcześniej operacji, lecz także do składu samej operacji, co znacznie skraca ogólny czas przebywania przedmiotu w systemie produkcyjnym pod warunkiem, że czas podjęcia decyzji będzie niewielki. Realizacja zasad projektowania technologii z uwzględnieniem sytuacji produkcyjnej możliwa jest przy utworzeniu odpowiedniego systemu zautomatyzowanego, pozwalającego generować rozwiązania, tak na etapie projektowania jak i eksploatacji systemu.

* Politechnika Lubelska, Instytut Technologicznych Systemów Informacyjnych,
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, a.swic@pollub.pl

Technologia modułowa opiera się na tym, że dowolny przedmiot może być przedstawiony jako zestaw tak zwanych modułów powierzchni, wybranych z ograniczonego asortymentu takich modułów. W przypadku każdego modułu powierzchni może być opracowanych kilka typów procesów technologicznych, uwzględniających ich różnorodność pod względem materiału, wymiarów, warunków odnośnie dokładności geometrycznej, jakości powierzchni itd. Połączenie technologii modułowej i grupowej jest podstawą do opracowania systemów obrabiarkowych na bazie agregowania węzłów wykonawczych urządzeń technologicznych, co prowadzi do ich typizacji, a zatem do tworzenia nowych systemów, zdolnych do kompleksowej produkcji typowych części we wszystkich dziedzinach przemysłu maszynowego. Technologia modułowa jest perspektywnym kierunkiem, lecz jej zastosowanie wymaga opracowania jakościowo nowych urządzeń technologicznych.

Proponowana metoda projektowania dróg technologicznych obróbki w dużym stopniu wykorzystuje zasady projektowania sytuacyjnego, a mianowicie możliwość operatywnej zmiany (z uwzględnieniem sytuacji produkcyjnej) dróg wykonania wcześniej określonej operacji i składu samej operacji.

Analiza pokazała, że technologia obróbki przedmiotów (rozpatrywano części klasy korpus) zależy funkcjonalnie od właściwości samych przedmiotów, a także urządzeń technologicznych, na których te procesy są wykonywane (w tym przypadku od ESW) [3, 4].

$$TCH = f(W_p, W_{ESP}), \quad (1)$$

gdzie: W_p – własności przedmiotów,

W_{ESP} – własności ESP.

Najbardziej widoczne efekty przynosi optymalizacja technologii w przypadku kompleksowego uwzględniania charakterystyk przedmiotów, a także możliwości urządzeń technologicznych systemu, głównie obrabiarek.

Należy, więc wyodrębnić:

- optymalizację technologii obróbki przedmiotów w już istniejącym systemie,
- optymalizację obróbki przedmiotów, w przypadku których system dopiero będzie zaprojektowany i zbudowany.

W pierwszym przypadku nie można wpłynąć na charakterystyki technologiczne urządzeń systemu, w drugim można oddziaływać na dobór odpowiednich urządzeń, takich jak: obrabiarki, urządzenia transportowe, urządzenia kontrolno-pomiarowe, urządzenia do obróbki cieplnej, magazyny.

Pierwszy wariant, można rozpatrywać jako szczególny przypadek drugiego, dlatego rozpatrywany jest drugi.

Odpowiednie prace projektowe powinny być poprzedzone zebraniem niezbędnej informacji o przedmiotach zaplanowanych do obróbki.

Wyodrębnia się właściwości, według których jest opisywany przedmiot klasy korpusy(X).

$$X = \{X_i\}_{i=1, \overline{I}}, \quad (2)$$

gdzie: x_i – nazwa i -ej własności przedmiotu:

- nazwa przedmiotu,
- numer identyfikacyjny wyrobu,
- numer identyfikacyjny rodzaju przedmiotów,
- forma przedmiotu (typ formy, rodzaj formy, różnorodność formy),
- wymiary przedmiotu (długość, szerokość, wysokość),
- masa przedmiotu,
- symbol materiału,
- półfabrykat (rodzaj półfabrykatu, klasa dokładności półfabrykatu),
- twardość,
- dokładność wykonania (dokładność przedmiotu, chropowatość, odchyłki równoległości, odchyłki od prostopadłości),
- obróbka cieplna (rodzaj obróbki, miejsce obróbki w technologii, czas obróbki),
- opis stron obróbki: płaszczyzny (wymiar w osi X , wymiar w osi Y , kąt pochylenia, chropowatość płaszczyzny, tolerancja),
- otwory gwintowe (profil gwintu, średnica, skok, głębokość, liczba),
- otwory (średnica, tolerancja, głębokość, chropowatość, przelotowość, ilość).

Jak wiadomo, nawet w ramach jednego przedsiębiorstwa przemysłowego przedmioty określonej klasy charakteryzują się znaczną różnorodnością, a więc nie wszystkie nadają się do obróbki w elastycznym systemie wytwórczym, te które spełniają warunki obróbki w *ESP* rozdziela się na odpowiednie grupy, i w ich przypadku można projektować odpowiednie systemy.

Podział przedmiotów na grupy umożliwia wstępną eliminację (bez dokładnej analizy) grup przedmiotów, nie odpowiadających warunkom obróbki w systemie wytwórczym, na przykład: nieodpowiednie wymiary gabarytowe, zbyt mała pracochłonność obróbki.

Elastyczny system wytwórczy powinien być w pierwszej kolejności projektowany w przypadku grup przedmiotów (o odpowiednich wymiarach gabarytowych), charakteryzujących się największą pracochłonnością obróbki.

Jako kryteria wyboru przedmiotów do obróbki w *ESP* przyjęto: koszt (K) i czas (T) obróbki. Najlepszy będzie proces, w wyniku którego osiągnięty będzie maksymalny efekt (K_{min} , T_{min}). Jakość efektu jest określana wartościami wejściowych zmiennych (W_i, W_{ESP}). Praktyka pokazuje, że wyjściowe zmienne (K , T) tylko w rzadkich przypadkach mogą jednocześnie osiągać znaczenia odpowiadające maksymalnemu efektowi. Zwykle bywa tak, że wartości

zmiennych wejściowych, przy których uzyskuje się najbardziej sprzyjające warunki w przypadku jednej zmiennej wyjściowej nie dają takich (najbardziej sprzyjających) innej zmiennej wyjściowej. W tych przypadkach efekt maksymalny otrzymywany jest przy kompromisowych wartościach zmiennych wejściowych.

Ocena wartości wejściowych zmiennych, określających najkorzystniejszy proces sprowadza się do analizy funkcji:

$$\begin{aligned} K &= f(W_p, W_{ESP}) \\ T &= f(W_p, W_{ESP}) \end{aligned} \quad (3)$$

Koszt obróbki w warunkach *ESW* nie powinien być większy niż w przypadku wariantu bazowego (procesy realizowane dotychczas). Porównanie kosztu i czasu obróbki należy prowadzić tylko w przypadku podzbioru przedmiotów, wymiary gabarytowe, których znajdują się w określonych przedziałach tak, aby była teoretyczna możliwość obróbki wszystkich przedmiotów na analizowanej grupie obrabiarek.

Określenie celowości obróbki przedmiotów w *ESW* jest możliwe po doborze podsystemu obrabiarek i określeniu ich struktury, parametrów obróbki oraz dróg technologicznych. Charakterystyki czasowe niezbędne do obliczeń K i T , są określane w wyniku symulacji procesu obróbki zbioru przedmiotów.

Proces obróbki przedmiotów w systemie wytwórczym charakteryzuje się pewną specyfiką, a mianowicie są one obrabiane według zasad technologii elastycznej, nawet przedmioty tej samej partii mogą być obrabiane według różnych dróg technologicznych, które rozumiane są jako uporządkowany zbiór obrabiarek, przez które one przechodzą [5].

W wyniku klasyfikacji otrzymuje się grupy obrabiarek, parametry konstrukcyjne, których znajdują się w określonych przedziałach. Formowanie grup przedmiotów prowadzi się przy założeniu, że zakwalifikowane do danej grupy przedmioty powinny charakteryzować się taką samą (ogólną) drogą obróbki, a więc powinny być obrobione na takich samych (wzajemnie zamiennych) obrabiarkach. Zakłada się, że dwie obrabiarki są jednakowe (wzajemnie zamienne), jeżeli są tego samego typu i są jednakowo uzbrojone (biorąc pod uwagę narzędzia), to znacząco mają jednakowe możliwości technologiczne.

Drogę obróbki syntezuje się z technologii wykonania poszczególnych elementów przedmiotu, dlatego jej syntezę powinno poprzedzać opracowanie technologii ich obróbki. Konieczna informacja znajduje się opracowanych bazach danych (o przedmiotach i narzędziach). Baza danych o przedmiotach zawiera nie tylko opis odpowiednich elementów przedmiotu, lecz także i relacje pomiędzy nimi, a więc i ograniczenia na projektowanie i syntezę drogi obróbki przedmiotu. Opracowanie technologii jest prowadzone bez powiązania z konkretnym modelem obrabiarki – są one dobierane na następnych etapach.

Niezbędne do obróbki narzędzia dobierane są z bazy danych o narzędziach. Technologia obróbki elementarnych powierzchni przedmiotów jest syntezywana ze schematów obróbki elementarnych powierzchni przedmiotu. Wyodrębniono warunki technologiczne obróbki powierzchni.

Schemat formowania technologii powierzchni przedmiotów i obliczania czasu ich realizacji przedstawiony został na rys.1.

Przy kształtowaniu drogi obróbki przedmiotów wychodzi się z założenia maksymalnie możliwej koncentracji przejść na obrabiarkę (na danym etapie nie analizuje się możliwości ich realizacji, określonej pojemnością magazynu narzędziowego) [6]. Zgodnie z tą zasadą przyjmuje się, że przedmiot będzie przekazywany na inną obrabiarkę w przypadku konieczności zmiany bazowania, uwarunkowanej technologią jego wykonania. Liczba ustawień przedmiotu określa liczbę niezbędnych do jego obróbki typów obrabiarek, a więc i ogólną drogę technologiczną jego wykonania.

Przeprowadzona w zakładach przemysłowych analiza pokazała, że do obróbki przedmiotu klasy korpusy wystarczają jedna- dwie obrabiarki typu centrum obróbkowe.

Każdemu ustawieniu przedmiotu (*ZP*) przyporządkowuje się obrabiarkę (*O*). Z każdej grupy przedmiotów (*GP*) wybiera się ustawienia przedmiotów, które mogą być realizowane na takiej samej obrabiarkę, tj. otrzymuje się grupę ustawień-przedmiotów (*GPZP*) i jej przypisuje się obrabiarkę (nie analizuje się uzbrojenia obrabiarki, a tylko jej typ) – rys. 2.

Otrzymane grupy ustawień-przedmiotów porządkuje się w taki sposób jak i przedmioty w grupie (uporządkowanie każdej grupy ustawień przedmiotów, przyporządkowanych do obrabiarki powinno być dokonane według ich podobieństwa technologicznego). Można w ten sposób maksymalnie wykorzystać narzędzia nawet w przypadku przejścia na obróbkę części, należących do innych grup.

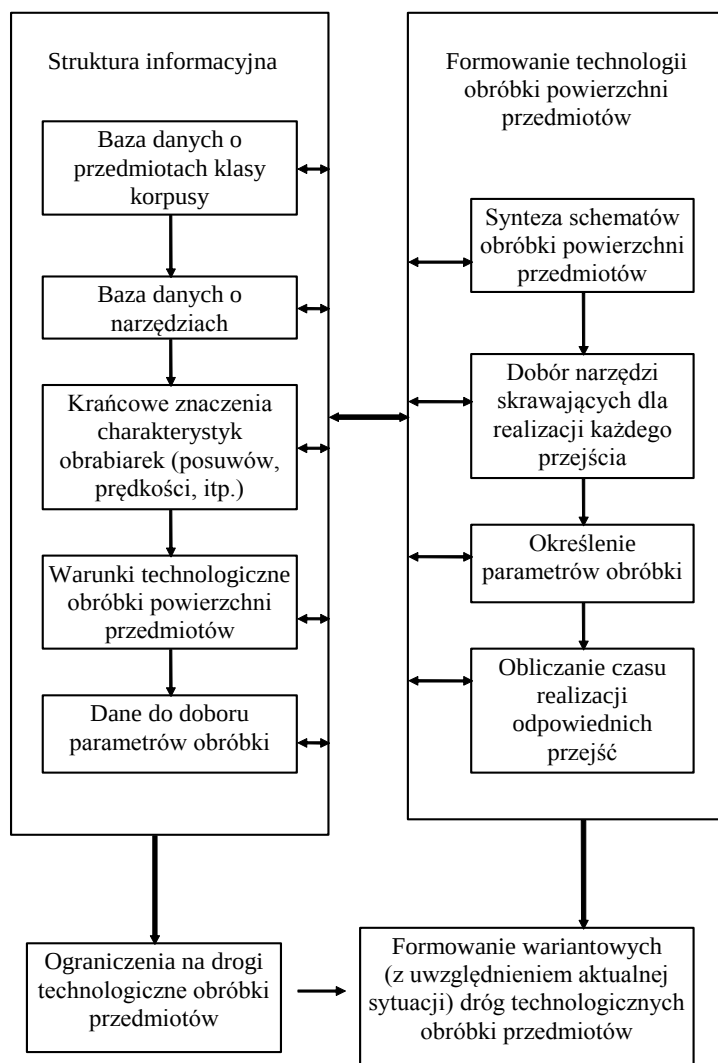
Grupy przedmiotów, można charakteryzować następującymi parametrami:

$$T^* = \langle m, T_{ci}, K_i \rangle, \quad (4)$$

gdzie: m – liczba partii ustawień – przedmiotów,

T_{ci} – cykl obróbki ustawienia przedmiotu,

K_i – wielkość partii ZP.



Rys. 1. Schemat formowania technologii obróbki powierzchni przedmiotów

Cykl obróbki partii ZP jest równy

$$T_{ci} = T_{obpi} + T_{pi}, \quad (5)$$

gdzie: T_{obpi} – czas obróbki (według programu) przedmiotu na obrabiarce,
 T_{pi} – czas ustawienia (zdjęcia) i zamocowania (odmocowania) przedmiotu.

Czas obróbki (według programu) zbioru części GPZP przypisanych do obrabiarki

$$T_c = \int_0^m T_{ci} K_i = \int_0^m (T_{obp_i} + T_{pi}) K_i, \quad (6)$$

gdzie: m – liczba ustawień przedmiotu (ZP) w grupie przedmiotów.

Każda z powstałych grup przedmiotów powinna być obrobiona w określonym czasie (analizowany jest roczny program produkcyjny). Jeżeli na jednej obrabiarce nie można osiągnąć takiej wydajności, należy określić liczbę wzajemnie zamiennych obrabiarek, na których będzie możliwa obróbka wszystkich grup w określonym czasie.

Każdej grupie przedmiotów GPZP przypisuje się grupę wzajemnie zamiennych obrabiarek, a to oznacza, że każdy przedmiot należący do grupy może być obrabiany na dowolnej ze wzajemnie zamiennych obrabiarek, przypisanych do analizowanej grupy przedmiotów. W przypadku każdego rodzaju przedmiotów powstaje zbiór wariantowych dróg technologicznych (rys. 3). Pod pojęciem drogi technologicznej rozumie się uporządkowaną kolejność obrabiarek, na których przedmiot jest obrabiany

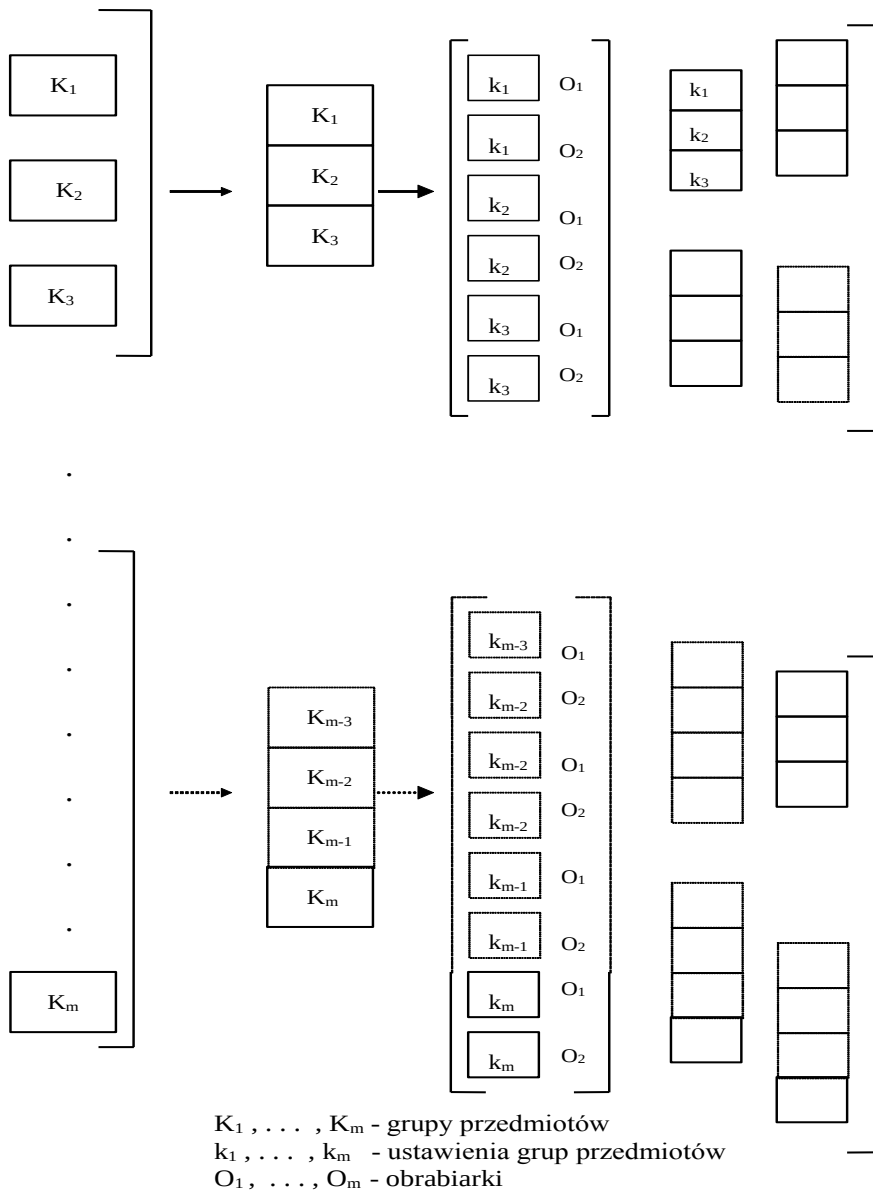
$$h_{ni} = \langle O_{n_i}^1, O_{n_i}^2, ..., O_{n_i}^j, ..., O_{n_i}^J \rangle \quad (7)$$

gdzie: h_{ni} – droga obróbki n_i -ej części,

$O_{n_i}^J$ – J – ta obrabiarka w drodze obróbki n_i -go przedmiotu.

Po zakończeniu obróbki na obrabiarce pierwszej grupy przedmiotów powinny one być, w miarę możliwości, niezwłocznie przetransportowane na obrabiarkę, należącą do następnej grupy.

Takie sterowanie przemieszczaniem przedmiotów pozwala maksymalnie skrócić cykl wykonania przedmiotu, a także zapasy produkcji w toku. Aby przedmiot można byłoby przekazać na obrabiarkę, należącą do innej grupy, powinna ona być dla tego przedmiotu dostępna, a to oznacza, że uzbrojenie obrabiarki powinno pozwalać na przeprowadzenie obróbki przedmiotu. Następnie należy przeanalizować uzbrojenie nie tylko obrabiarek danej grupy, lecz i zsynchronizować uzbrojenie wszystkich grup wzajemnie zamiennych obrabiarek.



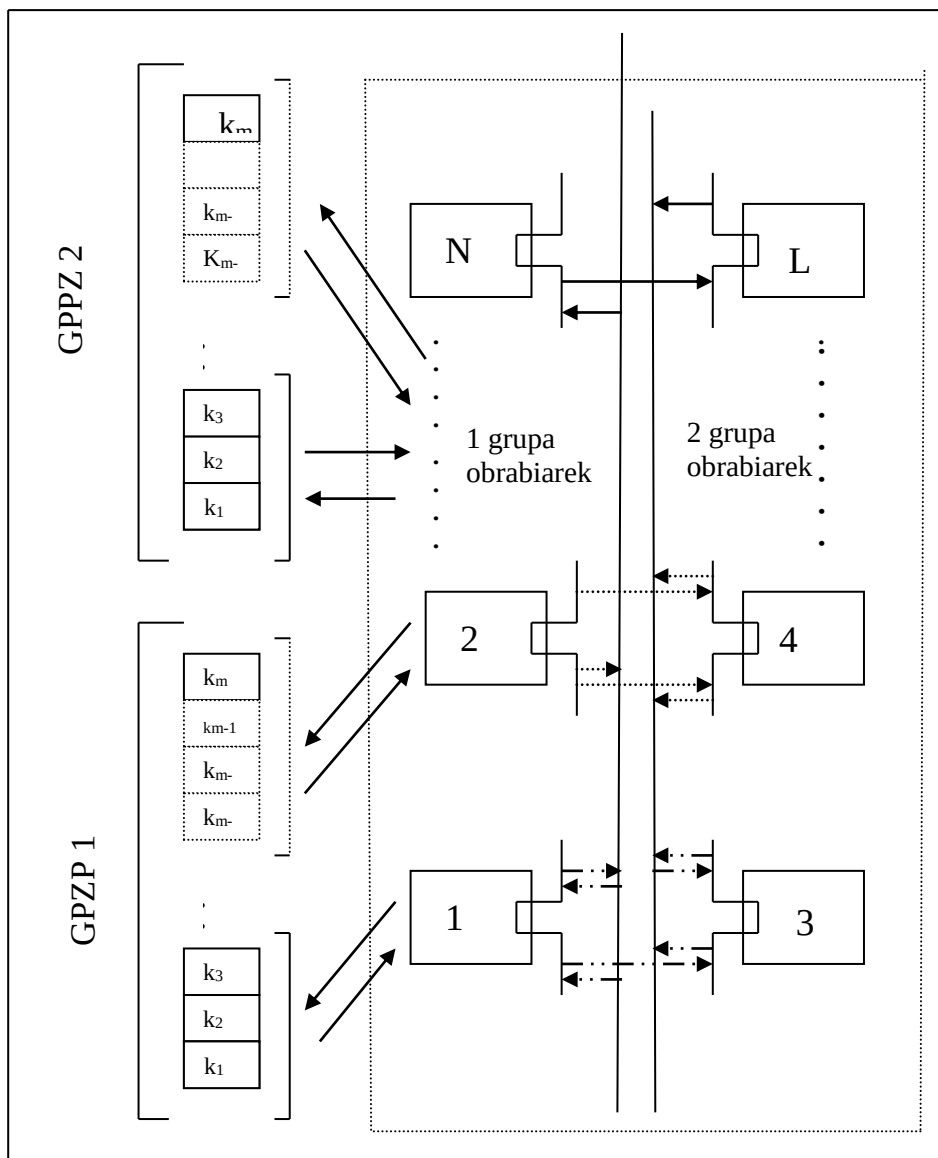
Rys. 2. Schemat grupowania przedmiotów

Droga technologiczna to podstawa dla opracowania szczegółowej technologii obróbki przedmiotu.

Na tym etapie jest znana informacja o tym, w jaki sposób części przechodzą przez obrabiarki (przez jakie obrabiarki przechodzi każdy przedmiot i w jakiej kolejności, jakie przejścia są niezbędne dla obróbki przedmiotu, jakie narzędzia przypisano do każdego zabiegu).

Określono kolejność wykonania przejść obróbki każdej powierzchni (według technologicznej celowości obróbki powierzchni: na przykład obróbka zgrubna powinna poprzedzać obróbkę dokładną), wykonywanej w danej operacji i czas realizacji każdego przejścia, lecz nie jest określona kolejności wykonania przejść, niezbędnych dla obróbki przedmiotu na obrabiarence i nie jest obliczany czas pomocniczy, niezbędny do wykonania każdego przejścia, a określany jest tylko stosunkiem procentowym do czasu głównego. Takie podejście jest w pełni dopuszczalne przy projektowaniu systemu, lecz niedostateczne, jeżeli rozpa-trywać eksploatację ESW.

Eksploatacja ESW wymaga opracowania szczegółowej technologii projektowania, w przypadku której należy do bazy o przedmiotach wprowadzić pewne uzupełnienia (lub załączyć dodatkową bazę), a mianowicie odległości (z odchyłkami) pomiędzy odpowiednimi elementami technologicznymi, a zatem należy opracować algorytm projektowania technologii obróbki przedmiotu na obrabiarence, wykorzystujący wyniki otrzymane w poprzednim etapie (projektowania systemu), takie jak: bazy danych, drogi obróbki przedmiotów, parametry obróbki – oczywiście tylko przedmiotów zakwalifikowanych do obróbki w ESP.



Rys. 3. Schemat możliwych dróg obróbki

W związku z niemożliwością uwzględnienia wszystkich możliwych sytuacji, występujących w procesie projektowania technologii celowe jest, aby program projektowania technologii miał konwersacyjny charakter.

Opracowana technologia obróbki przedmiotów na obrabiarkach powinna służyć jako podstawa do opracowania algorytmu sterowania obróbką przedmiotów na obrabiarce w czasie rzeczywistym. Przedmioty nie są obrabiane tylko na jednej obrabiarce systemu. Potrzebny jest więc system sterowania przebiegiem obróbki (przechodzenia) przedmiotów po obrabiarkach systemu.

Algorytm sterowania przebiegiem obróbki przedmiotu na obrabiarce, można wykorzystać w celu symulacji procesu obróbki przedmiotów w ESW na etapie projektowania systemu lub zamieniając czas bieżący na rzeczywisty przy sterowaniu obróbką w realnym elastycznym systemie produkcyjnym. Z powyższego wynika, że projektowanie i eksploatacja ESW są nierozdzielnie powiązane a więc należy te etapy rozpatrywać łącznie (kompleksowo), łącząc w jeden zintegrowany system projektowanie i eksploatację.

2. WNIOSKI

Przedłożony sposób kształtowania technologii obróbki części na obrabiarkach elastycznego systemu wytwórczego umożliwia znacznie lepsze wykorzystanie możliwości systemu wytwórczego. Zapewnia jednocześnie dużą elastyczności obróbki. Jest to szczególnie istotne w przypadku konieczności szybkiego uruchomienia wczesnej nieplanowanego zlecenia oraz awarii elementów systemu produkcyjnego, na przykład obrabiarki. W tym przypadku jest możliwość szybkiego przeplanowania dróg obróbki części z pominięciem maszyny uszkodzonej, tak aby w nowych warunkach było możliwe wytwarzanie z możliwie najwyższą wydajnością.

LITERATURA

- [1] ŚWIĆ A.: *Elastyczne systemy produkcyjne*. Technologiczno-organizacyjne aspekty projektowania i eksploatacji. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 1998.
- [2] ASL F.M., ULISOY A.G.: *Stochastic optimal capacity management in reconfigurable manufacturing systems*. Annals of the CIRP, Vol. 52, No. 1, pp. 371–374, 2–003.
- [3] TERKAJ W., TOLIO T., VALENTE A.: *A stochastic programming approach to support the machine tool builder in designing Focused Flexibility Manufacturing Systems (FFMSs)*. International Journal of Manufacturing Research, 5(2), pp. 199–229, 2010.
- [4] ŚWIĆ A., MAZUREK L.: *Modeling the reliability and efficiency of flexible synchronous production line*. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 2011, 4(52), s. 41–48.
- [5] ŚWIĆ A., TARANIENKO W.: *Projektowanie technologiczne elastycznych systemów produkcyjnych*. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin, 2003.
- [6] GOLA A., ŚWIĆ A.: *Computer Aided FMS Machine Tools Subsystem Selection – Conception of Methodology*. Applied Computer Science, Vol. 5, No. 1, pp. 27–39.

Piotr PENKAŁA*, Kinga JANOWSKA**

TECHNIKI ZESPOLENIA ODŁAMÓW W OSTEOSYTEZIE WEWNĘTRZNEJ

Streszczenie

Analizując dokładnie miejsce uszkodzenia, przebieg szczeliny złamania, ilość odłamów, charakter powstałych przemieszczeń oraz stan mięśni, można prawidłowo dobrać rodzaj leczenia złamania, czy zastosowany zostanie szew kostny, czy osteosynteza stabilna. Przed operacją planowaniu podlega również kolejność zespawania kolejnych odłamów. W technice zespawania w zależności od rodzaju złamania, jak również jaka kość uległa złamaniu, stosuje się różne materiały, które są przystosowane do zespawania danych złamań.

1. ZESPOLENIE ZA POMOCĄ ŚRUB KOSTNYCH

1.1. Śruby do istoty zbitej

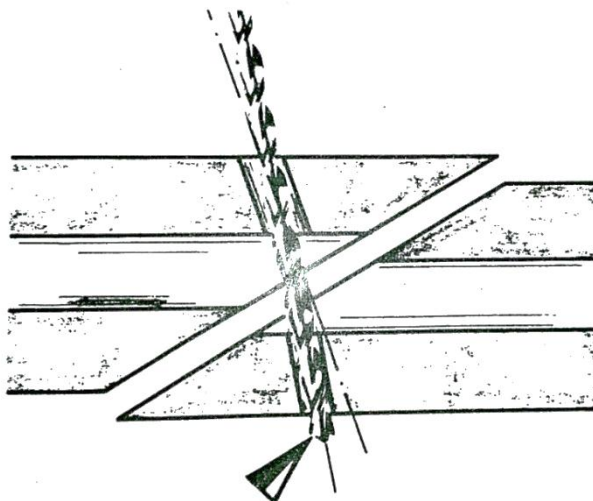
Złamaniem kwalifikującym się do zespolenia przy użyciu śrub, są złamania skośne oraz spiralne, charakteryzujące się długością szpary przełomu, większą od średnicy kości co najmniej 3 razy, ważnym jest jednak, aby kąt pomiędzy szczeliną powstałego złamania a kością nie przekraczał 30°.

Stabilne zespolenia odłamów przy użyciu śrub przeprowadza się według niżej wymienionych zasad:

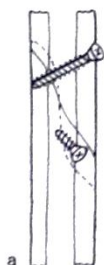
- śruba wprowadzana jest najczęściej wzdłuż siecznej kąta, który tworzy prosta prostopadła do osi kości i szpary złamania (rys. 1),
- zespolenia powinno być wykonane przy użyciu co najmniej 2 śrub (rys. 2),
- więcej niż 2 śruby używa się w przypadku złamań o długich i złożonych szparach przełomu kości, przynajmniej jedna ze śrub powinna być wprowadzona prostopadle,
- nie należy wkręcać kilku śrub w jednej płaszczyźnie, gdyż zespolenie wielopłaszczyznowe jest najmocniejsze,
- końce odłamów powinny być zespolane śrubami oddalonymi o co najmniej 1 cm od krawędzi odłamów [4].

* Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, 502728645, p.penkala@pollub.pl

** Politechnika Lubelska, absolwentka kierunku "Inżynieria biomedyczna"



Rys. 1. Wprowadzanie śruby po siecznej [5]



Rys. 2. Wielopłaszczyznowe wprowadzanie śrub dociskających, w przypadku złamania spiralnego (szkic a), b – rtg kości piszczelowej po zespoleniu [2]

1.2. Technika wkręcania śrub

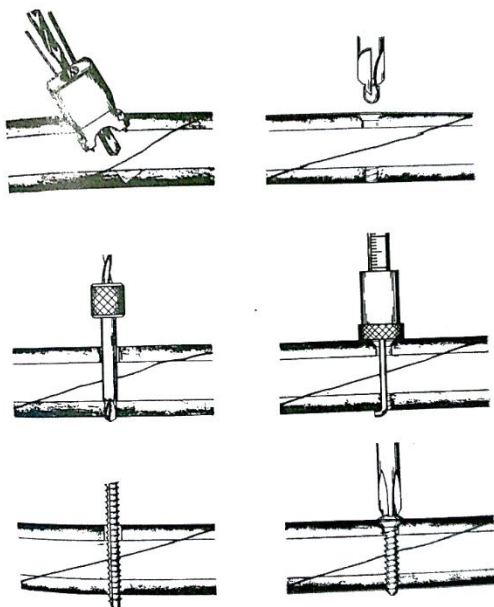
Początkowo musi zostać ustalony kierunek zespolenia, po czym na powierzchni kości umieszcza się prowadnicę, która dzięki zębom nie przemieszcza się po kości. Przy użyciu grubego wiertła (średnica 4,5 mm) wywiercony zostaje kanał przechodzący przez jedną warstwę korową kości. W kanał umieszcza się rurkę kierunkową, umożliwiającą ustawienie współosiowości otworów obu warstw korowych, przy jej użyciu wywierca się wiertłem o średnicy 3,2 mm kanał w przeciwległej warstwie korowej (rys. 3).

Po usunięciu rurki kierunkowej, w kanałach umieszcza się gwintownik. W szerszym kanale przesuwany on swobodnie, natomiast w węższym tworzy on dzięki ostrym krawędziom gwint. Ważnym jest, aby gwintownik izolować od tkanek miękkich, gdyż jego ostre krawędzie mogą je uszkodzić.

Na koniec przy użyciu freza kulistego tworzy się łożysko dla головки śruby. Po pomiarach głębokości następuje wkręcenie śruby w nagwintowany kanał odłamu. Kiedy głowka śruby oprze się o kość, dochodzi do zbliżenia odłamu do kości i jego docięnięcia.

Jeżeli zespoleniu ulegają kości małe, do nawiercania używa się wiertła odpowiednio 3,5 mm oraz 2 mm.

Odłam można docisnąć do kości umieszczając śrubę zarówno od strony odłamu, jak również od strony kości przy użyciu śruby dociskowej. Wszystko zależy od rodzaju urazu i możliwości w danym przypadku [6].



Rys. 3. Technika wprowadzania śruby korowej dociskającej odłamy [2]

1.3. Śruby do tkanki gąbczastej

Wyróżnia się trzy rodzaje śrub stosowanych do zespalania tkanki gąbczastej: śruby grube, śruby „kostkowe” oraz śruby cienkie.

1.3.1. Śruby grube

Najczęściej stosowane są do zespalania odłamów dużych nasad tj.: dalszej nasady kości udowej, bliższej nasady kości piszczelowej. Zasadą działania śrub grubych jest docisk całej części nagwintowanego odłamku, w zależności czy nasada jest dalsza czy bliższa, w zestawie znajdują się śruby krótsze i dłuższe.

Jeżeli odłamy mają skłonność przemieszczania się mimo zespolenia przy użyciu śrub, czasowo stosuje się dwa druty Kirschnera, które ustalają pozycję odłamów.



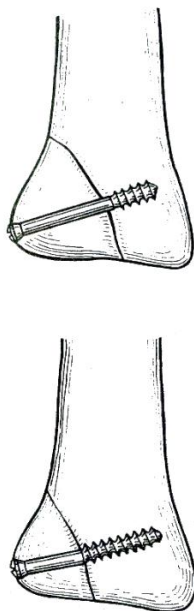
Rys. 4. Zespolenie odłamów przy użyciu śrub grubych [5]

W odłamie wywiercany jest kanał przy użyciu wiertła o grubości 3,5 mm, jeżeli warstwa korowa jest gruba stosuje się wiertło o średnicy 4,5 mm, jednak kanał ten winien przechodzić jedynie przez warstwę korową, ważnym jest aby kanał nie przekroczył szpary złamania. Ściany kanału gwintuje się przy użyciu gwintownika. Możliwym jest wkręcenie śruby, bez wcześniejszego gwintowania kanału, niestety wtedy śruba miażdży beleczki kostne, które ulegają martwicy, czego następstwem jest niespełnianie przez śrubę swoich zadań.

Kiedy zostaje dobrana odpowiednia śruba co do długości całkowitej i długości nagwintowanej, wkręca się ją do momentu oparcia jej główki o powierzchnię kości – dalsze dokręcanie powoduje docisk odłamów (rys. 4). Główka śruby nie może złamać warstwy korowej kości, dlatego jeżeli warstwa ta jest cienka dodatkowo stosuje się podkładkę o odpowiedniej szerokości. Zespolenia dokonuje się przy użyciu co najmniej dwóch śrub. Użycie pojedynczej śruby ma miejsce jedynie w przypadku przymocowywania małych odłamów, które nie przenoszą żadnych obciążeń.

1.3.2. Śruby „kostkowe”

Różnicą pomiędzy śrubami grubymi a kostkowymi zawiera się w grubości i sposobie nagwintowania. Śruby kostkowe mogą zostać wprowadzone bez wcześniejszego użycia gwintownika. Używa się ich do zespalania nasad, kostek goleni itp.



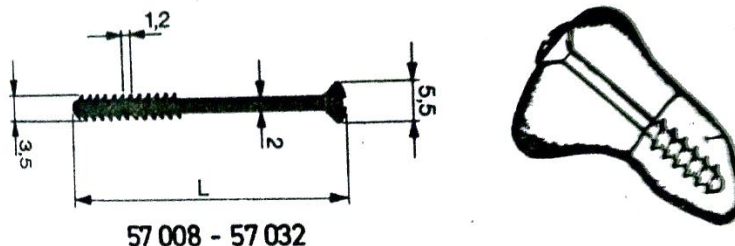
Rys. 5. Technika wprowadzania śrub „kostkowych” [6]

Przed wkręceniem śruby kostkowej nawierca się kanał wiertłem o grubości 3,2 mm. Zasadą działania śruby jest docisk po zagłębieniu części nagwintowanej w przeciwległym odłamie. Ważnym jest, aby zarówno główka jak i nagwintowana część śruby spełniały funkcję przyciągania wolnego odłamu. Poszerza to możliwości operacyjne. Podobnie jak w przypadku śrub grubych – śruby kostkowe stosuje się w liczbie co najmniej 2 sztuk, chyba że wielkość odłamu pozwala na zastosowanie 1 śruby, natomiast cienka warstwa korowa wymaga użycia odpowiedniej podkładki.

1.3.3. Śruby cienkie

Śruby tego typu stosuje się do zespalania kości łódeczkowatej, złamań dalszej nasady ramiennej oraz złamań nadkłykci.

Kanał wywierca się przy użyciu wiertła o grubości 2 mm, a głębokość kanału bada radiologicznie sondą główkową. Kanał zostaje nawiercony gwintownikiem przystosowanym do cienkich śrub, następnie wkręca się śrubę (rys. 6).



Rys. 6. Technika zespawania kości przy użyciu cienkich śrub [6]

Śrub do istoty gąbczastej nie używa się do zespawania tkanki zbitej, ponieważ nie możliwym jest ich usunięcie [3].

2. ZESPOLENIE PRZY UŻYCIU PŁYTEK

Już w latach 60-tych XX wieku zaproponowano osteosyntezę z użyciem płytek. Jednak ta przesztywniona metoda leczenia złamań kości budziła wiele zastrzeżeń, gdyż występowała osteoliza w strefach kontaktu biomateriał metaliczny – kość, oraz występująca atrofia kości w miejscu zespolenia, która przyczyniała się do powtórnych złamań po usunięciu płytki.

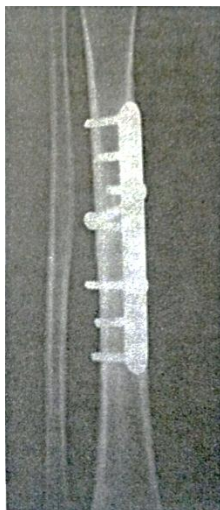
Przesztywniony sposób stabilizacji wpływa na wzrost naprężeń w elementach stabilizatorów płytkowych, mogą one powodować utratę nośności płytki stabilizatora w przekrojach krytycznych na skutek uplastycznienia materiału. Możliwym jest zainicjowanie pęknięcia płytki w miejscach o największym wyężeniu materiału, które to aktywizować może korozję. Jest to przyczyną wystąpienia metalozy oraz zaburzeń zrostu kostnego.

Wady jakimi cechują się zespolenia płytkowe stały się podstawą do poszukiwania rozwiązań ulepszających dany sposób osteosyntezy. Można do nich zaliczyć stosowanie podkładek silikonowych, w kształcie mostu, który przerzucony był nad szczeliną złamania, oraz płytki o ograniczonym kontakcie z kością.

Aktualnie stosuje się dwa rodzaje stabilizatorów płytkowych: Zespol oraz Polfix, których elementami są różne rodzaje płytek [1].

2.1. Płytki zabezpieczające

Kiedy szpara przełomu jest krótsza od podwójnego przekroju kości stabilne zespolenie przy użyciu samych śrub jest niewykonalne. W takich przypadkach stosuje się płytki zabezpieczające, których grubość wynosi 2 mm, a na powierzchni znajduje się szereg lub 2 otwory na śruby. Taką technikę zespolenie stosuje się w złamaniach skośnych, pojedynczych i wieloodłamowych (rys. 7).



Rys. 7. RTG kości goleni. Zespolenie kości piszczelowej śrubą ciągnącą i metalową płytką ze śrubami [2]

Na początku odłamy nastawia się oraz zespala poprzez śruby, tak jak zostało to opisane wcześniej (technika wkręcania śrub grubych, „kostkowych”, cienkich). Dopiero później dobierana zostaje płytka, której długość musi być na tyle odpowiednia aby przebiegała ponad wszystkie odłamy, a na odłamy końcowe zachodziły przynajmniej 3 otwory. Płytkę nie powinna być również krótsza niż pięciokrotna średnica kości, którą dana płytka zespala. Dodatkowym warunkiem jest fakt, że płytka powinna całą swoją powierzchnią przylegać do zespalanej kości, stąd dokonuje się doginania płytki, przy użyciu specjalnych przyrządów, tak aby nie została uszkodzona zewnętrzna, elektrolityczna warstwa płytki, dzięki której nie ulega ona korozji.

W miejscach, gdzie płytka przylega do kości odtłuszcza się okostną. Krok ten pomija się jedynie w przypadku wolnych odłamów, gdyż odtłuszczenie mogłoby spowodować ich martwicę. Ułożenie płytki musi w miarę możliwości być tak dopasowane, aby nie zostały przykryte główki wcześniej wkręconych śrub. Środek płytki w zależności od rodzaju złamania umieszcza się na wysokości przebiegu szpary złamania bądź na wysokości przebiegu głównej szpary złamania w przypadku złamań wieloodłamowych.

Kiedy płytką zostaje umieszczona na kości oraz unieruchomiona uchwytem, przystępuje się do wkręcania śrub. Proces ten rozpoczyna się od ustawienia prowadnicy płytki tak, aby kanał śruby znajdował się ściśle na osi otworu oraz był prostopadły do powierzchni płytki. Przy użyciu ostrych wiertel przewierca się obie warstwy korowe (jeżeli płytka ma długość większą niż dostateczną, śruby końcowe przechodzą tylko przez jedną z warstw korowych), zapewnia to większą elastyczność zespolenia oraz zapobiega naprężeniu, które zawsze występuje na końcu płytki.

Wywiercony kanał nacina się gwintownikiem, po czym mierzy jego głębokość i wkręca śrubę. Kiedy zostaną umieszczone obie śruby końcowe, można usunąć uchwyt i rozpocząć wkręcania pozostałych śrub w otwory. Wszystkie śruby, oprócz końcowych, powinny przechodzić przez obie warstwy korowe, natomiast ich końce wystawać 1–2 mm. Prawdłowo umieszczone śruby, opierają się całym obwodem główek o przylgnię otworów płytki.

Zespoleniem dostatecznie mocnym mianuje się zespolenie, gdzie do wszystkich otworów, z wyjątkiem tych znajdujących się bezpośrednio nad szparą złamania, wprowadzone zostały śruby. Po dokręceniu śrub oraz sprawdzeniu stabilności zespolenia, zszywa się tkanki miękkie, pozostawiając na 24–36 godzin cienki dren.

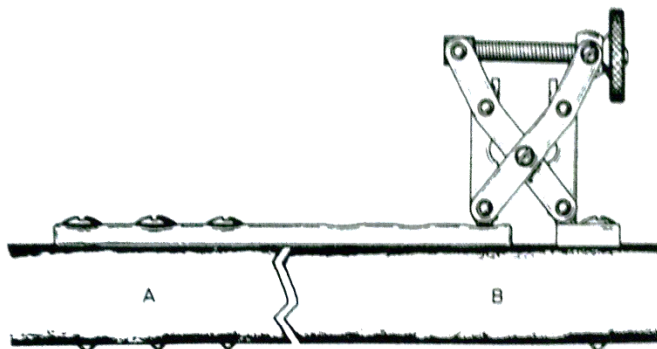
Płytką w tej metodzie zespolenia odgrywa rolę jedynie wzmacniającą zespolenie oraz neutralizującą siły. Podstawową jednostką zespalającą są śruby. Nie stosuje się tu aparatów dociskowych.

2.2. Płytki unieruchamiające

W przypadku leczenia złamań poprzecznych i lekko skośnych, gdzie niemożliwe jest zastosowanie dociskowego zespolenia śrubami stosowane są płytki unieruchamiające, które podobne są do płytek zabezpieczających, jednakże ich grubość wynosi 4 mm, czyli są dwukrotnie grubsze. Kolejną różnicą pomiędzy płytkami unieruchamiającymi a zabezpieczającymi jest stosowanie aparatów dociskowych. Końcowe otwory płytek unieruchamiających przystosowane są do współpracy z aparatami dociskającymi. Na krańcach płytki znajdują się jeden lub dwa otwory, dzięki którym możliwe jest wprowadzenie śrub do istoty gąbczastej. Podczas wyboru długości płytki unieruchamiającej, jej ułożenie na kości a także dopasowanie do kształtu kości odbywa się na takich samych zasadach jak w przypadku płytek zabezpieczających.

Zamocowanie płytki odbywa się poprzez wykonania na skórze cięcia, którego długość musi wynosić ok. 5 cm więcej aniżeli długość samej płytki. Do zespolenia złamania przystępuje się po wstępnym nastawieniu i unieruchomieniu. Aby uzyskać równomierny docisk osiowy płytka doginana jest do zarysów kości, tak aby odstawała na 2–4 mm od szpary złamania; jest to tzw. przegięcie płytki. Tak przygotowaną płytkę układa się na kości oraz przymocowuje przy użyciu śrub do tkanki korowej, wprowadzonych do otworów sąsiadujących ze szparą złamania (rys. 8).

Aparat dociskowy mocuje się po stronie nieprzymocowanej. Przy użyciu odległościomierza wierci się i gwintuje otwór, gdzie umieszcza się stopkę aparatu.



Rys. 8. Zespolenia złamania przy użyciu płytki unieruchamiającej i aparatu dociskowego [5]

Następnie zakłada się aparat kompresyjny. Jego zaczep umieszcza się w otworze końcowym płytki, a stopkę przymocowuje śrubą do wcześniej utworzonego kanału. Od śruby wymaga się, aby przechodziła przez obie warstwy korowe.

Do zamocowanego aparatu mocuje się śrubę kompresyjną, która poprzez jej dokręcanie umożliwia zbliżanie ramion aparatu kompresyjnego i centrowanie płytki w osi kości. W tym momencie możliwe staje się wprowadzenie śrub w pozostałe otwory płytki w odłam dociskany. Pokręcanie śrubą aparatu umożliwia dociśnięcie zaklinowania oraz całkowite unieruchomienie odłamów.

Ważnym jest kierunek docisku, który ma znaczenie dla prawidłowego zespolecia złamania. W złamaniu poprzecznym niewykazującym skłonności przemieszczania aparat umieszczany jest po stronie odłamu dłuższego. Natomiast w złamaniach lekko skośnych, które są niestabilne, kierunek docisku uzależniony jest od przebiegu szpary przełomu. W tym przypadku aparat umieszcza się tak aby odłam dociskający, do którego przymocowany jest aparat, wklinował się ostrym końcem pomiędzy płytkę a odłam dociskany.

Po zaklinowaniu odłamów zostają wprowadzone pozostałe śruby, aparat dociskowy zostaje usunięty, a w miejscu zamocowania jego stopy, wkręca się śrubę.

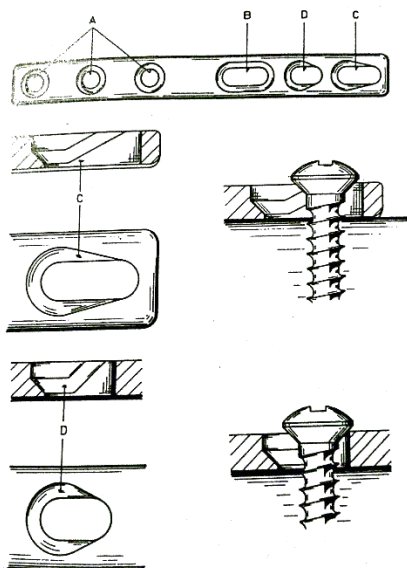
Aby wyprostować płytkę w miejscu tzw. przegięcia i docisnąć odłamy po przeciwległej stronie płytki, na koniec całego zabiegu dokręca się śruby sąsiadujące ze szparą złamania [3].

2.3. Płytki samodociskające

Wskazaniami do osteosyntezy przy użyciu płytek samodociskających są również złamania poprzeczne oraz lekko skośne, czyli podobnie jak dla płytek unieruchamiających.

Do płytek samodociskających zaliczane są płytki rynnowe i profilowane, które najczęściej stosuje się w zespłaniu kości przedramienia, natomiast do leczenia złamań o innym zlokalizowaniu stosuje się płytki proste, grube.

Zasada działania płytek samodociskających oparta jest na zasadzie współdziałania podstaw główek śrub zespłających z prawidłowo ukształtowanymi otworami w płytkach (rys. 9).



Rys. 9. Działanie płytki samodociskającej płaskiej [5]

Płytkę rynnową układa się podokostnowo. Charakterystyką tych płytek jest fakt, że nie dogina się ich do zarysu kości. Zastosowanie tych płytek ogranicza się do osteosyntezy kości trzonów długich, czyli przedramienia i kości strzałkowej. Długość płytki w konkretnych przypadkach leczenia powinna wynosić co najmniej pięciokrotność średnicy zespłanej kości.

3. PODSUMOWANIE

Na obecnym etapie rozwoju chirurgii, ortopedii oraz inżynierii biomedycznej istnieje bardzo wiele możliwości zespolenia kości po urazach. Jednym z podstawowych rozwiązań jest stosowanie śrub kostnych oraz płytek, które pozwalają

na zespolenie odłamów kostnych nawet przy bardzo skomplikowanych złamaniach. Zasadniczym celem stosowania stabilizatorów wewnętrznych, w oparciu o wyżej wymienione elementy jest przyspieszenie leczenia złamań, jak również umożliwienie szybszego powrotu do zdrowia, jaki nie jest możliwy w przypadku zastosowania opatrunku gipsowego. Pacjent dzięki zastosowaniu stabilizatorów wewnętrznych wcześniej może rozpocząć rehabilitację. W opracowaniu zamieszczono najważniejsze metody zespolenia, przy wykorzystaniu stabilizatorów wewnętrznych.

LITERATURA

- [1] BĘDZIŃSKI R., KĘDZIOR K., KIWERSKI J., MORECKI A., SKALSKI K., WALL A., WIT A.: *Biocybernetyka inżynierii Biomedycznej 2000*. Biomechanika i inżynieria rehabilitacyjna, t. V, Akademicka oficyna wydawnicza Exit, 2004.
- [2] BOREJKO M., DZIAK A.: *Badania radiologiczne w ortopedii*. PZWL, Warszawa 1988.
- [3] GUSTA A.: *Wskazania i przeciwwskazania do stosowania osteosyntezy w leczeniu złamań*. Chir. Narz. Ruchu Ortop. Pol. 1994, LIX, Supl. 1.
- [4] RAMOTOWSKI W.: *Stabilizatory płytkowe, Zespol i Polifix*. BHH MIK-ROMED, Dąbrowa Górnicza 1998.
- [5] TYLMAN D., DZIAK A.: *Traumatologia narządu ruchu*, tom 1. PZWL, Warszawa 1995.
- [6] TYLMAN D.: *Chirurgia urazowa narządów ruchu*. [w:] Chirurgia, PZWL, Warszawa 1977.

Piotr PENKAŁA*, Tomasz GORECKI**

MATERIAŁY UŻYWANE DO STABILIZACJI ZŁAMAŃ

Streszczenie

Dla materiałów stosowanych na implanty używane podczas stabilizacji wewnętrznej stawia się wymagania, które muszą być bezwzględnie spełnione. Do wymagań tych zaliczamy: niezawodność, niskie odsetki skutków ubocznych, łatwość użytkowania. Najczęściej wykorzystywanymi materiałami do stabilizacji wewnętrznej są stopy metali. Zapewniają one właściwą sztywność, dobrą plastyczność oraz z reguły są dobrze tolerowane biologicznie. Implanty metalowe zazwyczaj wykonywane są ze stali nierdzewnej ISO 5832–1, komercyjnie czystego tytanu cpTi, ISO 5832–2, stopów tytanu, niobu i glinu TAN, ISO 5832–11, stopu tytanu z molibdenem Ti-15Mo, ASTM F2066. Jednak w sytuacjach szczególnych wykorzystuje się inne materiały np. ceramiczne, polimerowe, jak również kompozyty węglowe czy materiały degradowalne.

1. WŁAŚCIWOŚCI MATERIAŁÓW

1.1. Sztywność implantu

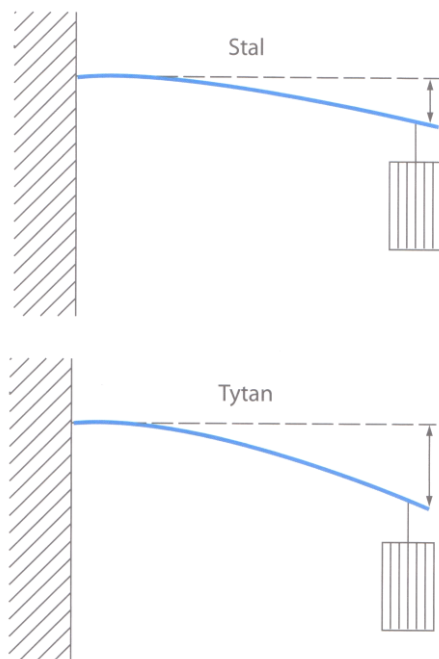
Sztywność implantu jest składową jego rozmiarów, kształtu oraz modułu sprężystości materiału z jakiego jest wykonany. Zwiększenie grubości standardowej płytki tytanowej o kilka dziesiątych części milimetra powiększy sztywność jej ugięcia. Złamanie kości jest równoznaczne ze stratą sztywności przez kość.

Osteosynteza pozwala na czasowe przywrócenie sztywności kości, dopiero jej zrost zapewnia kości sztywność trwałą.

Moduł sprężystości tytanu wynosi ok. 110 GPa, czyli ponad połowę modułu sprężystości stali nierdzewnej, gdzie moduł wynosi ok. 200 GPa, dlatego też obciążony takim samym ciężarem odkształci się dwukrotnie bardziej (rys. 1).

* Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, 502 728 645, p.penkala@pollub.pl

** Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, 517 895 173, t.gorecki@pollub.pl

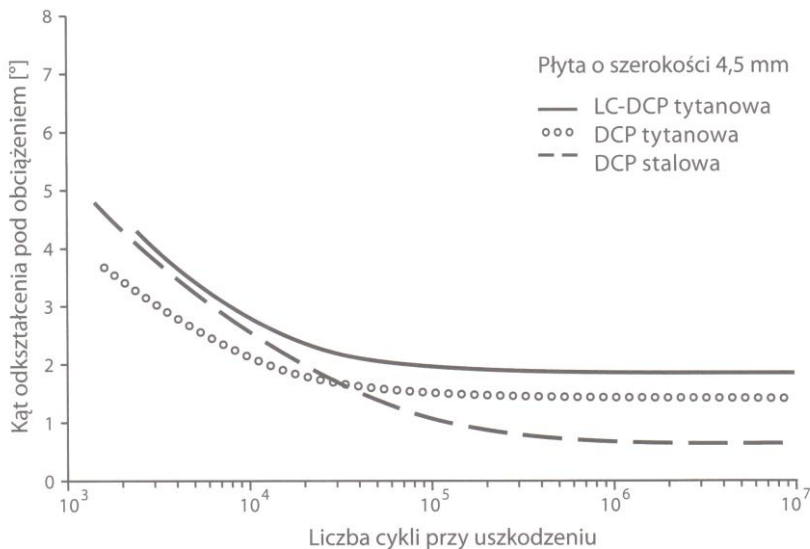


Rys. 1. Odształcenie stali (moduł sprężystości ok. 200 GPa) i tytanu (ok. 110 GPa) [8]

Rolą każdego implantu tj.: gwoździa, płytki czy stabilizatora zewnętrznego jest szynowanie szczeliny złamania, dlatego ich sztywność musi zapobiec odkształceniu w obrębie szczeliny. Dla prawidłowego zrostu ważnym jest zmniejszenie ruchomości złamania poniżej poziomu krytycznego, zapewnia to użyty aparat, dzięki spełnieniu tego wymogu, może rozpocząć się gojenie. W warunkach większych odkształceń dynamicznych niż podczas ostatecznej mineralizacji następują ziarnowanie i tworzenie chrząstki kostnej[8].

1.2. Wytrzymałość implantu

Wytrzymałość, czyli odporność materiału na oddziaływanie siły zewnętrznej, przy której nie występuje jego odkształcenie. Wytrzymałość określa wielkość obciążeń, jakie mogą zostać zadane danemu implantowi. Metal, zanim ulegnie pęknięciu nieodwracalnie się deformuje, w tym przypadku wymiary implantu są ważniejsze niż jego sztywność. Wytrzymałość tytanu jest ok 10% większa aniżeli stali, jednak poprzez zwiększenie grubości implantu, możliwym jest zniwelowanie tej różnicy. Wytrzymałość określa naprężenie graniczne, którego przekroczenie powoduje odkształcenie.

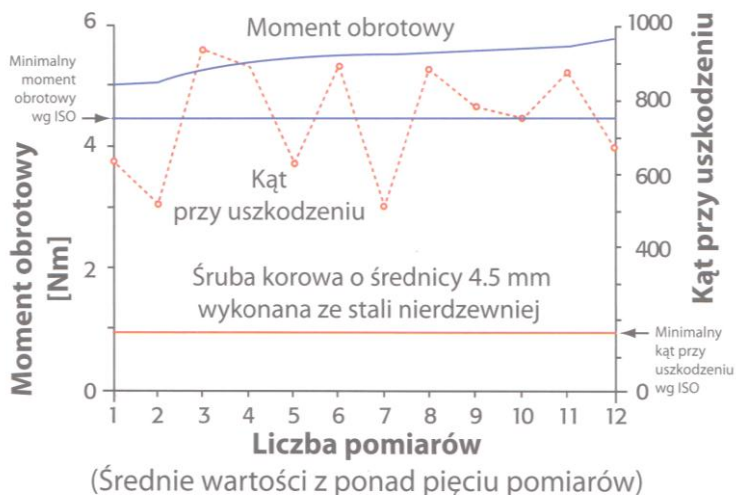


Rys. 2. Porównanie dynamicznych płyt kompresyjnych wykonanych z tytanu i stali nierdzewnej [7]

Dla stabilizacja wewnętrznej znacznie ma odporność implantu na obciążanie powtarzające się, których skutkiem jest uszkodzenie zmęczeniowe. Wykres (rys. 2) przedstawia odporność na zmęczenie w zależności od materiału i rodzaju implantu. Porównane zostały płyty kompresyjne, które wykonane zostały z komercyjnie czystego tytanu oraz ze stali nierdzewnej, badania natomiast zostały przeprowadzone w warunkach kontrolowanego kąta odkształcenia. Stal nierdzewna wykazuje lepsze wyniki w przypadku występowania obciążeń pojedynczych, jednak w warunkach stabilizacji wewnętrznej implant narażony jest na większą liczbę cykli obciążeń, a w tej sytuacji lepsze właściwości wykazują płytki wykonane z tytanu. Płytki LC-DCP charakteryzuje się równomierną sztywnością, dlatego też osiąga lepszą wytrzymałość zmęczeniową od płytki DCP [6].

1.3. Plastyczność implantu

Plastyczność jest określana jako stopień nieodwracalnego odkształcenia, które materiał toleruje przed pęknięciem. Materiały o dużej wytrzymałości: tytan i tytan kuty na zimno, posiadają plastyczność mniejszą niż stal.

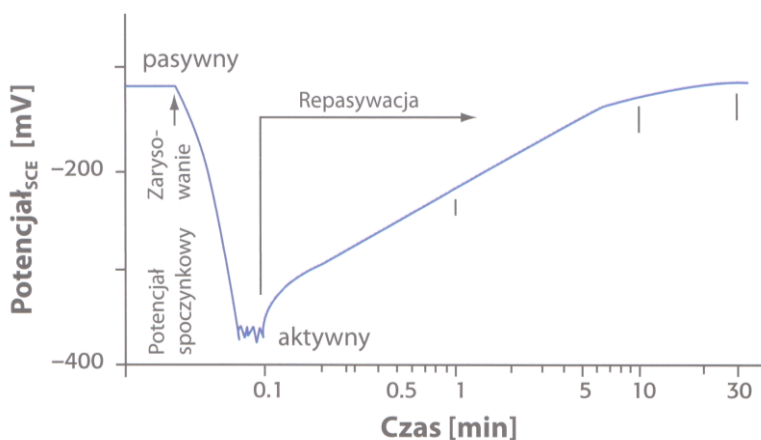


Rys. 3. Badania momentu obrotowego śrub korowych – średnica śrub 4,5 mm, materiał – tytan [7]

Międzynarodowe standardy mówią, iż 4,5 mm śruba korowa winna tolerować odkształcenia plastyczne i elastyczne powyżej 180° (rys. 3). Z racji, iż tytan jest mniej plastyczny, nie daje on zbyt wiele sygnałów ostrzegawczych nim dojdzie do jego pęknięcia, stąd też przed jego zastosowaniem chirurg powinien przećwiczyć używanie implantów wykonanych z tego materiału. Dzięki odpowiedniemu zaprojektowaniu implantu, można uniknąć problemów związanych z plastycznością tytanu. Wybór materiału musi korelować z odpowiednim projektem implantu.

1.4. Odporność na korozję

Korozja zachodzi w różnym tempie nawet w implantach wykonanych z tego samego materiału i systemach wykonanych z innych materiałów. Pojedyncze elementy wykonane ze stali nierdzewnej mają wysoką wytrzymałość na korozję w obecności płynów fizjologicznych. Powodem tego jest wytworzenie powierzchni ochronnej. Tytan i jego stopy charakteryzują się wysoką biernością chemiczną. Na powierzchni tych metali powstaje warstwa tlenkowa, która jest pasywna, cechuje się ona wysoką odpornością na korozję, dużo większą aniżeli tlenki chromu, które powstają na stali nierdzewnej. Powierzchnia ta powstaje bardzo szybko i staje się izolatorem elektrycznym, skutkuje prawie zerową korozją (rys. 4).



Rys. 4. Repasywacja czystego tytanu umieszczonego w roztworze chlorku sodu 0,9%, po zarysowaniu powierzchni igłą [7]

Jako że tytan i jego stopy wykazują podobne krzywe polaryzacji, stosowane są one w wieloczęściowych implantach. Z tego też powodu stopy kobaltu nie mogą zostać użyte do zastosowania w stabilizatorach wewnętrznych, gdyż są podatne na korozję galwaniczną w kontakcie ze stalą.

W ortopedii erozja występuje najczęściej w formie ścierania, zachodzącego np. podczas poruszania się śruby w stosunku do otworu w płycie. Ścieranie powstaje w wyniku mikroruchów przylegających do siebie powierzchni, powoduje to uwolnienie submikronowych cząstek do tkanek otaczających te powierzchnie. Wykazano, iż jeśli dwa implanty, które zostały wykonane z tytanu, wykonują względem siebie ruchy pod obciążeniem, to powstałe cząstki rozprzestrzeniają się do sąsiadujących tkanek, czego skutkiem są niegroźne przebarwienia. Nawet jeśli cząstki przemieszczają się z dala od miejsca implantacji, to dzięki biokompatybilności tytanu, cząstki te nie wywołują żadnej reakcji tkanek, do których docierają. Dlatego też tytan i jego stopy są materiałem najczęściej stosowanym w przypadku stabilizacji elastycznej, gdzie zawsze występuje zjawisko ścierania [7].

2. STRUKTURA IMPLANTU

W przypadku śrub najważniejszym jest otrzymanie stabilnego połączenia na granicy kość – implant. Ważnym jest struktura implantu, z którą styka się kość, gdyż to ona przenosi obciążenia pomiędzy tymi składowymi. Przenoszenie siły zależy od tarcia pomiędzy powierzchniami. Wrastanie kości jest nasilone w obrębie implantów z większą ilością nieciągłości powierzchni. Niestety są również tego wady, gdyż silna integracja pomiędzy kością a gwintem śruby,

którą należy usunąć, utrudnia usunięcie implantu. Jednak wrastanie tkanki kostnej w takim przypadku można ograniczyć, poprzez używanie implantów o jednolitej mikrostrukturze, zredukuje to siły potrzebne do późniejszego usunięcia implantu.

Niekiedy ruch na granicy implant – tkanka miękka przyczynia się do powstania włóknistej torebki, która wypełniona jest płynem. W płynie gromadzą się resztki komórkowe oraz cząstki powstałe podczas ścierania się stykających powierzchni implantów. Jako że torebka ta nie jest unaczyniona nie ma mowy o mechanizmach obronnych, stąd zwiększa się ryzyko zakażeń. Jednak zjawisko to częściej obserwuje się w przypadku stosowania implantów ze stali nierdzewnej aniżeli z tytanu.

Systemem ochronnym, który przeciwdziała powstaniu włóknistej torebki jest stosowanie implantów o mikrochropowatościach i mikronieciągłościach. W przypadku kiedy pożądane jest aby tkanki miękkie nie przylegały do implantu, swoje zastosowanie znalazł polerowany tytan oraz jego stopy, wtedy mikrostruktura implantu jest dużo bardziej ważniejsza niż skład chemiczny materiału z jakiego wykonany jest dany implant.

2.1. Kompatybilność implantów z rezonansem magnetycznym (MR)

Dzięki temu, że tytan i jego stopy nie wykazują własności magnetyków, możliwym jest bezproblemowe wykonanie badania metodą rezonansu magnetycznego pacjentom z implantami tytanowymi, podobnie zachowują się implanty stalowe. Implanty te powodują powstanie artefaktów, jednak są one niewielkie. W przypadku stali nierdzewnej i stopów o małej zawartości niklu problem jest większy, gdyż kwalifikuje się je jako paramagnetyki i nieferromagnetyki, stąd wykonanie MR jest praktycznie niemożliwe, w wyniku artefaktów jakie powodują dane materiały.

Kompatybilny z MR oznacza, iż nie wpływa na jakość powstałego obrazu. Stabilizatory zewnętrzne mogą posiadać części będące magnetykami, dlatego w ich przypadku nie powinno wykonywać się badań MR [7].

2.2. Biokompatybilność

Materiały, które zostały zakwalifikowane jako materiały dopuszczone do używania na implanty, muszą spełniać odpowiednie warunki biokompatybilne. Badanie wykazały, że tytan oraz jego stopy charakteryzują się większą biokompatybilnością aniżeli stal nierdzewna. Dodatkowo warto zaznaczyć, że czynniki takie jak:

- zastosowanie odpowiedniego materiału,
 - rodzaj implantu,
 - właściwości powierzchniowe danego implantu,
- dają możliwość zwiększania odporności na zakażenia bakteryjne.

Komercyjnie czysty tytan oznaczany jako cpTi wykazuje lepszą miejscową odporność w porównaniu do stali nierdzewnej. Badania potwierdziły, że ryzyko rozwoju infekcji pooperacyjnej w miejscu ingerencji było mniejsze jeżeli zastosowano płytki tytanowe [1].

W celu zbadania toksyczności produktów rozpuszczalnych korozji dokonuje się hodowli tkankowych oraz narządowych z zawartymi elementami kostnymi. Przeprowadzone w ten sposób eksperymentalne badania wykazują po raz kolejny przewagę tytanu nad stalą nierdzewną [3].

Najczęstszymi alergenami kontaktowymi są jony niklu, stąd słabe wyniki stali nierdzewnej w wielu kryteriach własnościowych na implanty; gdyż stal nierdzewna składa się z 13–16% niklu. Obecnie na świecie nawet 20 % ludzi cierpi na nadwrażliwość na nikiel. Kiedy nikiel uwolni się z implantu u pacjenta z nadwrażliwością na dany pierwiastek, wystąpi reakcja alergiczna. Podobne reakcje mogą również wystąpić w przypadku alergii na kobalt i chrom. Dla pacjentów, u których zdiagnozowano nadwrażliwość na którykolwiek pierwiastek, zaleca się stosowanie implantów z czystego tytanu lub jego stopów, gdyż do tej pory nie stwierdzono wystąpienia reakcji alergicznych po zastosowaniu implantów wykonanych z cpTi [7].

3. NOWOCZESNE MATERIAŁY STOSOWANE NA IMPLANTY

Medycyna dąży do wynalezienia materiałów, których użycie wyeliminowałoby problemy związane z uszkodzeniami implantów podczas ich nadmiernego obciążenia mechanicznego. Doszukuje się również zwiększenia wytrzymałości implantów, który uzyskuje się np.: poprzez dodanie wanadu do stopu tytanu.

Jednym z rozwiązań jest stosowanie stopów z pamięcią kształtów. Niestety podstawową wadą tych materiałów jest ich zasada działania. Dodatkowo jest to materiał dość twardy, trudny w obróbce a koszt jego wytworzenia przewyższa przeciętne koszty wytworzenia dotychczasowych materiałów stosowanych na implanty.

Jako powody, dla których stopy z pamięcią kształtu nie znalazły do dziś szerokiego zastosowania, wymienia się następujące:

- efekt pamięci wymaga niezawodnej indukowalności,
- siła, która wywołuje efekt pamięci musi być kontrolowana,
- materiał musi umożliwiać konieczną obróbkę,
- koszt produkcji musi być zgodny z zaletami, jakie oferuje materiał,
- stopy te nie zawsze charakteryzują się dobrą kompatybilnością,
- w razie usuwania implantu możliwym powinno być odwrócenie efektu pamięci.

Jednym z najbardziej cenionych stopów z pamięcią kształtu jest obecnie nitinol – materiał, który posiada niski moduł elastyczności, charakteryzuje się gwarancją odpowiedniego kształtu oraz tworzy porowatą piankę, dzięki której możliwym jest wrastanie kości. Owa pianka powstaje z proszku niklowo-tytanowego, połączone pory pianki mogą osiągnąć porowatość rzędu nawet 40–80%, a moduł elastyczności jest dość zbliżony do podchrzęstnej kości. Nitinol zaliczany jest do grupy materiałów super elastycznych, stosuje się go przeważnie w mocowaniu śrub w okolicy osteoporotycznej kości. Jednak podstawową wadą tego materiału jest 50% udział niklu [2].

4. POWŁOKI

Najczęstszymi i nieuchronnymi powikłaniami powstałymi podczas stosowania stabilizatorów zewnętrznych jest obluzowanie implantu oraz powstanie zakażenia w miejscu wprowadzania grotów. Ogólnie stosowaną metodą, która ogranicza możliwość obluzowania implantu oraz powstanie zakażenia jest modyfikowanie połączenia implantu z kością. Wprowadzone modyfikacje pozwalają na uzyskanie lepszej integracji pomiędzy tkankami miękkimi a implantem w miejscu przejścia grotów przez skórę.

Integrację zwiększa się dzięki stosowaniu powłok z hydroksyapatytu lub wytworzonych z fosforanu trójwapniowego. Warunkiem jednak jest aby stabilizacja osiągnięta początkowo pozwoliła wrosnąć kości w obręb implantu. Wykonywane badania potwierdziły, iż pokrycie grotów hydroksyapatytem pozwala na ścisłe połączenie danych grotów z tkanką kostną, dodatkowo również w wyniku poprawy związania implantu z tkankami w miejscu przechodzenia grotu przez skórę, zmniejszone zostało ryzyko zakażenia. Hydroksyapatyt charakteryzuje się dobrą biokompatybilnością, ma zdolność wytworzenia chemicznego połączenia z kością, nie jest toksyczny oraz ma niskie tempo rozkładu. Jednakże jego sztywność, słaba adhezja do powierzchni implantu oraz słaba spójność pomiędzy warstwami ogranicza jego możliwości użytkowe, gdyż istnieje ryzyko oddzielenia powłoki od implantu.

Obecnie prowadzone są badania nad anodową plazmowo-chemiczną obróbką metali (APC), dzięki której przyłączone zostają do powierzchni tytanowych elektrolity. Elektrolity te przylegają z czterokrotnie większą siłą aniżeli hydroksyapatyt, a grubość warstwy wynosi 3–5 μm , gdzie warstwa hydroksyapatytu ma wielkość 10–60 nm. Produkty APC cechują się taką samą kompatybilnością jak hydroksyapatyt [5].

5. IMPLANTY POLIMEROWE

Niektóre ze stosowanych implantów zaleca się aby po wygojeniu złamana usunąć. W takich sytuacjach pożądanymi materiałami są biodegradowalne implanty polimerowe, które po pewnym okresie od implantacji zostają resorbowane in vivo po czym rozpadają się. W wyniku rozpadu powstają produkty uboczne: woda i dwutlenek węgla, jednak są one nieszkodliwe i zostają usunięte z organizmu drogą procesów metabolicznych.

Do materiałów biodegradowalnych należą polimleczany i poliuretany, które są dobrze tolerowane przez tkanki, jednakże ich ograniczone właściwości mechaniczne powodują, że stosowane są one jedynie w implantach nienarażonych na duże obciążania.

Jako przykład biodegradowalnych implantów są groty, którymi stabilizuje się małe chrzęstne lub chrzęstno-kostne ubytki powierzchni stawowych, kotwice chirurgiczne, wykorzystywane w leczeniu złamań czaszki i oczodołu – cienkie płytki i śruby [4].

Polieteroeteroketon (PEEK) i polieteroketonketon (PEKK) są przedstawicielami implantów polimerowych niebiodegradowalnych. Materiały te są kompatybilne w stosunku do kości oraz mogą być sterylizowane większością dostępnych metod. Cechują się pięcioprocentowym spadkiem wytrzymałości w wyniku wystawiania na działanie promieniowania gamma, przezroczystością dla promieni rentgenowskich oraz brakiem właściwości magnetycznych, dlatego też nie rozgrzewają się podczas badania MR, a co za tym idzie nie tworzą artefaktów zamazujących obraz tkanek miękkich. Ich podstawową zaletą jest to, że nie korodują jak metale, jednak istnieje obawa, że uwalniają komponenty tj.: zmiękczacze, katalizatory, rozpuszczalniki. PEEK charakteryzuje się wytrzymałością na rozciąganie rzędu 90–100 MPa, którą można dodatkowo zwiększyć dzięki składnikom węglowym, jednak wskutek pęknięcia, ścierania oraz zużycia materiału, mogą uwalniać się ich mikrowłókna. Dodatek siarczanu baru działa jako kontrast podczas bada RTG.

Wymienione materiały są odporne chemicznie stąd ich duża tolerancja na środowisko w jakim się znajdują, jednakże ich wysoka hydrofobowość dyskwalifikuje ich użycie bez pokrycia specjalnymi powłokami lub modyfikacji powierzchni, gdyż inaczej nie dojdzie do osteointegracji. Kolejną wadą tych materiałów jest wysoki koszt ich produkcji. Stosuje się je głównie w implantach do międzytrzonowych zespołów w obrębie kręgosłupa lędźwiowego [7].

6. PODSUMOWANIWE

Do wytworzenia nowoczesnych implantów stosownych w stabilizacji wewnętrznej wykorzystuje się konwencjonalne tworzywa na bazie metali i ich stopów oraz materiały niemetaliczne. Zasadniczymi cechami, które muszą

posiadać te materiały to odpowiednia wytrzymałość, sztywność oraz plastyczność, a przede wszystkim biokompatybilność. Endoproteza powinna spełniać wymagania wynikające z geometrii kości, środowiska w którym będzie funkcjonować oraz posiadać zoptymalizowany kształt w aspekcie sztywności układu implant – kość. W pracy omówiono właściwości mechaniczne materiałów stosowanych na implanty oraz alternatywy, jakie wykorzystuje się w ramach rozwiązywania problemów z odczynami alergicznymi.

LITERATURA

- [1] ARENS S., SCHLEGEL U., MELCHER G.A.: *Influence of implant materials for fixation implants on local infection. An experimental study of steel versus titanium DCP in rabbits*. J Bone Joint Surg Br, 1996.
- [2] BAUMGART F., BENSMANN G., HAASSTERS J.: *Memory Alloys - New Materials for Implantation in Orthopaedic Surgery*. Berlin Heidelberg New York: Springer – Verlag, Part 1, 1980.
- [3] CASE C.P., LANGKAMER V.G., JAMES C.: *Widespread dissemination of metal debris from implants*. J Bone and Joint Surg Br, 1994.
- [4] CLEAS L., BURRI C., KIEFER H.: *Resorbable implants for refixation of osteochondral fragments in joint surfaces*. Aktuelle Traumatol, 1986.
- [5] FRAUCHIGER V.M., SCHLOTTIG F., GASSER B.: *Anodic plasma chemical treatment of CP titanium surfaces for biomedical applications*. Biomaterials, 2004.
- [6] PERREN SM, POHLER O, SCHNEIDER E (2001) *Titanium as Implant Material for Osteosynthesis Applications*. Brunette. 1st ed. Berlin Heidelberg New York: Springer – Verlag.
- [7] RÜEDI T. P., BUCKLEY R. E., MORAN C. G.: *AO Podstawy leczenia złamań*, tom 1. Medipage, Warszawa 2014.
- [8] TONINO AJ, DAVIDSON CL, KLOPPER PJ, ET AL. (1976) *Protection from stress in bone and its effects. Experiments with stainless and plastic plates in dogs*. J Bone Joint Surg Br.

Arkadiusz GOLA*, Elżbieta MAŁYSZEK**, Łukasz SOBASZEK***

LOGISTYCZNE DYLEMATY ORGANIZACJI PRZEPŁYWU PRODUKCJI

Streszczenie

W artykule przedstawiono wybrane problemy decyzyjne w obszarze zarządzania produkcją, ze szczególnym uwzględnieniem zagadnień związanych z przepływem strumienia produkcji. W treści wskazano m.in. dylematy menedżerów produkcji w zakresie planowania produkcji, ustalania wielkości partii produkcyjnej, określania sposobu spływu produkcji, jak też projektowania harmonogramów produkcji. Ponadto, w odniesieniu do każdego z wymienionych problemów wskazano potencjalne konsekwencje o charakterze organizacyjnym, rynkowym i ekonomicznym.

1. WSTĘP

Współczesny rynek – określany często rynkiem klienta, a także konkurencja w skali globalnej, zmuszają przedsiębiorstwa do poszukiwania nowych form doskonalenia procesu organizacji produkcji mogących mieć wpływ na zwiększenie efektywności oraz elastyczności realizowanych procesów [12,14]. Nieustanne poszukiwanie możliwości doskonalenia procesu wytwarzania związane jest z dynamiką i złożonością samego procesu, a także nowymi wyzwaniami o charakterze rynkowym, takimi jak: skracające się cykle życia produktów, presja na zmniejszanie kosztów produkcji, zwiększanie jakości produktów oraz skracanie czasu realizacji zamówienia [7,19,21]. Przedsiębiorstwa by utrzymać swoją pozycję konkurencyjną nieustannie muszą

* Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Instytut Technologicznych Systemów Informacyjnych, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, tel.: 81 538 45 35, a.gola@pollub.pl

** Politechnika Lubelska, Wydział Zarządzania, Katedra Organizacji Przedsiębiorstwa, ul. Nadbystrzycka 38, 20-618 Lublin, tel.: 81 538 44 84, e.malyszek@pollub.pl

*** Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Instytut Technologicznych Systemów Informacyjnych, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, tel.: 81 538 45 85, l.sobaszek@pollub.pl

wprowadzać zmiany zarówno w strukturze posiadanych systemów produkcyjnych, jak również w sposobie organizacji i zarządzania procesami podstawowymi i pomocniczymi.

Jednym z podstawowych czynników decydujących o konkurencyjności danego przedsiębiorstwa produkcyjnego jest możliwość dostarczania produkowanych wyrobów do klienta w możliwie najkrótszym czasie. Pociąga to za sobą konieczność zmiany paradygmatów związanych z procesem organizacji produkcji i obejmuje swoim zakresem zarówno sferę przygotowania produkcji, planowania produkcji, organizacji i zarządzania produkcją, a także gospodarki magazynowej – dających możliwość skrócenia długości cyklu produkcyjnego, a tym samym możliwość realizacji otrzymanych zleceń produkcyjnych w możliwie najkrótszym czasie.

W niniejszym artykule przedstawiono wykaz ważniejszych problemów decyzyjnych w zakresie organizacji przepływu produkcji wraz z ich skutkami ekonomicznymi i rynkowymi.

2. PROBLEM 1 – PRODUKCJA NA ZAMÓWIENIE CZY WEDŁUG PLANU?

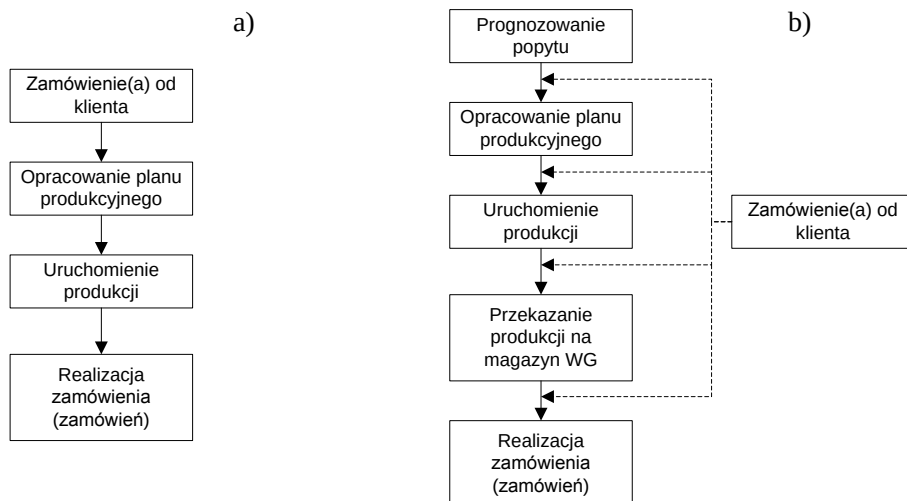
Charakter popytu, rodzaj klientów oraz częstotliwość realizacji dostaw w bezpośredni sposób mają przełożenie na charakter produkcji, a tym samym, rodzaj przepływu produkcji oraz związany z tym rodzaj sterowania. W klasycznym ujęciu rozróżnia się dwa modele:

- 1) produkcja realizowana na magazyn (ang. *Make to Stock* – MTS),
- 2) produkcja na zlecenie (ang. *Make to Order* – MTO).

Produkcja *Make to Stock* wiąże się przede wszystkim z produkcją powtarzalną, której wyroby są przeznaczone na magazyn. Odbiorcami takich wyrobów są zazwyczaj hurtownicy, duże sklepy, centra logistyczno-dystrybucyjne. Jednocześnie można zaobserwować duże wymagania w zakresie zmienności produktu oraz szybkiej reakcji na oczekiwania rynku. Prowadzą one do intensywnego rozwoju przedsiębiorstw produkcyjnych, w szczególności przedsiębiorstw średnich, małych i mikro, produkujących na zlecenie klienta. Produkcja na magazyn zazwyczaj jest wykonywana w systemach silnie zautomatyzowanych, nie wymagających szczególnej obsługi.

Produkcja *Make to Order* związana jest z obserwowaną tendencją do poszukiwania przez klientów produktów niepowtarzalnych: pociąga to za sobą konieczność zmian i przekształcenia produkcji masowej na magazyn, wykonywanej na liniach produkcyjnych zsynchronizowanych, w produkcję zmienną, wykonywaną na zlecenie innych firm oraz produkcję na bezpośrednie zamówienie klienta. Taka produkcja jest wykonywana w systemach charakteryzujących się dużą uniwersalnością wyposażenia [15].

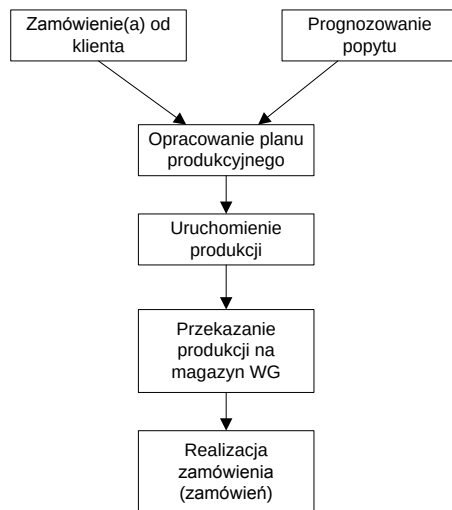
Proces planowania i realizacji zleceń produkcyjnych dla obydwu wyżej przedstawionych modeli został schematycznie pokazany na rys. 1.



Rys. 1. Przebieg procesu produkcyjnego według koncepcji:
a) Make to Order b) Make to Stock [10]

Należy zauważyć, iż w wielu przypadkach (np. produkcji wieloasortymentowej o sezonowym charakterze popytu), żaden z niniejszych modeli nie ma możliwości lub jest bardzo trudny do zastosowania. Przyjęcie modelu MTO powoduje sytuację w której w okresach wzmożonego popytu, przekraczającego wielkość zdolności produkcyjnych przedsiębiorstwo nie będzie mogło zrealizować napływających zamówień (w okresie ograniczonego popytu – sytuacja będzie odwrotna i pojawi się problem zagospodarowania wolnych mocy produkcyjnych). Sezonowość popytu i związane z tym problemy w naturalny sposób narzucają konieczność wzięcia pod uwagę możliwość wyrównywania wielkości produkcji w całym okresie rozliczeniowym, traktując magazyn wyrobów gotowych jako bufor pomiędzy zmiennym popytem a ustabilizowaną względnie wielkością produkcji. Niestety tego typu podejście (oparte na modelu MTS) nakłada konieczność prognozowania popytu dla każdej pozycji asortymentowej, co w przypadku szerokiej oferty jest zadaniem niezwykle trudnym.

W konsekwencji bardzo często menedżerowie decydują się na zastosowanie modelu mieszanego (rys. 2), w którym dla części wyrobów zastosowanie znajdzie model *Make to Stock*, dla pozostałych zaś modelu *Make to Order*.



Rys. 2. Przebieg procesu produkcyjnego według koncepcji mieszanej [10]

Zastosowanie modelu mieszanego definiuje problem polegający na określeniu, w przypadku których wyrobów należy zastosować model MTS – w których zaś produkcja powinna być realizowana według modelu MTO. Analiza sprzedaży poszczególnych pozycji asortymentowych w okresach historycznych pokazuje, iż mimo dużej liczby posiadanych w ofercie pozycji asortymentowych – tylko stosunkowo niewielka ich ilość generuje większość przychodu (zysku na działalności operacyjnej) przedsiębiorstwa.

Jednym z nasuwających się możliwych rozwiązań jest ograniczenie oferty przedsiębiorstwa poprzez wycofanie z niej wyrobów, które charakteryzują się niskim poziomem sprzedaży lub też niskim poziomem generowanego przychodu lub zysku. W wielu przypadkach, ze względu na prowadzoną politykę marketingową tego typu rozwiązanie nie jest możliwe do przyjęcia.

3. PROBLEM 2 – JAKI WYBRAĆ (JAK OPRACOWAĆ) PLAN PRODUKCJI?

Naturalną konsekwencją wskazanego powyżej problemu 1, pozostaje kwestia prawidłowego opracowania planu produkcyjnego. W praktyce istnieją dwie podstawowe metody planowania sprzedaży i operacji [2]:

- Planowanie zstępujące – metoda sporządzania planów sprzedaży i operacji, kiedy proces planowania jest oparty na jednej zagregowanej prognozie sprzedaży. Funkcjonuje tylko wtedy, gdy asortyment produktów lub usług nie ulega zmianom z okresu na okres lub gdy produkowane wyroby bądź wykonywane usługi charakteryzują się podobnymi potrzebami zasobowymi.

- Planowanie wstępujące – stosuje się, gdy asortyment produktów lub usług jest zmienny, a ich potrzeby zasobowe bardzo się różnią. W takich warunkach ogólna prognoza sprzedaży nie jest zbyt przydatna w określaniu zapotrzebowania na zasoby. Zamiast tego menedżerowie muszą oddzielnie oszacować zapotrzebowanie każdego zestawu produktów lub usług, a następnie zsumować uzyskane wartości w celu zdobycia ogólnego obrazu potrzeb zasobowych.

Łatwiejszą z ww. metod jest planowanie zstępujące. Najważniejszym założeniem w tym planie jest to, że menedżerowie mogą na podstawie sporządzonej prognozy opracować dokładne plany taktyczne, które następnie zostaną podzielone na zasoby pomiędzy produktami i usługami w fazie planowania szczegółowego i kontroli. Niezależnie od stosowanej metody menedżerowie opracowujący plan muszą dysponować wartościami planistycznymi. Wartości te oparte są na analizie lub danych historycznych przedsiębiorstwa, które decydenci stosują w celu przedłożenia prognozy sprzedaży na potrzeby zasobowe oraz zidentyfikowanie wykonalności i kosztów realizacji różnych planów zagregowanych [20].

Pierwszym etapem sporządzania zstępującego planu produkcji jest zebranie i ocena wartości planistycznych, jakimi dysponuje przedsiębiorstwo. Szczegółowe analizy, informacje przekazane przez doświadczonych kierowników oraz informacje z poprzednich okresów są podstawą analizy wielokryterialnej podczas budowy planu.

Po przełożeniu prognozy sprzedaży na zapotrzebowanie zasobowe kolejnym krokiem jest wykonanie różnych rodzajów planów produkcji. Najczęściej ukazywane rodzaje planów to plany: wyrównany, dostosowawczy i mieszany. Szczególną różnicą w niniejszych trzech planach jest sposób wahaniasię poziomu produkcji i zapasów:

- Wyrównany plan produkcji – w przypadku planu wyrównanego wielkość produkcji jest niezmienna, a zapasy pochłaniają różnicę pomiędzy produkcją a sprzedażą. To podejście najlepiej sprawdza się w branżach, w których zmiana wielkości produkcji jest niemożliwa lub bardzo kosztowna, a koszt utrzymania zapasów jest stosunkowo niski.
- Dostosowawczy plan produkcji jest przeciwieństwem planu wyrównanego. W tym przypadku wielkość produkcji jest zmieniana w każdym okresie w celu dopasowania jej do prognozy sprzedaży. W wyniku tego poziom produkcji dostosowuje się do popytu. To podejście najlepiej sprawdza się w branżach, w których utrzymanie zapasów jest bardzo drogie lub niemożliwe, a koszty zmiany poziomu mocy produkcyjnych są stosunkowo niskie.

- Mieszany plan produkcji stanowi formę pośrednią pomiędzy tymi dwiema skrajnościami. Zmianom podlega zarówno poziom produkcji, jak i stan zapasów, dzięki czemu plan ten jest najbardziej efektywny. Niestety ze względu na ogromną liczbę potencjalnych rozwiązań (NP.-trudny charakter zadania decyzyjnego) jego opracowanie stanowi trudność w przypadku zastosowania tradycyjnych metod.

Metodologia opracowywania planów wyrównanych i dostosowawczych, a także możliwości wykorzystania technologii obliczeniowych dla potrzeb optymalizacji planu produkcyjnego wg. kryterium kosztowego zostały zaprezentowane w pracach [2,8,9]. Należy jednak zauważyć, iż w praktyce przemysłowej bardzo rzadko zastosowanie znajdują „w czystej postaci” plany wyrównany i dostosowawczy. Jest to wynikiem występujących ograniczeń o charakterze techniczno-organizacyjnym charakterystycznych dla danego przedsiębiorstwa (np. pojemność magazynu, możliwość czasowego zatrudniania pracowników, itp.).

Każdorazowo zatem na etapie opracowania planu produkcyjnego szczególnymi kwestiami do rozstrzygnięcia pozostaje znalezienie odpowiedzi na następujące pytania:

- Jaki jest optymalny plan produkcyjny uwzględniający kilka zmiennych?
- Jakie rozwiązanie jest najlepsze przy określonych ograniczeniach?
- Co jest bardziej opłacalne dla przedsiębiorstwa – zatrudnienie nowych pracowników, czy produkcja w nadgodzinach?
- Jaki stan zapasów powinien być utrzymywany w przedsiębiorstwie? Co generuje wyższe koszty – zwolnienia pracowników czy utrzymywane zapasy?
- Czy liczba potrzebnych pracowników jest zawsze taka sama jak faktyczna liczba pracowników zatrudnionych?

Znalezienie odpowiedzi na te pytania – a tym samym znalezienie optymalnego planu produkcyjnego – nie jest sprawą łatwą ze względu na NP.-trudny charakter zadania optymalizacyjnego (zob. np. [8,9]). Brak odpowiedniego oprogramowania powoduje sytuację, iż bardzo często (zwłaszcza w przypadku małych i średnich przedsiębiorstw) odpowiedzi na te pytania – znajdujące odzwierciedlenie w kształcie opracowanego planu – są konsekwencją wiedzy i doświadczenia pracowników odpowiedzialnych za proces planowania produkcji.

4. PROBLEM 3 – JAK OBLICZYĆ WIELKOŚĆ PARTII PRODUKCYJNEJ?

Organizacja procesu produkcyjnego wymaga podziału określonej w planie produkcyjnym wielkości produkcji na mniejsze ilości określane pojęciem partii produkcyjnych. Zgodnie z [3] wielkość partii produkcyjnej należy dobierać tak, aby odpowiadała ona ilościowym zadaniom produkcyjnym (programom produkcyjnym)

oraz ekonomicznym wymaganiom produkcji wykonywanej w realnych, techniczno-organizacyjnych warunkach przebiegu procesu produkcyjnego. Przy jej wyborze zachodzi więc konieczność uwzględniania wielu czynników, które wymagają odmiennych decyzji, przemawiających za zwiększaniem wielkości partii produkcyjnej lub na odwrót, wymagających jej minimalizacji.

Zwiększenie partii produkcyjnej może pociągać za sobą zarówno korzystne, jak i niekorzystne skutki. Do skutków korzystnych zalicza się [3,4]:

- zmniejszenie nakładów na ustawienie i przygotowanie produkcji w przeliczeniu na jednostkę produkcji,
- wykorzystanie w większym stopniu dysponowanego funduszu czasu pracy stanowisk roboczych poprzez zmniejszenie czasu przebrojeń,
- zwiększenie wydajności pracy robotników w wyniku tzw. produkcyjnego uczenia się,
- zmniejszenie kosztów produkcji związane z wymienionymi wyżej czynnikami,
- uproszczenie organizacji i zarządzania produkcją, zwłaszcza planowania operatywnego, ewidencji produkcji, zarządzania dyspozytorskiego, itp.

Do skutków niekorzystnych należą zaś [3,4]:

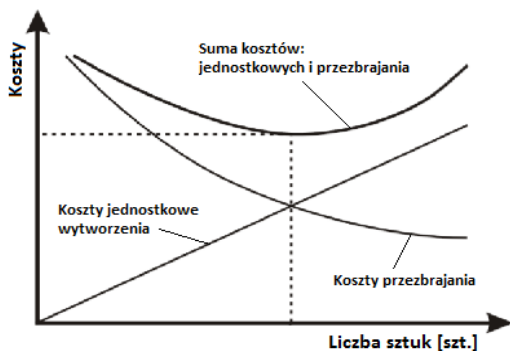
- wydłużenie cyklu produkcyjnego,
- zwiększenie zapasów produkcji w toku, potrzebnej powierzchni i pomieszczeń produkcyjno-magazynowych,
- wzrost zamrożenia środków obrotowych i odsetek od kredytu na środki obrotowe, opodatkowania zapasów itp.,
- zmniejszenie elastyczności procesu produkcyjnego i jego adaptabilności.

Problem wyznaczania partii sprowadza się zatem do znalezienia pewnej optymalnej wielkości, przy której możliwe będzie osiągnięcie minimum całkowitych kosztów produkcji. W schematyczny sposób problem ten zilustrowano na rys. 3.

Niestety, obok czynników wymienionych powyżej, doborze partii produkcyjnej wyrobu należy uwzględniać następujące założenia [5]:

- partia produkcyjna wyrobu powinna zawierać taką liczbę sztuk, aby stanowiskochłonność (pracochłonność) wykonania zasadniczych operacji nie była mniejsza od jednej zmiany roboczej (ze względu na wprawę pracownika),
- partia wyrobu winna być tak dobrana, aby jej okres powtarzalności równał się wielokrotności dnia roboczego (ze względu na ułatwienie ewidencji),
- partie produkcyjne różnych detali wykonywanych w jednej komórce produkcyjnej powinny mieć równe okresy powtarzalności lub okresy te powinny stanowić wzajemne wielokrotności,

- przy produkcji na automatach lub innych urządzeniach o dużym czasie wymiany narzędzi pożądanym jest, aby stanowiskochłonność partii produkcyjnej odpowiadała okresowi trwałości narzędzi,
- w przypadku urządzeń o dużej zmienności wykonywanych na nich operacji, zbyt małe wielkości partii produkcyjnych mogą spowodować zbyt duże udziały czasu przebrojeń, co może sprawić, że zaplanowana produkcja nie zostanie wykonana w okresie dysponowanego funduszu czasu tego urządzenia, a aby temu zapobiec należy obliczyć dla tego urządzenia minimalny okres powtarzalności, a następnie wielkości minimalnych partii produkcyjnych.



Rys. 3. Wykres kosztów produkcji w zależności od wielkości partii produkcyjnej [22]

W konsekwencji niewiele jest chyba problemów, które trudniej jest krótko i przejrzysto wyjaśnić, niż znaczenie i sposób określania wielkości partii produkcyjnej [6]. Sytuację komplikuje również duża ilość dostępnych formuł obliczeniowych spośród których część – mimo tak sformułowanego przeznaczenia – nie może być zastosowana dla potrzeb ustalania wielkości partii produkcyjnej [13].

4. PROBLEM 4 – JAKĄ PRZYJĄĆ FORMUŁĘ PRZEPŁYWU PRODUKCJI W TRAKCIE PROCESU PRODUKCYJNEGO?

Organizacja przepływu procesu produkcyjnego ma istotne znaczenie zwłaszcza w przypadku dużej złożoności wyrobów oraz wytwarzania ich w dużych seriach (partiach) produkcyjnych. Wybór formy ruchu (przekazywania) wyrobów ze stanowiska na stanowiska robocze, w trakcie trwania operacji technologicznych (faz technologicznych), może dotyczyć następujących układów [3,4]:

- szeregowego (kolejnego),
- szeregowo-równoległego (kombinowanego),
- równoległego.

Szeregowy ruch partii od operacji do operacji lub stanowiska na stanowisko polega na tym, że obrobione części przekazywane są do następnej operacji po wykonaniu operacji poprzedniej na wszystkich sztukach partii produkcyjnej. Okres technologiczny O_{tsz} partii produkcyjnej stanowi sumę czasów trwania wszystkich, kolejnych n operacji technologicznych:

$$O_{tsz} = S * \sum_{j=1}^n t_j, \quad (1)$$

gdzie: S – wielkość partii produkcyjnej,
 t_j – czas jednostkowy j -tej operacji,
 n – kolejny numer operacji w procesie technologicznym części.

Szeregowo-równoległy ruch partii od operacji do operacji lub ze stanowiska na stanowisko polega na tym, że obrobione detale przekazywane są do następnej operacji wcześniej niż zakończona jest operacja na wszystkich sztukach partii produkcyjnej. Części przekazywane są sukcesywnie, celowo wyodrębnionymi częściami partii produkcyjnej, tzw. partiami transportowymi, w celu utrzymania możliwie największej ciągłości obróbki na poszczególnych stanowiskach roboczych. Okres technologiczny $O_{tsz,r}$ partii produkcyjnej w układzie szeregowo-równoległym kalkulowany jest z wykorzystaniem formuły:

$$O_{tsz,r} = S * \sum_{j=1}^n t_j - (S - p_t) \sum_{j=1}^n t_{mn/j; j-1}, \quad (2)$$

gdzie: p_t – wielkość partii transportowej,
 $t_{mn/j; j-1}$ – czas operacji mniejszej w każdej kolejnej parze porównywanych operacji,
 S, t_j, n – oznaczenia jak powyżej.

Równoległy ruch partii oznacza, iż poszczególne części przechodzą na następną operację natychmiast po wykonaniu operacji poprzedniej, co stwarza sytuację, w której jedna partia jest w jednoczesnej równoległej obróbce w różnych operacjach na kilku stanowiskach roboczych. Okres technologiczny O_{tr} partii produkcyjnej w układzie równoległym kalkulowany jest z wykorzystaniem formuły:

$$O_{tsz,r} = p_t * \sum_{j=1}^n t_j + (S - p_t) * t_{\max.j}, \quad (3)$$

gdzie: $t_{\max.j}$ – czas najdłuższej operacji,
 S, t_j, n, p_t – oznaczenia jak powyżej.

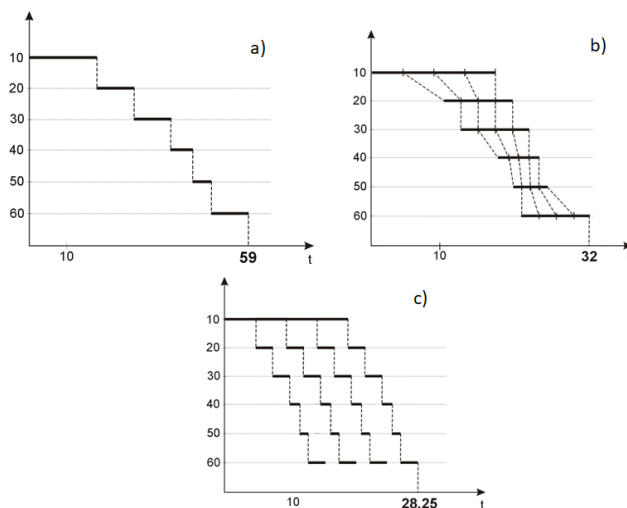
Długości okresu technologicznego, a także graficzną interpretację spływu detali w poszczególnych układach, dla procesu obróbki partii części $S=100$ szt. dla której proces technologiczny został określony w tab. 1 przedstawiono w tab. 1 i rys. 4.

Tab. 1. Proces technologiczny części dla potrzeb kalkulacji okresu technologicznego

Nr oper.	Stanowisko	Opis operacji	t_{pz} [godz.]	t_j [godz.]
10	RH25	Toczenie	0,5	0,18
20	TUB32	Toczenie	0,4	0,10
30	FYC-26	Frezowanie	0,4	0,10
40	FYC-26	Frezowanie kanałka	0,4	0,06
50	WRS25	Wiercenie	0,2	0,05
60	SWA10	Szlifowanie	0,5	0,10

Tab. 2. Długości okresu technologicznego przy różnych układach spływu detali

Układ spływu	Długość okresu technologicznego
Szeregowy	59 godz. 00 min.
Szeregowo-równoległy	32 godz. 00 min.
Równoległy	28 godz. 15 min.



Rys. 4. Graficzna interpretacja spływu części w procesie technologicznym:
a) układ szeregowy, b) układ szeregowo-równoległy, c) układ równoległy

Analizując powyższe wyniki, łatwo zauważyć, iż każdy z układów posiada pewne wady i zalety.

I tak *układ szeregowy* charakteryzuje się:

- najdłuższym okresem technologicznym,
- najmniejszą liczbą operacji transportowych,
- dużym stopniem wykorzystania stanowisk roboczych i ciągłością produkcji.

Układ szeregowo-równoległy cechuje:

- skrócona długość okresu technologicznego (w porównaniu z układem szeregowym),
- zwiększona ilość i częstotliwość operacji transportowych,
- duży stopień wykorzystania stanowisk roboczych i ciągłość produkcji.

Równoległy układ przebiegu partii wykonania części powoduje:

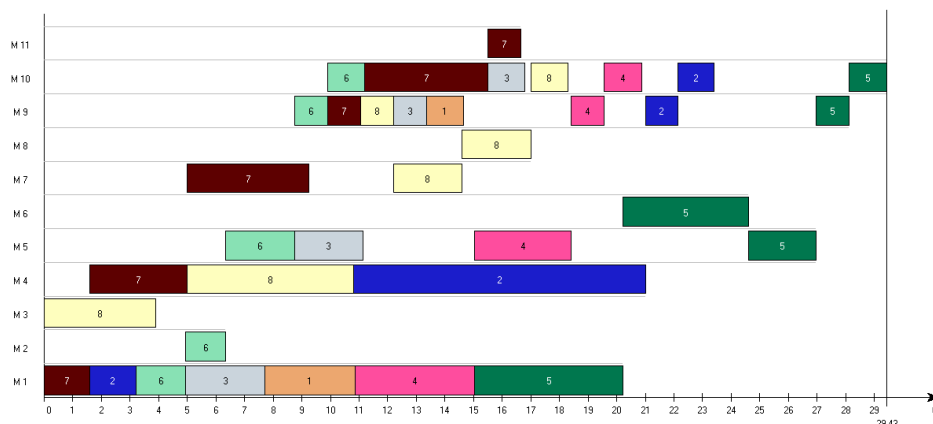
- skrócenie długości okresu technologicznego,
- zwiększenie liczby operacji transportowych (o porównaniu z układem szeregowym),
- zwiększenie ilości przerw na stanowiskach roboczych,
- zwiększenie liczby przebrojeń.

W związku z powyższym, decydując o wyborze któregoś z trzech wyżej przedstawionych układów, każdorazowo należy uwzględnić realia danego przedsiębiorstwa, biorąc pod uwagę takie czynniki jak rozmieszczenie stanowisk na hali produkcyjnej, koszty transportu wewnątrzzakładowego, możliwość synchronizowania zadań cząstkowych. W praktyce zwykle produkuje się wiele wyrobów równocześnie, co ma wpływ na wyznaczanie długości okresów technologicznych związanych np. z kolejnością wykonywania operacji na stanowiskach, kolejnością uruchamiania produkcji partii różnych wyrobów i inne [4]. Zagadnienia te stanowią problematykę wchodzącą w obszar projektowania harmonogramów pracy maszyn i urządzeń.

6. PROBLEM 5 – JAK OPRACOWYWAĆ HARMONOGRAM PRODUKCJI ?

Proces harmonogramowania produkcji pozwala zaplanować proces produkcyjny ze szczegółowym przydzieleniem zadań produkcyjnych do maszyn technologicznych (projektowanie harmonogramu maszyn) oraz pracowników (projektowanie harmonogramu robotnika). Wykorzystanie odpowiedniej metody szeregowania zadań pozwala, na podstawie marszruty technologicznej, informacji o dostępnych stanowiskach produkcyjnych, a także wymaganych czasach realizacji poszczególnych operacji, uzyskać informacje o planowanym terminie zakończenia produkcji, obciążeniu poszczególnych maszyn technologicznych, czy czasochłonności poszczególnych zadań [16].

Pod pojęciem harmonogramowania produkcji (szeregowania zadań produkcyjnych) rozumie się „określenie kolejności wykonywanych zadań i operacji na określonych stanowiskach produkcyjnych, tak aby uzyskać najlepsze wykorzystanie zasobów produkcyjnych względem określonego kryterium celu” [1]. Efektem procesu szeregowania zadań produkcyjnych jest harmonogram produkcji – najczęściej przedstawiany w postaci harmonogramu Gantta (rys. 5).



Rys. 5. Przykładowy harmonogram obciążenia maszyn produkcyjnych [16]

Generalnie wyróżnia się dwie główne metody szeregowania zadań produkcyjnych [11,17]:

- harmonogramowanie w przód – gdy dany jest czas poszczególnych operacji oraz data rozpoczęcia produkcji, a na podstawie tych informacji wyznacza się termin zakończenia realizacji zlecenia,
- harmonogramowanie wstecz – gdy dany jest wymagany czas zakończenia realizacji zlecenia oraz czasy poszczególnych operacji, a wyznacza się najpóźniejszy termin rozpoczęcia pierwszej operacji.

Analizując przedstawioną definicję szeregowania zadań produkcyjnych oraz wymienione metody harmonogramowania można stwierdzić, iż wydają się one dość proste. Niemniej jednak szeregowanie zadań produkcyjnych w realnym systemie produkcyjnym jest zagadnieniem bardzo złożonym i związanym z występowaniem wielu problemów. Problematyka harmonogramowania produkcji związania jest przede wszystkim z:

- złożonością procesu harmonogramowania produkcji (problem szeregowania zadań należy do klasy problemów NP.-trudnych),
- dynamiką i stochastycznym charakterem procesu produkcyjnego.

W konsekwencji w prowadzonych badaniach naukowych obserwuje się dwa podejścia do zagadnienia harmonogramowania produkcji [19]:

1. Harmonogramowe predyktywne, które związane jest z etapem planowania i w literaturze określane jest także mianem fazy *off-line*. To właśnie w trakcie tej fazy tworzony jest harmonogram nominalny – uwzględniający aktualne parametry systemu.
2. Harmonogramowanie reaktywne – związane z etapem realizacji planu, w literaturze określanego jako faza *on-line*. Uszeregowanie wówczas jest tworzone, bądź modyfikowane, w trakcie prowadzenia produkcji. Jakakolwiek zmiana procesu powoduje wdrożenie alternatywnego harmonogramu.

Niestety obydwie z powyższych podejść są obarczone pewnymi ograniczeniami powodując realne problemy w zakresie możliwości ich zastosowania w warunkach przemysłowych. Wynika to z faktu, iż ze względu na dynamikę i stochastyczny charakter procesu produkcyjnego opracowany i zoptymalizowany harmonogram produkcji traci swoją aktualność w przypadku wystąpienia jakiegokolwiek zaburzenia w procesie (np. awaria maszyny, wydłużenie czasu trwania operacji technologicznej, itp.). Uwzględnienie powstałej sytuacji wiąże się z koniecznością ponownej optymalizacji harmonogramu – co ze względu na znaczną złożoność procesu – jest zadaniem czasochłonnym – często eliminującym możliwość jego realizacji w trakcie trwania procesu produkcyjnego. W związku z powyższym aktualne badania w obszarze harmonogramowania skupione są na możliwości projektowania tzw. harmonogramów odpornych – umożliwiających opracowanie optymalnego harmonogramu produkcji – uwzględniającego możliwość wystąpienia zakłóceń w procesie produkcji (w literaturze nurt ten określany jest jako szeregowanie zadań produkcyjnych w warunkach niepewności – zob. np. [11,16,18]).

7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

Nieustająca presja konkurencji rynkowej powoduje, iż przedsiębiorstwa zmuszone są do nieustannego poszukiwania metod doskonalenia realizowanych procesów. W obecnym czasie – obok wysokiej jakości wytwarzanych produktów oraz niskich kosztów produkcji – czynnikiem o kluczowym znaczeniu pozostaje zdolność przedsiębiorstwa do możliwie najszybszego zaspokojenia potrzeb klienta. Bardzo często bowiem o wyborze zleceńbiorky decyduje nie tylko jakość i koszt, ale zdolność przedsiębiorstwa do realizacji zamówienia dokładnie na czas. Biorąc pod uwagę fakt rosnącej konkurencji oraz to, iż obecny rynek jest rynkiem klienta – wymagane czasy realizacji zleceń ulegają znacznemu skróceniu. W konsekwencji, przedsiębiorstwo by móc konkurować z innymi podmiotami musi posiadać zdolność szybkiego reagowania na napływające zamówienia.

W praktyce gotowość do natychmiastowej realizacji zlecenia uzależniona jest od posiadania produktu w magazynie wyrobów gotowych lub zdolności do szybkiej i elastycznej produkcji. Pierwsze z powyższych podejść pociąga za sobą koszty magazynowania – które to, zwłaszcza w przypadku realizacji produkcji wieloasortymentowej mają znaczny wpływ na oferowaną cenę produktu. W związku z powyższym pożądanym kierunkiem są działania w obszarze logistyki produkcji, prowadzące do zwiększenia efektywności przepływu strumienia materiałowego z jednoczesną optymalizacją kosztów wytwarzania.

W niniejszym artykule przedstawiono problemy decyzyjne związane z procesem planowania, organizacji i zarządzania produkcją mające wpływ na efektywność realizowanych procesów produkcyjnych. Wskazano również źródła złożoności problemów decyzyjnych oraz ekonomiczne i rynkowe skutki określonych decyzji na każdym z etapów procesu decyzyjnego.

LITERATURA

- [1] Al-HINAI N., ElMEKKAWY T.Y.: *Robust And Stable Flexible Job Shop Scheduling with Random Machine Breakdowns using a Hybrid Genetic Algorithm*. International Journal of Production Economics, Vol. 132, 2/2011, pp. 279–291.
- [2] BOZARTH C., HANDFIELD R.B.: *Wprowadzenie do zarządzania operacjami i łańcuchem dostaw*, Wyd. Onepress, Gliwice 2007.
- [3] BRZEZIŃSKI M. (red.): *Organizacja i sterowanie produkcją*, Agencja Wyd. PLACET, Warszawa 2002.
- [4] BRZEZIŃSKI M.: *Organizacja produkcji w przedsiębiorstwie*. Difin, Warszawa 2013.
- [5] BURSCHE J., LIS S., WAGNER K., WRÓBLEWSKI K.J.: *Organizacja podstawowych procesów produkcyjnych i sterowanie produkcją. cz. III.*, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1978.
- [6] FERTSCH M., GANIA I.: *Zarządzanie przepływem materiałów*, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2011.
- [7] GAWLIK J., PLICHTA J., ŚWIĆ A.: *Procesy produkcyjne*, PWE, Warszawa 2013.
- [8] GOLA A.: *Genetic-Based Approach to Production Planning with Manufacturing Cost Minimization*, Actual Problems of Economics, No. 3 (153) 2014, pp. 496–503.
- [9] GOLA A., ŚWIĆ A.: *Projektowanie zagregowanych planów produkcyjnych z wykorzystaniem algorytmów genetycznych* [w:] Matuszek J. (red.), *Metody i techniki kształtowania procesów produkcyjnych*, Wyd. Naukowe Akademii Techniczno-Humanistycznej, Bielsko-Biała 2016, s. 87–100.
- [10] GOLA A.: *Wybrane problemy planowania produkcji wieloasortymentowej o popycie sezonowym*, [w:] R.Knosala (red.) *Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji*, Oficyna Wyd. Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole 2014, s. 528–539.
- [11] KLIMEK M.: *Przydatno-reaktywne harmonogramowanie produkcji z ograniczoną dostępnością zasobów*, Kraków 2010.
- [12] KOREN Y.: *The Global Manufacturing Revolution. Product-Process-Business Integration and Reconfigurable Systems*, John Wiley & Sons, New Jersey, 2010.
- [13] KULISZ M., GOLA A.: *Dylematy wyznaczania wielkości partii produkcyjnej w przedsiębiorstwach z sektora MŚP* [w:] Knosala R. (red.) *Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji Tom I*, Wyd. Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole 2017, s. 624–635.

- [14] PAJĄK E., KLIMKIEWICZ E., KOSIERADZKA A.: *Zarządzanie produkcją i usługami*, PWE, Warszawa 2014.
- [15] SKOŁUD B.: *Zarządzanie operacyjne*. Produkcja w małych i średnich przedsiębiorstwach. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2006.
- [16] SOBASZEK Ł., GOLA A., ŚWIĆ A.: *Szeregowanie zadań produkcyjnych z uwzględnieniem dwuczynnikowej niepewności procesu*. [w:] Knosala R. (red.) *Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji*, Tom I, Wyd. Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole 2017, s. 686–699.
- [17] SOBASZEK Ł.: *Problemy harmonogramowania w systemach produkcyjnych*, Technological Complexes, nr 1–2, 2015, s. 175–178.
- [18] SOBASZEK Ł., ŚWIĆ A., GOLA A.: *Koncepcja zastosowania narzędzi predykcji w projektowaniu harmonogramów odpornych*, Zarządzanie przedsiębiorstwem, nr 2/2016, s. 20–26.
- [19] SZATKOWSKI K. (red.): *Nowoczesne zarządzanie produkcją. Ujęcie procesowe*, PWN, Warszawa 2014.
- [20] SZYMONIK A.: *Logistyka produkcji: procesy, systemy, organizacja*. Wyd. Difin, Warszawa 2012.
- [21] WIĘCEK D.: *Wpływ czynników kosztotwórczych na szacowanie kosztów produkcji elementów maszyn*. Organizacja i zarządzanie: Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej 2017, z. 101, s. 533–544.
- [22] ŻYWIŃSKI K.: *Planowanie procesów wytwarzania*. Poznań, 2005, <http://zasada.zut.edu.pl>

Jacek CABAN*, Wojciech MISZTAL**, Andrzej MARCZUK**,
Aleksiej ŠEVCOV***, Vladimir KOSOLAPOV***,
Sergej OTROŠKO***

WYDAJNOŚĆ PRZENOŚNIKA ŚLIMAKOWEGO W TRANSPORCIE PSZENICY PASZOWEJ

Streszczenie

W pracy przedstawiono studium parametrów pracy przenośnika ślimakowego wykorzystywanego w linii technologicznej do transportu pszenicy paszowej. Zwrócono uwagę na warunki pracy przenośnika ślimakowego w transporcie ziarna pszenicy takie jak: prędkość obrotowa wału ślimakowego oraz kąt pochylenia modułu transportującego. Opracowanie zawiera opis metod oceny pracy maszyn i urządzeń do przygotowania i zadawania pasz treściwych dla produkcji zwierzęcej. Podstawę do analizy stanowiły dane badawcze uzyskane na stanowisku badawczym przenośnika ślimakowego w laboratorium Katedry Maszyn Rolniczych i Transportowych na Uniwersytecie Przyrodniczym w Lublinie.

1. WSTĘP

Właściwe zaplecze techniczne jest niezwykle istotne w praktycznie każdej formie prowadzonej działalności produkcyjnej. Współcześnie jednym z bardziej istotnych czynników w produkcji zwierzęcej jest czynnik techniczny, ujęty w strategii zaopatrzenia maszynowo-technologicznego oraz w przyjętej koncepcji rozwoju mechanizacji i automatyzacji przemysłu rolniczego danego regionu. Działania takie przekładają się na uzyskanie znaczących oszczędności energii, surowców i materiałów konstrukcyjnych oraz podniesienia poziomu niezawodności maszyn i urządzeń wykorzystywanych w danym przedsiębiorstwie produkcyjnym. Aby osiągnąć najwyższy poziom produkcji zwierzęcej coraz więcej gospodarstw wyposażonych jest w nowoczesne maszyny, a nawet w całe linie zasilające [1].

* Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, Wydział Inżynierii Produkcji, Katedra Maszyn Rolniczych i Transportowych, ul. Głęboka 28, 20-612 Lublin, jacek.caban@up.lublin.pl

** Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, Wydział Inżynierii Produkcji, Katedra Maszyn Rolniczych i Transportowych, ul. Głęboka 28, 20-612 Lublin

*** Ogólnorosyjski Naukowo-Badawczy Instytut Pasz im. Wiliamsa w Łobnej, Rosja

System racjonalizacji karmienia musi spełniać następujące wymagania [2]:

- pasze powinny w pełni pokryć zapotrzebowanie na energię zwierząt, białka, witamin i soli mineralnych;
- zadawanie karmy, w odpowiedniej ilości, o dobrej jakości, oraz odpowiadającej przyjętym standardom;
- stosowane metody paszowe powinny zapewnić odpowiednie procesy rozrodcze, utrzymywanie zwierząt w dobrym zdrowiu i zapewnić dobre efekty ekonomiczne dla całkowitej produktywności gospodarstw rolnych;
- pasze dla bydła mlecznego powinny być doprowadzane w postaci kompletnej mieszanki (np. TMR), mieszane w mieszalniku pojazdowym z wykorzystaniem koncentracji dużych kawałków karmy i składników mineralnych;
- produkcja paszy powinna umożliwiać stosowanie pełnej mechanizacji uprawy roślin, podczas eksploatacji, przechowywania i karmienia.

Autorzy w opracowaniu [3] zwrócili uwagę na liczne problemy przygotowywania pasz występujące w produkcji zwierzęcej. Zauważyli potrzebę opracowania niezawodnych i w pełni mechanizujących procesy maszyn mobilnych do zadawania pasz. Ocena eksploatacyjna sprzętu technicznego do realizacji wymienionych procesów wskazuje na jego wysoką energochłonność, znaczną zawodność, niską jakość przygotowania przetwarzanego materiału oraz wysokie straty pasz, sięgające nawet 30% [3].

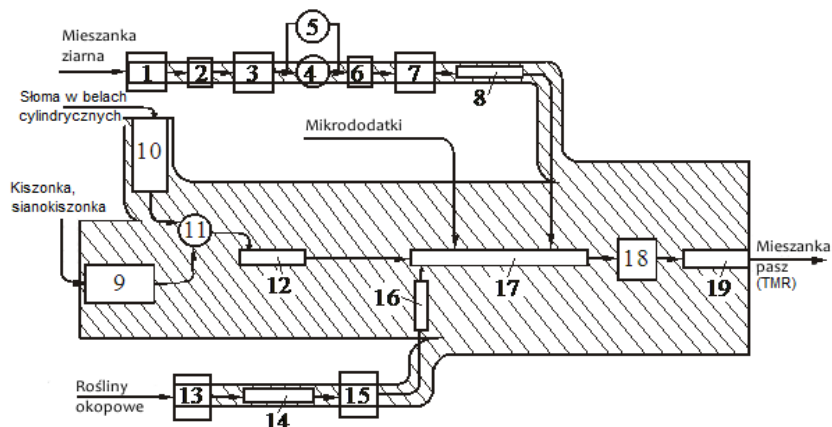
Zespoły ślimakowe stanowią ważny element maszynowy, wykorzystywany w mieszarkach, dozownikach, homogenizatorach, transporterach czy liniach technologicznych do transportu mieszanek paszowych. W związku z powyższym w niniejszym opracowaniu skoncentrowano się nad badaniami parametrów pracy urządzenia ślimakowego wykorzystywanego do transportu i zadawania pasz treściwych na bazie pszenicy. Studium parametrów pracy przenośnika ślimakowego do podawania mieszanek zboża paszowego przeprowadzono w laboratorium Katedry Maszyn Rolniczych i Transportowych na Uniwersytecie Przyrodniczym w Lublinie.

2. REALIZACJA PROCESÓW TRANSPORTOWYCH I DOZOWANIA

2.1. Linia technologiczna zadawania pasz

Podstawą przy projektowaniu technologicznych linii potokowych (TLP) jest przeprowadzenie analizy strumieni materiałowych, które to wyznaczają rytm przygotowania gotowej paszy dla zwierząt. Jednym z najważniejszych problemów w kwestii mechanizacji przygotowania paszy jest opracowanie podstaw teoretycznych produkcji potokowej celem dalszego doskonalenia

technologii i znacznego obniżenia zużycia środków i energii [3]. Na rys. 1., przedstawiono przykładowy schemat strumienia materiałowego, realizowanego w dziale przygotowania mieszanek paszowych energooszczędnej linii technologicznej.



Rys. 1. Model strumienia materiałowego w dziale mieszanek paszowych energooszczędnej linii technologicznej: 1 – zasobnik zbóż; 2, 6 – podnośniki czepakowe; 3 – agregat kombinowany APK-4; 4 – śrutownik ziarna; 5 – gniotownik ziarna; 7 – zasobnik śruty; 8 – przenośnik ślimakowy; 9, 10 – zasobniki podające; 11 – rozdrabniacz pasz; 12, 14, 16, 17, 19 – przenośniki; 13 – podajnik roślin okopowych; 15 – maszyna do czyszczenia na sucho i rozdrabniania roślin okopowych; 18 – zasobnik-mieszarka [3]

Przedstawiony na rysunku 1, model działu w oparciu o cztery odrębne strumienie pasz, których intensywności określone są na podstawie receptury dawki mieszanki. Dawki określono w następujący sposób [3]:
mieszanki paszowej składającej się z pociętej słomy (siana) – 23%,
sianokiszonki (kiszonki) – 60%,
mieszanki pasz treściwych – 8%,
roślin okopowych – 9%.

Całkowita intensywność strumieni na wejściu TLP równa się intensywności strumienia mieszanki na wyjściu. W przedstawionym rozwiązaniu udział poszczególnych rodzajów mieszanek wynosi odpowiednio 4.6, 12, 1.6, 1.8 t/h, i jest stały. Warunki te wymuszają zestawianie linii w taki sposób, aby zapewnić synchronizację strumieni produkowanej mieszanki paszowej, w przeciwnym wypadku następuje spadek wydajność całej linii, co powoduje wzrost strat energii. Efektywność wykorzystania paszy zależy od jej jakości początkowej, sposobu przygotowania i obróbki oraz transportu i układu zadawania paszy, dlatego szczególnego znaczenia nabiera problem racjonalnego wykorzystania środków linii technologicznych oraz urządzeń transportowych uczestniczących w systemie przygotowania i zadawania paszy.

2.2. System transportu paszy

Transport jest szerokim pojęciem, które jest definiowane na różne sposoby przez różnych autorów. Według słownika terminologii logistycznej [4] jest to „zespół czynności związanych z przemieszczeniem osób i dóbr materialnych przy użyciu odpowiednich środków”. W rozważanym przypadku będzie to transport dóbr materialnych na niewielkie odległości przy wykorzystaniu urządzeń transportu bliskiego pracujących w sposób ciągły lub przerywany, uwzględniając specyficzne warunki procesu technologicznego. Identyfikacja procesu technologicznego pozwala na dobór odpowiednich środków transportowych do obsługi poszczególnych operacji technologicznych. Środki transportowe odpowiadają za takie czynności jak, załadunek, przeładunek, wyładunek, manipulacja, przenoszenie oraz przewóz materiału transportowanego. Energooszczędna linia technologiczna mieszanek paszowych przedstawiona na rysunku 1, posiada urządzenia transportowe w postaci przenośników czerpakowych, przenośników ślimakowych, przenośniki taśmowe, przenośnik zgarniakowy oraz przenośnik pneumatyczny. Do transportu paszy treściwej wykorzystywane są przenośniki czerpakowe i ślimakowe z wałem obrotowym. Transport materiałów przenośnikiem ślimakowym może odbywać się w kierunku poziomym lub odchylonym od poziomu. Przenośniki śrubowe mogą być zastosowane do odbierania materiału transportowanego spod lejów zasypowych, zbiorników, zasobników rozładowniczych lub innych przenośników i podawać go na inne przenośniki lub do zbiorników [5,6,7]. Podczas pracy zespołu ślimakowego materiał przemieszcza się w przestrzeniach między zwojami ślimaka o grubości g i skoku S [8].

Przenośniki ślimakowe przejawiają szereg zalet m.in.:

- niski koszt inwestycji i eksploatacji;
- łatwa obsługa i konserwacja;
- możliwość transportu w różnych kierunkach;
- łatwość uszczelnienia, co jest bardzo ważne podczas transportowania materiałów pylistych.

Natomiast głównymi wadami są:

- stosunkowo duże zużycie energii, które wynika ze sposobu pracy;
- znaczne opory ruchu następujących wskutek tarcia materiału transportowanego o obudowę oraz powierzchnie śrubową;
- znaczne zużycie powierzchni śrubowej i obudowy, które wynika z tarcia materiału o wymienione elementy;
- kruszenie materiałów w czasie transportu oraz powstawanie zatorów w miejscach łożyskowania wału śrubowego;
- szczególne ograniczenia dotyczące doboru materiału transportowanego, głównie drobnoziarnistości oraz sypkości [5,6,7].

Wymienione cechy przenośników ślimakowych spełniają kryteria do transportu materiałów sypkich oraz zastosowania ich do linii technologicznych mieszanek paszowych i zadawania paszy treściwej. Podstawowym materiałem transportowanym przenośnikiem w tym są ziarna zbóż.

Znajomość właściwości fizycznych ziarna zbóż jest istotna nie tylko na etapie zbioru i przechowywania, ale również podczas przetwarzania [9]. Pszenica należy do grupy roślin zbożowych z rodziny traw i ma olbrzymie znaczenie w światowym rolnictwie. Zboża uprawia się przede wszystkim w celu pozyskania nasion, które stanowią podstawę żywienia zwierząt w postaci pasz treściwych i objętościowych. Pszenicę uprawia się na każdym kontynencie na szeroką skalę [10,11]. Ziarno pszenicy w swojej strukturze jest ciałem niejednorodnym, składa się z bielma, okrywy owocowo-nasiennej i zarodka. Wymienione części ziarna posiadają różne właściwości mechaniczne [3]. W ziarniaku pszenicy, ale również żyta, owsa oraz jęczmienia rozróżnia się stronę grzbietową, nasadę, wierzchołek oraz stronę, która zawiera podłużną bruzdę nazywaną stroną brzuszna. Bielmo jest stosunkowo kruche, zaś okrywy posiadają znaczną kleistość. Przy śrutowaniu ziarna bielmo poddawane jest głównie rozłupywaniu i ściskaniu, a okrywy rozrywaniu [3]. Twardość ziarna jest jednym z parametrów decydujących o jego przydatności technologicznej [9]. Odmiany pszenicy o twardym bielmie wymagają dłuższego czasu leżakowania i większego poziomu nawilżania przed przemiałem w porównaniu do odmian miękkich [9]. Podobnie okrągłe ziarna są bardziej wytrzymałe niż żebrowane. Oprócz tego występuje duża różnorodność ziarna w zakresie długości, szerokości i grubości, mających wpływ na właściwości mechaniczne.

Kupric [12] jako pierwszy badał właściwości mechaniczne nie pojedynczych ziaren, a masy ziaren na laboratoryjnym elektrodynamometrze rotacyjnym z zapisem automatycznym wielkości momentu obrotowego. Zaproponował wyznaczanie twardości ziarna jako średniej wielkości niszczącego momentu obrotowego przy rozdrabnianiu 100 cm^3 ziarna, przy czym badano nasiona różnych gatunków roślin o różnej wilgotności. W badaniach tych ocenę wytrzymałości ziarna dokonywano na podstawie naprężeń niszczących, wytwarzanych w zupełnie innych warunkach niż przy rozdrabnianiu ziarna w śrutownikach [3]. W technologii rozdrabniania ziarna ogromne znaczenie praktyczne ma postać mechanicznego związku z wilgocią, która w rozdrabnianym materiale może występować w formie kapilarnej (higroskopijnej) i wilgoci po namoczeniu. Wilgotność materiału (mieszanki paszowej) jest równie istotna przy transporcie za pomocą urządzeń przenośnikowych.

Podsumowując rozważania właściwości fizycznych zbóż można stwierdzić, że ze względu na niewielkie wymiary i skomplikowany kształt ziarna zbóż są trudnym surowcem do określania ich właściwości fizycznych. Dlatego też najczęściej w warunkach przemysłowych wyznacza się parametry dla określonej masy ziarna, takie jak wilgotność, gęstość usypowa i utręciona, celność i wyrównanie [9].

3. BADANIA LABORATORYJNE PRZENOŚNIKA ŚLIMAKOWEGO

Badania parametrów pracy przenośnika ślimakowego zrealizowano w laboratorium Katedry Maszyn Rolniczych i Transportowych na Wydziale Inżynierii Produkcji Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie. Obiektem badań był przenośnik ślimakowy z obracającym wałem T206/3 wykonany przez Pracowniczy Ośrodek Maszynowy w Augustowie [13]. Celem badań była analiza parametrów pracy przenośnika podczas transportu ziarna pszenicy przy trzech różnych kątach pochylenia przenośnika ślimakowego (0° , 10° oraz 20°), przy zadanej prędkości obrotowej wału. W trakcie badań transportowano stałą ilość materiału transportowanego w każdych warunkach pracy (pochylenia) przenośnika.

Przebieg procedury badawczej:

1. Określenie własności materiału transportowanego (gęstość usypowa, kąt tarcia wewnętrzznego);
2. Określenie masy materiału przed pomiarem;
3. Ustalenie prędkości obrotowej wału ślimakowego – 140 obr/min;
4. Ustalenie szczeliny roboczej w koszu zasypowym 200 mm;
5. Ustalenie kąta pracy przenośnika – 0° , 10° , 20° ;
6. Uruchomienie przenośnika ślimakowego;
7. Rozpoczęcie podawania materiału do kosza zasypowego;
8. Wypełnienie przestrzeni roboczej ziarnem pszenicy;
9. Rozpoczęcie pomiaru próby badania wydajności;
10. Określenie masy przetransportowanego materiału oraz czas jego transportu.

Badania powtarzano trzykrotnie w celu uśrednienia uzyskanych wyników dla określonego kąta pochylenia przenośnika. Badanie gęstości usypowej transportowanej pszenicy określono w oparciu o normę PN-73 R 74007 Ziarno zbóż – Oznaczanie gęstości [14].

Badania zrealizowano na stanowisku PS-6/2014 produkcji PIMR w Poznaniu, przenośnika ślimakowego z wałem obrotowym T206/3, wykonanego przez Pracowniczy Ośrodek Maszynowy w Augustowie. Na rysunku 2 przedstawiono stanowisko badawcze PS-6/2014 przenośnika ślimakowego. Do wykonania prac badawczych wykorzystano następującą aparaturę:

- kątomierz elektryczny Laserliner ArcoMaster 40;
- wagę elektroniczną platformową AXIS BA30C nr 294 do 30 kg;
- wagę elektroniczną AXIS AD5 nr 1672 do 5 kg o dokładności 0,001 kg.



Rys. 2. Stanowisko badawcze PS-6/2014 przenośnika ślimakowego, 1 – zasobnik zbóż; 2 – rura transportowa przenośnika; 3 – zespół napędowy; 4 – czujnik prędkości obrotowej wału; 5 – panel kontrolno-sterujący; 6 – zespół podnoszący do regulacji kąta pochylenia; 7 – rama konstrukcyjna przenośnika; 8 – zbiornik na przetransportowany materiał [15]

Stanowisko laboratoryjne składa się z przenośnika ślimakowego T 206/3, który posiada obudowę ślimaka (1) wykonaną ze stalowej blachy o przekroju kołowym. Regulacja zmiany kąta nachylenia odbywa się poprzez zespół podnoszący (6), który znajduje się na ramie konstrukcyjnej stanowiska przenośnika (7). Zespół podnoszący składa się z zespołu wciągarki mechanicznej z blokadą położenia, linki stalowej i układu dwóch rolek prowadzących. W obudowie porusza się wał ślimakowy osadzony na łożysku kulowym, które znajduje się w czerpni zasobnika zbóż (1) oraz od strony zespołu napędowego w głowicy. W skład zespołu napędowego wchodzi silnik elektryczny o mocy 1,5 kW oraz dwurzędowa przekładnia pasowa z pasami klinowymi (3). Przekładnia pasowa jest osłonięta blachą stalową ze względów bezpieczeństwa. Na głowicy przenośnika na wyjściu wału ślimakowego zamocowano czujnik położenia wału ślimakowego (4) (optyczny czujnik inkrementalny optoelectronic incremental encoders LARM 303/500 PB) umożliwiający pomiar prędkości obrotowej wału przenośnika. Regulacja pasów klinowych przenośnika odbywa się poprzez opuszczanie lub podnoszenie podstawy silnika.

Po prawidłowej regulacji napięcia pasów klinowych przekładni powinny one się ugiąć pod naciskiem palców o 10 mm. Transportowane zboże odbierane jest z przenośnika do zbiornika stalowego na materiał transportowany (8), z możliwością regulacji jego wysokości [15].

4. WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

Materiałem transportowanym przez przenośnik ślimakowy było ziarno pszenicy. Średnia wartość gęstości usypowej ρ dla badanego ziarna pszenicy wynosiła 750 kg/m^3 , wyznaczenia gęstości dokonano na podstawie wzoru (1):

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

gdzie: ρ – masa usypowa materiału [kg/m^3],

m – masa próbki [kg],

V – objętość próbki [m^3].

Procedura określania gęstości usypowej ziarna pszenicy została przeprowadzona w oparciu o normę PN-73 R 74007 [14].

W tabeli 1 przedstawiono wybrane dane konstrukcyjne oraz inne wartości przydatne w obliczeniach wydajności transportowej przenośnika ślimakowego.

Tab. 1. Zestawienie danych potrzebnych do obliczenia wydajności przenośnika ślimakowego [15]

Dane	Jednostka	Wartość
D – średnica zewnętrzna ślimaka	m	0,092
d – średnica wału	m	0,0215
S – skok spirali ślimaka	m	0,09
L – długość przenośnika	m	2
n – prędkość obrotowa	obr/min	140
ω – prędkość kątowna	rad/s	14,65
ψ – współczynnik wypełnienia	–	0,5
ρ – gęstość materiału	kg/m^3	750
φ_{0° – współczynnik korekcyjny dla kąta 0°	–	1
φ_{10° – współczynnik korekcyjny dla kąta 10°	–	0,8
φ_{20° – współczynnik korekcyjny dla kąta 20°	–	0,65

W tabeli 2 zamieszczono wartości współczynnika korekcyjnego φ zmniejszenia wydajności przenośnika ślimakowego w zależności od kąta pochylenia przenośnika.

Tab. 2. Wartość współczynnika korekcyjnego φ [16, 17]

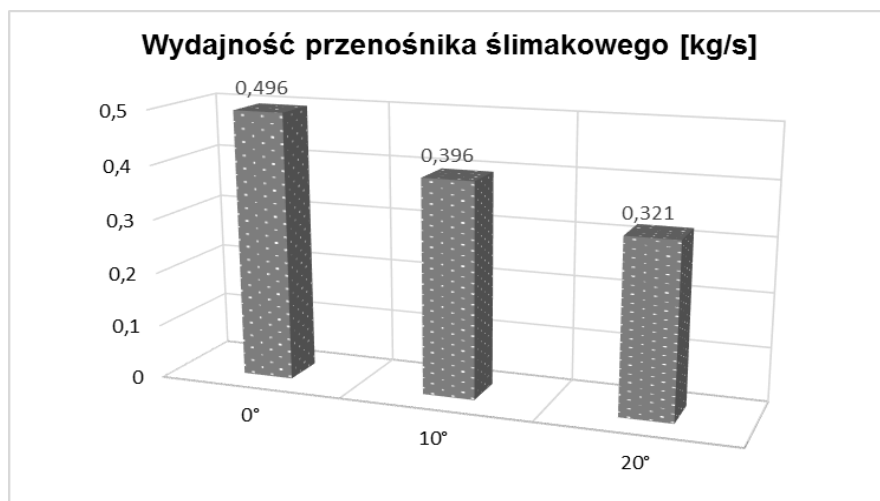
α [°]	0	5	10	15	20
φ	1,0	0,9	0,8	0,7	0,65

Uwzględniając powyższe zjawiska występujące podczas transportu pasz treściwych, wydajność badanego przenośnika ślimakowego wyznaczono z zależności (2):

$$Q = \frac{D^2 + d^2}{8} \cdot \omega \cdot S \cdot \rho \cdot \psi \cdot \varphi \quad (2)$$

gdzie: Q – wydajność przenośnika [kg/s].

Z uwagi na to, że na linii technologicznej pozyskiwania pasz przenośniki pracują w pozycji poziomej oraz w przypadku zadawania paszy mogą pracować pod pewnym kątem pochylenia badania realizowano dla trzech ustawień przenośnika. Wyniki uzyskanych wydajności dla zestawionych w tabeli 1 parametrów przenośnika ślimakowego przedstawiono graficznie na rysunku 3. Na wykresie przedstawiono wyniki dla trzech kątów pochylenia przenośnika ślimakowego (0°, 10°, 20°).



Rys. 3. Uzyskane wartości wydajności pracy przenośnika ślimakowego na stanowisku badawczym

Na podstawie analizy danych przedstawionych na wykresie na rysunku 3, zauważyć można, że wydajność badanego przenośnika śrubowego spada wraz ze wzrostem kąta pochylenia przenośnika. Największa wydajność została uzyskana w poziomym ustawieniu przenośnika i wynosiła około 0,5 kg/s. Najmniejszą wydajność przenośnika uzyskano przy kącie pochylenia 20° i wynosiła 0,321 kg/s.

5. PODSUMOWANIE

Wykorzystanie nowoczesnych maszyn i urządzeń w systemie zadawania pasz może prowadzić do korzyści wynikających z oszczędności nakładu pracy i kosztów energii. Zastosowanie przenośników ślimakowych o odpowiednich parametrach konstrukcyjnych i możliwościach transportowych ma istotny wpływ na wydajność prac związanych z produkcją zwierzęcą.

Przeprowadzone badania wskazują na możliwość wykorzystania takiego urządzenia ślimakowego lub urządzenia o podobnych parametrach konstrukcyjnych w zastosowaniu linii technologicznej do zadawania pasz treściwych. Wydajność badanego urządzenia spełnia wymagania danej linii technologicznej w zakresie od poziomu do kąta pochylenia 10°. Dla większych kątów pochylenia należy zwiększyć wydajność urządzenia transportującego.

LITERATURA

- [1] MAJCHRZAK M., BARWICKI J., WARDAL W.J., MAZUR K., BOREK K.: *Cost analysis of preparation and discharge in selected tied-up cattle barns*. Agricultural Engineering 1(153), 2015, pp. 85–93.
- [2] ROMANIUK W., FIEDOROWICZ G., BISKUPSKA K.: *Analiza standardów technologicznych obór dla krów mlecznych w gospodarstwach rodzinnych i farmerskich*. Monografia. Falenty – Warszawa. 2011.
- [3] MARCZUK A., SYSUEV V.A., ALEŠKIN A.V., SAVINYH P.A., MISZTAŁ W., BARAN S.: *Podejście systemowe w badaniach maszyn do przygotowania pasz*. Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, Wydział Inżynierii Produkcji, Lublin 2013.
- [4] FERTSCH M.: *Słownik terminologii logistycznej*. Biblioteka Logistyka. Instytut Logistyki i Magazynowania Poznań 2016.
- [5] GOŹDZIECKI M., ŚWIĄTKIEWICZ H.: *Przenośniki*. Warszawa 1979.
- [6] KOWALIK W., LEBIEDOWICZ W., SIARKOWSKI Z., WROTKOWSKI K.: *Mechanizacja produkcji zwierzęcej*. Pracownia Poligraficzna AR w Lublinie 1999.
- [7] RACZYK R.: *Środki transportu bliskiego i magazynowania*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2009.
- [8] FLIZIKOWSKI J., SADKIEWICZ J.: *Structural analysis of the extruder screw plasticizing system*. Polimery 6(60), 2015, pp. 402–410.

- [9] DZIKI D., RÓŻYŁO R., LASKOWSKI J., GRUNDAS S.: *Ocena właściwości fizycznych ziarna pszenicy przy wykorzystaniu analizatora pojedynczych ziarniaków*. Inżynieria Rolnicza 1(126), 2011, s. 39–46.
- [10] BŁAŻEWICZ-WOŹNIAK M., KĘSIK T., KONOPIŃSKI M.: *Uprawa roli i roślin z elementami herbológii*. Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie 2013.
- [11] KUBICKA H., NAWRACAŁA J., GÓRNY A.: *Zarys genetyki zbóż*, Tom 1. Instytut Genetyki Roślin PAN, Poznań 2005.
- [12] КУПИРЦ Я.Н. *Физико-химические основы размола зерна*. Заготиздат, 1946.
- [13] *Instrukcja oryginalna. Katalog części. Przenośnik ślimakowy T 206/3*. Augustów 2015.
- [14] PN-73 R 74007 *Ziarno zbóż – Oznaczanie gęstości*.
- [15] MARCZUK A., CABAN J., MISZTAŁ W., SEVCOV A., KOSOLAPOV V., OTROŠKO S.: *Badania parametrów pracy przenośnika ślimakowego w linii technologicznej do transportu pszenicy paszowej*. Adaptivnoe Kormoproizvodstvo Nr 1, 2016, pp. 76–83.
- [16] FURMANIK K.: *Transport przenośnikowy. Maszyny i Urządzenia Transportowe*. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2008.
- [17] MALCZEWSKI J.: *Mechanika materiałów sypkich, operacje jednostkowe*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1994.

Myron CHERNETS*, Natalia LEBEDEVA

EVALUATION OF DURABILITY OF A PLAIN BEARING WITH SHAFT AND BUSH ROUNDNESS DEVIATIONS

Summary

The aim of the paper is investigation of the kinetics of a plain bearing wear at boundary (dry, mixed) friction with small ovality of shaft and bush with respect to single-double-single area contact. Using an original generalized cumulative wear model, the effect of ovality of bearing elements on both durability of the bearing and changes in maximum initial contact pressures at shaft rotation and during the wear process was investigated. It was found that ovality has a positive effect on bearing durability. Also, it was found that contact pressures undergo cyclic changes when a shaft with ovality is rotated. The regularities of this effect are presented in a graphic form.

1. INTRODUCTION

Plain bearings are one of the most popular sliding friction systems. They can be applied in modern engineering in a number of ways: as shafts with small diameters to shafts with diameters of up to 1000 mm, both slow speed and high speed and loads from several up to millions of Newtons. The engineering practice proves that both bushes and shafts exhibit roundness deviations, like ovality, trilobing or tetra-lobing, which influence parameters of contact, bearing wear and durability. However, the methods presented in literature [1–14] do not consider the effect of out-of-roundness of the bearing elements on durability and contact pressures of such bearing. A number of works co-written by the present author [15–17,19 and others] investigate the effect of out-of-roundness of the shaft and the bush on contact pressures and durability of bearings with respect to a single-area contact. However, the investigated tribocontact cases can also

* Instytut Technologicznych Systemów Informacyjnych, Politechnika Lubelska, 20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 36, 81 538 45 83, m.czerniec@pollub.pl

involve bodies' interaction at the realization of single – double – single-area contact and in other words such contact can be called mixed contact, which has not been investigated yet. This paper presents the results of research undertaken to examine the given type of tribocontact problem, which indicate the regularities of ovality influence on bearing durability and character of contact pressures change.

2. PROBLEM FORMULATION

At the axis-symmetric out-of-roundness of bush 1 and shaft 2, a plain bearing (Fig. 1) can have the following forms (Fig. 2):

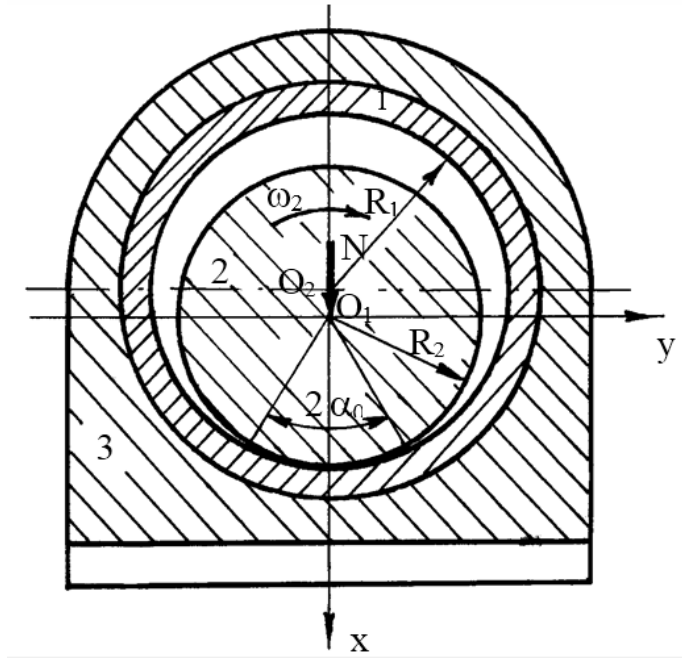


Fig. 1. Schematic of a plain bearing

- bush 1 horizontal ovality; shaft 2 ovality, trilobing and tetralobing,

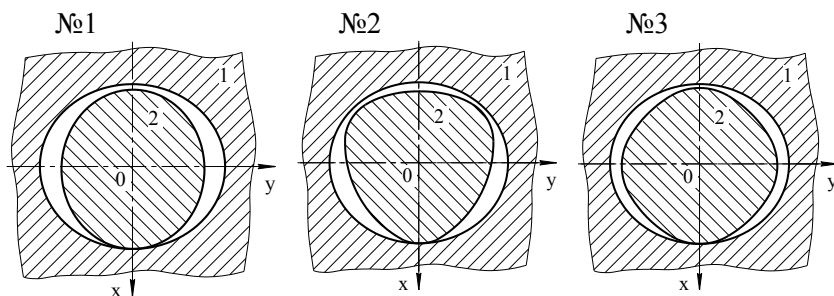


Fig. 2a. Single area contact of the elements

- bush 1 vertical ovality; shaft 2 ovality, trilobing and tetralobing,

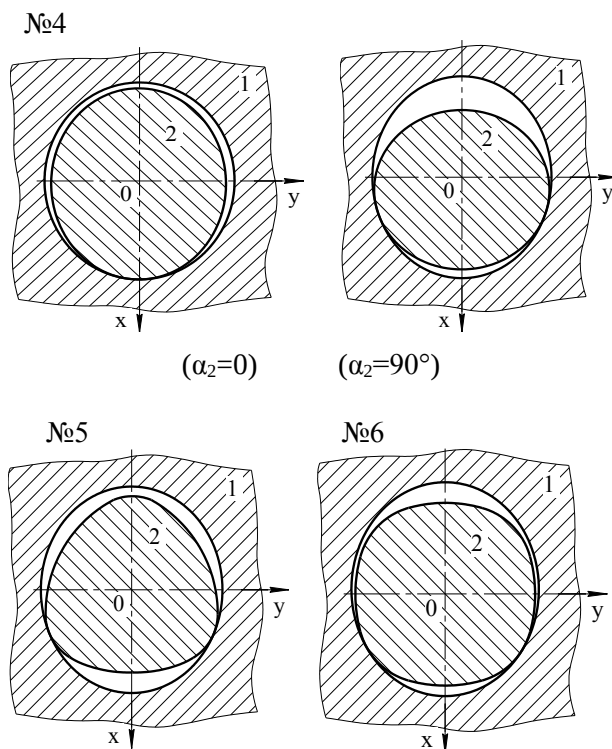


Fig. 2b. Double area contact of the elements

As can be seen from the schematics given in Fig. 2b, mixed contact (single-double-single-area contact) occurs when the shaft with out-of-roundness is rotated. The schematic shown in Fig. 3 illustrates phases I through V of the mixed contact of the elements with ovality. It is supposed to be reasonable assumption that here in conditions of quasistatic balance at rotation of the shaft ($\alpha_2 > 0$) from the initial position ($\alpha_2 = 0$), the following phases occur: symmetric and asymmetric single-area contact (I,III,V), asymmetric and symmetric double-area contact phases (II,IV).

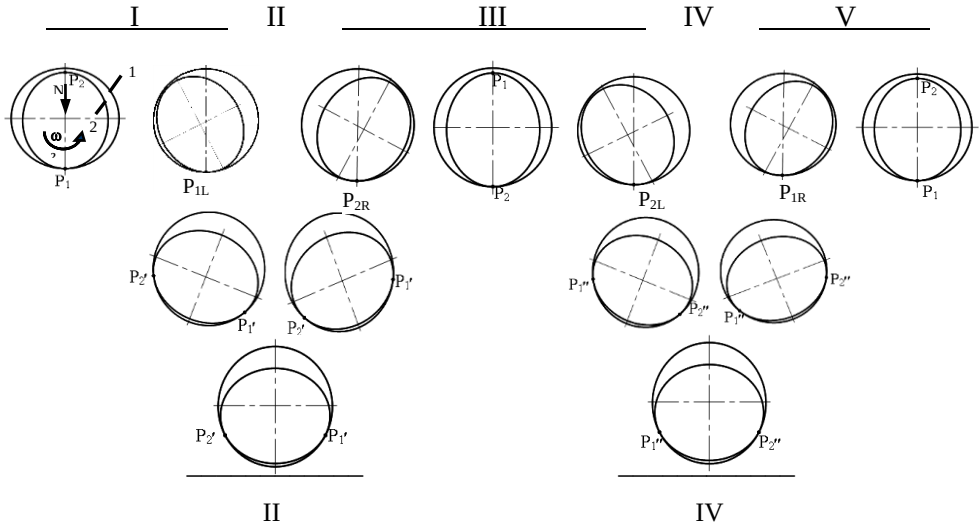


Fig. 3. Mixed contact phases: P_1, P_2 – points of bodies contact at the symmetric single-area contact; P'_1, P'_2, P''_1, P''_2 – points of bodies contact at the symmetric double-area contact; L, R – accordingly left and right extreme points of single-area contact

The initial out-of-roundness $\delta_k \ll R_k$ of contours L_1 and L_2 of the elements (Fig. 4a, b), where $\delta_1 = R_1 - R'_1$, $\delta_2 = R'_2 - R_2$, and R_1 is the greater half-axis of the bush hole, R'_1 is the smaller half-axis of the bush hole, R'_2 is the greater half-axis of a cross section of the shaft, R_2 is the smaller half-axis of a cross section of the shaft. The bearing has a radial clearance $\varepsilon = R_1 - R_2 > 0$. The shaft neck is under load of vertical radial force N . The shaft rotates at an angular velocity $\omega_2 = \text{const}$, and the load in the contact zone generates a friction force that causes wear of the bearing elements. Both elastic properties and wear resistance of the shaft and bush materials are not the same.

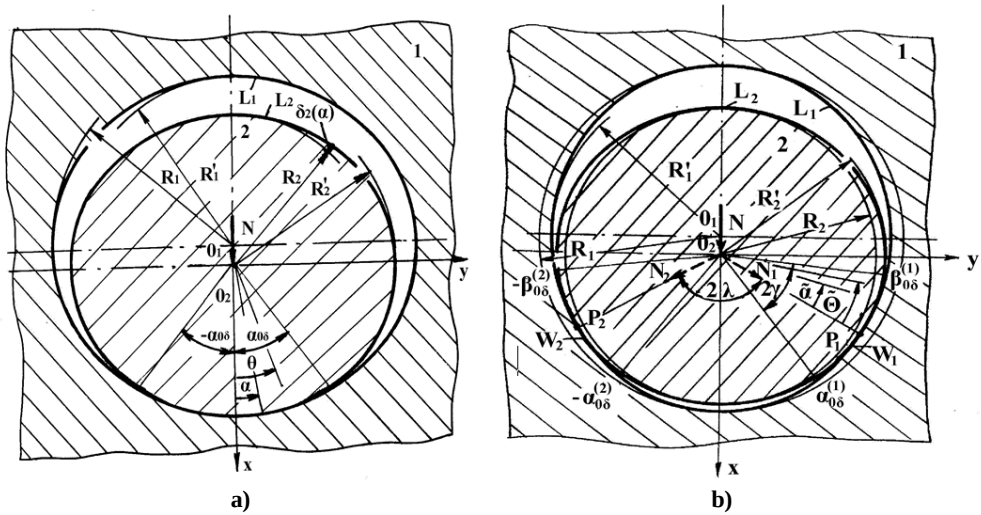


Fig. 4. Schematics of bearings with oval contours:
a) full single-area contact, b) mixed contact

The symmetric single-area contact ($\alpha_2 = 0^\circ$, $\alpha_2 = 90^\circ$ — Fig. 4a) is characterized by following parameters: contact angle $2\alpha_{0\delta}$, maximum contact pressures $p(0, \delta)$, contact zone $W = 2\alpha_{0\delta}R_2$. At the symmetric double-area contact (Fig. 4b), in the contact zones $W_1 = W_2 = 2\gamma R_2$ contact pressures occur, arriving at their maximum values $p(\lambda, \delta)$ along a force line $N_1 = N_2 = N / (2 \cos \lambda)$. Accordingly $2\gamma_1 = 2\gamma_2 = 2\gamma$, $\lambda_1 = \lambda_2$, $p(\lambda_1, \delta) = p(\lambda_2, \delta)$. The initial contact angle 2λ is unknown; it is determined according to the developed methods [15, 18, 19]. At the asymmetric double-area contact, the forces $N_1 \neq N_2$, the angles $\lambda_1 \neq \lambda_2$, the contact angles $2\gamma_1 \neq 2\gamma_2$, the contact pressures $p(\lambda_1, \delta) \neq p(\lambda_2, \delta)$ depend on the rotation angle α_2 of the shaft.

The kinetics of wear for the bearing with full single-area contact schematics (Fig. 2a) and with identical lobing of the elements was investigated in [17,19,20] using the cumulative wear model [16]. As for the mixed contact that occurs in bearings with schematics 4, 5, 6 (Fig. 2b), wear or durability can be estimated using the generalized cumulative wear model. For the simplified schematic 4, where bush 1 has a circular contour, while the shaft ovality is $\delta_2 \geq 0$, a solution is presented in [21]. The solution given below pertains to a situation when both the bush and shaft exhibit ovality with different values of deviations δ_1 and δ_2 (Schematic 4).

3. METHOD FOR SOLVING THE PROBLEM

Based on the cumulative wear model (including the generalized one), the out-of-roundness (in a more general case – lobing) of the shaft results in that the contact parameters (maximum contact pressures $p(\alpha_2, \delta)$, the contact angle $2\alpha_{0\delta} = 2\alpha_{0\delta}(\alpha_2)$ and the tribocontact angle $(p(\alpha_2, \delta, h), \alpha_{0\delta h})$ as well as the degree of wear of both the bush and shaft are the functions of the angle α_2 . In order to determine them, the discretization of shaft contour at some interval value $\Delta\alpha_2 = 1^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ is applied, where the contact parameters (contact pressures, contact zone) are taken as constant. The interval-discrete contact of bodies is separately investigated on each j -th discretization interval.

The degrees of linear wear $\bar{h}_{1\alpha_2}$ and $\bar{h}_{2\alpha_2}$ of the elements on each interval $\Delta\alpha_2$ are calculated by the formula [16, 17]

$$\bar{h}_{k\alpha_2} = \left| \frac{1}{S_h \Sigma_k} \left[{}^{1-m_k} \sqrt{\frac{L_k \tau_{k\alpha_2}}{L_k}} - t_*'' \right] - \tau_{k\alpha_2} \right|, \quad k = 1; 2, \quad (1)$$

where: $S_h = fp(\alpha_2, h) / \varepsilon_h$; $\Sigma_1 = -(1 - h'_1)$, $\Sigma_2 = (1 - h'_2)$; $L_k = B_k \tau_{k0}^{m_k} / v S_h (1 - m_k) \Sigma_k$; $\varepsilon_h = \bar{h}_1 \Sigma_1$; f is the sliding friction coefficient; v is the sliding velocity; $h'_1 = h_2 / h_1$, $h'_2 = h_1 / h_2$ denote the relative degrees of wear; $h'_1 = \frac{B_1 \tau_{10}^{m_1} (\tau_0 - \tau_{20})^{m_2}}{B_2 \tau_{20}^{m_2} (\tau_0 - \tau_{10})^{m_1}}$, $h'_2 = 1 / h'_1$; $\tau_{k\alpha_2} = \tau_0(\alpha_2) - \tau_{k0}$ – in the first rotation of the shaft, $\tau_{k\alpha_2} = \tau_0(\alpha_2, n_2) - \tau_{k0}$ – in its subsequent rotations n_2 ; $\tau_0(\alpha_2) = fp(\alpha_2, \delta)$; $\tau_0(\alpha_2, n_2) = fp(\alpha_2, \delta, h)$ – is the unit friction force; B_k, m_k, τ_{k0} are the indices of wear resistance for a selected tribological pair under experimental conditions [17, 19].

Time t_*'' of the tribological action for the angular displacement $\Delta\alpha_2$ is:

$$t_*'' = \frac{L'}{v} \Delta\alpha_2 = \frac{\Delta\alpha_2}{6n_2},$$

where $L' = 2\pi R_2 / 360^\circ$ is the friction path at shaft rotation set to 1° ; $v = \omega_2 R_2$ is the sliding velocity; $\omega_2 = \pi n_2 / 30$; n_2 is the number of shaft rotations per minute; $\bar{n}_2 = 60 / n_2$.

The mixed contact is characterized by single-area and double-area contact phases (Fig. 2). Accordingly, the initial contact half-angles ($\alpha_{0\delta}(\alpha_2)$ – single-area contact, $\gamma(\alpha_2)$ – double-area contact), when ($\alpha_{0\delta}(\alpha_2), \gamma_{\delta h}^{(s)}(\alpha_2)$) are determined in accordance with [20], using the following force balance conditions applied to the shaft (without taking into account $\tau = fp$):

$$N = R_2 \int_{-\alpha_{0\delta}}^{\alpha_{0\delta}} p(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \delta) \cos \alpha d\alpha = 4\pi R_2 E_\delta \varepsilon_\delta \sin^2 \frac{\alpha_{0\delta}(\alpha_2)}{4} - \text{single-area contact, (2)}$$

$$N_1 = N_2 = 4\pi R_2 E_\delta \varepsilon_\delta \sin^2 \frac{\gamma(\lambda)}{4} - \text{symmetric double-area contact, (3)}$$

where $N_1 = N_2 = N / 2 \cos \lambda$;

$$N_1 \neq N_2 = 4\pi R_2 E_\delta \varepsilon_\delta \sin^2 \frac{\gamma^{(s)}(\alpha_2)}{4} - \text{asymmetric double-area contact, (4)}$$

$$\text{where } N_{1\alpha_2} = N \frac{\sin(90^\circ + \lambda - \alpha_2)}{\sin(180^\circ - 2\lambda)}, \quad N_{2\alpha_2} = N \frac{\sin(-90^\circ + \lambda + \alpha_2)}{\sin(180^\circ - 2\lambda)},$$

$s = 1; 2$ – contact areas ; $\lambda_1 = \alpha_2 - (90 - \lambda)$, $\lambda_2 = -(2\lambda - \lambda_1)$ – angles that determine the direction of the forces $N_{1\alpha_2}$, $N_{2\alpha_2}$, $\lambda_1 + \lambda_2 = 2\lambda$;

To determine tribocontact half-angles $\alpha_{0\delta h}$ and $\gamma_{\delta h}^{(s)}$ the equation of the kind (2, 3) is used [2]:

$$N = 4\pi R_2 (E_\delta \varepsilon_\delta + E_h \varepsilon_h) \sin^2 \frac{\alpha_{0\delta h}(\alpha_2)}{4}, \quad N_1(N_2) = 4\pi R_2 (E_\delta \varepsilon_\delta + E_h \varepsilon_h) \sin^2 \frac{\gamma_{\delta h}^{(s)}(\alpha_2)}{4},$$

$$N_1(N_2) = 4\pi R_2 (E_\delta \varepsilon_\delta + E_h \varepsilon_h) \sin^2 \frac{\gamma_{\delta h}^{(s)}(\alpha_2)}{4},$$

where $E_\delta = e_4 \cos^2 \frac{\tilde{\alpha}}{4} / R$, $\varepsilon_\delta = \varepsilon \Sigma_\delta$, $e_4 = 4E_1 E_2 / Z$, $E = 2G / (1 + \mu)$ is Young's modulus, G, μ are the elastic modulus and Poisson's ratio,

$$Z = (1 + \kappa_1)(1 + \mu_1)E_2 + (1 + \kappa_2)(1 + \mu_2)E_1, \quad \kappa = 3 - 4\mu;$$

$\Sigma_\delta = 1 - \frac{\delta_1}{2\varepsilon} D_1(\alpha_1) - \frac{\delta_2}{2\varepsilon} D_2(\alpha_2)$; $\alpha_1 = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ, 360^\circ$ is the symmetric contact, $\alpha_1 = 0^\circ, 0 < \alpha_2 < 360^\circ$ is the asymmetric contact; $D_1(\alpha), D_2(\alpha)$ are the characteristics of out-of-roundness [18]; $\tilde{\alpha} = \lambda + \alpha, 0 \leq \alpha \leq \theta, 0 \leq \theta \leq \alpha_{0\delta}$ (Fig.4a), $\tilde{\Theta} = \lambda + \theta, 0 \leq \tilde{\alpha} \leq \tilde{\Theta}, 0 \leq \tilde{\Theta} \leq \gamma, \gamma_1^{(1)} \leq \tilde{\alpha} \leq \gamma_2^{(1)}, \gamma_{1,2}^{(1)} = \lambda \pm 0.5(\beta_{0\delta}^{(1)} - \alpha_{0\delta}^{(1)})$, $\gamma_{1,2}^{(2)} = -\lambda \pm 0.5(\beta_{0\delta}^{(2)} - \alpha_{0\delta}^{(2)})$.

When determining the angles $\alpha_{0\delta h}$ and $\gamma_{\delta h}^{(s)}$, it should be assumed that $\varepsilon_h = \sum_1^j \bar{h}_{i\alpha_2} \Sigma_1$, where $j = 360^\circ/\Delta\alpha_2$ is the number of intervals of the shaft contour discretization. Maximum contact pressures, including the degree of wear on each j -th interval during the first shaft rotation, are determined according to [17]:

$$p(\alpha_2, \delta, h) = p(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \delta) + \sum_1^F \sum_1^j p(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \bar{h}_{j-1}),$$

where for schematics 4: $F - \text{I, III, V}$ are the single-area contact phases, $F - \text{II, IV}$ are the double-area contact phases; the initial pressures $p(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \delta)$ and their wear-caused variation $p(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \bar{h}_j)$ are determined for each j -th interval:

a) for the single-area contact:

$$p(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \delta) \approx E_\delta \varepsilon_\delta \tan \frac{\alpha_{0\delta}(\alpha_2)}{2}, \quad p(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \bar{h}_j) = E_h \varepsilon'_h \tan \frac{\alpha_{0\delta h}(\alpha_2)}{2};$$

b) for the double-area contact:

$$p(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \delta) \approx E_\delta \varepsilon_\delta \tan \frac{\gamma(\alpha_2)}{2}, \quad p(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \bar{h}_j) = E_h \varepsilon'_h \tan \frac{\gamma_{\delta h}^{(s)}(\alpha_2)}{2}$$

where $E_h = e_4 \cos^2 \frac{\alpha_{0\delta h}(\alpha_2)}{4} / R_2$, $E_h = e_4 \cos^2 \frac{\gamma_{\delta h}^{(s)}(\alpha_2)}{4} / R_2$, $\varepsilon'_h = \bar{h}_{i\alpha_2} \Sigma_1$.

For the subsequent shaft rotations n_2 , the maximum contact pressures are:

$$p(\alpha_2, \delta, h) = p(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \delta) + \sum_1^F \sum_1^{jn} p(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, h_{j-1}).$$

The degree of linear wear of the bush and shaft after the n_2 rotations of the shaft is:

a) for the single-area contact:

$$- \text{ bush: } h_{1|_{\alpha=0}}^{(n_2)} = h_1^{(I)} + h_1^{(III)} + h_1^{(V)} = \sum_1^{j_{n_2}} \bar{h}_{1|_{\alpha=0}}^{(n_2)},$$

$$- \text{ shaft: } h_{2\alpha_2}^{(n_2)} = h_{2\alpha_2}^{(I)}; h_{2\alpha_2}^{(III)}; h_{2\alpha_2}^{(V)} = \sum_1^{n_2} \bar{h}_{2\alpha_2}^{(n_2)} \quad - \text{ over the contour in the zones of phases I, III, V respectively;}$$

b) for the double-area contact:

- bush:

$$h_{1a}^{(n_2)} = h_1^{(II)} + h_1^{(IV)} \quad [p. P_1' \text{ (zone of phase II) } + p. P_2'' \text{ (zone of phase IV)}],$$

$$h_{1a}^{(n_2)} = h_1^{(II)} + h_1^{(IV)} \quad [p. P_2' \text{ (zone of phase II) } + p. P_1'' \text{ (zone of phase IV)}];$$

- shaft:

$$h_{2a}^{(n_2)} = h_2^{(II)} + h_2^{(IV)} \quad [p. P_1'(\lambda_1) + p. P_2''(\lambda_2)],$$

$$h_{2a}^{(n_2)} = h_2^{(II)} + h_2^{(IV)} \quad [p. P_2'(-\lambda_2) + p. P_1''(-\lambda_1)].$$

The single-area and double-area contact zones are described by the angles α_{2*} based on $\Sigma_\delta = 1 - (\delta_1/2\varepsilon)D_2(\alpha_1) - (\delta_2/2\varepsilon)D_2(\alpha_2) = 0$, where $\alpha_1 = 0^\circ$, $0^\circ \leq \alpha_1 \leq 360^\circ$. For schematics 4, $D_1 = 1 + 3\cos 2\alpha_1$, $D_2 = 1 - 3\cos 2\alpha_2$. At the angles α_{2*} , the initial contact pressures are $p_{\min} = 0.6N/R_2$ [10].

The above mentioned cumulative wear model can be used for sliding bearings, working in conditions of dry, mixed and boundary friction at the abrasive, adhesive, oxidative wear, where mechanical contact interaction of bush and shaft with different sliding friction coefficient appears. It is supposed that bearing is running in conditions of constant temperature and constant specific friction forces. Thermal deformation of bodies as well as motion dynamics is not taken into account in this case.

4. NUMERICAL SOLUTION

The input data for slow, heavily-loaded bearing, working at boundary lubrication rate, included: $N = 0.1$ MN; $R_2 = 50$ mm; $v = 0.0628$ m/s; $f = 0.04$; $\varepsilon = 0.21$ mm; $\delta_1 = (0; 0.05)$ mm, $\delta_2 = (0; 0.05; 0.1; 0.15; 0.2)$ mm; $\delta_1 + \delta_2 \leq \varepsilon$; $\Delta\alpha_2 = 10^\circ$; $n_2 = 12$ rpm; $h_{1*} = 0.3$ mm; $\Sigma_1 = -(1 - h_1')$, $E_1 = 1.1 \cdot 10^5$ MPa, $\mu_1 = 0.34$ (bronze OCS 5-5-5); $E_2 = 2.1 \cdot 10^5$ MPa, $\mu_2 = 0.3$ (steel 35, hardening + tempering); $B_1 = 4.75 \cdot 10^9$, $m_1 = 0.85$, $\tau_{10} = 0.1$ MPa; $B_2 = 5.46 \cdot 10^9$, $m_2 = 0.66$, $\tau_{20} = 0.08$ MPa. The arbitrary parameters of bearing run (N, n_2, f, v), its materials (E, μ, B, m, τ_0) and details ovality (δ_1, δ_2) values can be selected.

As the result of the exact problem numerical solution, which is achieved with the help of developed software, the regularities of variations of bearing durability were determined (of the shaft rotations n_{2*} at h_{1*}) depending on ovality of δ_1 and δ_2 (Fig. 5). It stands to mention that contour discretization interval decrease from 10° to 1° results in approximately 1.035 times increase of bearing calculated durability. At the same time the evaluation length is increasing tenfold. That's why to significantly decrease calculating time it is chosen that $\Delta\alpha_2 = 10^\circ$.

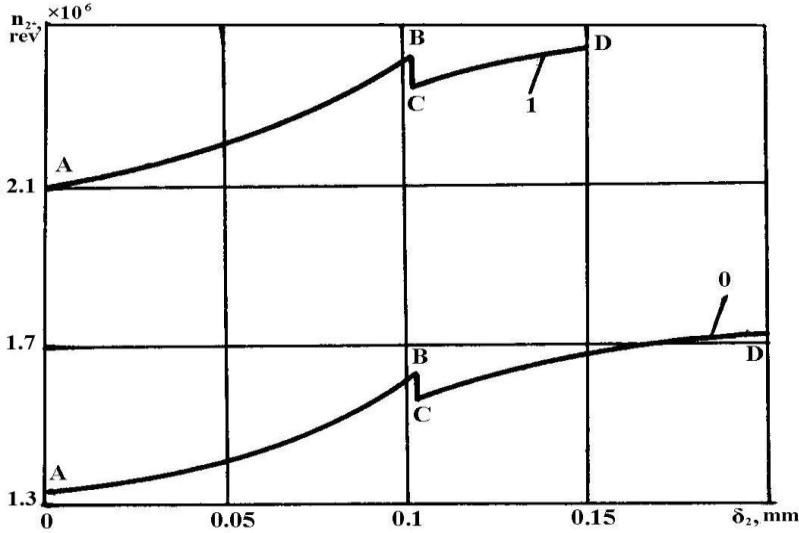


Fig. 5. Bearing durability at variations of ovality of its elements: 0 – $\delta_1 = 0$; 1 – $\delta_1 = 0.05$ mm

With an increase in shaft ovality, bearing durability also increases in the single-area contact zone (AB). At point B where the single-area contact changes into double-area contact, the bearing durability decreases in an irregular manner, then it increases again in the double-area contact zone (BD). The minimum bearing durability is related to a circular cross section of the shaft. This fact can be attributed to the character of variations of the maximum contact pressure when the shaft with ovality rotates, which will be discussed further on in the paper. The bearing durability definitely increases with an increase in ovality of the bush.

The variation of the maximum contact pressures at $\delta_1 = 0$, after an acceptable degree of wear of the bush $p(\alpha_2, \delta, h)$ is shown in Fig. 6 and 7. Accordingly, Fig. 6 shows the variation of the maximum contact pressures for the single-area contact (curves 0; 1; 2), while Fig. 7 illustrates this variation for the mixed contact (curves 3; 4).

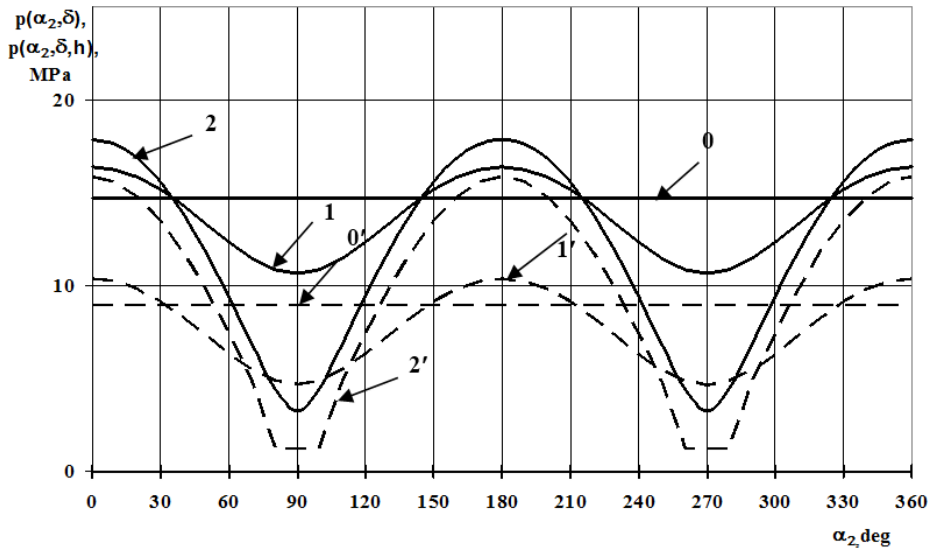


Fig. 6. Dependence of the maximum contact pressures on the angle of rotation of the shaft with ovality: 0 – $\delta_2 = 0$; 1 – $\delta_2 = 0.05$ mm; 1 – $\delta_2 = 0.1$ mm; 3 – $\delta_2 = 0.15$ mm; 4 – $\delta_2 = 0.2$ mm; full lines – $p(\alpha_2, \delta)$, dashed lines – $p(\alpha_2, \delta, h)$

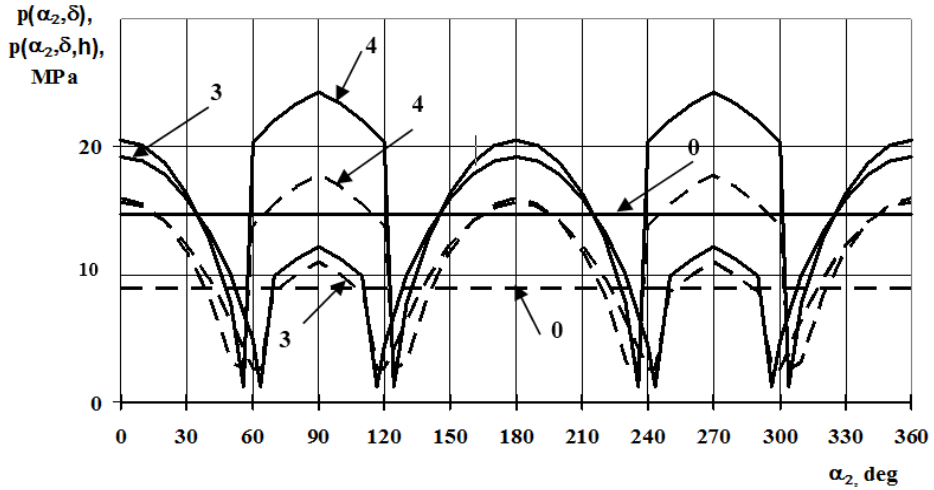


Fig. 7. Dependence of the maximum contact pressures on the angle of rotation of the shaft with ovality: 0 – $\delta_2 = 0$; 1 – $\delta_2 = 0.05$ mm; 1 – $\delta_2 = 0.1$ mm; 3 – $\delta_2 = 0.15$ mm; 4 – $\delta_2 = 0.2$ mm; full lines – $p(\alpha_2, \delta)$, dashed lines – $p(\alpha_2, \delta, h)$

In the single-area contact ($\delta_2 = 0; 1; 2$ mm) at increased shaft ovality δ_2 , the pressures slightly increase. When the shaft rotation angle is changed, the pressures cyclically change their values, from minimum to maximum. In the mixed contact (single-double-single-area contact), the cooperation between the shaft and the bush is more complex. The computation results demonstrate that in the single-area contact an increase in shaft ovality leads to an increase in the pressures $p(0, \delta)$; at shaft rotation, however, the pressures decrease to $p_{\min} = 0.6N/R_2$ much faster than is the case in the above-discussed full single-area contact. Further on, in the double-area contact, these pressures increase rapidly (Fig. 7).

Analyzing the regularities of variations of the maximum contact pressures that are caused by wear (Fig. 6), it can be seen that at $\delta_2 = 0$ and $\delta_2 = 0.05$ mm the variation is the highest (curves 0; 1). In the case of ovality $\delta_2 = 0.15$ mm, the differences between the pressures $p(\alpha_2, \delta)$ and $p(\alpha_2, \delta, h)$ are much smaller (curves 4). This can be explained by the fact that shaft ovality in this case is higher than the limiting value $\delta_2 = 0.104$ mm, when the single-area contact changes into the double-area contact. An increase in shaft ovality leads to the double-area contact where the differences between the initial and post-wear pressures increase together with the shaft ovality increase (curves 3; 4).

The contact parameters for $\alpha_2 = 0$ are listed in Table 1. It should be emphasized that an increase in ovality δ_2 of the shaft leads to an increase in the maximum initial contact pressures in the single-area contact zone, while an increase in ovality δ_1 of the bush results in their decrease.

Tab 1. Maximum contact pressures (initial and post-wear h_{1*}) and contact angles at $\alpha_2 = 0$

δ_2 , mm	$\delta_1 = 0$			$\delta_1 = 0.05$ mm			$\delta_1 = 0.1$ mm		
	$p(0,\delta)$ MPa)	$2\alpha_{0\delta}$ (deg)	$p(0,\delta,h)$ (MPa)	$p(0,\delta)$ (MPa)	$2\alpha_{0\delta}$ (deg)	$p(0,\delta,h)$ (MPa)	$p(0,\delta)$ (MPa)	$2\alpha_{0\delta}$ (deg)	$p(0,\delta,h)$ (MPa)
0	14.71	9.92	8.95	10.65	13.72	3.66	3.24	45.78	2.5
0.1	17.87	8.17	15.81	14.71	9.92	9.98	10.65	13.72	7.05
0.2	20.55	7.10	15.96	—	—	—	—	—	—

5. CONCLUSIONS

1. The numerical results demonstrate that technological ovality of its elements affects two basic parameters of a plain bearing: its durability and contact pressures. Depending on the size of contour deviations of the elements, a single-area or single-double-single-area contact occurs. Irrespective of the type of contact, its durability increases at $\delta_2 > 0$ and $\delta_1 \geq 0$ compared to a bearing with no ovality.
2. It has also been found that the minimum durability of a bearing for the single-area contact occurs at $\alpha_2 = 0$, where the pressures $p(0,\delta)$ have the highest values (Fig. 6). The bush undergoes the maximum degree of wear at $\alpha = \alpha_1 = 0$. In contrast, the bush does not wear at this point at all in the double-area contact; it only wears in some regions of its contours (Figs. 3; 4b), which causes an increase of bearing durability (Fig. 5). In the single-area contact zones, the shaft wears over the contour, while in the double-area contact – it wears at points P'_1 , P''_1 , P'_2 , P''_2 (Fig. 3) located by the angle 2λ .
3. The maximum contact pressures in the single-area contact (Fig. 6) when the shaft exhibits ovality are lower during most of its rotation than it is the case at $\delta_2 = \delta_1 = 0$. The greater the difference between the pressures $p(\alpha_2, 0)$ and $p(\alpha_2, \delta)$, the higher the increase in durability of the bearing (Fig. 5). As for the double-area contact, an increase in δ_2 results in an

increase in the area of contact (Fig. 7), which leads to a decrease in the single-area contact zone and, consequently, enhanced durability of the bearing (Fig. 5).

4. It has been established qualitative and quantitative regularities of elements' ovality influence on bearing durability (Fig. 5) and contact pressures (Fig. 6, 7, Table 1).
5. The presented generalized cumulative model of sliding bearing wear can be used for different kinds of friction and fatigue wear (abrasive, adhesive and oxidative), if characteristics of materials wear resistance B, m, τ_0 for selected working conditions are determined.

REFERENCES

- [1] ANDREIKIV A., CHERNETS M.: *Assessment of the Contact Interaction of Machine Parts in Friction*, Naukova Dumka, Kiev, 1991.
- [2] HORYACHEVA I., DOBYCHIN N.: *Contact Problems in Tribology*, Mashinostroenie, Moscow, 1988.
- [3] KOVALENKO E.: *On the numerical analysis of wear of the shaft-bush coupling*, Mekh. Tverd. Tela, 1982, no. 6, pp. 66–72.
- [4] KRAGELSKII N., DOBYCHIN M. and KOMBALOV V.: *Foundations of the Numerical Analysis of Friction and Wear*, Mashinostroenie, Moscow, 1977.
- [5] KUZMENKO A.: *Methods for the Numerical Analysis of Wear and Reliability*, Podillya Technological University, Khmelnytskyi, 2002.
- [6] TEPLYI M.: *Contact Problems for Zones with Radial Limits*, Wysshaya shkola, Lvov, 1983.
- [7] TEPLYI M.: *Evaluation of the Contact Parameters and Wear in cylindrical Sliding Supports*, Treniye i Iznos, 1987, no. 6, pp. 895–902.
- [8] USOV P.: *Internal Contact of Cylindrical Solids with Similar Radiuses Under Their Surface Wear*, Treniye i Iznos, 1985, no. 3, pp. 404–414.
- [9] ZWIEZYCKI W.: *Reliability Prediction of Machine Details Under Wear*, ITE, Radom, 1999.
- [10] SOROKATYY R.: *Generalization of triboelements method for the wear processes modeling of sliding bearings*, Problems of Tribology, 2007, no. 2, pp. 36–45.
- [11] SOROKATYY R.: *Solving of wear and contact problems by triboelements method in ANSYS environment*, Problems of Tribology, 2007, no. 3, pp. 9–17.
- [12] KOLMOGOROV L., KHARLAMOV V., KURILOV A., PAVLISHKO S.: *Friction and wear model for a heavily loaded sliding pair. Part II. Application to an unlubricated journal bearing*, Wear, 1996, vol. 197, pp. 9–16.
- [13] REZAEI A., OST W., PAEPEGEM W., DEGRIECK J., DEBAETS P.: *Experimental study and numerical simulation of the large-scale testing of polymeric composite journal bearings: two-dimensional modeling and validation*, Wear, 2011, vol. 270, pp. 431–438.
- [14] REZAEI A., PAEPEGEM W., DEBAETS P., OST W., DEGRIECK J.: *Adaptive finite element simulation of wear evolution in radial sliding bearings*, Wear, 2012, vol. 296, pp. 660–671.
- [15] CHERNETS M.: *Methodology of Evaluation of the Characteristics of Contact and Prediction of the Durability of Cylindrical Sliding Tribosystems with Small Out-of-Roundness of the Contours*, Problemy Tribologii, 2000, no. 1, pp. 14–22.

- [16] CHERNETS M., LEBEDEVA N.: *Assessment of Wear and Durability of Plain Bearings in the Presence of Ovality of the Contours of their Elements in the Cumulative Model*, Problemy Tribologii, 2005, no. 4, pp. 114–120.
- [17] CHERNETS M., ANDREIKIV A., LEBEDEVA N.: *A Model for the Evaluation of Wear and Durability of a Plain Bearing with Small Out-of-Roundness*, Materials Science, 2009, no. 2, pp. 279–290.
- [18] CHERNETS M.: *A Contact Problem for a Cylindrical joint with Technological Faceting of the Contours of its Parts*, Materials Science, 2009, no. 6, pp. 859–868.
- [19] CHERNETS M.: *Contact problems of cylindrical connections with small contours lobing at the wear*, Drogobych State Pedagogical University, Drogobych, 2009.
- [20] CHERNETS M., ZHYDYK V.: *Generalized cumulative model of wear kinetics research of sliding bearing. Part 1. Linear and cumulative model*, Problems of Tribology, 2012, no. 4, pp. 11–17.
- [21] CHERNETS M., ZHYDYK V.: *Generalized cumulative model of wear kinetics research of sliding bearing. Part 2. Generalized and cumulative model*, Problems of Tribology, 2013, no. 1, pp. 6–15.

*designing, optimization, synthesis, heuristic algorithm,
search range, technological equipment, work process*

*Bohdan PALCHEVSKYI**

CAD AUTOMATE PROCEDURE OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

Abstract

It is shown the features of automation of basic design operations and observed principles of theirs connecting in integrated CAD. Examples of the automated implementation of project procedures are given.

1. INTRUDUCTION

Problems arising in the early stages of the designing of technological machines are associated with the solution of semistructured tasks that hardly formalized and therefore are hardly amenable to automation within the existing automated design methodology. Thus, the main defect of modern CAD system is a lack of formalized human – machine methods of designing, especially in the early stage and lack of system transitions between different stages of designing. These problems are solved using a system of analysis for the association heuristic and mathematical procedures.

2. SYSTEM APPROACH IN CAD

System approach is a study principle in which considering the projected technical system, i.e. technological equipment in a whole, but not its separate subsystems. Human activity in designing of such a technological system is targeted, because it is seen as a means of achieving its goals by ensuring a given operation. For technological machines, this problem is formulated as follows: to ensure the right quality of products with a given productivity and the lowest cost on given production conditions during machine functioning.

The task of a system concept is optimization of the whole system, but not an increasing of efficiency of its constituent subsystems.

* Honored Worker of Science and Technology of Ukraine, Lutsk National Technical University, Ukraine

To ensure the functioning of a given technological system also needed properly connect the elements among themselves, i.e. to establish specific links between elements – **relation**. The set of necessary and sufficient, to achieve the goal, relations between elements of the system is called **a system structure**. In the second method of designing – **variant-design** is carried out by distinguishing variant from the generalized structure that describes the class of designed objects usually presented in the form of AND-OR-graphs.

If the problem arises during designing of technological machine through its layout of elements on the set rules, the **searching design** scheme starts to work. In the third method (searching) of designing technological machine becomes a complex task with a variable design object (product – work process – the structure of the machine). It can be divided into separate simple tasks, to create subsystems of automated design and combine these subsystems into an integrated system-aided design – CAD. In the synthesis algorithms there are blocks of formation of the next variant of its evaluation and decision-making. The selection of completed structures is used when rating of intermediate variant is complex, so the completed structures of objects should be created in a unit of formation as, for example, it can be made for the layout of the technological machine. The set capacity of possible variants can be so large that the whole selection is impractical. In such cases, the selection may be only partial, based on approximate (heuristic) algorithms.

3. MODELING FEATURES IN THE SEARCHING DESIGN

The most complex method of designing is searching design, which includes procedures of analysis and synthesis, simulation and optimization, choice-making etc. The main purpose of the design is to create model of not yet existing object by systematic purposeful activity, which will ensure the functioning of the set. It is needed to build system of models with which you can compile, transmit and improve the results of such activities.

The detailed design of technological machine is a detailed model of which is formed by sequential processing and converting the output common model, that is given the terms of reference (TOR). For a task designing it is needed to build system models that can help to detail, to summarize and to transfer the project design step by step. Many of these problems of designing technical systems can be formalized well enough, reduced to mathematical models that allow one to put and solve optimization problems.

4. CAD AUTOMATE PROCEDURES OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

There are some widely known procedures (operations) that are targeted in any project **P** activities: modeling, information transfer in time and space, receiving new information. With automated design the major advantage is availability of many alternatives of design solutions. Then in the design, there are two very important steps:

- 1) creation of alternative sets from which one have to choose;
- 2) to determine objectives for the achievement of which the choice is made.

Thus we assume that the goals defined in such detail that criteria for evaluation and comparison of all alternatives already exist. But the problem is that to find the best for the given conditions in the output set, i.e. optimal alternative. That is, we should know criterion for evaluating alternatives, way of comparing options and finding the best of them. So let's consider another project operation, which necessarily included to the design process – the choice of alternative from obtained at various stages of design options of design solutions.

The decision-making is an action over alternative sets due to which subset of selected alternatives is received. It is possible to reduce the alternative sets if there is a way to compare the alternatives with each other and determine the best. The choice can be described by another in way – through **language binary relations**. Its larger, in comparison with criterion language, universality is based on consideration of the fact that in reality is often difficult or impossible to assess alternative taken separately; but when viewing it in isolation way not in pair with another option, you can specify which one is better.

Thus, the basic assumptions of languages binary relations are the following:

- separate alternative is not measured, that is criteria function is not carried out;
- for each pair of alternatives (x, y) once you may find out, that one of them dominates the other or they are equal;
- relation of benefit in any pair of alternatives does not depend on the other alternatives offered for selection.

4.1. Instances of automation procedure of preceding binary relation

To determine the sequences of forming the elements of product we use procedure of preceding binary relations. The input source is information about product design – individual detail – in its structural model (Fig. 1, Table 1).

Tab. 1. Dimensions of swivel pad, mm

Marking surfacesDTE	Surface characterization			Relation with the base surface				Plan of surface processing
	R _a	IT	Geometric accuracy	Processed		Unprocessed		
				dimen- sional	geome- trical	dimen- sional	geome- trical	
1	6.3	1000	Alignment tolerances 0.05 mm			H ₁ , 12±0.5		roughing
2	3.2	1200				H ₂ , 14±0.6		roughing
3	6.3	600		9→15 ^{+0.6}				roughing
4K	2.5	200		5→16 _{-0.2}				roughing finishing
5	3.2	700		12→25 ^{±0.3}				roughing
6	3.2	200		5→28 ^{+0.2}				roughing
7K	2.5	200		4→60 ^{±0.4}				roughing finishing
8	6.3	600		9→15 ^{+0.6}				roughing finishing
9K	3.2	160		2→40 _{-0.16} 1→30 ^{±0.1}				roughing finishing
10	6.3	300		2→17 ^{+0.3}				roughing
11	6.3	400		13→21 ^{±0.5} 1→80 ^{+0.4}	Parallelism tolerances 0.1 mm			roughing
12	3.2	600				H2, 79 _{-0.6}		roughing
13	6.3	400		12→19 ^{±0.2}				roughing
14	6.3	1600		1→74 ^{±0.8}	Parallelism tolerances 0.1 mm			roughing

In the most general case, drawing of details includes several kinds of dimensions that link DTE at various stages of processing in detail:

- H dimensions link raw DTE and their surfaces (workpiece size);
- P dimensions link DTE and surface of one phase of processing, for example, prefinished;
- coordination dimensions of relation link surfaces of raw DTE with prefinished DTE surfaces and those in turn – with finished DTE surfaces.

To automate the process of determining the order of execution DTE was created **PreMat** program, which automates the process of analysis of preceding binary relations between DTE (Fig. 3).

		Work surfaces			Surfaces to be processed														Processing stages						
					Rough outline										Finished outline										
		H1	H2	H3	M1	M2	M3	M4	M5	M6	10	11	12	4K	7K	Σ	0	I	II	III	IV	V	VI		
Surfaces to be processed	H1															0	H1								
	H2															0	H2								
	H3															0	H3								
	M1	1		1												2	0	M1							
	M2				1							1				2	2	0	M2						
	M3											1				1	1	0	M3						
	M4						1			1						2	2	2	0	M4					
	M5						1			1						1	2	2	1	0	M5				
	M6				1											1	1	0	M6						
	10				1											1	0	1	10						
11				1	1					1					3	3	1	0	11						
12		1											1		1	0	12								
4K							1					1			2	2	1	1	0	0	4K				
7K								1					1		2	2	2	2	1	1	0	7K			

Fig. 2. Preceding binary relations between swivel pad surfaces (see fig. 1)

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11	E12	E13	E14	0	I	II	III	IV	V	
E1															0	E1					
E2															0	E2					
E3															0	E3					
E4	1		1												2	0	E4				
E5				1							1				2	2	0	E5			
E6												1			1	1	0	E6			
E7						1			1						2	2	2	0	E7		
E8							1		1						2	2	2	1	0	E8	
E9				1											1	1	0	E9			
E10					1										1	1	0	E10			
E11				1	1					1					3	3	2	0	E11		
E12		1													1	0	E12				
E13							1						1		2	2	1	1	0	E13	
E14								1					1		2	2	2	2	2	0	E14

Fig. 3. Preceding binary relations matrix with steps of preceding I–V (see fig. 3: E1–E3 = H1–H3; E4–E9 = M1–M5)

Reflection of formation DTE swivel pad (operations or conversions) is shown in a graph form of processing sequence (Fig. 4).

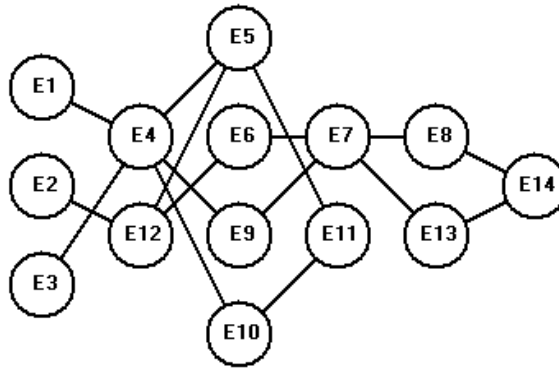


Fig. 4. Reflection of processing sequence of swivel pad (left to right)

5. THE AUTOMATED PROCESS OF STRUCTURE SYNTHESIS OF TECHNOLOGY EQUIPMENT THROUGH THE USAGE OF "AND-OR GRAPH"

This graph includes nodes that correspond of necessarily included elements, and nodes containing alternative element. For the optimization synthesis should be used certain quality indicators in the formation of graph. In such ambiguous graph the computer selects requirements that correspond to each element and forms the technical description of the system.

A method is given for technical systems that have lots of modifications, but on a physical process, that is realized, a little differ among themselves. As we see, processing lines and multistage machines refer to such technical systems.

If some elements are detailed not enough, then node of the third level is made for them, where FM features elaborate.

Assessment of options based on the calculation of indices *and*-nodes using node indices of the second level (elements and features that are united by *and*-node. In this case, such calculation options are possible:

In developed software [4] searching of technical solution starts with narrowing of deleting search area of *and-or*-tree choiceless nodes (they are included in the technical solution automatically) and nodes that do not meet TOD. Then acceptable solutions are chosen on shortened *and-or*-tree.

Then all nodes of *and-or*-tree in order from the last to the root are reviewed. Then the index options with TOD date and among themselves are compared. The algorithm works on the principle of full sorting of possible (defined by compatibility tables) combinations of elements and their features.

6. CONCLUSIONS

Improvement of computer-aided design system for improving design decisions has ways:

1. Optimization synthesis of technical solution is focused on the full automation of well-formalized problems. Optimization reveals considerable reserves of improvement through the new perspectives of developing principle schemes and structure of technological equipment.
2. Creating a knowledge base and expert systems which acquire experience of experts and, indeed, eventually replace experts. Intellectual property of expert systems can be realized thanks to the received from the person (expert) knowledge in a particular subject area in the form of facts (objective knowledge) and heuristic methods (empirical rules), which bring database and knowledge base into machine.

REFERENCES

- [1] DIETRICH J.: *Designing and design*. Systemic approach, 1981, p. 456.
- [2] KOLESNIKOV A.: *Methodology and technology of solving difficult problems by methods of functional hybrid intellectual systems*. [in:] Kolesnikov A., Kirikov I, M.: IPI RAN, 2007, p. 387.
- [3] PALCHEVSKIY B.: *Information technology of technological equipment designing*. Lutsk NTU Editing and Publishing Department, 2012, p. 572.
- [4] PALCHEVSKIY B.: *Designing of automated optimization synthesis of technical objects structure of using "and-or" trees*. Technological complexes, 2011, №2 (4), pp. 23–29.

*Olena KHRESTYANPOL**

PROJECT PROCEDURE INTEGRATION OF FMS STRUCTURE SYNTHESIS

Abstract

The stages of computer integrated design of flexible packaging production systems are considered.

1. INTEGRATION OF FMS STRUCTURE

The effectiveness of any complex system, which includes almost all of automated packaging lines, largely depends on felicity of choice of main, auxiliary and transport equipment and its layout. Search the optimal structure of FMS packaging, which in most cases is created on the basis of serial technology and transport equipment is the decisive stage of the creation of new technology. Therefore, in the packaging design of FMS there is a problem of selection and functional coordination of main and transport equipment that will perform certain complex packaging process transactions with a given performance. Among the numerous of possible options received at generation step, the integral optimization criterion is inserted at the evaluation stage, which would determine the most effective option [1].

Therefore, to evaluate variant structure was chosen integral indicator of function efficiency of the automated line, namely the cost per unit. This indicator assesses both specifications of the automated line (performance, reliability, durability, quality of products) and economic (cost of equipment, energy and complexity of manufacture of the product, etc.). The most effective option is structure variant of automated line that has the lowest numerical value of production cost.

Software implementation of optimal structure of automated packaging line search is based on a modular structure, i.e. consists of some relatively independent parts – a design procedures. It includes the following modules: user interaction module, deleting module of line structure, search optimal structure module, product cost calculation module and database module.

* Lutsk National Technical University, Ukraine

Scheme of structural links between modules – the program procedures is shown in Fig. 1.

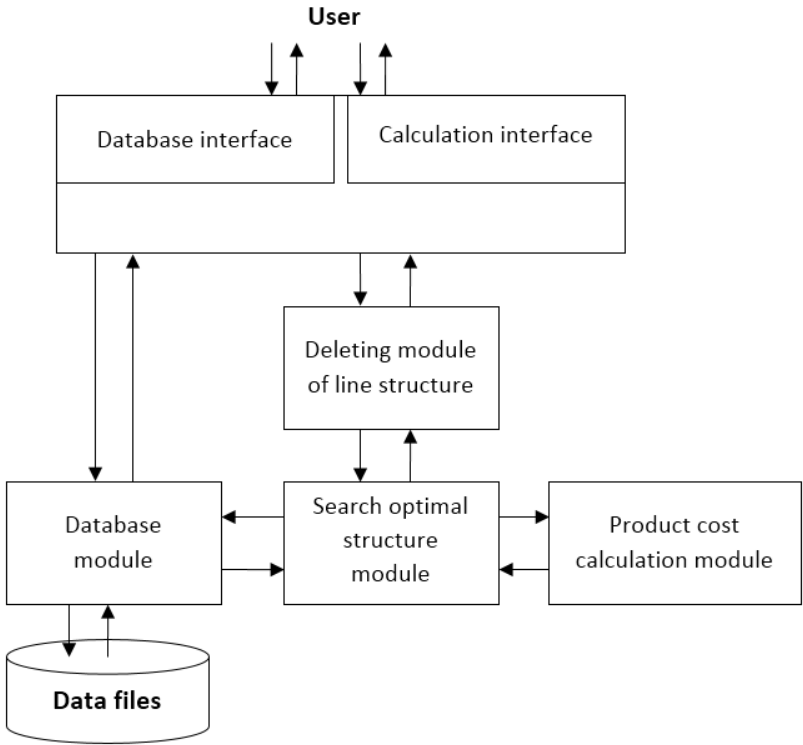


Fig. 1. Scheme of intermodule interaction in the program

User interaction module can be divided into interface to a database that allows users to view, edit, and delete data from a database and monitors correct input and calculation interface that allows the user to set all the necessary search parameters and displays the results.

Deleting module structure received input parameters from calculation interface module of interaction with the user, based on the results of the search optimal structure module of the automated line, build layout structure of the automated line.

Search optimal structure module – it actually is software implementation of the method of "branches and boundaries". Moreover, he turns to work with database module and to calculate the reduced unit costs at every step – the relevant module. Optimization of FMS is done by generating the set of all possible structural options, which imposed certain restrictions, for example, set performance and their evaluation and selection criteria for the cost of production. Was used the method of "branch and bound".

Variations of automated line structure are described in a tree-form with ramifications for each operation that is performed in an automated line. It is sed Line array containing a list of equipment and calculating unit production cost accumulated since the start of manufacturing operations to total Wytr. Each branching threads are choices of equipment included in an automated line, and its level determines the operation performed. The mechanism of optimization is to find the shortest path from the highest to the lowest level, and at every turn the value of accumulated cost production is determined. All found variants is memorable. If at some level accumulated production cost will be higher than in already found variant, then this branch and all its subsidiary branches are not considered.

In the first step of the equipment model is chosen to perform the first operation, then the second and the rest of the operations. Then it is determined for the first version of the structure that satisfies the given constraints of performance, the value of production cost. This value of production cost is taken as the maximum. Then the search is conducted that at each branching already accumulated of production cost with the highest production cost was compared. If the resulting value is less than the maximum, then the search continues, but if not, then return to the previous branching and switch to the other branches of trees are carried out. In case when search has reached the end of a tree, the maximum production cost value assigned to this option, and then again repeat the previous steps to bypass all the branches of the tree.

Schematic module flowchart that implements the method of branches and boundaries can be represented as follows (fig. 2).

Product cost calculation module. To assess the structure of automated line integral index of efficiency of its operation is chosen, that is production cost w . This indicator assesses both technical specifications of the automated line (productivity, reliability, durability, quality of products) and economic (cost of equipment, energy and complexity of manufacture of the product, etc.).

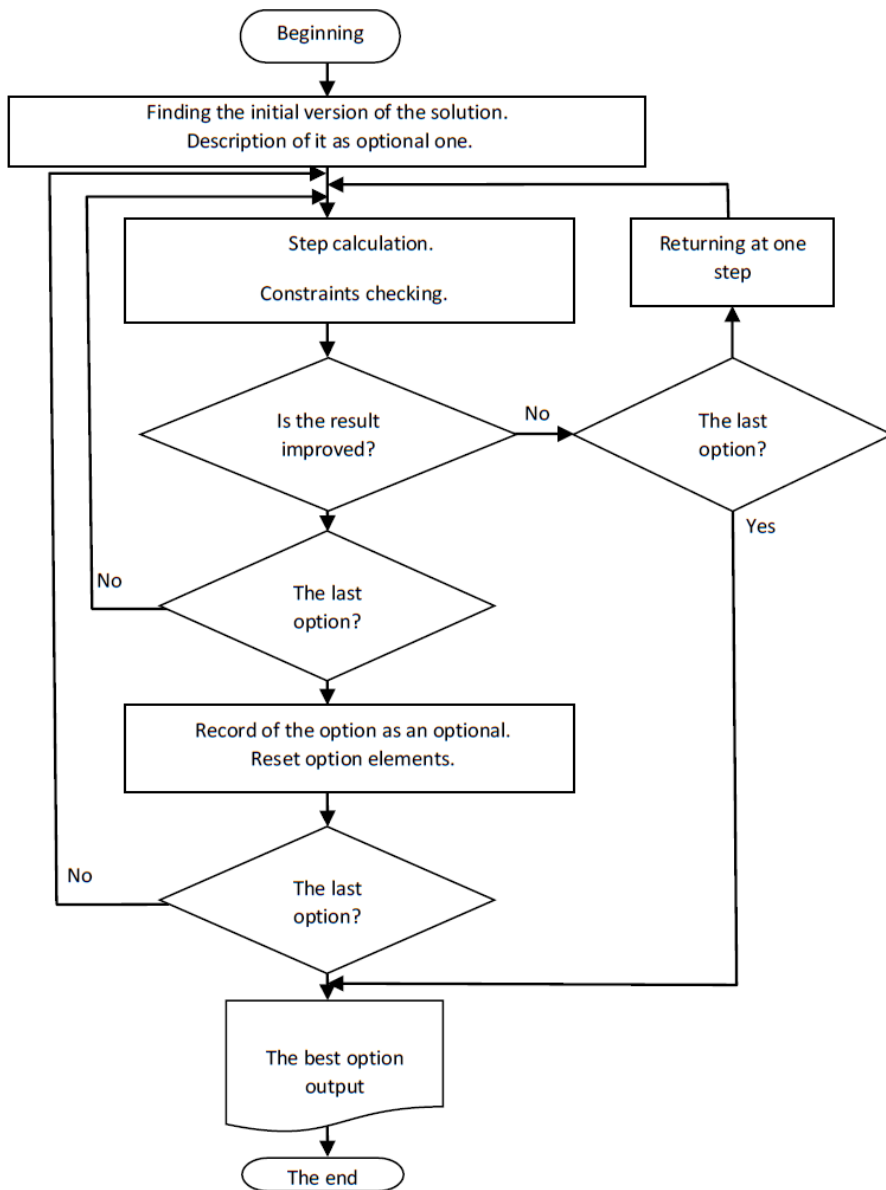


Fig. 2. The block diagram of directed finding of the optimal variant of FMS by branch and bound

The most effective option is considered automatic line structure that will provide the lowest numerical value of production cost w . Production cost w is determined by:

$$w = \sum_{i=1}^M \left(1,15 \cdot T \cdot a_i \cdot S_p + \frac{0,12 \cdot A_i}{N_p} \cdot a_i \right) + 0,15 \sum_{i=1}^M \frac{a_i \cdot A_i}{N_p} \quad (1)$$

where: N_p – annual program of product output,
 S_p – per minute wage for worker, grn./min.,
 A – balanced value of equipment, grn.,
 a – the number of parallel operating equipment during one operation,
 T – duration of duty cycle,
 M – the number of work places (technological operations) in a line.

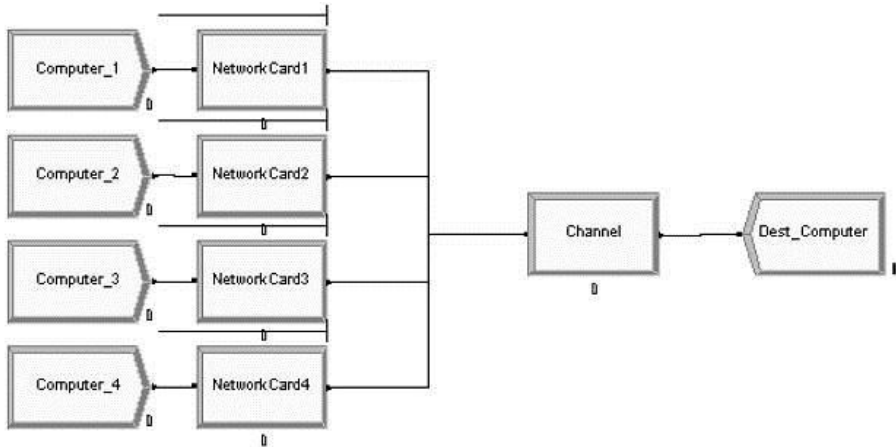


Fig. 3. Model in Arena

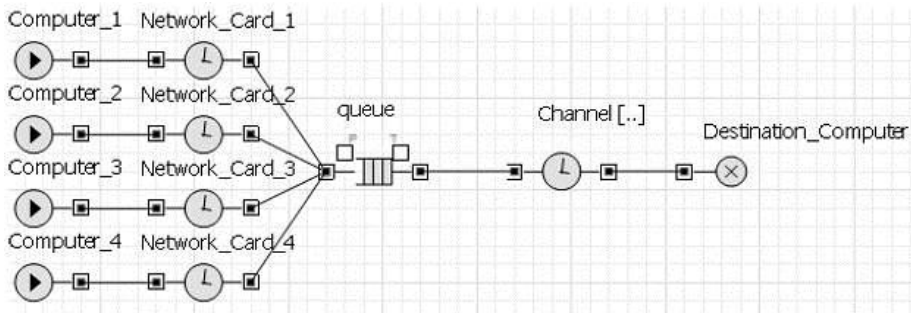


Fig. 4. Model in AnyLogic

The results of using these software packages simulation modeling can serve to improve flexible manufacturing systems, which are based on combining diverse technological equipment with different levels of automation.

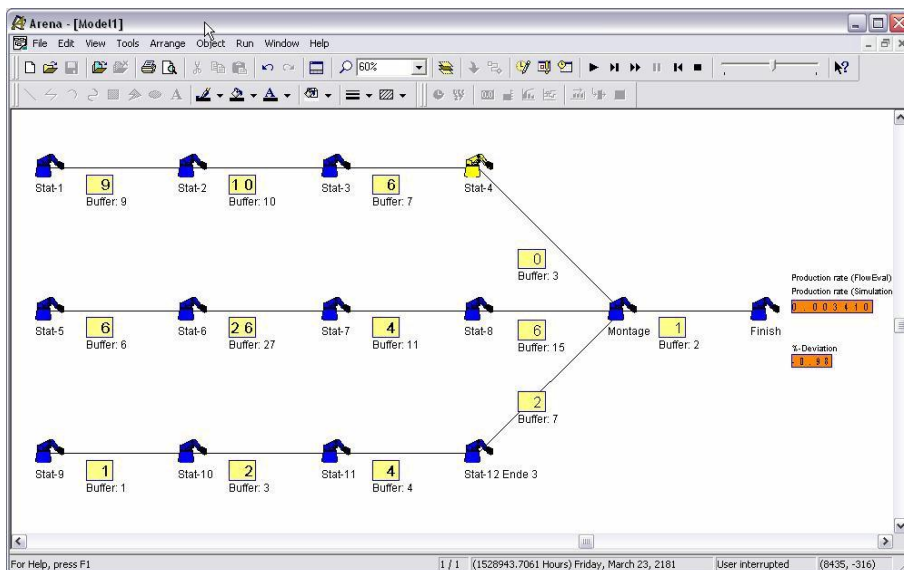


Fig. 5. The window modeling in the environment Arena

2. CONCLUSIONS

1. The main drawback of modern CAD FMS – is the lack of formalized system transitions between different phases of design, namely between the stages of functional and structural synthesis.
2. The software is developed to minimize readjustment time of FMS machine.

REFERENCES

- [1] KRESTIANPOL O.: *Information software for design of flexible manufacturing systems (FMS) of packaging*. Technological complexes, №2 (8), 2013, p. 169–176.
- [2] PALCHEVSKIY B., SWIC A., PAVLYSH V., BANASZAK Z., GOLA A., KRESTIANPOL O., LOZYSKIY V.: *Information support for integrated flexible manufacturing systems*. Lutsk, Vezha-Print, 2014, p. 344.
- [3] KRESTYANPOL O.A.: *Construction principles of FMS of packaging production*. Technological complexes, № 1, 2010, p. 152–159.
- [4] KRESTYANPOL O.A., LASCH I.V.: *Difficulty of material flow products in processing lines*. Scientific notes, Interuniversity collection, Issue 28, Lutsk, 2010, p. 274–277.
- [5] KRESTYANPOL O.A.: *Designing features of flexible production systems of packaging production*. Technological complexes, 2011, № 1(3), p. 128–133.

- [6] KRESTYANPOL O.A.: *The development of design methods of flexible packaging production systems*. Technological complexes, № 1,2(5,6), 2012, pp. 244–248.
- [7] KRESTIANPO O.: *Systematic and Structural Approach to the Formation of Flexible Manufacturing Systems for Packaging*. Computer Aided Production Engineering, Politechika Lubelska, 2013, pp. 9–19.
- [8] KRESTIANPOL O.: *Wsparcie informacyjne projektowania elastycznych systemów produkcji opakowań*. IV Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna – Wiedza i zarządzanie przedsięwzięcia w inżynierii produkcji «INTELTRANS 2013», Krakow, pp. 109–120.
- [9] KRESTYANPOL O.A.: *Features of flexible production systems of packaging production*. Materials of international scientific and technological conference – Automation: problems, ideas and solutions, Sevastopol, 5–9 September 2013.
- [10] KRESTYANPOL O.A.: *Functional model of flexible production system*. Applied Computer Science, Vol.10, No 2, 2015.
- [11] KRESTYANPOL O.A.: *Functional modeling of flexible manufacturing systems*. Materials of Ukrainian s-t conference "Modern technologies of industrial complex", Issue 2, Kherson, Publisher KHNTU, 2015, pp. 91–95.
- [12] BANASZAK Z.A., Zaremba M.B.: *Project-driven planning and scheduling support for virtual manufacturing*. Journal of Intelligent Manufacturing, Vol.17, No 6, 2006, pp. 641–651.
- [13] ŚWIC A., MAZUREK L.: *Modeling the reliability and efficiency of flexible synchronous production line*. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, 2011, 4 (52), p. 41–48.
- [14] BANASZAK Z.: *Systemy informatyczne w zarządzaniu produkcją*. [in:] Zawila-Niedzwiecki J. (red.), Rostek K., Gasirkiewicz A.: Informatyka Gospodarcza, C. H. Beck, Warszawa, 2010, pp. 363–400.
- [15] SHIGEO SHINGO: *Quick changeover: Revolutionary technology of production optimization*. Trans. from Engl. – M.: Alpina Business Brooks, 2006, pp. 344.
- [16] KRESTIANPOL O.: *Functional models of optimization of flexible manufacturing system of packaging*. Technological complexes, 2014, №2 (10), pp. 160–168.

Piotr BERNAT*

STREAMLINING THE OPERATIONS OF A TRANSPORT BUSINESS BY IT SOLUTIONS

Abstract

The article presents the possibility of streamlining company functioning by customized IT solutions. It discusses the conditions for and advantage of using the proposed arrangements and profitability analysis. The GPS system using its functionality enables to streamline transport management, which includes not only monitoring but also supervision, including online supervision, of the process of delivering transport services. The database management system allows the proper resources management, cost accounting not only determines the profitability of the order, but also simulates profitability or impact of individual components on the unit cost. The proposed solutions can be used together or separately, depending on the needs identified in the company.

1. INTRODUCTION

One important aspect of the work of a transport business is the provision of proper customer service, including the processing of transport service orders. This requires managing the delivery of transport services with the use of the organization's resources, taking into account the costs involved. Accordingly, the operations of a transport business can be considered in terms of service delivery effectiveness and operational cost-effectiveness. Such effectiveness will also depend on the use of computerized solutions available to the organization [2,3,8,12]. The proposed response to the need for streamlining the operations of transport businesses is to implement a number of customized IT solutions suited to the needs of the individual organization [1]. The use of customized IT solutions will increase the effectiveness of its operations, including – importantly – the cost-effectiveness [9] of the operations.

* Institute of Management, University of Applied Science in Nysa, Poland,
piotr.bernat@pwsz.nysa.pl

2. METHODOLOGY OF RESEARCH

The research problem was to find a solution to support the functioning of the transport business. Hence, it was analyzed whether and to what extent customized IT solutions influence the streamlining of the transport business and whether the proposed solution should be integrated and covering all areas of the company's functioning comprehensively or should be a modular solution enabling the introduction of the application to meet identified needs.

It was assumed that customized IT solutions streamline the functioning of the transport business. Hence, companies were identified and the case study was based on the effects of the proposed solutions, and after collecting and analyzing the data obtained, solutions were proposed in the above-discussed field.

The study involved small transport companies with small transport fleets dealing with both domestic and international transport services. The impact of GPS implementation, but also other forms of IT solutions, were analyzed.

Hence, it was necessary to find a link between the customized IT solutions and the efficiency of the operations of transport business. The following main problems have been identified in the course of research:

- the delivery of transport services,
- the use of the available resources,
- assessment of the economic profitability of delivering a particular service.

You should seek solutions to these problems [5,11]. The above problems can be addressed by implementing customized IT solutions designed to support service delivery, the use of resources and cost monitoring. The proposed solutions include the GPS technology, a DBMS system and cost calculation (in spreadsheets).

3. SCOPE OF SUPPORT

The scope of support offered by the proposed customized IT solutions should reflect the transport operator's needs and includes the following:

- service delivery management,
- resource management,
- cost management.

3.1. System GPS

The use of the GPS technology allows the transport business operator to overcome the following problems in the service delivery process: logistics-related issues (e.g. the location of the vehicle), communication issues (e.g. communication with the driver) and economic issues (e.g. vehicle running costs) [2].

The basic features of the GPS technology include:

- locating vehicles,
- monitoring fuel consumption levels,
- planning routes,
- monitoring the drivers' working time,
- monitoring unauthorized trips.

3.2. System DBMS

The use of DBMS allows the operator to overcome the following problems: logistics-related issues (e.g. the availability of resources), communication issues (e.g. customer service) and economic issues (e.g. the cost of maintaining availability, the consequences of unavailability) [3].

The basic features of the DBMS technology include:

- customer service,
- service delivery processing,
- management of driver-related information,
- management of technical resources (semi-trailers/tractor units),
- supports the GPS technology.

3.3. Cost Calculation System

The use of spreadsheets for cost calculation purposes allows the transport business operator to overcome the following problems: logistics-related issues (e.g. choosing transport service orders for delivery), communication issues (e.g. gathering useful information) and economic issues (e.g. the rate for the service) [4].

The main purposes of the cost calculation process include:

- calculating the total cost of the service,
- analyzing the cost components,
- gathering information,
- calculating service rates,
- supporting the GPS technology.

4. INTRODUCTION EFFECTS

An analysis of the effects of introduction the solution was performed earlier, in the classification of the customized IT solutions. The benefits were described for both the service delivery process and the costs of operations.

4.1. System GPS

In the case of the GPS solution, an analysis was performed for a particular route and included the vehicle operating costs [2]. The GPS technology is also useful in the case of communication problems, e.g. between the operator and the driver. A comparison of the costs of communication in the fourth quarters of 2012 and 2013 [2] leads to the conclusion that the operator's cost-effectiveness has improved.

Other advantage include drivers taking better care of the vehicles. Knowing that the operator can monitor their work, the drivers are likely to improve their driving style. The information provided by the system can also be the basis for calculating the drivers' working time.

4.2. System DBMS

The basic version of the solution allows the transport business operator to gather information on the operator's vehicles, their condition and status. This functionality enables the operator to manage its resources effectively. The system will automatically remind the operator of MOT inspection dates, repairs or approval inspections, which helps the operator to avoid the problem of vehicle unavailability.

The entire system also allows the operator to gather driver-related information, but the key effect of the solution is that the user can record information relating to its transport service orders, which help to manage the operator-client relationships.

However, despite these unquestionable benefits of the solution, not all business operators choose to implement the full features and functions of the system.

4.3. Cost Calculation System

After the introduction of direct cost to the spreadsheet, you can specify margins on the core business operations. It specifies the extent to which offered rate for 1 km covers the basic costs associated with a "generation" of transport service.

The indirect cost categories include practically all of the business operator's other costs of operations. If these are compared to the operator's revenue, it is possible to determine whether the profit margin covers the operator's costs of operations and whether the level of this coverage is satisfactory to the operator.

To make the calculations easier, a model has been developed to analyze the costs per km on a monthly or annual basis. This allows the business operator to compare the data for the different periods and identify the causes of differences.

5. SUMMARY

Transport business operators' efforts to increase their operations effectiveness can and should be supported by customized IT solutions. That is why, after analyzing the needs, looking for solutions improving the activity of the transport business began.

The GPS system has a particular justification for international transport. It allows you to manage order processing. The DBMS system allows you to maintain proper relationships with the outsourcer and gives you insight into your resources, and cost calculations allow you to analyze the profitability of a single order.

The proposed solution, customized IT solutions, has a modular structure and allows for the introduction of a single application. By contrast, all three applications provide comprehensive support for the operation of the transport business. Therefore, the presented solutions should be regarded as proposed ways of streamlining the operations of a transport business through the use of IT solutions.

Acknowledgement

This research was financially supported in the years 2014–2015 by the UMWO Opole EU funds ESF under the PO KL Priority VIII Regional human resources, Activity 8.2 Transfer of knowledge, Subactivity 8.2.1 Support for cooperation between science and business.

REFERENCES

- [1] BERNAT P.: *Tendencje i kierunki informatycznego wspomagania funkcjonowania przedsiębiorstw produkcyjnych cz. 1. warianty rozwiązania*, w: *Postępy Nauki i Techniki*, 13/2012, Lublin, str. 7–13, 2013.
- [2] BERNAT P.: *GPS Technology Application as a Tool of Streamlining the Operations of a Transport Business and Economic Analysis*, *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 791, Trans Tech Publications, 2015, pp. 96–101.
- [3] BERNAT P., MICHEL K.: *Innowacje w przedsiębiorstwie transportowym*. [w:] *Symbioza nauki z biznesem* pod red. Kołosowski M., Oficyna Wydawnicza Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej w Nysie, str. 7–18, Nysa, 2015.
- [4] BERNAT P.: *Raport końcowy: Innowacje w przedsiębiorstwie TRA-PER Mariusz Michel*, PO KL Priorytet VIII, 8.2, 8.2.1, PWSZ w Nysie, (materiały niepublikowane), Nysa, 2015.
- [5] BURNEWICZ J. (red.): *Innovative perspective of transport and logistics*, Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk, 2009.
- [6] PRAGUE C. N., IRWIN M. R., REARDON J.: [tł. z jęz. ang. Jarosław Gierlicki et al.], *ACCESS 2003 PL: Biblia*, Helion, Gliwice, 2004.
- [7] HUANG L.: *The Key Technology Research for Logistics Vehicle Monitoring System Based on GPS*, *Advanced Materials Research*, Vol. 1049–1050, 2014, pp. 1189–1192.

- [8] KOWALSKI M.: *Flota przez satelitę*. http://www.truck.pl/pl/article/484/flota-przez-satelit%C4%99-gps---ju%C5%BC-nie-luksus-lecz-chleb-powszedni,mik_180
- [9] MYTLEWSKI A.: *Monitoring ekonomiczny przedsiębiorstw*. Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk 2007.
- [10] OVIDIU B. A., TOMA M.: *How Does Business Intelligence Solutions can Streamline and Influence Transport Networks?* *Procedia Economics and Finance* 20, 59–64, 2015.
- [11] ŚCIGAŁA M., TWOREK K., MARTAN J.: *Technologie informacyjne determinantą innowacyjności – aktualny model organizacji*. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej*, seria: Organizacja i Zarządzanie, z. 68, nr kol. 1905, 2014, str. 413–423.
- [12] *GPS Cut Costs and Streamline Processes with GPS Fleet Tracking*, <http://wasteadvantagemag.com/gps-cut-costs-and-streamline-processes-with-gps-fleet-tracking/>

Александр ХАРЧЕНКО, Екатерина ВЛАДЕЦКАЯ*,
Сергей БРАТАН*, Дмитрий ВЛАДЕЦКИЙ**

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНЕШНИХ ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ДЕТАЛЕЙ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ СТЕНДЕ

1. АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Для промышленности приморских городов характерно наличие таких мобильных мини-заводов, как плавучие мастерские (ПМ) и рейдовые плавучие мастерские (ПМР) с размещенными на палубах производственными участками, в том числе и механообрабатывающими, имеющими широкий спектр станочного оборудования, включая шлифовальные станки. ПМ и ПМР способны выполнять сложные работы по изготовлению и модернизации высокотехнологичных изделий, узлов и агрегатов в удалённых от основных пунктов базирования районах. Особенностью эксплуатации указанного оборудования является наличие вибраций, вызванных воздействием на него различных источников, снижающих точность и повышающих шероховатость обрабатываемых поверхностей в ходе технологического процесса [1,2].

Повышение качества обработки деталей в условиях ПМ непосредственно связано с необходимостью уменьшения вынужденных колебаний станка, передаваемых через поверхность палубы от внешних источников, в том числе и от воздействий внешней среды – волнений водной поверхности.

Как правило, на палубах ПМ (рис. 1, а) фиксация станков обеспечивается фундаментом (рис. 1, б), который не обеспечивает достаточной виброизоляции вследствие значительных внешних колебательных воздействий, которые до настоящего времени являются малоизученными и их влияние на качество обработки, особенно на финишных операциях, усложненных колебательными процессами разного уровня, не исследовалось.

* ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, Севастополь, Россия, khao@list.ru, vladetska@rambler.ru, serg.bratan@gmail.com, vladetski@gmail.com



Рис. 1. Общий вид плавучей мастерской (а) и пример установки ее оборудования (б)

2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для определения влияния внешних воздействий на качество обработки при шлифовании использовали лабораторное оборудование (рис. 2) в составе экспериментального стенда, включающего круглошлифовальный станок ВУА 16, оснащенный комплексом контрольно-измерительной аппаратуры, а также компрессором 1 (FINI Tiger 245), размещаемым на разном удалении ($B_{k1} \dots B_{ki}$) от станка 2, создающим при работе на разных режимах внешние вибрационные воздействия на технологическую систему станка ($f_{k1} \dots f_{ki}$), имитирующие внешние возмущения через поверхность пола и фундамент на станину станка, соответствующие воздействиям на станки в ПМ внешней среды (морского волнения) и работающего соседнего оборудования, вызывая вибрации и виброперемещения с амплитудами A_x, A_y, A_z соответственно в направлениях его осей координат. Для определения параметров вибраций, амплитуды, виброскорости и виброускорения использовали виброметр 3 «Вибротест-МГ4.01». Проведенный этап имитационного моделирования позволил определить основные условия, при которых возможно проведение шлифовальной обработки на лабораторном оборудовании с получением показателей качества, соответствующих тем или иным условиям внешних воздействий (уровню волнения, работе внешнего оборудования) на круглое шлифование в плавучей мастерской [3,4]. По разработанной методике и при заданных условиях проводили на универсальном круглошлифовальном станке ВУА 16 обработку поверхностей шеек валов ($d = 26,00^{+0,050}_{-0,025}$, мм) для партий деталей, имитируя для каждой из партий различные уровни волнений и одновременно наличие или отсутствие работающего внешнего оборудования.

Экспериментальные исследования показали, что значительное влияние на качество обработки при шлифовании в условиях плавучей мастерской оказывают внешние воздействия как от морского волнения, увеличивая погрешность обработки $\Delta=f(h_{3\%})$ в 3,8...5,0 раз, так и от соседнего работающего оборудования – в 2,6...3,3 раза. При этом шероховатость $R_a=f(h_{3\%})$ обрабатываемой поверхности возрастает соответственно в 1,6...2,5 раз от морского волнения и в 1,56...2,5 раз от работающего оборудования. Волнистость $W=f(h_{3\%})$ поверхностей шеек валов возрастает в 1,23...2,75 раз от морского волнения и в 1,4...3,3 раза от работающего оборудования.

Для определения параметров вибраций использовали виброметр «Вибротест-МГ4.01» (рис. 3). Виброметр «Вибротест-МГ4.01» является современным отечественным прибором, предназначенным для измерений виброскорости, виброускорения, виброперемещения и частоты колебаний твердого тела как в научно-исследовательской и опытно-конструкторской деятельности, так и в различных отраслях промышленности, включая предприятия точного машиностроения.

Так как дополнительные перемещения A_z вдоль оси вращения детали и оси вращения шлифовального круга не оказывают существенного влияния на качество обработки при врезном шлифовании, виброизмерения вдоль оси Z в рамках данной работы не производились.

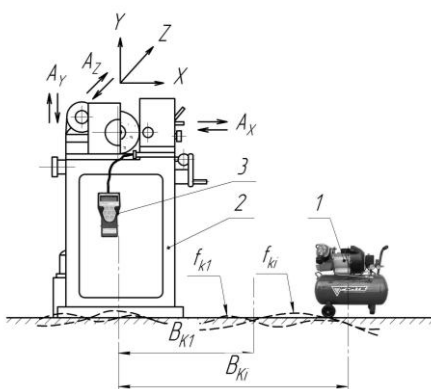


Рис. 2. Схема экспериментального стенда для имитации внешних вибрационных воздействий при шлифовании, идентичных возникающим на ПМ: 1 – компрессор FINI Tiger 245; 2 – станок BUA 16; 3 – виброметр

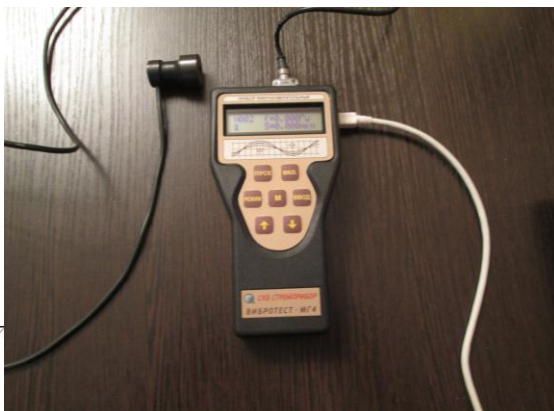
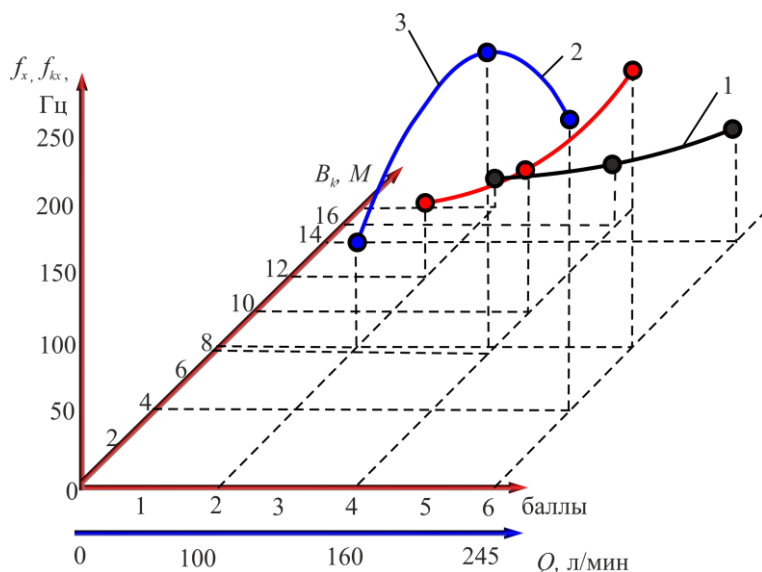


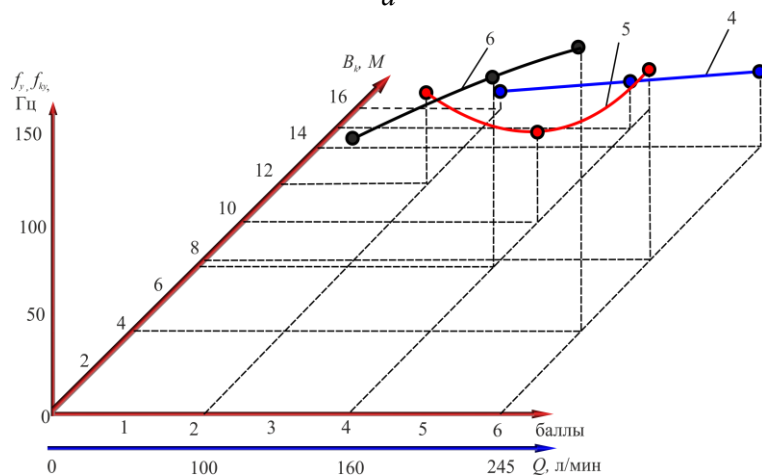
Рис. 3. Виброметр «Вибротест-МГ4.01» для определения параметров вибраций

Полученные показатели имитации вибрационных воздействий на круглошлифовальный станок с помощью компрессора и дополнительного оборудования в лабораторных условиях свидетельствуют о том, что по частоте и виброперемещениям как в зоне измерения станина-фундамент (f_x, f_y, S_x, S_y), так и в зоне направляющих стола (f'_x, f'_y, S'_x, S'_y), управляя производительностью ($Q = 100; 160; 245$ л/мин) компрессора и меняя расстояние ($B_k = 4,5 \dots 16$ м) его удаления от станка, а также используя соседнее оборудование и вентиляцию, можно достичь вибрационных воздействий, моделирующих условия работы в плавучей мастерской с учетом слабого, значительного и сильного волнений водной поверхности, а также влияния внешнего оборудования на технологическую систему круглошлифовального станка. Полученные при этом эксперименте результаты соответственно частоты (f_{kx}, f_{ky}) (рис. 4) и виброперемещения (S_{kx}, S_{ky}) в зоне станина-фундамент, а также в зоне направляющих стола частоты (f'_{kx}, f'_{ky}) (рис. 5) и виброперемещения (S'_{kx}, S'_{ky}) незначительно отличаются от соответствующих показателей, полученных в производственных условиях плавучей мастерской, при этом наибольшая разница не превышала 5%.

Проведенный этап имитационного моделирования позволил определить основные условия, при которых возможно проведение шлифовальной обработки на лабораторном оборудовании с получением показателей качества, соответствующих тем или иным условиям внешних воздействий (уровню волнения, работе внешнего оборудования) на круглое шлифование в плавучей мастерской. По описанной ранее методике и при заданных условиях проводили на универсальном круглошлифовальном станке ВУА 16 обработку поверхностей шеек валов ($d = 26,00^{+0,050}_{-0,025}$, мм) для партий деталей, имитируя для каждой из партий различные уровни волнений и одновременно наличие или отсутствие работающего внешнего оборудования.



а



б

Рис. 4. Графики зависимостей $f_{kx}=f(Q, B_k)$ (а) и $f_{ky}=f(Q, B_k)$ (б) в зоне измерения станина-фундамент от состояний компрессора (Q – производительность, B_k – удаление от станка) и состояний станка (1, 4 – отключен; 2, 5 – работает; 3, 6 – работает одновременно с плоскошлифовальным станком и вентиляцией), имитирующих соответствующие условия $f_x=f(h_{3\%})$, $f_y=f(h_{3\%})$ плавучей мастерской

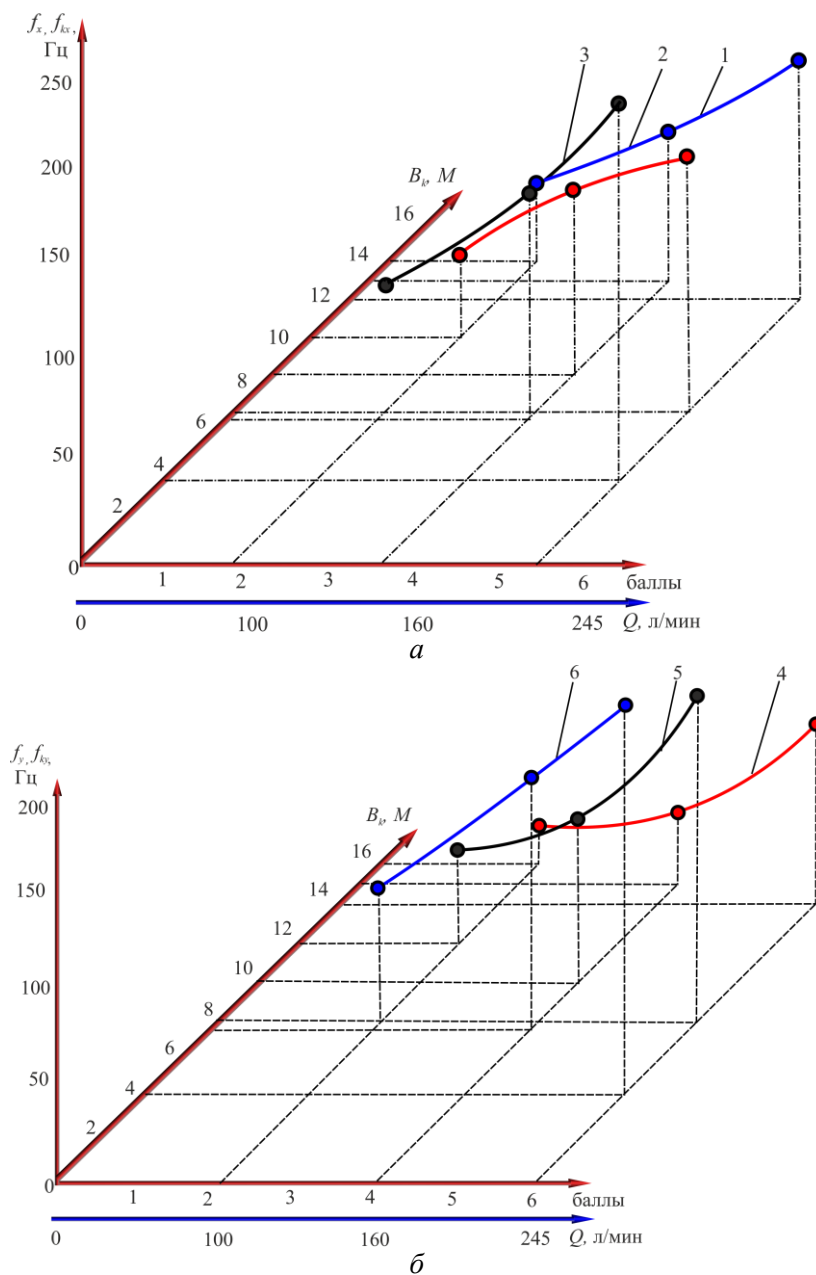


Рис. 5. Графики зависимостей $f'_{kx}=f(Q, B_k)$ (а) и $f'_{ky}=f(Q, B_k)$ (б) в зоне измерения направляющих стола от состояний компрессора (Q – производительность, B_k – удаление от станка) и состояний круглошлифовального станка (1, 4 – отключен; 2, 5 – работает; 3, 6 – работает одновременно с плоскошлифовальным станком и вентиляцией), имитирующих соответствующие условия $f'_x=f(h_{3\%})$, $f'_y=f(h_{3\%})$ плавучей мастерской

Результаты проверки качества обработанных при этом поверхностей приведены в табл. 1. Наблюдались следующие отклонения формы цилиндрических поверхностей при круглошлифовальной обработке: a – от цилиндричности (L – длина нормируемого участка, EFZ – отклонение профиля продольного сечения), b – от круглости (TFK – допуск круглости), c – овальность, d – огранка (отклонение от круглости), e – от профиля продольного сечения (EFP – отклонение от цилиндричности, TFP – допуск цилиндричности). Преимущественное значение имел показатель биения опорных шеек вала – Δ , $\mu\text{м}$, оценивающий отклонения от круглости. Поскольку длина опорной шейки была соизмерима с шириной шлифовального круга, то отклонения от цилиндричности и от профиля продольного сечения изменялись при проведении экспериментов несущественно.

Условно границу между различными порядками отклонений поверхности устанавливают по значению отношения шага S_w к высоте неровностей W_z . При $S_w/W_z < 40$ отклонения относят к шероховатости поверхности, при $1000 \geq (S_w/W_z) \geq 40$ – к волнистости, при $(S_w/W_z) > 1000$ – к отклонениям формы. Волнистость поверхности представляется совокупностью периодически повторяющихся неровностей, у которых расстояния между смежными возвышенностями или впадинами превышают базовую длину l . Шероховатость – это совокупность неровностей поверхности с относительно малыми шагами, выделенная с помощью базовой длины. Шероховатость поверхности – R_a , $\mu\text{м}$ и показатели волнистости – W_z , $\mu\text{м}$ обработанной поверхности определяли по известным методикам с использованием профилометров-профилографов моделей 201 и «Talisurf 5M-120» [5,6].

Результаты исследований на графике зависимостей (рис. 6, a) отклонений формы $\Delta = f(h_{3\%})$ для $\Delta_{\max}$ (1, 3) и $\Delta_{\min}$ (2, 4) поверхностей шеек валов от внешних воздействий и состояний круглошлифовального станка (1, 2 – работает; 3, 4 – работает одновременно с плоскошлифовальным станком и вентиляцией) показывают, что при усилении морского волнения биение опорных шеек $\Delta_{\max}$ существенно возрастает: при значительном волнении и неработающем внешнем оборудовании – в 3,8 раза, при сильном – почти в 5 раз по сравнению с показателями при слабом волнении.

Величина показателя TFK (т.е. $\Delta_{\max} - \Delta_{\min}$) при этом увеличивается соответственно в 5 и в 6,9 раза. При обработке на станке одновременно с работающими соседним оборудованием и вентиляцией эти показатели соответственно для $\Delta_{\max}$ – в 2,6 раза (при значительном волнении) и в 3,3 раза (при сильном волнении); для TFK – увеличение составило 2,7 раза (при значительном волнении) и 3,5 раза (при сильном волнении).

Параметры шероховатости $R_a = f(h_{3\%})$ для $R_{a \max}$ (1,3) и $R_{a \min}$ (2, 4) (рис. 6, b) поверхностей шеек валов также зависят от внешних воздействий

и состояний круглошлифовального станка (1, 2 – работает; 3, 4 – работает одновременно с плоскошлифовальным станком и вентиляцией).

При неработающем соседнем оборудовании R_a при значительном волнении увеличивается в 1,6 раза, при сильном – в 2,5 раза по сравнению с показателями при слабом волнении. При обработке на станке одновременно с работающими соседним оборудованием и вентиляцией эти показатели соответственно для R_a – в 1,56 раза (при значительном волнении) и в 2,5 раза (при сильном волнении) превышают показатели при слабом волнении.

Графики зависимостей показателей волнистости $W=f(h_{3\%})$ для W_{max} (1, 3) и W_z (2, 4) (рис. 7, а) поверхностей шеек валов от внешних воздействий и состояний круглошлифовального станка (1, 2 – работает; 3, 4 – работает одновременно с плоскошлифовальным станком и вентиляцией) и пример полученной круглограммы ($\bar{o}$) показывают, что W_{max} (W_z) возрастают при значительном волнении и неработающем внешнем оборудовании – в 1,23 (1,12) раза, при сильном – в 2,75 (2,1) раз по сравнению с показателями при слабом волнении.

Таб. 1. Результаты проверки качества поверхностей шеек валов, обработанных на круглошлифовальном станке в лабораторных условиях

Воздействие внешнего оборудования	Биение опорных шеек Δ , <i>мкм</i>			Шероховатость поверхности R_a , <i>мкм</i>		
	max	min	Дисперсия σ^2 , <i>мкм</i> ²	max	min	Дисперсия σ^2 , <i>мкм</i> ²
Слабое волнение						
Нет	0,025	0,010	$6,2 \times 10^{-6}$	0,63	0,41	$1,3 \times 10^{-3}$
Есть	0,048	0,009	$4,2 \times 10^{-5}$	0,80	0,51	$2,3 \times 10^{-3}$
Значительное волнение						
Нет	0,094	0,018	$15,9 \times 10^{-5}$	1,00	0,46	$8,1 \times 10^{-3}$
Есть	0,123	0,008	$3,7 \times 10^{-6}$	1,25	0,50	$15,6 \times 10^{-3}$
Сильное волнение						
Нет	0,124	0,020	$2,9 \times 10^{-6}$	1,6	0,50	$3,3 \times 10^{-2}$
Есть	0,162	0,023	$5,4 \times 10^{-4}$	2,0	0,63	$5,2 \times 10^{-2}$
	Показатели волнистости					
	Слабое волнение					
	W_{max} , <i>мкм</i>	W_z , <i>мкм</i>		S_w , <i>мкм</i>		L_w , <i>мкм</i>
Нет	5,6	4,8		192		960
Есть	7,2	5,3		265		1457,5
Значительное волнение						
Нет	6,9	5,4		297		1782
Есть	10,2	5,8		916		4580
Сильное волнение						
Нет	15,4	9,9		574		3920
Есть	23,8	10,6		1328		6640

При обработке на станке одновременно с работающими соседним оборудованием и вентиляцией эти показатели соответственно для $W_{\max}$ и W_z – в 1,4 и 1,1 раза (при значительном волнении), а также в 3,3 и в 2 раза (при сильном волнении) превышают показатели при слабом волнении.

Таким образом, экспериментальные исследования подтверждают, что значительное влияние на качество обработки при шлифовании в условиях плавучей мастерской оказывают внешние воздействия как от морского волнения, увеличивая погрешность обработки в 3,8...5,0 раз, так и от соседнего работающего оборудования – в 2,6...3,3 раза. При этом шероховатость обрабатываемой поверхности возрастает соответственно в 1,6...2,5 раз от морского волнения и в 1,56...2,5 раз от работающего оборудования. Волнистость поверхностей шеек валов возрастает в 1,23...2,75 раз от морского волнения и в 1,4...3,3 раза от работающего оборудования [7].

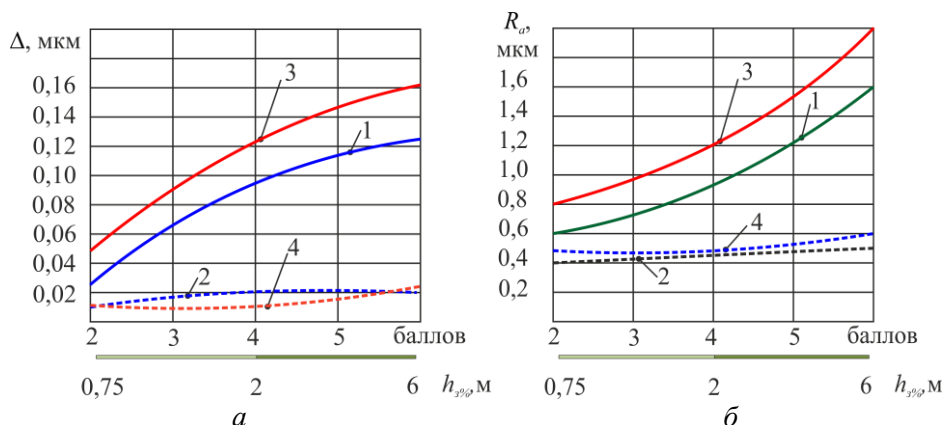


Рис. 6. Графики зависимостей отклонений формы $\Delta=f(h_{3\%})$ для $\Delta_{\max}$ (1, 3) и $\Delta_{\min}$ (2, 4) (а) и шероховатости $R_a=f(h_{3\%})$ для $R_{a \max}$ (1, 3) и $R_{a \min}$ (2, 4) (б) поверхностей шеек валов от внешних воздействий и состояний круглошлифовального станка (1, 2 – работает; 3, 4 – работает одновременно с плоскошлифовальным станком и вентиляцией)

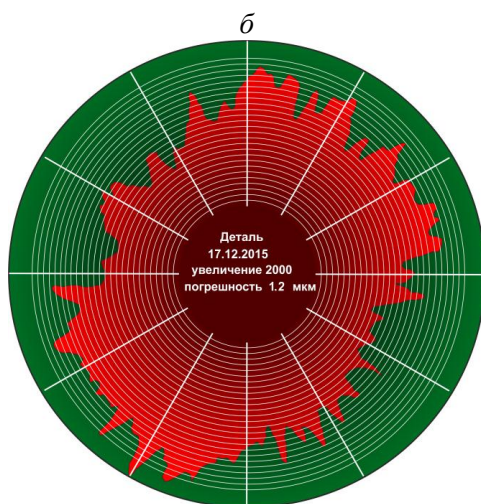
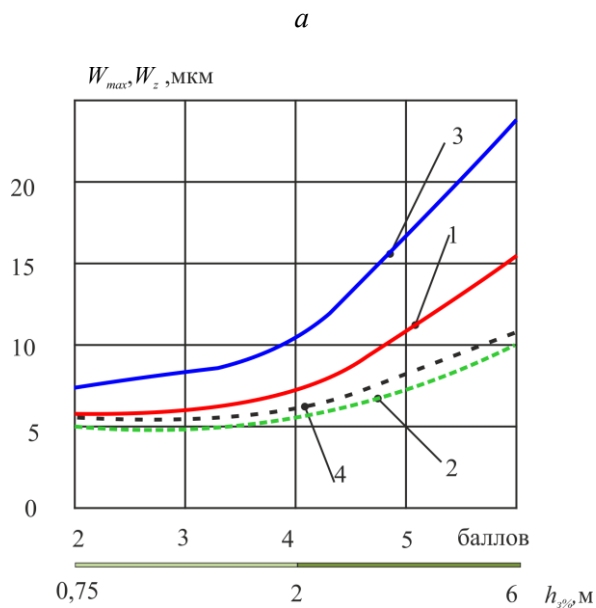


Рис. 7. Графики зависимостей показателей волнистости $W=f(h_{3\%})$ для W_{max} (1, 3) и W_z (2, 4) (*a*) поверхностей шеек валов от внешних воздействий и состояний круглошлифовального станка (1, 2 – работает; 3, 4 – работает одновременно с плоскошлифовальным станком и вентиляцией) и пример полученной круглограммы (*б*)

Эти факты свидетельствуют о том, что традиционная виброизоляция станков в виде бетонных фундаментов на плавучих мастерских не способна защитить высокоточное оборудование, в частности, шлифовальные станки от негативного вибрационного воздействия, возникающего вследствие морского волнения и работающего соседнего технологического оборудования и обеспечить требуемое качество обработки, гарантированное техническими характеристиками станка.

3. ВЫВОДЫ

Такой подход позволил экспериментально исследовать влияние на качество деталей при шлифовальной обработке морского волнения, воздействующего на плавучее основание мастерской, выявил необходимость оптимизации виброзащитной системы станка для решения задач обеспечения динамической стабилизации процесса шлифования [8–15] и создания конструкций эффективных виброизолирующих опор и устройств. Полученные результаты являются основой для дальнейших экспериментальных исследований параметров и характеристик технологической системы круглошлифовального станка в условиях плавучей мастерской.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] БРАТАН С.М.: *Анализ влияния колебаний, передаваемых через фундамент станка, на качество процесса шлифования*. Братан С.М., Владецкая Е.А.: Вестник НТУ «ХПИ»: Сб. научн. трудов. Харьков: НТУ «ХПИ», 2008, № 35, с. 13–22.
- [2] ВЛАДЕЦКАЯ Е.А.: *Повышение виброустойчивости шлифовальных станков плавучих ремонтных мастерских*. Владецкая Е.А., Братан С.М., Харченко А.О.: Сучасні технології в машинобудуванні: Зб. наук. праць. Харків: НТУ «ХПИ», 2012, Вип. 7, с. 103–111.
- [3] ВЛАДЕЦКАЯ Е.А.: *Оценка параметров качества шлифуемой поверхности*. Владецкая Е.А., Братан С.М., Прогрессивные направления развития машиноприборостроения, транспорта и экологии: материалы междунар. научн.-техн. конф. студ., аспирантов и молодых ученых, г. Севастополь, 20–23 мая 2013 г., Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2013, с. 186–188.
- [4] ВЛАДЕЦКАЯ Е.А.: *Обеспечение качества шлифовальной обработки путем автоматизации виброзащиты станка в условиях плавучей мастерской*. Владецкая Е.А., Братан С.М., Харченко А.О., Современные инженерные и инженерно-педагогические технологии: сб. статей науч.-практ. конф. Симферополь: ДАЙПИ, 2015, с.82–85.
- [5] ВЛАДЕЦКАЯ Е.А.: *Обеспечение динамической стабилизации шлифовальной обработки путем уменьшения внешних возмущений в условиях плавучей мастерской*. Владецкая Е.А., Братан С.М., Харченко А.О., Вестник современных технологий: Сб. науч. трудов. Севастополь: СевГУ, 2016, Вып. 1, с. 21–41.

- [6] ВЛАДЕЦКАЯ Е.А.: *Обеспечение качества шлифовальной обработки путем уменьшения внешних возмущений в условиях плавучей мастерской*. Владецкая Е.А., Харченко А.О., Братан С.М., Владецкий Д.О., Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. Орел: ФГБОУ ВО «ПГУ», 2015, №6 (314), с. 88–103.
- [7] ВЛАДЕЦКАЯ Е.А.: *Повышение качества шлифовальной обработки в условиях плавучей мастерской*. Владецкая Е.А., Братан С.М., Перспективы науки – 2016: Сб. докл. III Междунар. конк. науч.-иссл. работ, 29 апреля 2016 г., Том III (Ест. и техн. Науки), Казань: ООО «Рокета Союз», 2016, с. 247–257.
- [8] ВЛАДЕЦКАЯ Е.А.: *Оптимизация структуры виброзащитных систем шлифовального станка на основе морфологического анализа*. Владецкая Е.А., Харченко А.О., Братан С.М., Вісник СевНТУ. – Вип.140: Машиноприладобудування та транспорт; зб. наук. пр., Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2013, с. 14–20.
- [9] ВЛАДЕЦКАЯ Е.А.: *Разработка формирующего фильтра, моделирующего динамику морского волнения плавучей ремонтной мастерской*, Владецкая Е.А., Вісник СевНТУ, Вип. 150: Машиноприладобудування та транспорт; зб. наук. пр., Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2014, с. 36–40.
- [10] ХАРЧЕНКО А.О.: *Повышение точности процесса круглого шлифования путем эффективной виброизоляции станка*. Харченко А., Братан С., Владецкая Е., International Scientific Conference on engineering design and research of automotive vehicles and machines «SAKON'08», Rzeszow – Przecław, Polska, 24–27 Wrzesien, 2008, с. 47–58.
- [11] ВЛАДЕЦКАЯ Е.А.: *Анализ методов и средств виброзащиты динамических систем от вынужденных колебаний в машиностроении*. Владецкая Е.А., Прогрессивные направления развития машино-приборостроительных отраслей и транспорта: материалы междунар. научн.-техн. конф. студ., аспирант. и мол. ученых, г. Севастополь, 19–22 мая 2009 г., Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2009, с. 79–81.
- [12] ВЛАДЕЦКАЯ Е.А.: *Повышение динамического качества шлифовального станка на основе оптимизации виброизолирующих устройств*. Владецкая Е.А., Харченко А.О., Братан С.М., Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении. Севастополь-2015: Сб. статей по материалам междунар. науч.-техн. конф. – г. Севастополь, 14–15 сентября 2015 г., Севастополь: ФГАОУ ВО «СевГУ», 2015, с. 139–148.
- [13] ДОЛГИН В.П.: *Реакция динамической системы на произвольный сигнал*. Долгин В.П., Владецкая Е.А., Братан С.М., Учёные записки Крымского инженерно-педагогического университета, Вып. 43. Технические науки, Симферополь: НИЦ КИПУ, 2014, с. 53–58.
- [14] ХАРЧЕНКО А.О.: *Реакция динамической системы на произвольный сигнал на примере станка в условиях плавучей мастерской*. Харченко А., Владецкая Е., Долгин В., Братан С., Monografie «Maszyny i procesy produkcyjne» (Машины и производственные процессы), Lublin, Polska: Politechnika Lubelska, 2015, с. 86–98.
- [15] ВЛАДЕЦКАЯ Е.А.: *Снижение вибрационных воздействий на технологическую систему шлифовального станка в плавучих мастерских*. Владецкая Е.А., Харченко А.О., Братан С.М., Гуманистическая экономика и качество жизни: сб. статей по материалам международной научн.-практ. конф., Ульяновск: УлГПУ, 2013, с. 255–268.

Алексей ОСТРЕНКО, Александр ВЕТРОГОН*,
Андрей ХАРЧЕНКО**

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ПОДВЕСКИ АВТОМОБИЛЕЙ ПУТЁМ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АМОРТИЗАТОРОВ

1. АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ

В современных условиях роль автомобильного транспорта непрерывно возрастает. Независимо от транспортно-технологического назначения системы «водитель – автомобиль – дорога – среда» её важнейшие эксплуатационные свойства и их реализация в значительной мере определяются плавностью хода и виброзащитой водителя, пассажиров и груза. Поэтому постоянное совершенствование и поддержание в надлежащем техническом состоянии систем подвески, виброзащиты, амортизаторов транспортных средств является одной из важнейших задач промышленности, организаций, предприятий, а также частных владельцев, эксплуатирующих транспортную технику, в частности, автомобили.

Кроме того, задача повышения безопасности движения автомобильного транспорта всегда была и остаётся весьма актуальной. Это связано с увеличением количества транспортных средств и с повышением их средней скорости движения, а также с ростом интенсивности движения на дорогах.

Сегодня наиболее полно отвечают требованиям объективной оценки технического состояния подвески автомобиля линии инструментального контроля, содержащие в своем составе: тормозной стенд, стенд проверки ходовой части автомобиля, тестер бокового увода автомобиля [1, с. 75] и др. Интересен метод диагностирования подвески по свободным колебаниям, основанный на сравнении эталонной кривой затухающих колебаний кузова с кривой, полученной в процессе испытаний. Эти кривые могут быть получены двумя методами: подъемом и сбрасыванием автомобиля с определенной высоты (обычно 10...15 см [1]).

Наиболее распространены стенды, в которых применяются резонансный метод измерения амплитуды колебаний МАНА/BOGE и метод измерения сцепления с дорогой (EUSAMA).

* ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, Севастополь, Россия, ostrenich@rambler.ru, windgone1980@gmail.com, list-box@mail.ru

Несмотря на различия методов диагностики состояния подвески их объединяет одно – диагностика осуществляется периодически и проводится только в условиях СТО. Отсутствует непрерывный контроль состояния подвески, которое зависит от условий эксплуатации транспортного средства, субъективных факторов и даже заводского качества элементов подвески. Это может влиять на показатели автомобиля и стоимость ремонта.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работах [2–5] коэффициент сопротивления амортизатора рассматривался как постоянная величина. Такое допущение не позволяет определить влияние степени износа элементов амортизатора на колебания кузова автомобиля в различных дорожных условиях. Кроме несимметричности динамических характеристики автомобильных амортизаторов на ходах отбоя и сжатия также необходимо учитывать их нелинейность, и изменение нелинейности в процессе эксплуатации.

В связи с вышеизложенным, особый интерес представляет задача разработки системы мониторинга автомобильных амортизаторов, позволяющей своевременно обнаружить износ элементов амортизатора в процессе эксплуатации транспортного средства.

3. ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА

Система мониторинга состоит из восьми датчиков ускорений, имеющих на современных автомобилях с управляемой подвеской, микроконтроллера и информационного табло.

Первая группа датчиков закрепляется на рычагах подвески, связанных с неподрессоренными массами автомобиля, а вторая группа – на кузове, в зоне колёсных арок.

Система работает следующим образом. В процессе движения колёса автомобиля при наезде на неровности совершают колебательные движения, ускорения которых фиксируются датчиками. Так же, но уже с другими параметрами колебаний, перемещается кузов транспортного средства. Информация об ускорениях с колёсных датчиков и датчиков, закреплённых на кузове, передаётся на микроконтроллер. Далее происходит обработка результатов с применением математического аппарата спектрального анализа [6, с. 14]. При расхождении теоретической и экспериментальной спектральной плотности вертикальных ускорений поддрессоренной массы, микроконтроллер подаёт сигнал на информационное табло, которое показывает какой амортизатор вышел из строя.

4. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Математическая модель программы заключается в описании работы одномассовой колебательной расчётной схемы подвески в общей колебательной системе автомобиля. Так как необходимо учитывать нелинейность и несимметричность динамических характеристик гасителя колебаний, то для описания применяется дифференциальное нелинейное уравнение второго порядка:

$$m \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + \mu \frac{dy(t)}{dt} + cy(t) = \mu \frac{dq(t)}{dt} + cq(t), \quad (1)$$

где: m – поддрессоренная масса, кг; $y(t)$ – перемещение поддрессоренной массы, м; μ – коэффициент сопротивления амортизатора, Нс/м; C – жёсткость подвески, Н/м; $q(t)$ – возмущение от дорожного покрытия.

Для исследования влияния процесса износа амортизатора будем рассматривать силу его сопротивления как функцию двух переменных, при этом рассмотрим два варианта зависимости силы сопротивления от параметров износа:

$$P = f(V, k), \quad (2)$$

$$P = f(V, k_1), \quad (3)$$

где: P – усилия на штоке амортизатора, Н; V – скорость перемещения поршня, $\frac{m}{c}$; k – коэффициент учитывающий степень износа пружины клапана отбоя; k_1 – коэффициент учитывающий степень износа поршневого кольца.

Коэффициенты k и k_1 определяем экспериментально на стенде. Для этого варьируем усилие затяжки гайки клапана отбоя (2,5; 5,0; 10,0; 15,0; 20,0 и 30,0 Нм) и износ поршневого кольца (0,45; 1,00; и 1,5 мм), создаваемый искусственно.

Решить уравнение (1) с различными, зависящими от скорости поршня и износа элементов амортизатора значениями μ , представляется возможным с помощью численного метода Рунге–Кутты. Найденные значения ускорений поддрессоренной массы и значения ускорений неподдрессоренных масс используются для построения корреляционной функции $R_x(\tau)$ [7, с. 408].

Определение спектральной плотности будем производить по корреляционной функции $R_x(\tau)$

$$S_x(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau = 2 \int_0^{\infty} R_x(\tau) \cos(\omega\tau) d\tau, \quad (4)$$

где $\tau = t_1 - t_2$; t_1, t_2 – границы временного интервала (рис. 1) [8, с. 169].

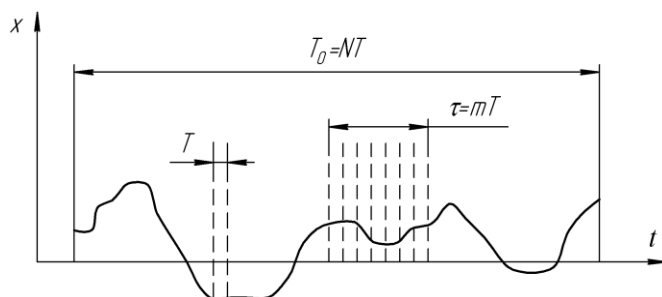


Рис. 1. Пример обработки осциллограммы

На рис. 2 и 3 показаны спектральные плотности ускорений поддресоренной массы автомобиля при движении по дороге с грунтовым покрытием на скорости 40 км/ч.

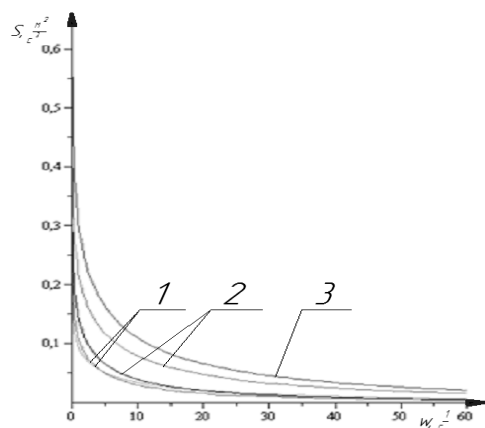


Рис. 2. Спектральная плотность вертикальных ускорений поддресоренных масс транспортного средства (различная степень износа клапанной пружины):
1 – при незначительном износе;
2 – при среднем износе;
3 – при значительном износе

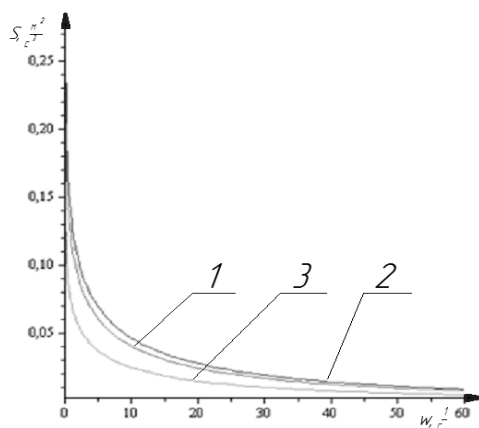


Рис. 3. Спектральная плотность вертикальных ускорений поддресоренных масс транспортного средства (различная степень износа поршневого кольца):
1 – при незначительном износе;
2 – при среднем износе;
3 – при значительном износе

Критерий определения технического состояния амортизаторов заложен в калибровочных таблицах, загруженных в программу микроконтроллера. Указанные таблицы позволяют сравнить теоретические и действительные значения спектральной плотности вертикальных ускорений поддрессоренной массы при различных спектральных плотностях вертикальных ускорений неподдрессоренной массы, которые обусловлены скоростью движения автомобиля и типами дорожных покрытий.

Остаточный ресурс амортизатора при известной наработке с начала эксплуатации определим как разность между наработкой до предельного значения спектральной плотности вертикальных ускорений поддрессоренной массы и наработкой в момент контроля по формуле:

$$t_{ocm} = t \left[\left(\frac{S_x(\omega)_n}{S_x(\omega)_t} \right)^{\frac{1}{\alpha}} - 1 \right], \quad (5)$$

где: t – ресурс, использованный элементом от начала эксплуатации к моменту контроля; $S_x(\omega)_n$ – предельное изменение значения спектральной плотности; $S_x(\omega)_t$ – изменение значения спектральной плотности в момент контроля; α – показатель степени, характеризующий изменение значения спектральной плотности.

Согласно ОСТ 37.001.440-86 допустимые отклонения значений сопротивлений усилию и сжатию амортизатора не должны превышать 20 %. Таким образом, предельным значением спектральной плотности будет являться величина, отличающаяся более чем на 20 % от теоретических значений, заложенных в калибровочных таблицах.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная система позволяет оперативно производить мониторинг технического состояния автомобильных амортизаторов, определять их остаточный ресурс, не используя дополнительное диагностическое оборудование, обеспечив тем самым предотвращение критического износа элементов амортизатора и повышение надёжности системы подвески, а также безопасности и комфортности движения автомобиля.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] СЕРГИЕНКО Н.Е.: *Диагностика технического состояния подвески автомобиля бортовым устройством*. Сергиенко Н.Е., Мирошніченко Н.В., Вестник НТУ «ХПИ», Харьков, 2012, Вып. № 64 (970), с. 75–80.
- [2] МИРЗОЕВ Г.К., Ермолин А.В., Храпов Д.С.: *Оценка демпфирующих и виброизолирующих способностей подвески по результатам дорожных испытаний автомобиля*. Мирзоев Г.К., ОАО «АВТОВАЗ», ТГУ, 2004, – с. 34–39.
- [3] AKOPJAN R., LEJDA K.: *Theoretical and operational problems of buses and their prime movies*. Akopjan R., Lvov: “Meta”, 2002, p. 450.
- [4] AKOPJAN R., LEJDA K.: *Some problems of theory, constructions exploitation of automotive transport facilities*. Akopjan R., Lvov: “BMC”, 2006, p. 579.
- [5] АКОПЯН Р.А. *Віброзахист автотранспортних засобів*. Акопян Р.А., Давидок С.І., Львів: НВП «Мета», 1988, с. 304.
- [6] ХАЧАТУРОВ А.А.: *Динамика системы дорога – шина – автомобиль – водитель*. Под ред. Хачатурова А.А., М.: Машиностроение, 1976, с. 535.
- [7] ИВАЩЕНКО Н.Н.: *Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем*. Иващенко Н. Н., М.: Машиностроение, 1973, с. 606.
- [8] ОГРЫЗКОВ С.В.: *Совместные колебания подвески и кузова автомобиля*. Огрызков С.В., Ветрогон А.А., Крячков А.А., Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля., Луганськ, 2011, Вып. 122., с. 167–172.

ГИДРОДИНАМИКА ТЕЧЕНИЙ У ПОВЕРХНОСТИ ЭКРАНИРОВАННЫХ ДИСКОВ С ЭЖЕКТОРНЫМИ КАНАЛАМИ В ПОЛОСТЯХ РОТОРОВ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

1. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В работах [1,2] показана перспективность применения экранированных дисков ГТД с эжекторными каналами для уменьшения радиальных температурных напряжений посредством разогрева ступичной части диска горячим воздухом, отсасываемым эжектором с периферии полости (рис. 1).

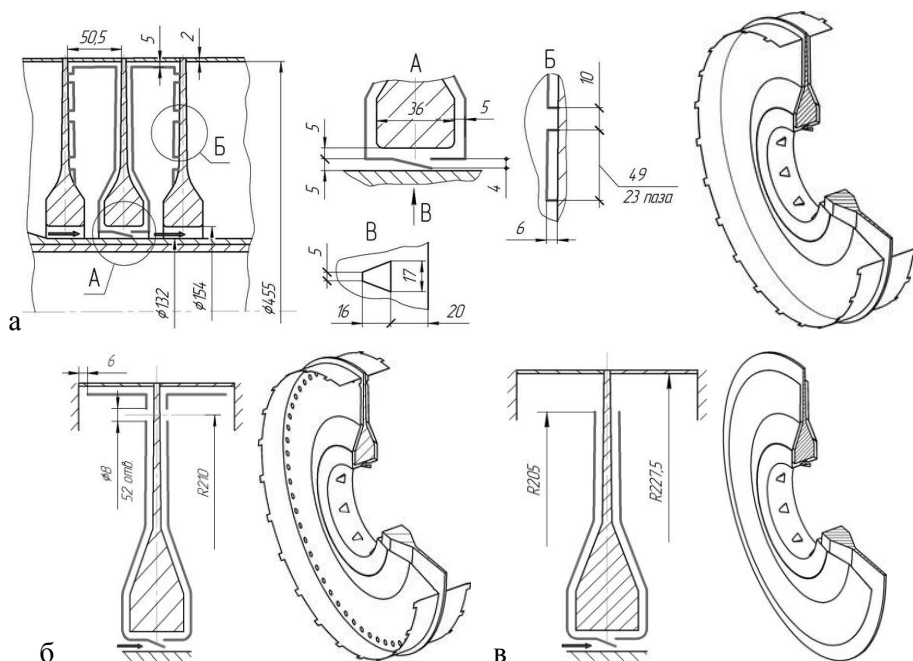


Рис. 1. Варианты конструкций экранов с эжекторными каналами: а — диск, экранированный полностью; б — экранировано полотно диска, на периферии экрана имеется ряд отверстий; в — экранирована ступица и 2/3 полотна диска

* ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, Севастополь, Россия, list-box@mail.ru

В качестве эжектора рекомендуется применять эжекторный канал, корпус которого омывается осевым потоком охлаждающего воздуха. Применение эжекторов с периферийным обдувом позволяет наиболее эффективно использовать динамический напор воздуха, отбираемого на охлаждение двигателя. От производительности эжектора будет зависеть гидродинамика течений охлаждающего воздуха в канале между экраном и диском, влияющая на характер распределения температуры по радиусу диска. В настоящее время в литературе нет сведений по методике расчета гидродинамики течений охлаждающего воздуха в полостях роторов с эжекторными устройствами.

2. РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Статья посвящена гидродинамическому расчету течений охлаждающего воздуха в полости ротора с экранированными дисками, снабженными эжекторными каналами. В расчет входит определение производительности эжекторного канала и скорости охладителя вдоль радиуса диска.

Корпус эжекторного канала представляет собой расширяющийся конус, при обтекании которого осевым потоком создаются условия для понижения давления в выходном сечении канала эжектора.

При таком обтекании корпуса эпюра скоростей по сечению канала имеет вогнутую форму. Большая скорость на внешней стенке корпуса уменьшает возможность отрыва потока от стенки расширяющегося канала, что способствует улучшению работы эжектора с внешним обдувом [3].

Если принять, что скорость отсасываемого воздуха на периферии экрана равна скорости обтекания осевым потоком корпуса эжекторного канала, а скорость в центре эпюры принять равной скорости всплытия к оси вращения под действием свободной конвекции в поле массовых сил, то расчетную скорость в сечении на выходе эжекторного канала $W_{\text{эж}}$ можно принять как среднеарифметическую скорости W_0 , с которой осевой поток обтекает корпус эжекторного канала (при ее определении необходимо учитывать загромождение эжекторами проходного сечения кольцевого канала под ступицей экранированного диска) и скорости W , с которой горячий воздух всплывает к оси вращения под действием сил плавучести во вращающейся полости.

Специальных измерений скорости всплытия во вращающейся полости не проводилось, однако использование материалов работы [4] позволяет сделать вывод, что скорость всплытия находится в диапазоне $0,1 \dots 0,5$ м/с. При этих условиях производительность эжектора определяется по формуле

$$v_{\text{эжс}} = 0,75 f \cdot w_{\text{эжс}}, \quad (1)$$

где f — площадь сечения на выходе эжекторного канала, м².

Производительность эжектора уменьшена на четверть, т.к. осевой поток омывает только 3/4 поверхности корпуса эжектора.

Отсос эжектором воздуха осуществляется из обеих полостей одновременно. Учитывая это, скорость воздуха, отсасываемого из одной полости в зазоре между экраном и диском на среднем радиусе расчетного участка, определится по формуле

$$w_i = \frac{v_{эж} \cdot n}{2 \cdot F_i}, \quad (2)$$

где: n – число эжекторов;

$F_i = \pi \cdot d_i \cdot \delta_i$ – площадь проходного сечения в зазоре между экраном и диском на среднем радиусе i -го расчетного участка, м^2 ;

d_i – текущий средний диаметр расчетного участка, м ;

δ_i – ширина зазора между экраном и диском на среднем диаметре расчетного участка, м .

Как показали опыты, если число и размеры эжекторных каналов остаются постоянными, то количество отсасываемого воздуха из полости ротора прямо пропорционально осевому расходу воздуха, который протекает через кольцевой канал под ступицей экранированного диска. В наших опытах с изменяемым расходом воздуха при девяти эжекторах количество отсасываемого из обеих полостей воздуха во всех случаях составило 12% от величины осевого расхода воздуха.

Опытами установлено, что эффективность прогрева ступичной части диска зависит от величины площади выходного сечения эжекторных каналов. С уменьшением количества и размеров эжекторных каналов увеличивается температура отсасываемого в меньших количествах горячего воздуха, что увеличивает температуру ступичной части диска. В наших опытах этот эффект наблюдался в диапазоне $10 \leq F_{\text{ВХ}} / F_{\text{ВЫХ}} \leq 70$, где $F_{\text{ВХ}}$ — сумма площадей входных сечений зазора между экраном и диском периферии обеих полостей; $F_{\text{ВЫХ}}$ — сумма площадей сечений на выходе эжекторных каналов.

Как видно на рис. 2, в диапазоне $35 \leq F_{\text{ВХ}} / F_{\text{ВЫХ}} \leq 70$ разогрев ступицы снижается, т.е. уменьшается количество отсасываемого горячего воздуха, а вместе с ним уменьшается количество подводимого к ступице тепла. При $F_{\text{ВХ}} / F_{\text{ВЫХ}} < 10$ разогрев ступицы также уменьшается, т.к. из-за больших количеств отсасываемого воздуха воздух не успевает разогреться.

Распределение температуры по радиусу диска подчиняется закону, который в нашем случае принимает вид

$$t_{\text{ЭК}} = (t_{\text{ВЫХ}} + (t_{\text{МАХ}} - t_{\text{ВЫХ}}) \left(\frac{r_i}{r_{\text{МАХ}}} \right)^{m_3}), \quad (3)$$

где: $t_{\text{ЭК}}$ – температура i -го расчетного участка экранированного диска с эжекторными каналами, °C;

$t_{\text{ВЫХ}}$ – температура охлаждающего воздуха под ступицей экранированного диска, °C; определяется по зависимостям работы [5];

$t_{\text{МАХ}}$ – температура газа в проточной части ступени экранированного диска, °C;

r_i – средний радиус расчетного участка, м;

$r_{\text{МАХ}}$ – максимальный радиус диска, м.

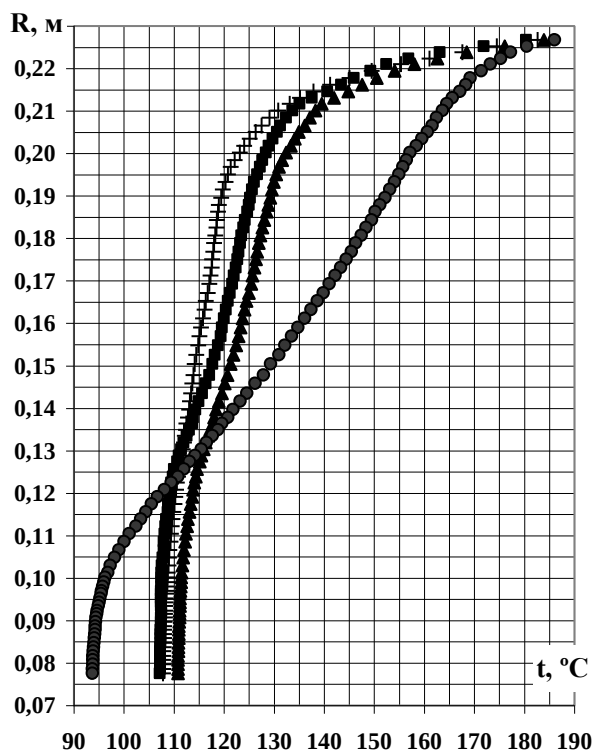


Рис. 2. Распределение температуры по радиусу диска: ● – неэкранированный диск; экранированный диск с эжекторными каналами: + – 9 каналов, $F_{\text{ВХ}} / F_{\text{ВЫХ}} = 11,4$; ▲ – 3 канала, $F_{\text{ВХ}} / F_{\text{ВЫХ}} = 34,2$; ■ — 3 канала, $0,5 F_{\text{ВЫХ}}$, $F_{\text{ВХ}} / F_{\text{ВЫХ}} = 70,9$

Для экранированного диска с эжекторными каналами показатель степени m_3 определится по формуле:

$$m_3 = c Re^x \cdot \left(\frac{F_{\max} \cdot r_{\Pi}}{F \cdot R} \right)^y \cdot \left(\frac{F_{\text{эж ВХ}}}{F_{\text{эж ВЫХ}}} \right)^z \cdot m_0, \quad (4)$$

где c, y, z – соответственно множитель и показатели степени, определяемые по экспериментальным данным для каждого расчетного участка диска;

$Re = \frac{w_i \cdot d_{\text{экв}}}{\nu}$ – число Рейнольдса, определяемое по скорости воздуха

в зазоре между экраном и диском;

$\left(\frac{F_{\max} \cdot r_{\Pi}}{F \cdot R} \right)$ – степень экранирования диска;

$F_{\max}$ – площадь поверхности диска, m^2 ;

r_{Π} – радиус междисковой полости, m ;

F – площадь неэкранированных участков диска, m^2 ;

R – радиус подвода воздуха в зазор между экраном и диском, m .

$m_0 = c_1 Re_{\omega}^{\alpha} \cdot \left(\frac{t_{\max} - t_{\text{вых}}}{t_{\text{вых}}} \right)^{\beta}$ – показатель степени в формуле (3) для

расчета распределения температуры на неэкранированном диске;

$Re_{\omega} = \frac{\omega \cdot r_{\max}^2}{\nu}$ – число Рейнольдса вращательного движения.

Температурное состояние дисков с исследуемыми вариантами конструкций показано на рис. 3. Как видно из графика, наименьший перепад температуры по радиусу диска имеет полностью экранированный диск с эжекторными каналами, расположенными в кольцевом зазоре под ступицей диска.

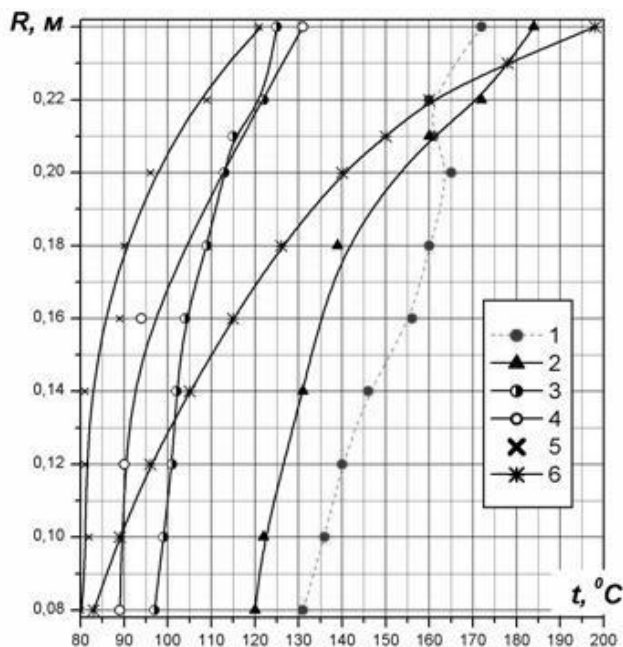


Рис. 3. Температурное состояние диска с эжекторными устройствами в стационарных условиях теплообмена: 1 – эжекторные устройства с длинными трубками; 2 – эжекторные устройства с трубками средней длины; 3 – полное экранирование диска с эжекторными каналами; 4 – при наличии в экране отверстий; 5 – экранирование ступицы и 2/3 полотна диска; 6 – без устройств в полости ротора

Установлено [6,7], что увеличение степени экранирования позволяет увеличить разогрев ступичной части диска за счет большего отвода тепла с периферии междисковой полости от проставочных колец; при увеличении скорости осевого потока охлаждающего воздуха увеличивается отструивание горячего воздуха с помощью эжектирования, что приводит к большему разогреву ступицы диска.

3. ВЫВОДЫ

Предложенный метод расчета производительности эжекторных каналов с методикой расчета скорости охлаждающего воздуха в зазоре между экраном и диском позволяет определить на стадии проектирования оптимальные размеры устройств для уменьшения температурных напряжений в дисках роторов газотурбинных двигателей.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] САЛОВ Н.Н.: *Исследование температурного состояния экранированных роторов ГТД с эжекторными устройствами*. Салов Н.Н., Харченко А.А., Горобец Г.В., Бубенцов В.М., *Авиационно-космическая техника и технология*, 2006, №8, с.117–120.
- [2] САЛОВ Н.Н.: *Исследование термонапряженного состояния экранированных дисков роторов ГТД с эжекторными каналами*. Салов Н.Н., Харченко А.А., Горобец Г.В., *Вестник двигателестроения*, 2007, №3, с.123–126.
- [3] ЩУКИН В.К.: *Газоструйные компрессоры*. Щукин В.К., Калмыков И.И., М.: Машгиз, 1963, с. 148.
- [4] САЛОВ Н.Н.: *Исследование режимов течения в радиальном вращающемся канале при прокачке теплоносителя вдоль оси вращения*. Салов Н.Н., Александрова Л.В., Бубенцов В.М., Химченко Е.С., *Рабочие процессы в охлаждаемых турбомашинах газотурбинных двигателей*, Казань: КАИ, 1989, с. 104–106.
- [5] САЛОВ Н.Н.: *К определению подогрева воздуха, транспортируемого через полости осевого компрессора*. Салов Н.Н., *Изв. вузов. Авиационная техника*, 2000, №1, с. 63–65.
- [6] ХАРЧЕНКО А.А.: *Уменьшение радиальной неравномерности температурных полей в дисках роторов ГТД дискобарабанной конструкции*: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03, Харченко Андрей Александрович, Харьков, 2008, с. 20.
- [7] САЛОВ Н.Н.: *Гидродинамика и теплообмен в роторах и трансмиссиях газотурбинных двигателей. Уменьшение температурных напряжений в дисках*. Салов Н.Н., Харченко А.А., М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2015, с. 180.

Сергей БРАТАН, Александр ХАРЧЕНКО*,
Екатерина ВЛАДЕЦКАЯ**

ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ВИБРОИЗОЛИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ШЛИФОВАЛЬНОГО СТАНКА ПЛАВУЧЕЙ МАСТЕРСКОЙ

1. АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ

Для поиска рациональных технических решений по конструкции виброизолирующих устройств станка, работающего в условиях плавучей мастерской, использован метод морфологического анализа, достаточно полно разработанный для решения технических задач, в частности проектирования станков, их узлов и механизмов [1]. Проведенные мероприятия позволили решить задачу синтеза на уровне структурно-компоновочной оптимизации [2]. Этап параметрического синтеза и проведение дополнительных теоретических и практических исследований реальных конструкций виброизолирующих устройств, выполненные в Севастопольском государственном университете, позволили создать новые конструкции виброизолирующей опоры (рис. 1) [3] и виброизолирующего устройства металлорежущего станка плавучей мастерской (рис. 2) [4].



Рис. 1. Виброизолирующие опоры новой конструкции

* Севастопольский государственный университет, ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, Россия, serg.bratan@gmail.com, khao@list.ru, vladetska@rambler.ru

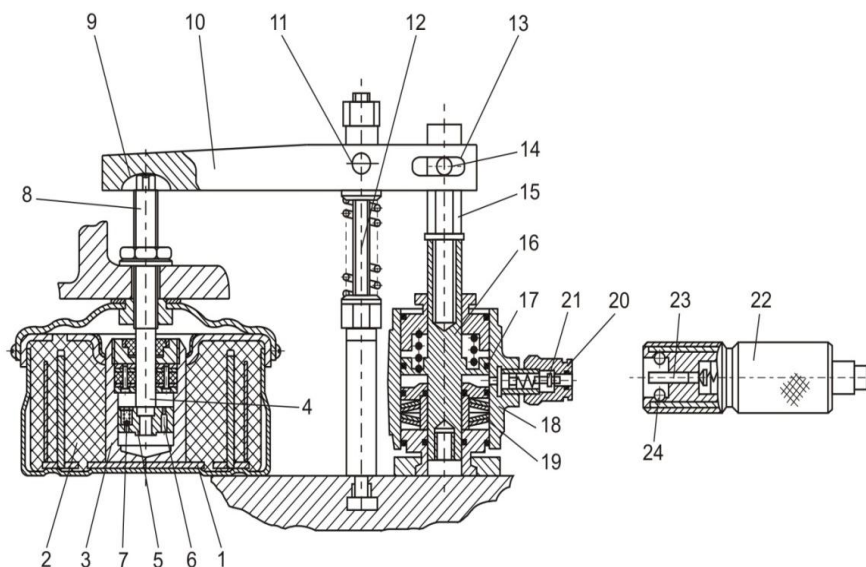


Рис. 2. Общий вид виброизолирующего устройства: 1 – основание; 2 – резиновый элемент; 3 – цилиндр; 4 – шток; 5 – поршень; 6 – калиброванное отверстие; 7 – клапан сжатия; 8 – регулировочный винт; 9 – сферическая поверхность лунки; 10 – прихват; 11 – ось; 12 – стойка; 13 – продольный паз; 14 – ось; 15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

2. МАТЕРИАЛЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для оценки надежности вариантов выбранных структур необходимо рассмотреть особенности возникновения отказов функционирования, то есть эксплуатационную надежность системы виброизолирующего устройства (ВУ) (рис. 3).

Каждый элемент подсистемы ВУ может иметь различные интенсивности восстановления μ , а также и различные интенсивности отказов λ , т.е. разную надежность. При этом сложный элемент (подсистема) при одинаковом λ может иметь меньшее значение μ (меньшую надежность). Либо при одинаковом μ большее значение λ , чем менее сложный элемент. Это необходимо учесть при выборе критериев оценки эффективности структур ВУ.



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

Рассматривая виброизолирующее устройство как дискретную систему, примем, что элементы (подсистемы) отказывают независимо друг от друга, причем каждый элемент после отказа восстанавливается. Будем считать, что исходные свойства подсистемы восстанавливаются полностью, а работа, отказы и восстановления одной подсистемы никак не влияют на надежность других. Моменты отказа каждой подсистемы образуют процесс восстановления, причем в силу наших предположений, эти процессы независимы. Обозначим через $F_k(t)$ закон распределения времени жизни k -й подсистемы (элемента). Предполагаем, что эти законы имеют непрерывную плотность $f_k(t)$ и существуют среднее время жизни подсистемы (элемента) T_k и его дисперсия σ_k^2 .

Поскольку подсистемы в системе ВУ с точки зрения надежности соединены последовательно (рис. 4), то отказ любой подсистемы вызывает отказ всей системы. Появление отказов на одном участке времени не меняет вероятности появления какого-либо числа отказов на другом участке, не пересекающимся с первым. Из этих физических соображений следует, что при сделанных выше предположениях в потоке отказов системы ВУ должно отсутствовать последствие. Кроме того, предположим, что законы распределения $F_k(t)$ имеют непрерывные плотности. Отсюда следует, что функция $H(t)$ – среднее число отказов – непрерывна и поток отказов системы ВУ является ординарным, т.е. вероятность одновременного появления двух отказов ничтожно мала. С учетом приведенных доводов, рассмотрена система ВУ как физически дискретная система, которая может находиться в состояниях S_0, S_1, S_2, S_3, S_4 .

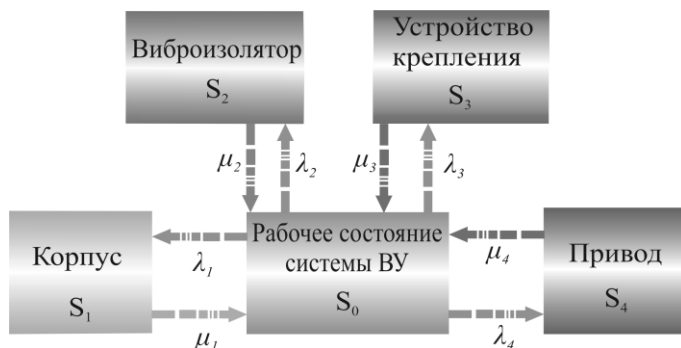


Рис. 4. Размеченный граф состояний ($S_0, S_1, \dots, S_4$) системы ВУ с учетом отказов ее подсистем: $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ – интенсивности потока отказов соответственно корпуса, виброизолятора, устройства крепления, привода; $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$ – интенсивности потока восстановлений указанных подсистем

Состояние S_0 характеризует нормальное функционирование виброизолирующего устройства (ВУ) при отсутствии отказов.

В состоянии S_1 требуется ремонт вышедшего из строя корпуса вследствие потока отказов его функционирования с интенсивностью λ_1 . В этом случае $\lambda_1 = 1/\overline{T}_k$, где $\overline{T}_k$ – среднее время между двумя отказами функционирования корпуса, ч.

Состояние S_2 характеризуется выходом из строя виброизолятора из-за потоков отказов с интенсивностью λ_2 . При этом $\lambda_2 = 1/\overline{T}_B$, где $\overline{T}_B$ – среднее время между двумя отказами функционирования виброизолятора, ч.

В состоянии S_3 требуется ремонт или замена вышедшего из строя устройства крепления вследствие потока отказов с интенсивностью λ_3 . В этом случае $\lambda_3 = 1/\overline{T}_y$, где $\overline{T}_y$ – среднее время между двумя отказами функционирования устройства крепления, ч.

В состоянии S_4 требуется ремонт вышедшего из строя привода вследствие потока отказов с интенсивностью λ_4 . В этом случае $\lambda_4 = 1/\overline{T}_\Pi$, где $\overline{T}_\Pi$ – среднее время между двумя отказами функционирования привода, ч.

Величины $\overline{T}_k$, $\overline{T}_y$, $\overline{T}_B$, $\overline{T}_\Pi$ определяются по общей формуле

$$\overline{T} = \sum_{j=1}^m \frac{t_j}{m},$$

где t_j – интервал между $(j-1)$ -м и j -м отказами; m – число отказов функционирования соответствующей подсистемы виброизолирующего устройства.

Каждая подсистема ВУ подвергается восстановлению после отказа. Интенсивность восстановления соответственно для каждой подсистемы обозначим $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$, считая при этом, что время восстановления, являющиеся случайной величиной, подчиняется закону Пуассона:

$$\mu_1 = \frac{1}{\bar{T}_{BK}}; \mu_2 = \frac{1}{\bar{T}_{BB}}; \mu_3 = \frac{1}{\bar{T}_{BY}}; \mu_4 = \frac{1}{\bar{T}_{ВП}},$$

где $\bar{T}_{BK}$ – среднее время восстановления (ремонта) корпуса, ч; $\bar{T}_{BB}$ – среднее время восстановления (замены) виброизолятора, ч; $\bar{T}_{BY}$ – среднее время восстановления (замены) устройства крепления, ч; $\bar{T}_{ВП}$ – среднее время восстановления (ремонта) привода, ч.

Для описания размеченного графа состояний системы виброизолирующего устройства обозначим вероятность ее нахождения в каждом из вышеуказанных состояний соответственно P_0, P_1, P_2, P_3, P_4 .

P_0 – вероятность нормальной работы ВУ при отсутствии отказов, $P_0 = P(S_0)$; P_1 – вероятность отказа подсистемы корпуса, $P_1 = P(S_1)$; P_2 – вероятность отказа подсистемы виброизолятора, $P_2 = P(S_2)$; P_3 – вероятность отказа подсистемы устройства уплотнения, $P_3 = P(S_3)$; P_4 – вероятность отказа подсистемы привода, $P_4 = P(S_4)$.

Состояние системы определяется совокупностью уравнений финальных вероятностей:

$$\begin{cases} P_0(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4) = P_1\mu_1 + P_2\mu_2 + P_3\mu_3 + P_4\mu_4; \\ P_1\mu_1 = P_0\lambda_1; \\ P_2\mu_2 = P_0\lambda_2; \\ P_3\mu_3 = P_0\lambda_3; \\ P_4\mu_4 = P_0\lambda_4. \end{cases} \quad (1)$$

Система (1) решается с помощью условия нормирования:

$$\sum_{i=0}^4 P_i = 1.$$

В уравнениях интенсивности λ – характеризуют входящий поток – поток отказов, интенсивности μ – выходящий поток – поток восстановлений.

Из (1) определяем финальные вероятности:

$$\begin{cases} P_0 = (1 + \lambda_1 / \mu_1 + \lambda_2 / \mu_2 + \lambda_3 / \mu_3 + \lambda_4 / \mu_4)^{-1}; \\ P_1 = P_0 \lambda_1 / \mu_1; \\ P_2 = P_0 \lambda_2 / \mu_2; \\ P_3 = P_0 \lambda_3 / \mu_3; \\ P_4 = P_0 \lambda_4 / \mu_4. \end{cases}$$

Решение полученной системы уравнений и результаты расчетов позволят выявить наименее надежную из подсистем виброизолирующего устройства, определив вероятности их отказов.

Блок-схема программы расчета надежности рациональных вариантов систем виброизолирующих устройств включает следующие основные этапы:

- 1) ввод названий элементов базовой системы;
- 2) расчет количества элементов;
- 3) генерация матрицы исходных данных;
- 4) заполнение матрицы исходными данными;
- 5) формирование уравнения финальных вероятностей;
- 6) расчет вероятности безотказной работы системы;
- 7) расчет вероятностей отказов элементов системы;
- 8) генерация матрицы результатов;
- 9) вывод результатов моделирования.

Рассмотрим каждый пункт словесного алгоритма. Первый пункт предполагает ввод названий элемента системы пользователем для идентификации их в дальнейшей работе программы и при выводе результатов. Для этого будет использоваться отдельное поле, в которое непосредственно вводится название элемента и список, в котором будут отображаться уже введенные подсистемы или элементы.

Во втором пункте после окончания ввода названий элементов, производится расчет количества элементов в заданной системе. Эта информация служит для создания дальнейшего интерфейса программы (появления необходимого количества полей ввода для параметров элементов), так и для расчетов финальных вероятностей.

В третьем пункте производится генерация матрицы исходных данных, т.е. создается матрица с пустыми значениями потоков отказов и восстановлений для каждого элемента, присутствующего в системе. В соответствии с этой матрицей на рабочем поле программы создается необходимое количество полей ввода для таких данных, как потоки отказов и восстановлений соответствующих элементов системы. В ходе процесса,

описанного в четвертом пункте, пользователь вводит данные о потоках отказов и восстановлений в поля ввода, присутствующие на рабочем поле программы. Эти данные автоматически заносятся в матрицу исходных данных.

Пятый пункт предполагает составление программой системы финальных уравнений для заданной системы. Подробный алгоритм этой операции рассмотрен в [5].

В пунктах шесть и семь решается система финальных уравнений. Для начала вычисляется вероятность безотказной работы P_0 . Затем вычисляются вероятности отказов каждого элемента системы $P_1...P_n$. Пункт восемь отвечает за создание матрицы результатов и запись полученных результатов в соответствующие ячейки этой матрицы.

Вывод результатов моделирования осуществляет пункт девять. Вывод результатов предполагается реализовать в текстовом и графическом виде. Текстовый вид представляет собой список с указанием элемента и вероятностью его отказа, в конце выводится вероятность безотказной работы системы. Графический вид выполняется в виде диаграммы, по оси X расположены элементы системы, по оси Y – вероятности отказов этих элементов. Для удобства чтения данной диаграммы вероятность безотказной работы не выводится, т.к. является несоизмеримо большей по величине. Графический алгоритм программы представлен на рис. 5. На рис. 6 представлен пример работы предлагаемой программы для вычисления вероятностей безотказной работы системы виброизолирующего устройства, а также отказов его подсистем, описанных в работе [6].

Эксплуатационные данные по параметрам потоков отказов и восстановления подсистем виброизолирующего устройства, а также результаты моделирования приведены в таблице 1.

Таб.1. Результаты расчетов надежности подсистем виброизолирующего устройства

Подсистема	Интенсивность потока отказов, ч^{-1}	Интенсивность потока восстановлений, ч^{-1}	Вероятность отказа
Корпус	0,00039	0,07142	0,0052
Виброизолятор	0,00040	0,03840	0,0100
Устройство крепления	0,00043	0,15384	0,0026
Привод	0,00100	0,04545	0,0211
Вероятность безотказной работы системы ВУ			0,9609

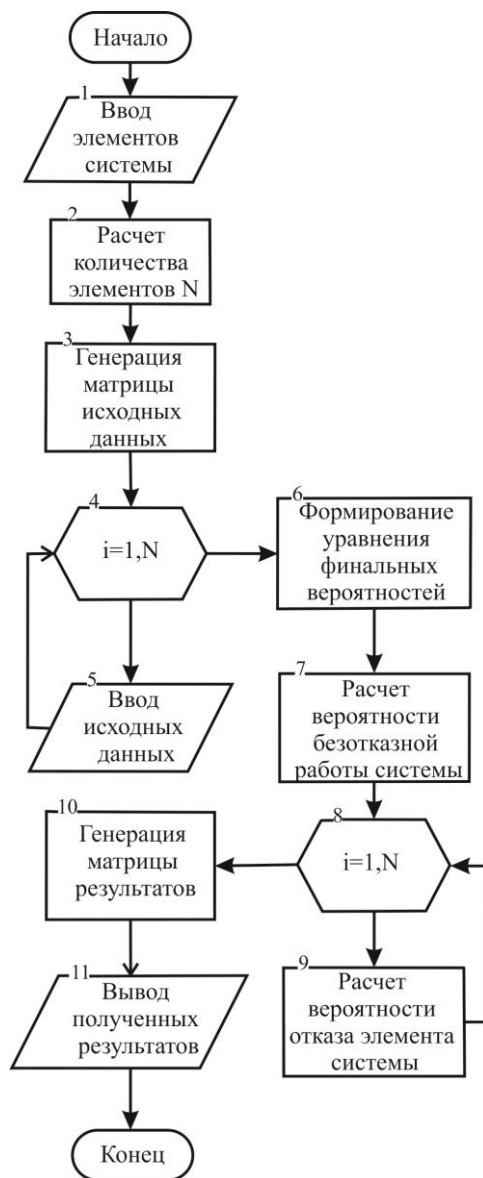


Рис. 5. Графический алгоритм расчета надежности системы ВУ

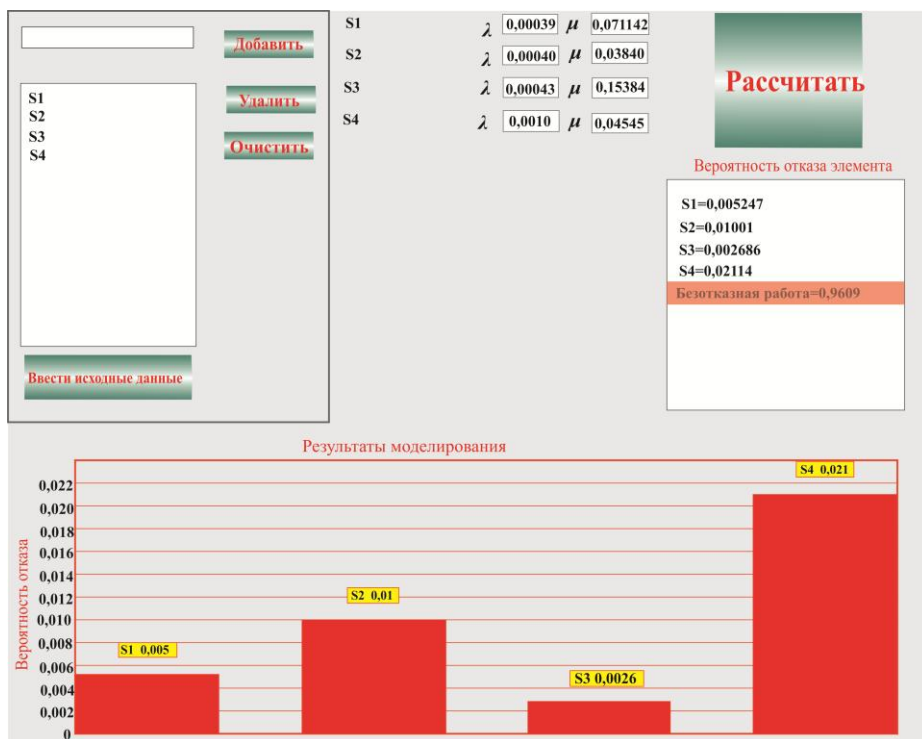


Рис. 6. Результаты программы расчета надежности подсистем виброизолирующего устройства

Машинный эксперимент показал достаточно высокую эксплуатационную надежность виброизолирующего устройства ($P_0 = 0,9609$), т.е. более 96% своего ресурса устройство находится в рабочем состоянии, а около 4% — в состоянии ремонта (восстановления) его подсистем. К наименее надежной подсистеме следует отнести привод (вероятность отказа $P_4 = 0,0211$, т.е. 2,11%), далее – виброизолятор (вероятность отказа $P_2 = 0,01$, т.е. 1%), затем корпус ($P_1 = 0,0052$, т.е. 0,52%) и устройство крепления (вероятность отказа $P_3 = 0,0026$, т.е. 0,26%). Выявленные наименее надежные элементы и подсистемы нуждаются в усовершенствованиях конструкторско-технологического характера – путем оптимизации конструкции и технологических мероприятий, которые могут привести к существенному увеличению сроков службы изделия.

3. ВЫВОДЫ

Для продолжения машинного эксперимента необходимо получить эксплуатационные данные для новых вариантов подсистем и системы и повторить процесс расчетов, начиная с первого этапа. Однако в данном случае подсистем и элементов, имеющих надежность, существенно влияющую на вероятность безотказной работы системы, не выявлено, так как даже наименее надежный элемент — привод (вероятность отказа — 2,11%) не оказывает существенного влияния на работоспособность системы и поэтому дальнейшей оптимизации с точки зрения повышения надежности на данном этапе не требуется.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] КУЗНЕЦОВ Ю.Н.: *Теория технических систем*. Кузнецов Ю.Н., Новоселов Ю.К., Луцив И.В., Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2010, с. 252.
- [2] ВЛАДЕЦКАЯ Е.А.: *Оптимизация структуры виброзащитных систем шлифовального станка на основе морфологического анализа*. Владецкая Е.А., Братан С.М., Харченко А.О., Вісник СевНТУ, Вип.140: Машиноприладобудування та транспорт: зб. наук. пр., Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2013, с.14–20.
- [3] ХАРЧЕНКО А.О., Владецька К.О., Братан С.М., Рапацький Ю.Л.: *Віброізолююча опора металорізного верстата*. Патент України 36389, 2008, Бюл. №20.
- [4] ХАРЧЕНКО А.О., Владецька К.О., Братан С.М., Владецький Д.О.: *Віброізолюючий пристрій металорізного верстата плавучої ремонтної майстерні*. Патент України 51621, 2010, Бюл. №14.
- [5] ВЛАДЕЦКАЯ Е.А.: *Повышение качества шлифовальной обработки в условиях плавучей мастерской*. Владецкая Е.А., Братан С.М., Перспективы науки, 2016: Сборник докладов III Международного конкурса научно-исследовательских работ (29 апреля 2016 года). Том III (Естественные и технические науки), Казань: ООО «Рocketsa Союз», 2016, с. 247–257.
- [6] ВЛАДЕЦКАЯ Е.А.: *Обеспечение качества шлифовальной обработки путем уменьшения внешних возмущений в условиях плавучей мастерской*. Владецкая Е.А., Братан С.М., Харченко А.О., Владецкий Д.О., Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, Орел: ФГБОУ ВО «ПГУ», 2015. №6 (314), с. 88–103.
- [7] БРАТАН С.М.: *Исследование надежности виброизолирующего устройства шлифовального станка*. Братан С.М., Владецкая Е.А., Наукоемкие технологии в машиностроении, Брянск: ФГБОУ ВО «БГТУ», 2016. №9 (63), с. 10–15.