

ZESZYTY NAUKOWE
KSW

Serie wydawnicze KSW

Debiuty Naukowe KSW (od 1998 r.)
Zeszyty Naukowe KSW (od 1997 r.)

Kujawska Szkoła Wyższa
we Włocławku

ZESZYTY NAUKOWE KSW

Tom XLVI

Półrocznik

seria G:
Nauki Techniczne

zeszyt 2
Procesy tribologiczne
w rzeczywistych systemach eksploatacyjnych



Włocławek 2018

Kolegium redakcyjne
Adam Wróbel (przewodniczący),
Jozef Jarab, Bazyli Degórski, Olena Bida, Sadi Saleh Sadiyev,
Jozef Biełak, Marian Šuráb, Martin Dojčár, Larysa Lukianova,
Jaroslav Slepecký, Adam Żwirbla

Redaktor tomu
dr inż. Michał Sójka

Recenzenci tomu
dr hab. inż. Łukasz Muslewski
(Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy)
dr hab. inż. Wiesław Urbaniak
(Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy)
dr hab. Stanisław Chrobak
(Uniwersytet Kardynała Stefana Wyszyńskiego w Warszawie)

Korekta językowa
dr Miłosz Kłobukowski

Projekt okładki
Regina Magier

DTP
Maciej Kolanowski

© Copyright by Kujawska Szkoła Wyższa
Włocławek 2018

ISSN 2543-585X

Wydawca
Kujawska Szkoła Wyższa we Włocławku
87-800 Włocławek, pl. Wolności 1
tel. 660 722 691
www.ksw.wloclawek.pl, e-mail: biurorektora@ksw.wloclawek.pl

SPIS TREŚCI

Wprowadzenie.....	9
Paweł Bukowski	
Analiza uszkodzeń wtryskiwaczy paliwa typu common rail stosowanych w przemysłowych silnikach o zapłonie samoczynnym.....	13
Zenon Pawlak, Wiesław Urbaniak	
Articular cartilage: a model based on lamellar bilayers and surface repulsion.....	27
Joanna Podemska	
Stres zawodowy jako problem społeczny	37
Mirosław Radwański	
Drgania poprzeczne niejednorodnego układu ciągłego na przykładzie lufy armatniej.....	47
Mirosław Radwański	
Podstawowa analiza drgań układów ciągłych.....	63
Michał Sójka	
Badanie procesów starzenia olejów przekładniowych w procesie eksploatacji przekładni planetarnych	85
Grzegorz Śmigielski	
Linia opóźniająca implementowana w układzie FPGA	99
Krzysztof Wiercholski	
Bio-hydro-elektro-magneto-dynamika mazi stawowej i potu treningowego w procesie przemiany materii.....	107
Informacje o autorach	119

TABLE OF CONTENTS

Introduction.....	9
Paweł Bukowski	
Analysis of injection of common rail injectors fuels used in industrial ignition engines with reactive ignition engines.....	13
Zenon Pawlak, Wiesław Urbaniak	
Articular cartilage: a model based on lamellar bilayers and surface repulsion.....	27
Joanna Podemska	
Occupational stress as a social problem.....	37
Mirosław Radwański	
Transverse vibrations of heterogeneous system on the example of a cannon barrel.....	47
Mirosław Radwański	
Basic analysis of vibrations of continuous systems.....	63
Michał Sójka	
Quality monitoring degradative changes gear oils during operation of transmission gear.....	85
Grzegorz Śmigielski	
Delay line implemented in an FPGA device.....	99
Krzysztof Wierzcholski	
Bio- hydro- electro- magneto- dynamics of synovial fluid and trained sweat in basal metabolic rate process.....	107
Information about authors.....	119

WPROWADZENIE

Dynamiczny rozwój technologiczny nakreśla kierunki zmian w sposobie projektowania, sterowania i obsługiwanie rzeczywistych systemów użytkowych, z jakimi mamy styczność na co dzień. Współczesne trendy rozwojowe wywierają duży wpływ na zmiany procesów poznawczych całej otaczającej rzeczywistości. Obecnie maszyny i urządzenia użytkowe pełniące określone funkcje wynikające z potrzeb cywilizacyjnych, np. pojazdy (potrzeba podróżowania czy transportowania towarów), muszą jednocześnie spełniać szereg norm ekologicznych, ergonomicznych i niezawodnościowych. Dodatkowo oczekuje się, by maszyny użytkowe były piękne, o niebagatelnym wyglądzie, odzwierciedlające swoje główne cechy: moc, prędkość, lekkość, bezpieczeństwo itd. Początkowo rozwój cywilizacji technicznej projektował użytkownika anonimowego. Przyjmowano, że wszyscy ludzie mają te same cechy, zarówno fizyczne, jak i psychiczne oraz te same oczekiwania. W rzeczywistości zróżnicowanie okazuje się bardzo duże i uwzględnienie indywidualnych upodobań jest bardzo trudne lub wręcz niemożliwe do osiągnięcia.

Aby spełnić oczekiwania i potrzeby użytkowników, m.in. środków transportu, powstała nowa grupa projektantów zajmujących się sztuką użytkową, czyli tzw. wzornictwem przemysłowym — designem. Designerzy (z j. ang.) działają na styku sztuki, nauki i techniki. Sztuka rozumiana jest jako wrażliwość na proporcje, zestawy barwne, zdolność określania cech formy itp. Nie bez znaczenia pozostają uwarunkowania kulturowe i aktualna moda. Designer często szuka inspiracji, obserwując otaczającą go przyrodę. Rezultaty tych badań można zobaczyć w modelowaniu nowych kształtów maszyn użytkowych czy pojazdów.

Równolegle można zaobserwować ciągłą poprawę ergonomii nowoczesnych obiektów technicznych. W przeszłości praca człowieka-operatora wymagała sprostania trudnym zadaniom i obciążeniom. Niejednokrotnie brak elementarnej ergonomii powodował u operatora niewygodę, ograniczenia widoczności, sterowanie w pozycjach wymuszonych czy w atmosferze nadmiernego hałasu. Przekonano się, że nie można projektować maszyn, urządzeń czy środków transportu nie uwzględniając ograniczeń, wynikających z możliwości psychofizycznych człowieka, czyli ich głównego użytkownika.

Zmiany te, zarówno dotyczące wizualnej formy zewnętrznej obiektu technicznego, jak i sposobu jego sterowania i związanego z tym poziomu ergonomii i bezpieczeństwa, nie modyfikują jednak istnienia w każdym urządzeniu skomplikowanych procesów eksploatacyjnych. Procesy te występują niezależnie

od typu, przeznaczenia, wielkości gabarytowych, sposobu działania, czy sterowania maszyny, urządzenia i pojazdu. Do takich procesów można zaliczyć procesy tribologiczne, a więc związanych z tarcieniem. Mogą występować jako procesy przygotowane: *pitting*, *spalling*, *fretting* czy *scuffing*, a także jako zużycie ściernie, adhezyjne czy przez utlenianie. Zawsze są to jednak procesy destrukcyjne, a eksploatacyjni technicy starają się, by ich przebieg był jak najmniej intensywny.

Paradoks tarcia w technice polega na tym, że jest zjawiskiem zarówno niepożądanym, jak i koniecznym. Od początku rozwoju cywilizacji pierwsi wynalazcy starali się zminimalizować współczynniki tarcia w parach ciernych typu czop–panewka w pierwszych zawiasach wrót warowni czy łożyskowaniu osi kół maszyn obrotowych lub wozów transportowych. Jednocześnie w wyniku istnienia tarcia możliwe było trwałe osadzanie tychże kół na osiach czy stosowanie prymitywnych hamulców ciernych. We współczesnych pojazdach, urządzeniach i maszynach tarcie minimalizowane jest najwyższej jakości środkami smarnymi, olejami syntetycznymi, czy też łożyskami wykonanymi z materiałów niskotarciowych. Z drugiej strony technicy poszukują materiałów o najwyższych współczynnikach tarcia, by za pośrednictwem sprzęgieł ciernych transmitować strumień mocy z silników na przekładnie i dalej na elementy wykonawcze. Ponadto zjawisko tarcia wykorzystywane jest powszechnie w systemach hamulcowych, gdzie energia ruchu obrotowego lub posuwistego za pośrednictwem par ciernych zamieniana jest w ciepło i rozpraszana do otoczenia.

W wyniku szeregu zmian dotyczących formy i postaci nowoczesnych obiektów technicznych oraz sposobu ich obsługi procesy zachodzące w tych obiektach stają się coraz bardziej ukryte przed operatorem czy użytkownikiem. Przykładowo silniki współczesnych pojazdów są coraz bardziej obudowane, wyciszone i odizolowane wibroakustycznie, a o procesach w nich zachodzących informowani jesteśmy sygnałami zapalanych kontrolki lub krótkimi ciągami znaków kodujących powstałe uszkodzenia czy niesprawności. Wiele istotnych procesów eksploatacyjnych zachodzących w tak skomplikowanym obiekcie technicznym, jakim jest silnik spalinowy, obrazowana jest kilkoma symbolami wyświetlanymi na konsoli kierowcy–operatora. Procesy eksploatacyjne, w czasie rzeczywistym, są monitorowane i diagnozowane, tworząc genezę, na podstawie której można prognozować o dalszym potencjale eksploatacyjnym — o przyszłych stanach awaryjnych i długości resursu do najbliższego procesu odnowy czy wymiany. Niestety, za pośrednictwem ograniczonego zestawu przyrządów kontrolno-pomiarowych i kilku świetlnych (czy dźwiękowych) kontrolki stanów poszczególnych podzespołów docierające do użytkownika informacje o procesach zachodzących w danym obiekcie technicznym są cząstkowe. Nie mając pełnej wiedzy co do zachodzących w obiekcie technicznym rzeczywistych procesów eksploatacyjnych (destrukcyjnych), można w sposób

niezamierzony doprowadzić do niesprawności obiektu technicznego, a nawet do uszkodzenia awaryjnego eliminującego możliwość dalszej eksploatacji.

Procesy tribologiczne, związane ze zjawiskiem tarcia, poza destrukcyjnym działaniem na elementy i podzespoły każdego obiektu technicznego, mogą dodatkowo emitować hałas i drgania. Drgania jako zjawisko niepożądane wprowadzają do układów kinematycznych zakłócenia ograniczające możliwość precyzyjnego sterowania procesem eksploatacji. Szczególnym rodzajem drgań są drgania w niejednorodnych układach ciągłych.

Zużycie tribologiczne par ciernych poza maszynami i urządzeniami występuje także w naturze. Zjawiska tarcia występujące w warstwach wierzchnich chrząstki stawowej powodują podobne zmiany degradacyjne. Warstwy lamelarne, oddzielone mazią stawową i płynem synowialnym z różnoimiennymi potencjałami elektrycznymi, stanowią niedościgniony wzór łożyska ślizgowego o możliwościach samoregeneracji. Niestety możliwości te są ograniczone w czasie i wraz ze wzrostem rezerwu stawu, liczonego w milionach cykli, a także wiekiem biologicznym „łożyska”, pogarszają się.

Opisane w artykułach procesy tribologiczne odnoszą się do rzeczywistych systemów eksploatacyjnych, a więc takich, które występują w realnym świecie. Dotyczy to zarówno wytworów współczesnej inżynierii: maszyn i urządzeń, jak i organizmów żywych. Sterowanie tymi procesami jest mocno ograniczone i sprowadza się do minimalizowania skutków destrukcyjnego działania zużycia eksploatacyjnego poprzez zapewnienie skutecznych metod eliminowania tarcia suchego i mieszanego na rzecz tarcia płynnego i granicznego. Racjonalna eksploatacja obiektów technicznych może być wspomagana przez sterowniki programowalne, natomiast „bezawaryjne” użytkowanie biologicznych par ciernych powinna zapewnić odpowiednia dieta i umiejętnie dostosowane ćwiczenia ruchowe czy trening sportowy. Ponadto aktywność fizyczna ogranicza niekorzystne oddziaływanie stresu, w szczególności stresu zawodowego związanego z intensywnym procesem myślowym na odpowiedzialnych stanowiskach pracy.

Zapraszam do lektury.

dr inż. Michał Sójka

Paweł Bukowski

(Kujawska Szkoła Wyższa we Włocławku)

ANALIZA USZKODZEŃ WTRYSKIWACZY PALIWA TYPU COMMON RAIL STOSOWANYCH W PRZEMYSŁOWYCH SILNIKACH O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM

Słowa kluczowe: silnik wysokoprężny; olej napędowy; common rail; wtryskiwacz paliwa; zużycie

ANALYSIS OF INJECTION OF COMMON RAIL INJECTORS FUELS USED
IN INDUSTRIAL IGNITION ENGINES WITH REACTIVE IGNITION ENGINES

Key words: diesel engine; diesel fuel; common rail; fuel injector; wear

Wprowadzenie

We współczesnych silnikach z zapłonem samoczynnym najpowszechniej wykorzystuje się układ zasilania oparty na technologii COMMON RAIL. Podstawową zasadą działania tego układu jest tłoczenie paliwa nie bezpośrednio do wtryskiwacza, ale do wspólnej szyny — zasobnika ciśnienia. Dopiero z tego miejsca paliwo przepływa do elektrycznie sterowanych wtryskiwaczy. Należy nadmienić, że ciśnienie w szynie może osiągnąć 2000–2500 bar. Tak wysokie ciśnienie panujące w układzie wymusza na producentach silników stosowanie aparatury wtryskowej o bardzo wysokiej precyzji działania, całkowicie nieodpornej na zanieczyszczenia mechaniczne.

Wraz z zaostrzeniem norm emisji spalin, zarówno w Europie, jak i w USA widoczna jest wyraźna tendencja zmierzająca do znacznego zmniejszenia zawartości wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych i związków siarki w olejach napędowych, przy jednoczesnym podniesieniu liczby cetanowej i obniżeniu temperatury wrzenia. Proponowane zmiany własności fizykochemicznych i składu olejów napędowych przyczyniają się do zmniejszenia emisji szkodliwych substancji zawartych w spalinach, obniżają także temperaturę blokady zimnego filtra, co jest ich pozytywnym aspektem. Z uwagi jednak

na obniżenie zawartości związków siarki i węglowodorów aromatycznych w tych paliwach odnotowuje się wyraźny spadek smarności i własności przeciwzużyciowych [2, s. 59]. Powyższe, wraz z nieskuteczną filtracją oleju napędowego, jest przyczyną większości uszkodzeń współczesnych silników o zapłonie samoczynnym. Nieprawidłowa praca aparatury wtryskowej ma bezpośredni wpływ na szereg parametrów pracy silnika, w tym temperatury w komorze spalania, co finalnie może skutkować termiczną degradacją materiału tłoka i doprowadzić do zniszczenia silnika.

Pogorszenie własności przeciwzużyciowych i paramentów smarności olejów napędowych powoduje przyspieszone zużycie, a nawet zużycie awaryjne elementów układu wtryskowego COMMON RAIL, w szczególności pompy rotacyjnej i par precyzyjnych wtryskiwaczy-rozpylaczy. Zużycie to ma charakter zużycia tribologicznego [1, s. 252].

Charakterystyka obiektu badań

Badaniom poddane zostały wtryskiwacze BOSCH o numerze katalogowym Y 431 K05 194, numerach seryjnych:

- 0956/Cyl. 7,
- 0967/Cyl. 6,
- 1028/Cyl. 4,
- 1037/Cyl. 3,
- 1107/Cyl. 5

pracujące w silniku napędu agregatu prądotwórczego o mocy znamionowej 500 kW. Producentem silnika jest firma IVECO. Handlowe oznaczenie tej jednostki jest następujące: VECTOR 8V FVQE2883X*A201. Pełną specyfikację silnika można znaleźć na stronach www pod następującym adresem: <http://www.powertechengines.com/IvecoData/VectorIndustrialSpecs.pdf>

5 z 8 wtryskiwaczy zostało zdemontowanych z silnika na podstawie reklamacji użytkownika, który zgłaszał trudności z osiągnięciem mocy znamionowej generatora, zadymienie spalin w kolorze białym oraz hałaśliwą pracę silnika. Przy użyciu specjalistycznego interfejsu diagnostycznego IVECO zdiagnozowano odchyłkę dawek korekcyjnych poszczególnych cylindrów. Na podstawie odczytu danych wytypowano nieprawidłowo działające wtryskiwacze, które poddano dalszym działaniom diagnostycznym. W momencie demontażu, silnik miał 7187 motogodzin pracy.

Przebieg badań

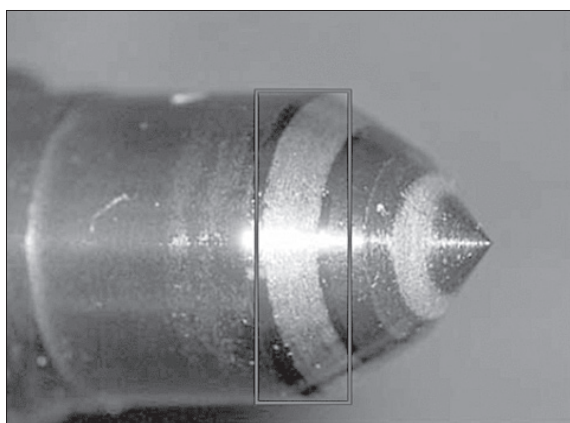
W pierwszej kolejności przeprowadzono test funkcjonalny wtryskiwaczy na stole probierczym BOSCH. Urządzenie wykazało, iż wszystkie testowane wtryskiwacze są niezgodne z wymaganiami i wykazują wysoki poziom przecieku na zaworze sterującym.

Tabela 1. Wydruk parametrów uzyskanych podczas testu na stole probierczym

Prod. date	Serial Nr.	CP1	CP2	CP3	CP4	Q_guiding	Q_seat
687	956	488,41	389,21	8,67	8,76	10,64	513,04
687	967	395,28	382,60	12,37	15,47	8,88	347,77
687	1028	–	–	–	–	–	–
687	1037	–	–	–	–	–	–
688	1107	307,84	371,74	7,34	11,44	7,27	90,26

Kolorem ciemnoszarym oznaczono wartości parametrów odpowiadające przyjętym normom. Kolor jasnoszary to wartości poza normą lub poza zakresem pomiarowym.

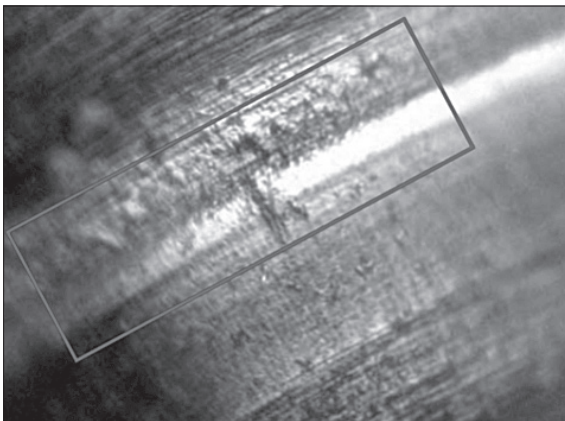
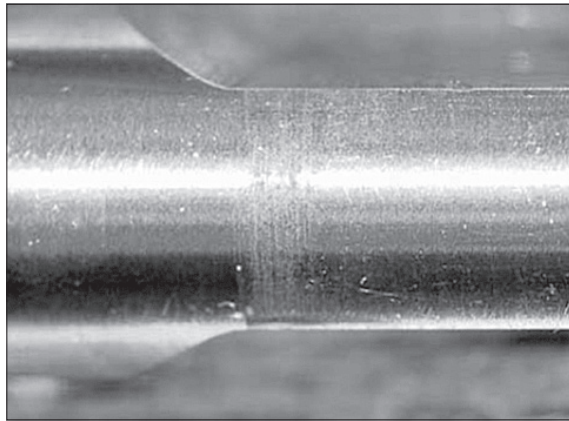
W dalszym przebiegu badań wtryskiwacze poddano procesowi demontażu. Po rozmontowaniu skupiono się na stanie technicznym zaworów sterujących, a w szczególności igieł zaworów oraz ich gniazd. Do oceny użyto mikroskopu optycznego z możliwością zapisu obrazu oraz mikroskopu elektronowego skaningowego marki JEOL.



Wtryskiwacz nr 0956

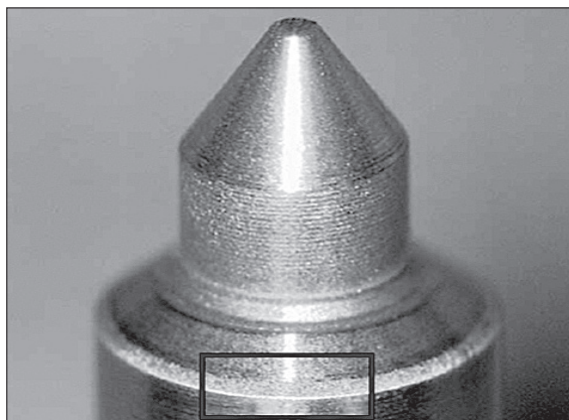
Fotografia 1. Widoczne zużycie nawęglonej warstwy wierzchniej przylgni zaworu

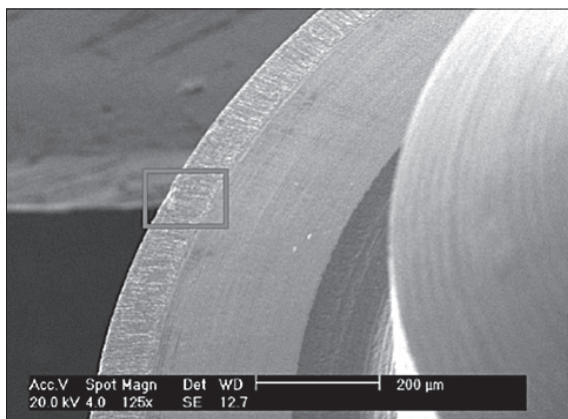
Fotografia 2. Rysy na powierzchni zewnętrznej prowadzenia iglicy zaworu



Fotografia 3. Szczegół obrazujący uszkodzenie gniazda zaworu

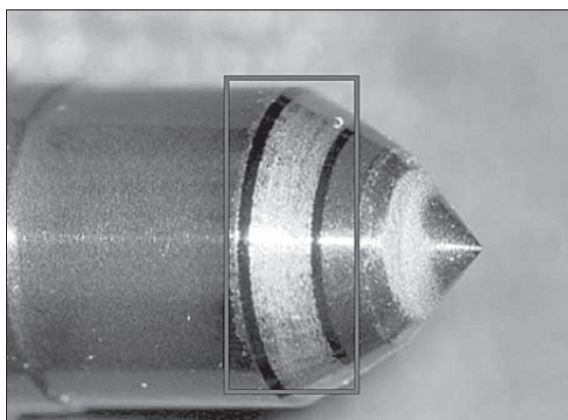
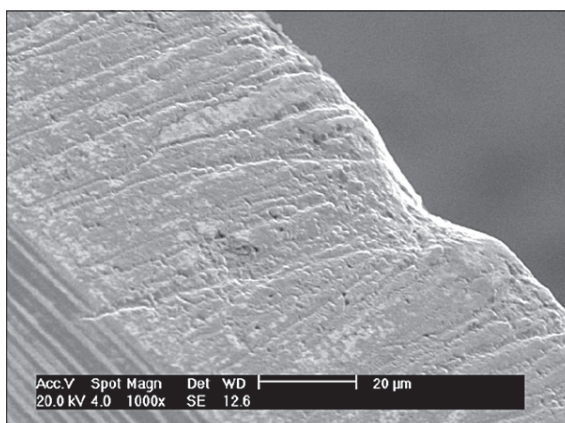
Fotografia 4. Uszkodzenia krawędzi uszczelniającej iglicy zaworu





Fotografia 5. Obraz krawędzi uszczelniającej iglicy pod mikroskopem elektronowym

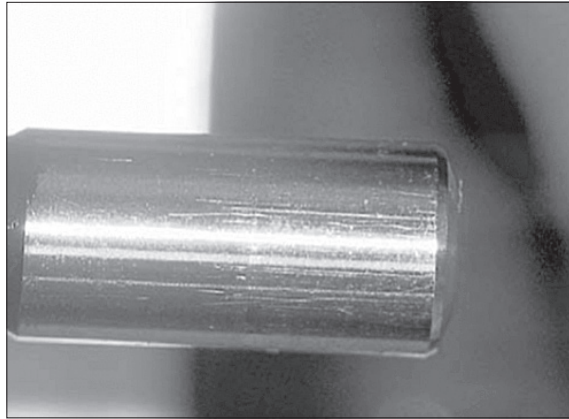
Fotografia 6. Uszkodzenia krawędzi uszczelniającej iglicy zaworu (przecieki 513 mm³/min)



Wtryskiwacz nr 0967

Fotografia 7. Widoczne zużycie nawęglonej warstwy wierzchniej przyłgni zaworu

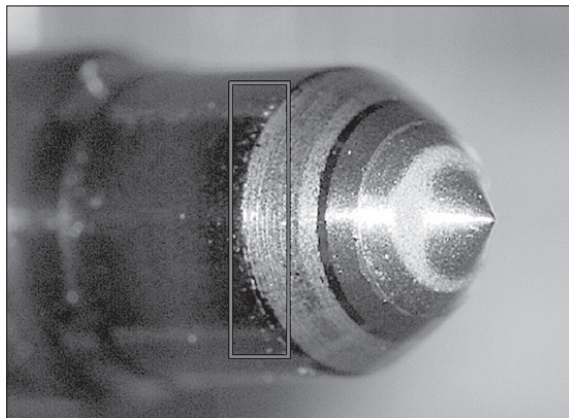
Fotografia 8. Zarysowania
na powierzchni prowadzącej
iglicę zaworu

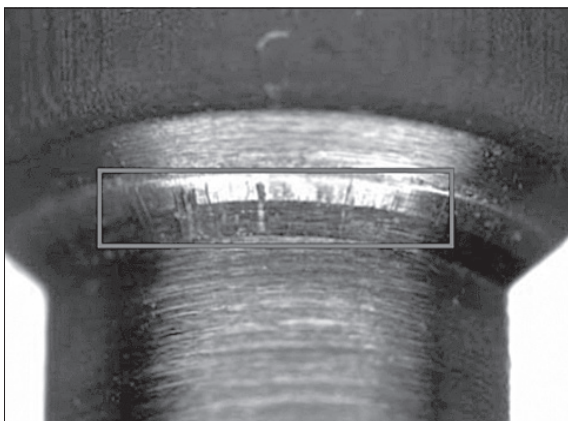


Fotografia 9. Uszkodzenia
krawędzi uszczelniającej
iglicy zaworu

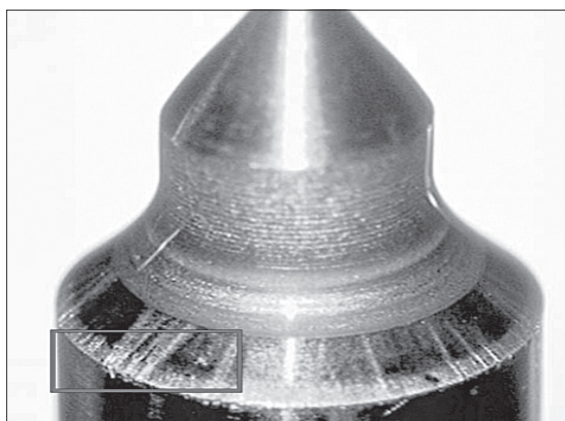
Wtryskiwacz nr 1028

Fotografia 10. Powierzchnia
przyłgni iglicy
— niesymetryczne zużycie
jako efekt luzu prowadzenia

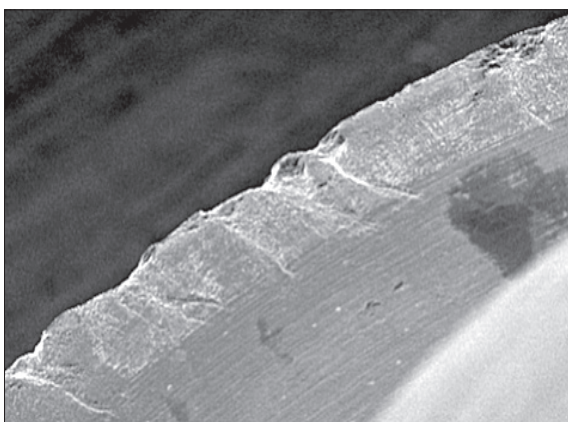




Fotografia 11. Uszkodzenie przyłgni zaworu

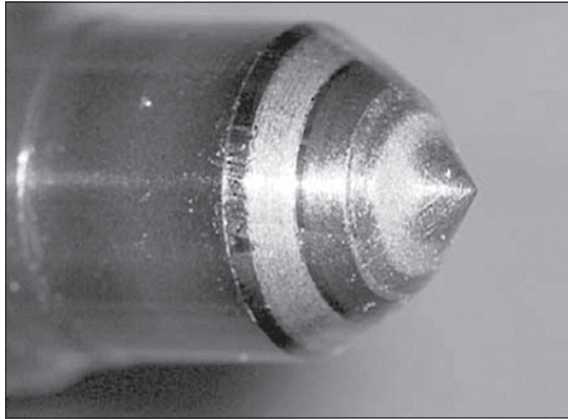


Fotografia 12. Uszkodzenie krawędzi uszczelniającej iglicy zaworu

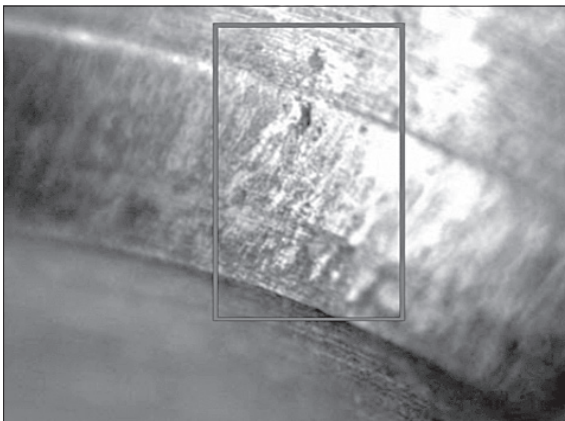


Fotografia 13. Obraz uszkodzeń krawędzi uszczelniającej pod mikroskopem elektronowym

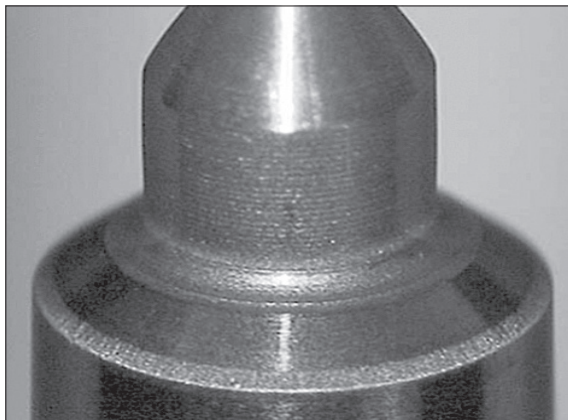
Wtryskiwacz nr 1037



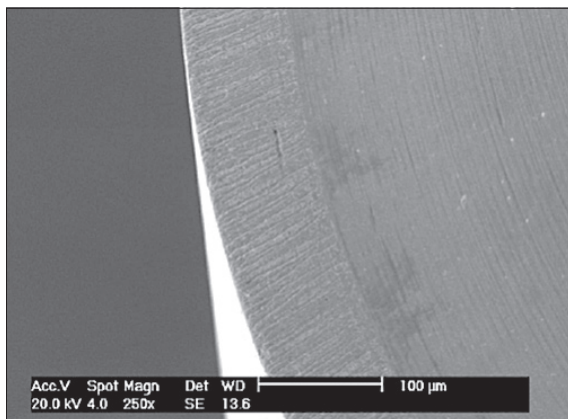
Fotografia 14. Widoczne zużycie nawęglonej warstwy wierzchniej przyłgni zaworu



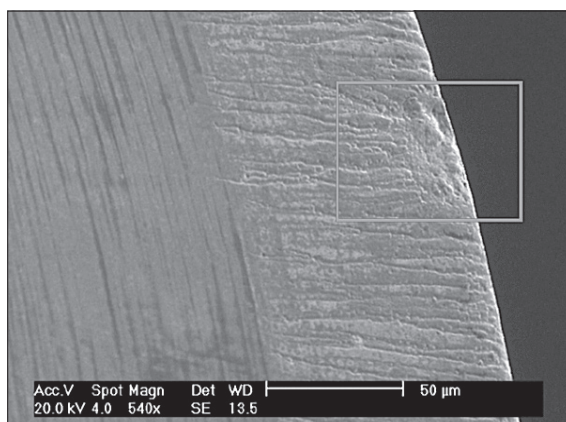
Fotografia 15. Uszkodzenie przyłgni gniazda zaworu sterującego



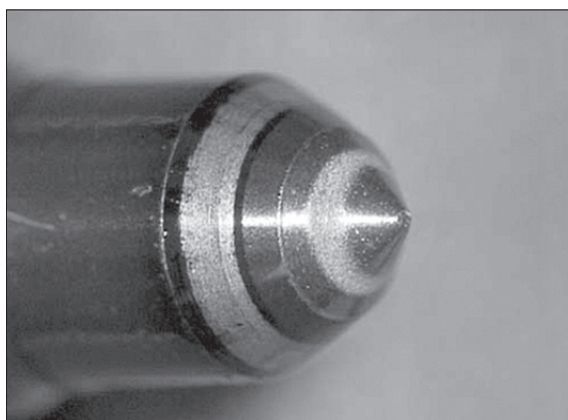
Fotografia 16. Uszkodzenia przyłgni iglicy zaworu



Fotografia 17. Obraz mikroskopowy uszkodzeń krawędzi uszczelniającej

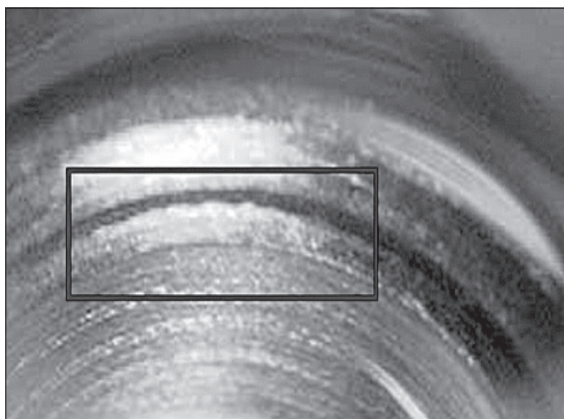


Fotografia 18. Uszkodzenia potwierdzają wysoki poziom nieszczelności zaworu (>500 mm³/min)

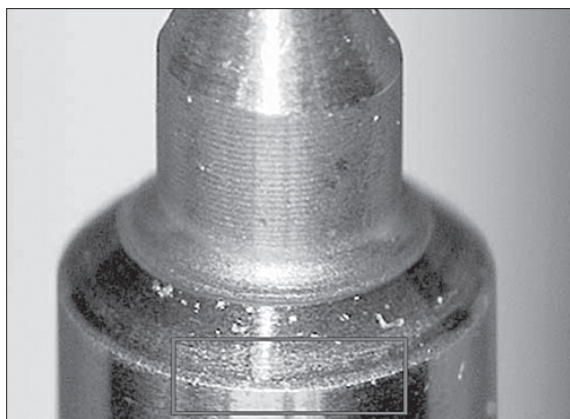


Wtryskiwacz nr 1107

Fotografia 19. Widoczne zużycie nawęglonej warstwy wierzchniej przylgni zaworu



Fotografia 20. Uszkodzenia gniazda zaworu



Fotografia 21. Uszkodzenia krawędzi uszczelniającej iglicy zaworu

Badania dodatkowe

W związku z charakterem uszkodzeń ujawnionych w trakcie badań elementów zaworów sterujących wtryskiwaczy zbadano również ich rozpylacze (dysze). Wyznaczano ciśnienie otwarcia zaworu iglicowego rozpylacza wtryskiwacza, natężenie przepływu Q_{hydr} [$cm^3/30 s/100 bar$], a także przecieki [%]. W poniższej tabeli przedstawiono wyniki badań:

Tabela 2. Wyniki badań parametrów wtryskiwaczy

Numer wtryskiwacza	Numer rozpylacza	Ciśnienie otwarcia [bar]	Q_hydr [cm ³ /30 s/100 bar]	Przeciek [%]
956	9793	246,3	1322,9	0,15
967	9331	247,7	1323,7	0,15
1028	326	241,8	1301,7	0,19
1037	371	244,1	1311,8	0,16
1107	8872	247,1	1323,9	0,17

Wszystkie rozpylacze wtryskiwaczy, które zostały poddane badaniu wykazują pełną zdatność pomimo 7178 godzin pracy.

Podsumowanie badań

Badane wtryskiwacze zostały zdemontowane z silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym, który wykazywał podwyższone zadymienie spalin w kolorze białym oraz generował nadmierny hałas. Badania jednoznacznie potwierdziły, że wtryskiwacze paliwa nie pracują poprawnie. Wyniki pomiarów potwierdziły wcześniejsze przypuszczenia, że wtryskiwacze nie spełniają wymagań przewidzianych w specyfikacjach ich producenta.

Jako podstawową przyczynę nieprawidłowości można wskazać postępującą erozję powierzchni roboczych zaworów sterujących oraz uszkodzenia krawędzi uszczelniających iglic wszystkich przebadanych zaworów. Szczegółowa analiza wspomnianych powierzchni wykonana przy pomocy skaningowego mikroskopu elektronowego potwierdziła jednoznacznie przyczynę nieprawidłowych parametrów pracy. Rozpylacze wtryskiwaczy nie wykazały uszkodzeń pomimo przepracowania 7178 godzin.

Analiza źródłowych przyczyn uszkodzeń wtryskiwaczy

Na podstawie otrzymanych wyników badań można postawić tezę, że jedyną przyczyną uszkodzeń wtryskiwaczy jest zanieczyszczone paliwo lub jego niedostateczna filtracja. Ponieważ zawór sterujący wtryskiwacza nie jest jedynym elementem precyzyjnym układu zasilania Common Rail, postawiona teza

wydaje się być nieprawdziwa. Zaprzeczeniem tej tezy jest również fakt, że zespoły rozpylaczy wtryskiwaczy nie wykazały żadnych nieprawidłowości. Dla czego więc uszkodzeniu uległy wyłącznie zawory sterujące?

Po przeanalizowaniu zasady działania i budowy wtryskiwacza elektromagnetycznego CR BOSCH nasuwa się wniosek, że iglica zaworu jest elementem, na który działają największe siły wynikające z panującego w układzie ciśnienia. Nawet najdoskonalsze układy filtrujące, zapewniające czystość paliwa na poziomie wymaganym normą PN-ISO 4406 [2], nie są w stanie całkowicie zatrzymać zanieczyszczeń, stąd największy ich destrukcyjny wpływ ujawnia się właśnie w elementach zaworu sterującego. Być może smarność paliwa była niewystarczająca i nie spełniała wymagań normy PN-EN 590. Smarność w takim przypadku należy wyznaczyć zgodnie z normą PN-EN ISO 12156-1 metodą HFRR [4].

Uzyskana w przypadku badanych wtryskiwaczy trwałość na poziomie 7200 godzin pracy pozwala na uzasadnienie konieczności przeprowadzenia procesu regeneracji wtryskiwaczy po około 6000–7000 godzin pracy, co często spotyka się w dokumentacji techniczno-ruchowej silników.

Konkluzja

W analizowanym przypadku doszło do uszkodzenia 5 z 8 sztuk wtryskiwaczy CR silnika ZS IVECO VECTOR. Producent w dokumentacji techniczno-ruchowej nie zawarł wytycznych co do resursu wtryskiwaczy, stąd eksploatator ich nie wymienił, ani nie zregenerował aż do momentu wystąpienia objawów niesprawności silnika. Niestety brak informacji o trwałości tak istotnego elementu układu zasilania jest dość powszechną praktyką stosowaną przez producentów silników. Praktyka ta naraża eksploatatorów i ich otoczenie na poważne kłopoty wynikające z przestoju urządzeń. Zaleca się więc, aby w procesie wyboru silnika, wymóc na dostawcy pełną informację dotyczącą prognozowanej trwałości elementów systemu wtryskowego. Uszkodzenia wtryskiwaczy mogą niezauważone doprowadzić do zniszczenia silnika. W przypadku już działających silników przemysłowych wyposażonych w układ CR, dla których producent nie przewidział czasowej wymiany, autor zaleca, aby podczas planowego przestoju, zdemontować i zweryfikować wtryskiwacze na stanowisku testowym. Pozwoli to uniknąć kosztownych awarii w dalszej eksploatacji.

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań eksploatacyjnych elektromagnetycznych wtryskiwaczy paliwa układu COMMON RAIL stosowanych w systemie transportu, jakim są Regionalne Linie Kolejowe. Na podstawie przeprowadzonych badań określono charakter procesów uszkodzeń wtryskiwaczy oraz wpływ warunków eksploatacji na chwilowy stan głównych parametrów określających ich zdatność. Wykazano, że w systemach transportu brakuje wygodnych i wiarygodnych metod diagnozowania i kontroli stanu technicznego wtryskiwaczy paliwa w trakcie eksploatacji, a w okresie trwania gwarancji na zespoły napędowe pojazdów szynowych jedynym kryterium decyzyjnym jest resurs narzucony przez producenta. Niniejsza praca stanowi wstęp do podjęcia próby zmiany strategii eksploatacji wtryskiwaczy paliwa, co może zoptymalizować koszty związane z utrzymaniem pojazdów.

Summary

The paper presents the results of investigations of the electromagnetic fuel injectors of COMMON RAIL system used in the transport system, which are Regional Railway Lines. Based on the research, the nature of the injector damage processes and the influence of operating conditions on the state of the main parameters determining their suitability were determined. It has been shown, that there are no convenient and reliable methods of diagnosing and controlling the fuel injectors during operation and that the only criterion to be met is the resurrection imposed by the manufacturer for the duration of the warranty for the diesel engines of rail vehicles. This paper is an introduction to trying to change the fuel injector operating strategy, which can optimize the cost of maintaining a vehicle.

Literatura

1. Olesiak S., Stępień Z., *Zagadnienia smarności ciekłych paliw silnikowych*, „Czasopismo Techniczne” 2008, z. 7-M, s. 251–263.
2. Oleksiak S., Łukasik Z., *Nowoczesne układy wtrysku paliwa w silnikach Diesla i ich wpływ na jakość paliw i dodatków detergentowo-dyspergujących*, „Nafta-Gaz” 2009, nr 1 (65), s. 58–64.
3. Sacha D., *Zawartość zanieczyszczeń stałych w paliwach do silników Diesla, w aspekcie wymagań stawianych przez Światową Kartę Paliw*, „Nafta-Gaz” 2010, nr 4, s. 302–306.
4. PN-EN ISO 12156-1:2016-04 — wersja polska: *Oleje napędowe — Ocena smarności z zastosowaniem aparatu o ruchu posuwisto-zwrotnym wysokiej częstotliwości (HFRR) — Część 1: Metoda badania*.

Zenon Pawlak

(Cuiavian University in Włocławek,
Tribochemistry Consulting US)

Wiesław Urbaniak

(Kazimierz Wielki University in Bydgoszcz,
Cuiavian University in Włocławek)

ARTICULAR CARTILAGE: A MODEL BASED ON LAMELLAR BILAYERS AND SURFACE REPULSION

Key words: articular cartilage surface; phospholipids bilayers; friction coefficient; interfacial energy

CHRZĄSTKA STAWOWA: MODEL SMAROWANIA OPARTY NA LAMELARNYCH DWUWARSTWACH I ODPYCHANIU POWIERZCHNI

Słowa kluczowe: powierzchnia chrząstki stawowej; dwuwarstwy fosfolipidów; współczynnik tarcia; energia międzyfazowa

Introduction

In order to describe the frictional behaviour of a cartilage/cartilage sliding surface, we have proposed a lamellar-repulsion model based on the charge density of amphoteric surface interaction [1, 2]. According to the model, low friction can be realized when two repulsive surfaces slide against each other, and water of hydration between the interface gap acts as a lubricating layer. Therefore, the lamellar slippage of bilayers and a short-range repulsion between the two surfaces as well as the water contained in the interface lower the friction. Thus, the frictional behaviour between two surfaces carrying the same sign of charges has been investigated [4–6]. It has been found that the friction is strongly dependent on the charge density of the cartilage surface and the surface wettability within a lamellar repulsion model [1, 6]. The natural cartilage of animal joints has a very low friction for the sliding velocity — a few centimeters per second under a load of 18 MPa [7].

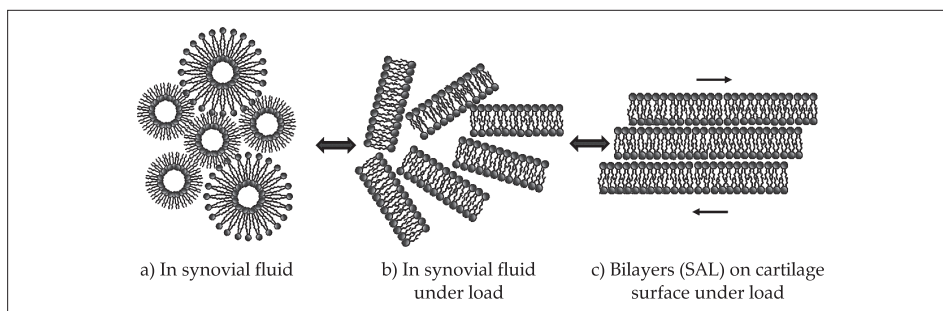


Figure 1. Phospholipids in synovial fluid and on the surface of cartilage: (a) liposome and hexagonal phase in synovial fluid (SF), (b) lamellar phases in SF under load and (c) phospholipid bilayers on the surface of cartilage under load

Figure 1 shows self-organization of lipid vesicles in synovial fluid, formation of lamellar phases of PLs in SF under load and the lamellar slippage of the phospholipid bilayers on the surface of cartilage under load. The negatively charged surface of cartilage with synovial fluid at pH 7.4 is supported under load by lamellar slippage of bilayers, this resulting in a low friction. It was experimentally proved that phospholipids present in synovial fluid and on the surface of AC played a vital role as a lubricant, but when surface PLs bilayers become deformed, joints performance becomes poor [8, 9].

In this paper, we studied the interfacial energy of the model membrane (used in the form of liposomes) formed by phospholipids as a function of pH. The amphoteric cartilage surface negatively charged at a pH of 7.4 ± 1 change in pH range 1 to 9 from positive, then approaching neutral, IEP, and turns to negative. By measuring friction coefficient of cartilage/cartilage pair a both positively charged $(-\text{NH}_3^+)/(-\text{NH}_3^+)$, negatively charged $(-\text{PO}_4^-)/(-\text{PO}_4^-)$ and neutral, cartilage surface will make a dominant contribution to the frictional force. Studying the friction in cartilage/cartilage pairs of bovine origin over the pH of buffer solutions is fascinating to observe electrostatic mechanism of joint lubrication.

Experimental

Materials and Methods

The phosphatidylcholine (PC) and phosphatidylserine (PS) of 99% purity was acquired from the chemical company, Fluka. The membrane was modelled using 20 mg/mL of the lipid in *n*-decane solution. The lipid was dissolved in

chloroform, the solvent was evaporated in the argon atmosphere and the residue was dissolved in *n*-decane.

The articular cartilage specimens were collected from bovine knees (BN) aged one to two years. Osteochondral plugs, 5 and 10 mm in diameter, were harvested from lateral and medial femoral condyles using a circular stainless steel cutter. The cartilage discs were cut into 3-mm plugs with underlying bone. After preparation the specimens were stored at 253 K in 0.15 M NaCl (pH=6.9), and fully defrosted prior to testing. The cartilage discs were then glued to the disc and pinned to stainless-steel surfaces, and friction tests were conducted.

The buffer solutions (pH 5.0–9.5) were prepared by adding 0.2 M sodium hydroxide to 100 mL of a solution of the composition: 0.04 M acetic acid (80%), 0.04 M phosphoric acid and 0.04 M boric acid. A suitable pH of the buffer was adjusted using a sodium hydroxide solution (at 22°C) [10]. The pH of the electrolyte was carefully controlled by a pH-meter during the measurements.

The microelectrophoretic method. The interfacial energy (γ), of the phosphatidylcholine and phosphatidylserine liposomal bilayers was determined by the microelectrophoretic method by measuring the radius of curvature r , of the convex surface formed when a static pressure difference, Δp , was applied to both its sides. The method used was based on the Young and Laplace's (Y-L) standard formula expressed as follows:

$$\gamma = \frac{\Delta p}{2/r} \quad (1)$$

The gamma value obtained from (Y-L) equation was applied to the equation in an expanded form involving interfacial energy on the pH using a Britton–Robinson universal buffer solution as developed by Petelska and Figaszewski [11]. The apparatus and the microelectrophoretic method used are described in [11, 12]. The γ values were measured in 7–10 replicates with up to 5 readings of the lipid's spherical cap. The results of interfacial energy (γ) as a function of pH are shown in Figs. 2 and 3.

Friction test: The coefficient of friction (f) was measured at room temperature using a sliding friction tester pin on-disc tribotester manufactured by ITeR, Poland. The friction between two discs of cartilage soaked in saline (as the lubricating fluid, pH 6.9) and subjected to a load, sliding velocities and time was measured. The tests were performed at a very low speed of 1 mm/s during 10 min and a load of 15 N (1.2 MPa), which corresponds to lubrication under physiological conditions. Before running the test, the cartilage samples were left for one hour in saline. A total number of five tests were performed using fresh samples of each experimental specimen and set up [6].

Physicochemical parameters (isoelectric point, IEP); acid-base equilibria pK_a and pK_b for phosphatidylcholine (PC) and phosphatidylserine (PS) are summarized as follows: Isoelectric point (IEP) 4.12, 3.80; acid-base equilibria pK_a 2.58, 3.36 and pK_b 5.69, 9.55, respectively. Maximum interfacial energy densities (J/m^2) found experimentally at the isoelectric points is: PC 3.53, PS 2.94 [13].

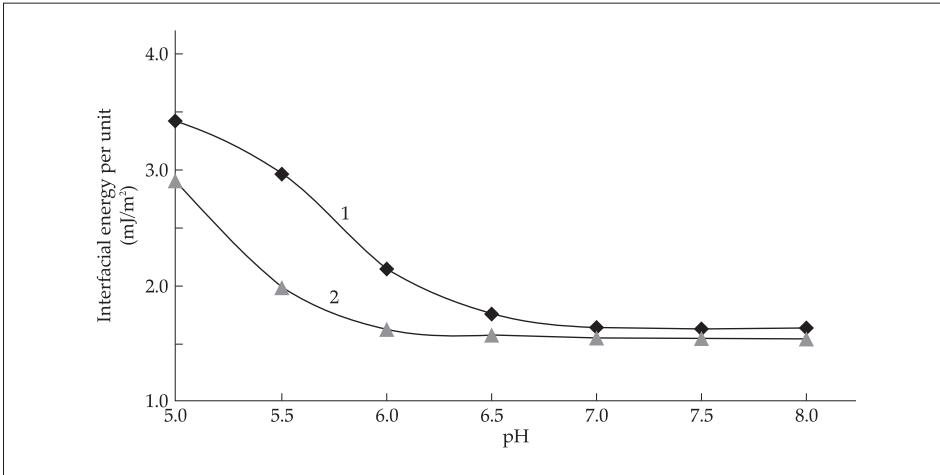


Figure 3. Change of the interfacial energy of model membranes (used in the form of liposomes) formed by phosphatidylcholine PC (1), phosphatidylserine, PS (2) as a function of pH over the range 5.0 to 8.0.

The dependence of interfacial energy of the liposome membrane formed by the two PLs (PC and PS) on the pH of the buffer solution is presented in Fig. 3. The PLs, which are amphoteric molecules containing functional $-NH_2$ and $-PO_4H$ groups, are affected by the solution's pH. Upon raising the pH of the solution from 5.0 to 8.0 (after isoelectric point) the $-PO_4H$ group begins to lose its proton ($-PO_4H + OH^- \rightarrow -PO_4^- + H_2O$), leaving behind the negatively charged surface, and leading to a decrease in the interfacial energy.

Nature equipped cartilage with the synovial fluid in the form of an efficient amphoteric phospholipidic buffer mixture. An actual concentrations of $[-PO_4^-]$ and $[-PO_4H]$ influence the effectiveness or capacity of a buffer, β (expressed by the molar quantity of $[OH^-]$ added, ΔH^+ to the pH change, ΔpH), $\Delta H^+/\Delta pH = \beta$ [14].

The dependence of buffer capacity (β) on components ratio can be seen in Fig. 3 curves (liposome bilayer) and Fig. 4b curve (cartilage) in physiological range 7.4 ± 0.7 . The slopes of tangents to the curves in the range pH 6.5 to 8.0 (or 9.5) are inversely proportional to the buffer capacity ($\beta = \Delta(E_{int})/\Delta pH$, Fig. 3 and $\beta = \Delta(f)/\Delta pH$, Fig. 4b).

Variation of friction coefficient of cartilage/cartilage surfaces as a function of time

The friction coefficient is derived from the well-known phenomenological relation, $(f) = F/W$. According to Amonton's law, the frictional force (F) between two solids is proportional to the load (W) forcing them together, with the proportionality coefficient, (f), known as the friction coefficient.

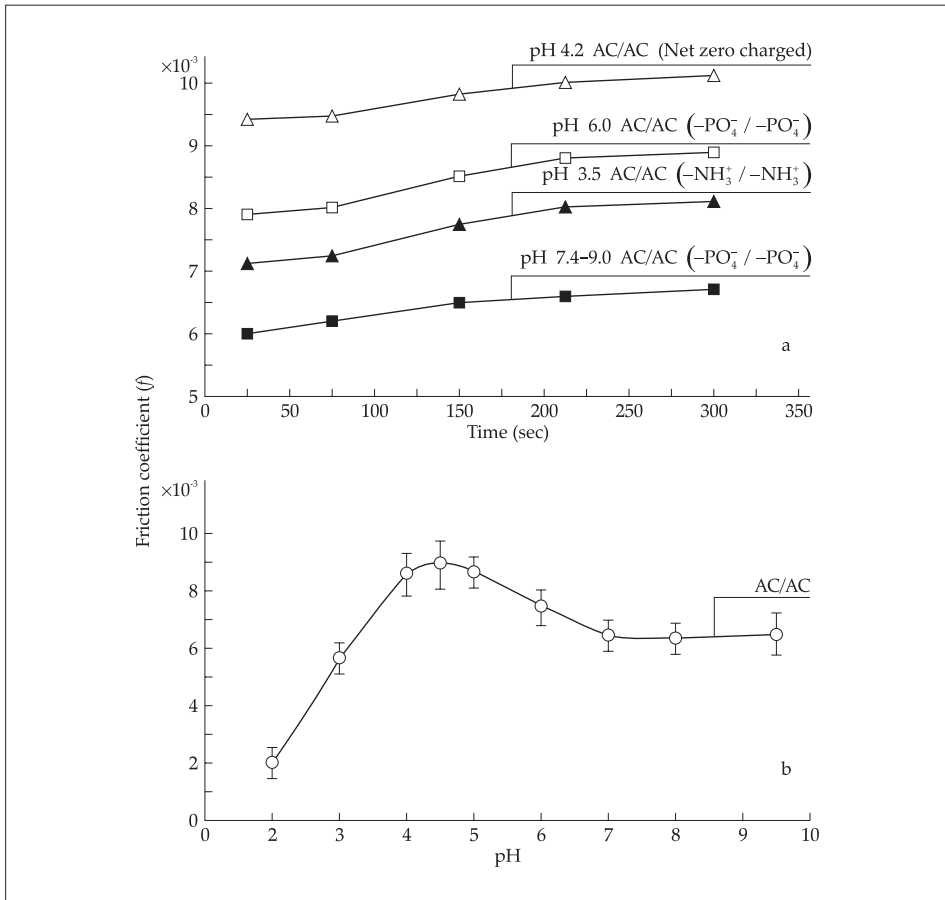


Figure 4. The friction coefficient of the (cartilage/cartilage) surfaces (a) with positively charged surfaces (+/+) at pH 3.5, with negatively charged (-/-) at pH 6.0, 7.4, and 9.0 and at isoelectric point (\pm/\pm) at pH 4.2 and (b) the friction coefficient the bovine (cartilage/cartilage) surfaces against pH 2.0 to 9.5 of buffer solutions under a 15 N load and 1 mm/s sliding velocity during 300 seconds

Figure 4 shows the pH profiles of the friction coefficient of bovine cartilage (BC) vs time and pH. Different values of friction for various cartilage surfaces as shown in Figure 4 curves part (a) should be associated with their amphoteric character and charge density. The above experimental results demonstrate that the friction is largely dependent on the electrostatic interaction between the two cartilage surfaces. The low friction between two cartilage surfaces carrying the same charge should be attributed to the surface electrostatic repulsion of a charged cartilage/cartilage pair. Charge density of cartilage surface was changed by varying the pH of the buffer solution, which imparted AC different charge densities. The curve was obtained at pH 3.5 before IEP, for a pair charged positively of $(-\text{NH}_3^+/-\text{NH}_3^+)$ and curves at pH 6.0, 7.4 and 9.0 were taken after IEP, for pairs charged negatively of $(-\text{PO}_4^-/-\text{PO}_4^-)$, while the curve at pH 4.2 (IEP) was obtained for net zero charges.

It was experimentally proved that the charged surface of a cartilage resulted in a lower friction than that measured at pH 4.2 (IEP) for net zero charges. Frictional measurements with liposomes and phospholipid bilayers (see Fig. 1) support our hypothesis of the low friction within the lamellar-repulsive mechanism [1, 6]. This low friction is attributed to the low interlayer (contact angle $\sim 0^\circ$), lamellar slippage (Fig. 1d) of bilayers and a short-range repulsion. The interfaces of negatively charged cartilage $(-\text{PO}_4^-)$ surfaces and contribution of the hyaluronan, proteoglycans (PGs), a glycoprotein termed lubricin and lamellar PLs phases [2] support the concept of lamellar-repulsive mechanism.

Conclusions

In this study, we examined the influence of pH on the properties of the phospholipid bilayer (in liposomal forms) such as interfacial energy and friction coefficient of bovine cartilage/cartilage surfaces. As the pH was varied, the model membrane formed by phosphatidylcholine and phosphatidylserine as well as friction coefficient in a bovine cartilage demonstrated amphoteric behaviour resembling that characterizing the isoelectric point, IEP. At pH 7.4, the negatively charged bilayers of PLs demonstrated a very high buffer capacity (β) imparted by phospholipid, $\Delta\text{H}^+/\Delta\text{pH}=\beta$. This suggests that lubrication in joints can be explained in terms of a lamellar-repulsive hydration mechanism. We therefore conclude that lamellar slippage of bilayers and a short-range repulsion between the interfaces of the negatively charged $(-\text{PO}_4^-)$ cartilage surfaces is a major determinant of the low frictional properties of the joint.

Summary

In this study, amphoteric character of phospholipidic cartilage surface was explained based on a liposomal model membrane. Our results reveal that the interfacial energy model membrane has isoelectric point, IEP, with the shape of the Gaussian curve. A decreased surface energy after IFP approaches constant values at physiological (or synovial fluid) pH of 7.4 and beyond. The authors examine surfaces of the bovine articular cartilage in solution at varying pH by measuring friction coefficient. The effect of negative and positive charge density (or fixed charges) on (cartilage/cartilage) friction coefficient has been investigated. The authors conclude that the phospholipid bilayers facilitate an almost frictionless contact in the joint.

Streszczenie

W pracy zbadano amfoteryczny charakter powierzchni dwuwarstwy fosfolipidowej w oparciu o model membrany liposomowej badanej w szerokim zakresie pH (ryc. 2 i 3). Autorzy wykazali, że energia powierzchniowa membrany vs pH posiada kształt krzywej Gaussa z punktem izoelektrycznym (IEP) ~4,2 pH. Krzywa energii powierzchniowej po załamaniu się dla pH około 6,8 utrzymuje wartość stałą. Fakt ten gwarantuje niskie tarcie w fizjologicznym zakresie 7,4±1 (maż stawowa) chrząstki. Autorzy wyznaczyli współczynnik tarcia dla dwóch powierzchni chrząstki bydłowej w zakresie pH 1,0–9,5. Zbadano tarcie (chrząstka/chrząstka) dla obu powierzchni ujemnych, dodatnich i w punkcie izoelektrycznym. Autorzy stwierdzają, że ujemnie naładowana powierzchnia chrząstki ułatwia niemal beztarciowy lamellarno-elektrostatyczny mechanizm smarowania w stawie.

Literature

1. Pawlak Z., Urbaniak W., Hagner-Derengowska M., Hagner W. (2015), *The Probable Explanation for the low friction of natural joints*. Cell Biochem Biophys, 71, pp 1615–1621. DOI: 10.1007/s12013-014-0384-8.
2. Williams P.F., Powell G.L., LaBerge M. (1993), *Sliding friction analysis of phosphatidylcholine as a boundary lubricant for articular cartilage*, Proc. Instn. Mech. Engrs. Part H. J. Engin. Medicine 207 (H1), pp 59–66. DOI: 10.1243/PIME_PROC_1993_207_268_02
3. Sarma A.V., Powell G.L., LaBerg M. (2001), *Phospholipid composition of articular cartilage boundary lubricant*, Journal of Orthopedic Research 19, pp 671–676. DOI: 10.1016/S0736-0266(00)00064-4.
4. Hills B.A. (2000), *Boundary lubrication in vivo*, Proc. Inst. Mech. Engrs. 214, pp 83–94. DOI: 10.1243/0954411001535264.
5. Pawlak Z., Urbaniak W., Hagner-Derengowska M., Hagner W. (2014), *Lamellar slippage of bilayers — a hypothesis on low friction of natural joints*, Biointerphases, 9 pp 041004. DOI: 10.1116/1.4902805.
6. Pawlak Z., Gadomski A., Sojka M., Urbaniak W., Bełdowski P. (2016), *The amphoteric effect on friction between the bovine cartilage/cartilage surfaces under slightly sheared hydration lubrication mode*, Coll. Surfaces B: Biointerfaces, 146, pp 452–58. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2016.06.027.
7. McCutchen C.W. (1959), *Mechanism of animal joints: Sponge — hydrostatic and weeping bearings*, Nature, 184, pp 1284–85. DOI:10.1038/1841284a0.
8. Kosinska M.K., Liebisch G. et al. (2013), *A lipidomic study of phospholipid classes and species in human synovial fluid*, Arthritis Rheum. 65, pp 2323–2333. DOI: 10.1002/art. 38053.

9. Ballantine G.C., Stachowiak G.W. (2002), *The effects of lipid depletion on osteoarthritic wear*. *Wear* 253, pp 385–93. DOI: 10.1016/S0043-1648(02)00147-3
10. Britton H.T.K., Robinson R.A. (1931), *Universal buffer solutions and the dissociation constant of veronal*, *J. Chem. Soc.*, pp 1456–1462.
11. Petelska A.D., Figaszewski Z.A. (1998), *Interfacial tension of the two-component bilayer lipid membrane modelling of cell membrane*, *Bioelectrochemistry and Bioenergetics*, 46, pp 199–204. DOI: 10.1016/S0302-4598(98)00138-X.
12. Pawlak Z., Petelska A.D., Urbaniak W., Yusuf A.Q., Oloyede A. (2013), *Relationship between wettability and lubrication characteristics of the surfaces of contacting phospholipid-based membranes*, *Cell Biochemistry and Biophysics* 65 335-345. DOI: 10.1007/s12013-012-9437-z.
13. Petelska A.D., Figaszewski Z.A. (2009), *pH Effect of the Sphingomyelin Membrane Interfacial Tension*, *J Membrane Biol* 230, pp 11–19. DOI: 10.1007/s00232-009-9181-5.
14. Pawlak Z., Yusuf K.Q., Pai R., Urbaniak W. (2017), *A lamellar — repulsive mechanism of lubrication of natural joints*, *Arch. Biochem. Biophys.*, 623–624, pp 42–48. DOI: 10.1116/1.4902805.

Joanna Podemska

(Kujawska Szkoła Wyższa we Włocławku,
Warsztaty Terapii Zajęciowej
przy Polskim Związku Niewidomych we Włocławku)

STRES ZAWODOWY JAKO PROBLEM SPOŁECZNY

Słowa kluczowe: stres jako proces; psychologiczne teorie stresu; źródła stresu organizacyjnego; choroby psychosomatyczne wynikiem stresu; interwencje służące zapobieganiu stresowi zawodowego

OCCUPATIONAL STRESS AS A SOCIAL PROBLEM

Key words: stress as a process; psychological theories of stress; sources of organizational stress; psychosomatic disorders caused by stress; occupational stress interventions and stress prevention

Ogólne zaburzenia zdrowia związane ze stresem

Poprzedni wiek uznany został za najbardziej dynamicznie rozwijające się stulecie. Koszty zysków i strat zostały po równo rozłożone na szali. Można by się pokusić o pytanie: dlaczego? Ogromny postęp skutkowało tym, że gospodarka zaczęła zmieniać świat, życie codzienne, w tym i zdrowie. Wraz z jej wzrostem niestety ludzkość osiągnęła spadek wydajności fizycznej. Skomplikowane maszyny, urządzenia sterują procesem technologicznym. Człowiek jedynie skupia się na kontroli włączników i wyłączników na ekranie komputera. Więcej energii konsumuje proces myślenia niż w wysiłek fizyczny. To nie jedyna destrukcyjna kwestia, wystarczy bowiem wymienić zanieczyszczone środowisko, zagrożenia związane z przemocą fizyczną i psychiczną, popadanie w nalogi: alkohol, narkotyki, dopalacze skutecznie skracają ludzkie życie. Inspirując się słowami Bassama Aouila, można stwierdzić, że stan zdrowia jest wynikiem świadomego wyboru dokonanego przez człowieka poprzez: stosunek do samego siebie, poprzez styl życia, sposób spędzania wolnego czasu, ogólnie prozdrowotny styl życia¹.

¹ B. Aouil, *Determinanty postaw żołnierzy zawodowych wobec prozdrowotnego stylu życia*, „Zeszyty Naukowe WSHE” 2003, t. 12, Włocławek, s. 157.

Problematyka stresu organizacyjnego jest aktualna w krajach wysoko rozwiniętych, które nadają tempo rozwojowi gospodarczego. Cena, jaką płacą menadżerowie, jest najwyższa, od utraty zdrowia po zgon. Przykładem może być „zjawisko karoshi” w Japonii, czyli nagły zgon w sile wieku spowodowany zawałem mięśnia sercowego lub udarem mózgu. Każdego roku ofiarą „karoshi” pada około 10 tys. osób².

Światowa Organizacja Zdrowia alarmuje, ponieważ stan zdrowia na świecie drastycznie się pogarsza. Z badań EZOP w 2012 r. wynika, że społeczeństwo polskie jest mocno narażone na rozwój chorób, których wyzwalaczem jest stres. Rezultaty badań w tym zakresie okazują się bardzo niepokojące:

— zaburzenia nerwicowe występują u około 9,6% mieszkańców Polski, tj. 2,5 mln osób;

— zaburzenia nastroju występują u prawie miliona Polaków;

— około 200 tys. Polaków ma za sobą próby samobójcze.

Ważnym pytaniem staje się: „Co powoduje pogorszenie naszego psychicznego zdrowia i jak o nie dbać we współczesnym świecie?”³. Z opublikowanych przez EU-OSHA badań wynika, że w Polsce — podobnie jak w całej Europie — najczęstszą przyczyną stresu związanego z pracą jest jej reorganizacja lub niepewność zatrudnienia — 84% odpowiedzi. Dla porównania średni wynik w Europie wynosi 72%. Jako kolejne przyczyny stresu związanego z pracą polscy respondenci wskazywali:

— przepracowane godziny lub obciążenie pracą — 65%,

— brak jasności w sprawie ról i obowiązków — 59%,

— ograniczona możliwość wpływu na własne zasady pracy — 58%,

— padanie ofiarą niedopuszczalnych zachowań, tj. mobbingu — 57%,

— brak wsparcia ze strony kolegów, przełożonych przy wypełnianiu swoich obowiązków — 53%⁴.

Większość swojego życia poświęcamy pracy, a więc czas, jaki tam spędzamy, jest nieproporcjonalny do wypoczynku. Największym zagrożeniem dla człowieka staje się on sam. Liczne sytuacje społeczne eskalują konflikty, wyzwalają agresję, budują cały szereg napięć. Badania prowadzone w Szwecji na pracownikach różnych szczebli wykazały, że osoby zajmujące niższe stanowiska w organizacji są czterokrotnie bardziej narażone na wystąpienie chorób układu krążenia niż osoby na najwyższych szczeblach⁵. Wyniki te zostały potwierdzone przez Roberta Sapolskiego, który obserwował zachowanie małp w strukturze społecznej. Swoje konkluzje zawarł w książce *Dlaczego zebry nie mają wrzodów*. Wśród pracowników, którzy czują się niesłusznie krytykowani lub

² J.F. Te r e l a k, *Psychologia organizacji i zarządzania*, Warszawa 2005, s. 227.

³ *Jak radzić sobie z życiowym stresem w zgodzie z własną naturą?*, red. J. Z a p a ł a, Poznań 2015.

⁴ Badanie EU-OSHA dotyczące stresu w miejscach pracy: Polska na tle Europy, www.psychostreswpracy.pl

⁵ D. G o l e m a n, *Inteligencja społeczna*, przeł. A. J a n k o w s k i, Poznań 2013, s. 276.

ignorowani, choroba naczyń wieńcowych występuje w 30% częściej niż u tych, którzy uważają, że są traktowani sprawiedliwie⁶.

Różne teorie związane ze stresem

Sięgając do źródeł, warto zastanowić się, czym jest stres, czy jest nam potrzebny, jeżeli tak, to do czego? W medycynie pionierem pracy nad stresem był Walter Cannon, twórca teorii homeostazy. W badaniach fizjologicznych opisywał reakcje człowieka na stres związany ze zmianą ciepłoty, niedotlenienia, obniżenia poziomu cukru i podniesienia ciśnienia. Rozwinięcie teorii homeostazy i teorii przystosowania na gruncie fizjologii stanowi teoria stresu Hansa Selye'go. Wyodrębnił on syndrom objawów niespecyficznych wspólny dla wszystkich chorób. Nazwał go ogólnym syndromem adaptacji, inaczej — odpowiedzią organizmu na stres⁷. Rozwija się ona w trzech stadiach: poprzez reakcję alarmową, która mobilizuje organizm; stadium odporności, które niczym wojownik broni organizmu przez złymi czynnikami, oraz stadium wyczerpania, które charakteryzuje się utratą zdolności obronnych, czego wskaźnikiem może być śmierć. Fizjologiczne przygotowanie do reakcji obronnej organizmu jest powszechnie znane, mniej się wspomina o psychologicznych aspektach stresu, czyli wyraźnych różnicach jakościowych. Selye różnicuje stres na dobry i zły:

- dystres — pojawia się wtedy, kiedy jest długotrwały i destabilizuje organizację życia, niesie cierpienie i dezintegrację psychiczną,
- eustres — jego działanie pomimo dyskomfortu prowadzi do rozwoju osobowości i jest czynnikiem motywującym⁸.

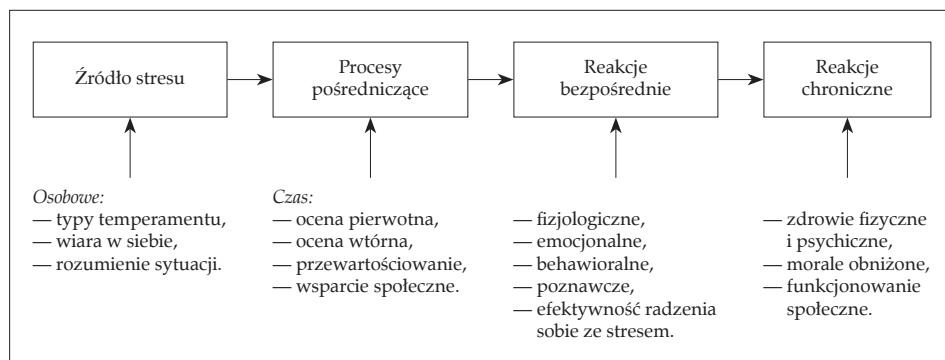
Prekursorzy psychologicznych teorii stresu wysnuli kilka ciekawych wątków na temat jego działania w sferze poznawczej. Na początku była to teoria frustracji Saula Rosenzweiga, a z czasem G.R. Elliott i Richard Lazarus bardziej szczegółowo opisali i zapoczątkowali nowe teorie psychologiczne. Na mechanizmy oceny poznawczej zwraca uwagę transakcyjna teoria stresu Lazarusa i Susan Folkman. Stres z tej perspektywy określa się jako zagrożenie dla procesów psychicznych wywołanych działaniem czynników stresujących, takich jak: krzywda, strata, zagrożenie, wyzwanie. Ta interakcja obciąża zasoby i zagraża zdrowiu. Według Lazarusa stres jest procesem, który odzwierciedla transakcje zachodzące pomiędzy osobą a światem zewnętrznym. Przedstawia to poniższa rycina⁹.

⁶ Tamże, s. 276.

⁷ J.F. Terela k, *Psychologia organizacji...*, s. 230.

⁸ Tamże, s. 232.

⁹ Tamże, s. 235.



Rycina 1. Transakcyjna teoria stresu według Lazarusa

Źródło: opracowanie własne

Jak widać, skuteczność radzenia sobie ze stresem wiąże ze sobą wszystkie reakcje bezpośrednie, skumulowane, chroniczne i odroczone w czasie. W przyrodzie nic nie ginie, jak głosi popularne powiedzenie, więc i człowiek jako część ekosystemu również poddawany jest tym procesom. Każdy stres prędzej czy później wpłynie na zdrowie.

Kolejną teorią ukazującą czynniki stresujące jest model L. Leviego i M. Frankenhausera. Autorzy zwracają uwagę, że stres w pracy może być generowany zarówno przez fizyczne, jak i społeczne środowisko. Do czynników środowiskowych, które generują sytuacje stresowe zalicza się:

- 1) Czynniki stresowe tkwiące w samej pracy:
 - ogólne przeciążenie pracą,
 - presja czasu i terminowość zadań,
 - warunki pracy,
 - praca zmianowa,
 - konieczność nadążania za szybkimi zmianami technologicznymi.
- 2) Stosunki społeczne z przełożonymi, podwładnymi i kolegami:
 - niezdolność do podporządkowania się,
 - brak wsparcia społecznego,
 - wadliwa polityka społeczna.
- 3) Struktura organizacyjna i klimat emocjonalny:
 - brak współodpowiedzialności,
 - poczucie osamotnienia,
 - zła komunikacja interpersonalna.
- 4) Miejsce w organizacji:
 - dwuznaczność roli i konfliktogenność,
 - nieadekwatna do roli odpowiedzialność za rzeczy i ludzi,
 - zbyt duża zależność od kierownictwa średniego szczebla.

5) Źródła ekstraorganizacyjne:

- problemy rodzinne,
- kryzysy życiowe,
- trudności finansowe,
- konflikty związane z małą wiarygodnością i polityką firmy,
- konflikty w pracy, w domu,
- brak wsparcia instytucjonalnego.

6) Kariera zawodowa:

- aktualny status zawodowy niezgodny z kwalifikacjami i aspiracjami,
- brak perspektywy rozwoju.

Do czynników osobowościowych generujących stres zalicza się neurotyczne cechy osobowości, tj.:

- niezrównoważenie emocjonalne,
- konformizm,
- brak inicjatywy,
- sztywność postaw,
- trudności adaptacyjne,
- niska lub zawyżona samoocena,
- niski poziom motywacji osiągnąć,
- zachowanie typu A¹⁰.

Analizując koncepcję Lazarusa, można stwierdzić, że istotna część czynników stresogennych ma związek ze stresem organizacyjnym. Niewątpliwie czynniki źródeł ekstraorganizacyjnych również odgrywają istotną rolę, obniżają jakość pracy. Trudno jest oddzielić życie zawodowe prywatnego, które niejednokrotnie przeszkadza strategicznym zadaniom. O ile wpływ ten może zostać zminimalizowany, o tyle czynniki osobowościowe wymagają większej pracy i uwagi. Zazwyczaj ludzie bywają bezkrytyczni i nie dostrzegają w sobie jakichkolwiek wad. Jeżeli już takowe się znajdują, często zrzuca się winę na innych lub usprawiedliwia się przed sobą, mówiąc, że „tacy już jesteśmy”. Jest to przykład nastawienia stałego, niebiorącego pod uwagę możliwości rozwoju. Aby ten zaistniał, potrzebna jest praca nad sobą, pomoc psychologa, niekiedy psychiatry.

Wyżej przedstawione teorie zawierają w sobie źródło stresu organizacyjnego. Jak mawiał Arystoteles, „człowiek jest istotą społeczną” i poza wspólnotą trudno mu się funkcjonuje. Warto zadać sobie pytanie: co w człowieku jest indywidualne, a co społeczne i jakie korelacje zachodzą pomiędzy tymi pierwiastkami? Jeżeli człowiek jest częścią systemu społecznego, to określa go zasięg wymagań w polu, w którym się znajduje. Może to być otoczenie przyrodnicze, np. klimat, położenie geograficzne, a także otoczenie kulturowe, które nosi znamiona synkretyzmu kulturowego, czyli mieszaniny kultur, norm,

¹⁰ Tamże, s. 238.

wartości. Otoczenie technologiczne ściśle związane jest z pracą, to stan posiadanej wiedzy, możliwości rozwoju, umiejętności wykorzystania maszyn, technologii. Wielorakie przenikanie tych środowisk miewa stresogenny charakter, który odbija się na zdrowiu i relacjach z otoczeniem zawodowym lub prywatnym.

Zaburzenia psychosomatyczne i somatopsychiczne reakcją na stres

Stres manifestuje się poprzez symptomy:

1) Pogorszenie stanu zdrowia somatycznego, przejawiające się zwiększonym tętnem, wysokim poziomem cholesterolu, nałogiem palenia, wrzodami, chorobą wieńcową.

2) Pogorszenie stanu zdrowia psychicznego, wiąże się to z bardzo niską samooceną, słabą motywacją do pracy, nadużywaniem alkoholu, a także nerwicą.

3) Zaburzenie procesów organizacyjnych, przejawiających się niską efektywnością pracy, absencją, konfliktami, niezadowoleniem, a nawet rezygnacją z pracy.

Reakcje na stres mogą być różne, wszystko zależy od struktury osobowości każdego człowieka¹¹.

Tabela 1. Reakcje osobowościowe na stres

Reakcje psychologiczne	Reakcje behawioralne	Reakcje zdrowotne
1	2	3
Alienacja	Absencja w pracy	Choroba somatyczna: układ oddechowy, układ sercowo-naczyniowy, układ pokarmowy, bóle, zawroty głowy, cierpięcie, swędzenie, astma, cukrzyca, otyłość, niska immunologia
Lęki	Błędy w działaniu	
Nuda	Wypadki	
Apatia	Agresywność	
Wypalenie zawodowe	Nadmierne karanie	Choroba psychiczna
Spadek motywacji	Nadużywanie alkoholu	Psychosomatyka
Zagubienie	Nikotyzm	Nerwica: zaburzenia lękowe
Depresjonalizacja	Kofeinizm	Zaburzenia obsesyjno-kompulsywne
Depresja	Lekomania	Zaburzenia adaptacyjne
Niezadowolenie z pracy	Narkomania	Zaburzenia dysocjacyjne

¹¹ Tamże, s. 268.

Tabela. cd.

1	2	3
Niezadowolenie z życia	Nadmierny apetyt lub brak apetytu	Zaburzenia depresyjne Zaburzenia stresowe pourazowe
Zaburzenia emocjonalne		
Przemęczenie	Złe odgrywanie ról	
Frustracja	Mała wydajność pracy	
Napięcia emocjonalne	Rezygnacja z pracy	
Wrogość	Zmiana celu	
Irytacja	Strajki	
Niska samoocena	Utrata złudzeń	
Obrażanie się	Rozczarowanie	
Niedowartościowanie	Obojętność	
Pracoholizm		

Źródło: opracowanie własne

Stres i reakcje zdrowotne idą ze sobą w parze. Nie umiemy z niego racjonalnie korzystać, dlatego zapadamy na różnego rodzaju choroby. Bodziec wyzwała reakcję: wyrzutu adrenaliny i kortyzolu, podnosi się ciśnienie krwi, oddech przyspiesza. Ciało sygnalizuje mobilizację do walki. Wszystko byłoby dobrze, gdyby stan ten trwał tyle, ile potrzeba. W momencie, kiedy staje chroniczny, wtedy sytuacja jest alarmowa. Organizm nie jest przystosowany do tak długiego obciążenia.

Według danych Światowej Organizacji Zdrowia — WHO — stres jest podstawową przyczyną cierpień współczesnego człowieka i dotyka około 400 mln ludzi. Jeżeli dodać do tego około 370 mln chorych na depresję i około 300 mln alkoholików, a więc cierpiących na choroby powstające w sposób pośredni w związku ze stresem, to uświadamia nam, że problem radzenia sobie ze stresem należy zacząć od edukacji prozdrowotnej¹².

Wszelkie działania interwencyjne mogą koncentrować się na poziomie organizacji (usuwanie źródła problemu), na poziomie styku organizacji z jednostką (zwiększenie odporności osoby na określone stresory). Z kolei na poziomie jednostki można uczyć się lepszych sposobów zmagania się ze stresem.

Interwencje na poziomie organizacji koncentrują się na obserwacji, audycie poziomu stresu zawodowego, poprawieniu atmosfery środowiska pracy, planowaniu czasu, dobrym przepływie informacji, podejmowaniu decyzji, konfliktach, rozwijaniu kadry menadżerskiej, zarządzaniu karierą, firmowych programach poprawiania kondycji fizycznej i stanu zdrowia, instytucjonalizacji usług na rzecz zdrowia i bezpieczeństwa pracy, ergonomii i psychologii pracy.

¹² Tamże, s. 289.

Interwencje na styku jednostka/organizacja mają na celu zwiększenie świadomości, szkolenia w zakresie zarządzania czasem, delegowanie zadań, doskonalenie indywidualnych umiejętności radzenia sobie, asertywność, czyli umiejętność wyrażania własnych przekonań, uczuć i pragnień w bezpośredni, szczerzy sposób, przywracanie i utrzymanie równowagi pomiędzy życiem prywatnym a zawodowym, coaching i konsultacje, np. jak radzić sobie z agresywnym klientem, zapewnienie wsparcia emocjonalnego, intensywne leczenie zaburzeń, rehabilitacja pracowników.

Interwencje na poziomie jednostki zależą od nas samych, wymagają zwiększenia samoświadomości, prowadzenia i promowania zdrowego stylu życia polegających na zachęcaniu do większej aktywności fizycznej, właściwego odżywiania się, pilnowania prawidłowej wagi, przesypania odpowiedniej ilości godzin, odpoczynku, który umożliwia odprężenie i odzyskanie energii wydatkowanej w ciągu dnia. Skuteczne mogą być techniki poznawczo-behawioralne opierające się na myślach, które prowadzą do emocji, a te z kolei wiodą do konkretnych działań. Przykładem tego podejścia jest racjonalno-emotywna terapia Alberta Ellisa z Uniwersytetu Stanowego w Nowym Jorku. Warto zweryfikować swoje postępowanie, czyli dokonać analizy sytuacji i zastąpić irracjonalne myśli oraz przekonania bardziej racjonalnymi elementami poznawczymi¹³.

Podsumowanie

Stres zawodowy stanowi problem nie tylko natury zdrowotnej, ale i społecznej. Wymagania pracy ulegają szybkim przeobrażeniom wywoływanym przez przemiany społeczne. Zmieniła się również natura wymagań profesjonalnych, zamiast fizycznych stresorów współczesny człowiek boryka się ze stresorami natury poznawczej o charakterze emocjonalnym. Ze społecznego punktu widzenia łagodzenie stresu stanowi bardzo ważne zadanie, ale nadal istnieje rozbieżność pomiędzy teoretyczną wiedzą a praktycznymi implikacjami. Zjawiska chorobowe, które dotyczą pracowników, są ściśle związane z przeżywanym stresem. Częste zwolnienia lekarskie z powodu słabej odporności organizmu, doświadczanie duszności, problemy z układem krążenia są wynikiem przeżywania długotrwałego stresu. Wobec tego wszelkie interwencje powinny być kierowane na źródło wielu problemów, działania mające przynieść zmianę zachowań zdrowotnych powinny być skierowane na pracownika¹⁴.

¹³ N. Chmiel, *Psychologia pracy i organizacji*, Gdańsk 2002, s. 196–197.

¹⁴ Tamże, s. 198.

Praca dla większości stanowi sens życia, jego integralną część. Jest filarem tworzenia związków, zależności. Warto zastanowić się nad tym, aby była bardziej wydajna przy zminimalizowanych kosztach zdrowotnych. Zestresowany pracownik nie będzie wydajny. Szczęśliwy pracownik podniesie walor firmy i jej prestiż. Choć koszty włożone w prewencję czynników stresogennych będą duże, to efekty tej pracy na pewno okażą lepsze i długofalowe.

Streszczenie

Okres przedindustrialny nie wywoływał tylu emocji co czasy współczesne. Wówczas nie dochodziło do sytuacji, w której nie pojawiłby się stres. Związany był on z większą wypadkowością przy pracy, z kolei dziś dzieje się tak z przeciążeniem psychicznym. Współcześnie wkroczyliśmy w nową erę mechanizacji i większego rozwoju techniki. Nie musimy podnosić ciężkich sprzętów, czy też wykonywać pracy za pomocą rąk. Odciążają nas wynalazki techniki, maszyny, roboty, komputery. Można by było pomyśleć, że dzięki temu mamy coraz więcej czasu dla siebie. Jednakże dzieje się inaczej, zamiast spokoju popadamy w coraz to większe błędne koło stresogennych nawyków, przyzwyczajzeń. Współczesny człowiek cierpi na niestabilność nastrojów, popada w coraz to większe uzależnienia. Można by się pokusić o tezę, że XXI w. to wiek stresu zarówno zawodowego, jak i społecznego. Czy niektóre choroby psychosomatyczne i somatopsychiczne są wynikiem działania stresu? Na te i inne pytania postaram się odpowiedzieć w poniższym artykule.

Summary

The pre-industrial period did not produce as many emotions as modern times. One could not avoid stress at that time, which was mostly associated with a higher accident rate at work than with mental strain, which is characteristic for current period. We have entered into a new era of mechanization and technological development. We do not have to lift heavy equipment nor do manual work. We have been unburden by the so-called miracles of engineering, mechanization and computerization. One could think that we have more time for ourselves. However, the situation is different: instead of being calm, we fall into the increasingly vicious cycle of stressful habits. We experience mood swings, we suffer from an increasing number of addictions. One might be tempted to argue that the 21st century is the age of both occupational and social stress. Are some psychosomatic and somatopsychic disorders the result of stress? For these and other questions I will try to answer in this article.

Mirosław Radwański

(Kujawska Szkoła Wyższa we Włocławku)

DRGANIA POPRZECZNE NIEJEDNORODNEGO UKŁADU CIĄGŁEGO NA PRZYKŁADZIE LUFY ARMATNIEJ

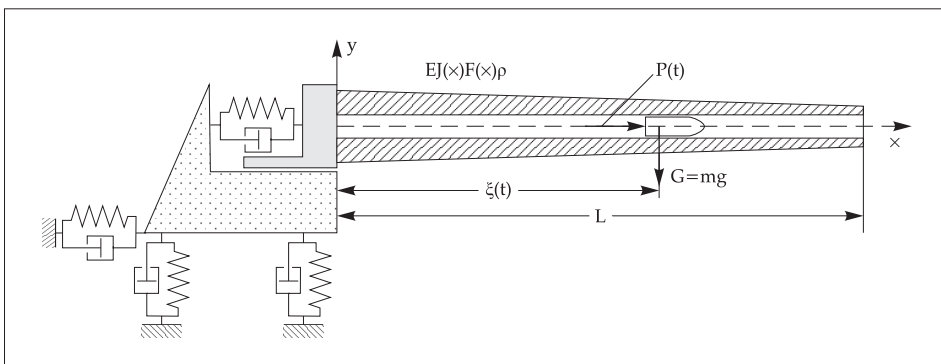
Słowa kluczowe: drgania; częstość drgań; postać drgań; belka niejednorodna; metoda Galerkina

TRANSVERSE VIBRATIONS OF HETEROGENEOUS SYSTEM ON THE EXAMPLE OF A CANNON BARREL

Keywords: vibrations; frequency of vibrations; form of vibrations; heterogeneous bar; Galerkin method

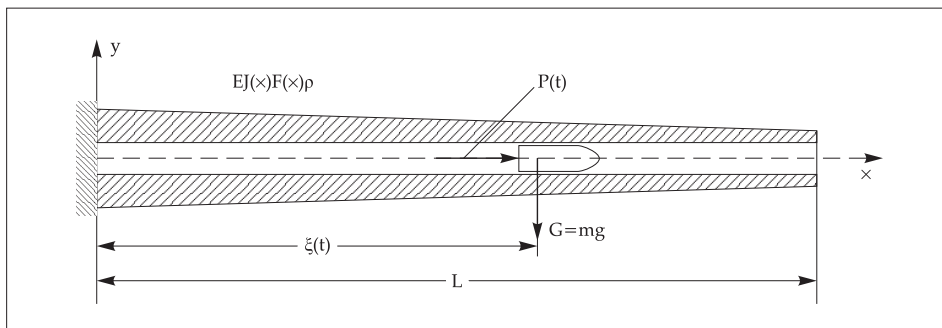
Założenia do modelu drgań poprzecznych lufy

Model drgań poprzecznych niejednorodnego układu ciągłego należy do kategorii układów o złożonym opisie matematycznym. Niejednorodność układu polega na tym, że rozpatrywana lufa ma zmienną średnicę (ryc. 1). Rozpatrywane będą drgania poprzeczne (giętne), pomijamy drgania skrętne i podłużne.



Rycina 1. Schemat mocowania lufy armatniej

W dalszym ciągu rozważań przyjęto model częściowy jak na ryc. 2., założono więc, że częstotliwości drgań własnych poprzecznych (giętych) lufy są znacznie większe od częstotliwości drgań lufy wraz z innymi elementami armaty przy lufie sztywnej. Przyjmujemy również płaski układ i fakt, że pocisk jest punktem materialnym.



Rycina 2. Model częściowy

Drgania poprzeczne lufy będą opisane następującym równaniem [Filipov].

$$E \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[J(x) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right] + \rho F(x) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \left(mg + m \frac{d^2 y_k}{dt^2} - m \frac{d^2 y}{dt^2} \right) \delta[x - \xi(t)] \quad (1),$$

gdzie:

- m — masa pocisku;
- $J(x)$ — moment bezwładności pola przekroju poprzecznego lufy;
- $E=2,06 \cdot 10^{11}$ N/m — moduł sprężystości;
- $\rho=7800$ kg/m³ — gęstość materiału;
- $y=y(x,t)$ — ugięcie lufy;
- $y_k=y_k(x)$ — technologiczne odstępstwo od prostoliniowości osi lufy, a także ugięcie pod wpływem ciężaru;
- $\xi(t)$ — położenie środka masy pocisku w chwili t ;
- $P(t)$ — siła działająca na pocisk w lufie w wyniku działania ciśnienia gazów prochowych ładunku miotającego;
- δ — delta Diracka.

Ponieważ funkcja ugięcia jest funkcją złożoną, sformułujemy:

$$\begin{aligned} \frac{dy_k[x(t)]}{dt} &= \frac{dy_k}{dx} \frac{dx}{dt}, \quad \frac{d^2 y_k}{dt^2} = \frac{d^2 y_k}{dx^2} \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 + \frac{dy_k}{dx} \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{d^2 y_k}{dx^2} \dot{x}^2 + \frac{dy_k}{dx} \ddot{x} \\ \frac{dy}{dt} &= \frac{\partial y}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial y}{\partial t}, \quad \frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 + 2 \frac{\partial^2 y}{\partial x \partial t} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{\partial y}{\partial x} \frac{d^2 x}{dt^2} = \\ &= \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \dot{x}^2 + 2 \frac{\partial^2 y}{\partial x \partial t} \dot{x} + \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{\partial y}{\partial x} \ddot{x} \end{aligned}$$

Krzywiznę lufy przyjmijmy w postaci paraboli leżącej w płaszczyźnie pionowej.

$$y_k(x) = y_{k\max} \frac{x^2}{L^2}, \quad \frac{dy_k}{dx} = 2y_{k\max} \frac{x}{L^2}, \quad \frac{d^2y_k}{dx^2} = 2 \frac{y_{k\max}}{L^2}$$

Przyjmujemy $y_{k\max} = 0,006$ m. Ponadto przyjmijmy, że prędkość pocisku w lufie może być wyznaczona z następującego wzoru:

$$\dot{\xi}(t) = v(t) = \frac{F}{m_p} \int_0^t p(\vartheta) d\vartheta - \frac{R_b}{m_p} t,$$

gdzie:

R_b — oznacza opór pocisku przemieszczającego się w lufie,

$p(t)$ — ciśnienie gazów prochowych.

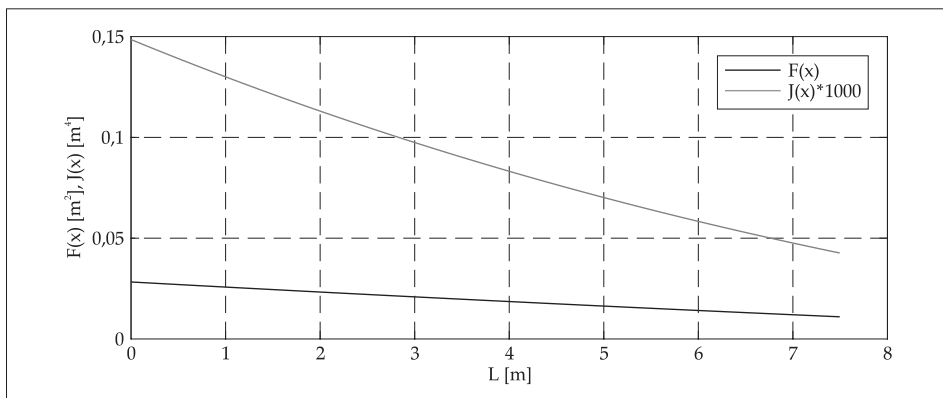
Zjawiska związane z ruchem pocisku w lufie to zadanie balistyki wewnętrznej. Nie jest to istotą opisywanego problemu, dlatego posłużymy się tu wzorem przybliżonym:

$$p = 2,0357 p_m \frac{t}{t_{k1}} e^{(1-2,0357t/t_{k1})} \quad \text{dla } t < t_{k2} \quad \text{i} \quad p = 0 \quad \text{dla } t > t_{k2}$$

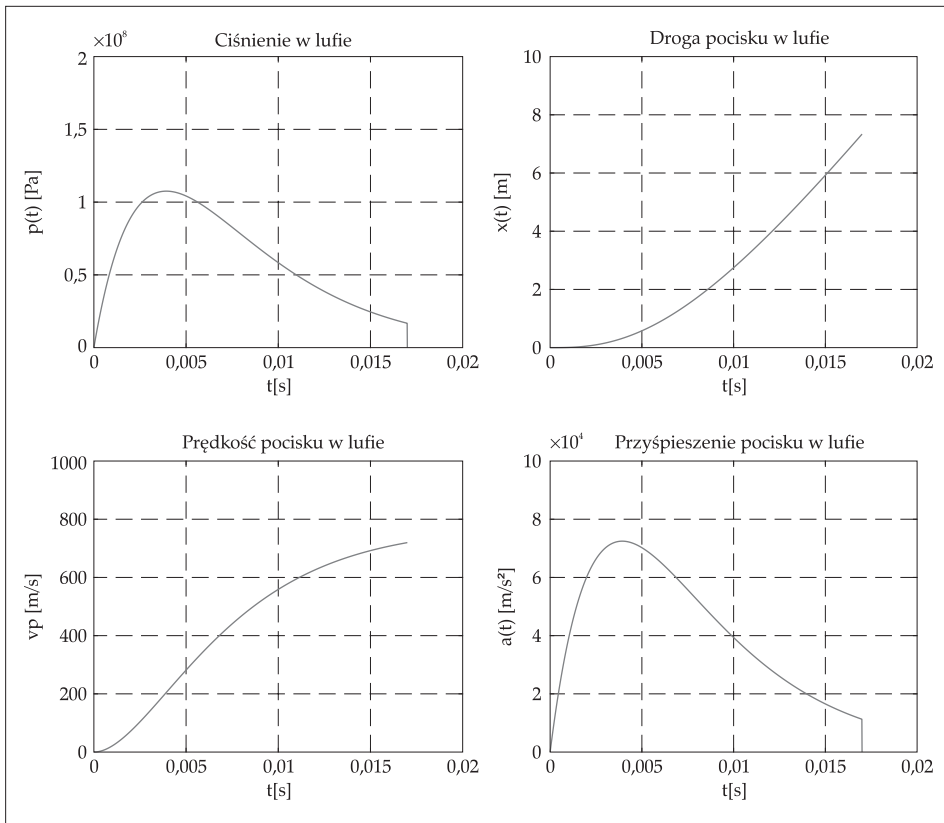
gdzie:

$p_m = 1,0753 \cdot 10^8$ Pa jest wartością maksymalną ciśnienia, $t_{k1} = 0,008$ s, $t_{k2} = 0,017$ s.

Ponadto przyjmijmy: $L = 7,5$ m — długość lufy; $d_{zp} = 0,245$ m — średnica lufy w miejscu zamocowania; $d_{zk} = 0,195$ m — średnica lufy na końcu; $d_w = 0,155$ m — średnica wewnętrzna; $m_p = 28$ kg — masa pocisku. Dla tak przyjętych danych potrzebne parametry do dalszych obliczeń przedstawiono na ryc. 3. i ryc. 4.



Rycina 3. Przekrój poprzeczny i moment bezwładności lufy



Rycina 4. Parametry balistyczne ($x(t) = \xi(t)$ $a(t) = \ddot{\xi}(t)$)

Analiza poprzecznych drgań własnych belki jednorodnej

Do rozwiązania równania (1) potrzebne nam będą postacie $Y_i(x)$ i częstości $S_i(t)$ drgań własnych belki. Funkcje $Y_i(x)$ winny spełniać wszystkie warunki brzegowe zagadnienia, trudno jednak takie funkcje znaleźć. Dlatego wyznaczymy postacie drgań własnych dla belki jednorodnej $X_i(x)$ i przyjmijmy, że $Y_i(x) = X_i(x)$ oraz $d_z = 0,195$ m — średnica zewnętrzna lufy (belki jednorodnej).

Postacie drgań własnych belki jednorodnej poszukujemy rozwiązując równanie:

$$EJ \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \rho F \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (2).$$

Rozwiązanie metodą Fouriera (rozdzielenia zmiennych) przyjmujemy:

$$y(x, t) = X(x)T(t).$$

Po podstawieniu do równania (2) otrzymujemy:

$$EJX^{IV}(x)T(t) + \rho FX(x)\ddot{T}(t) = 0.$$

Stąd $\ddot{T}(t) = -\omega^2 T(t)$ oraz równanie postaci drgań własnych $X^{IV}(x) - k^4 X(x) = 0$,

$$\text{gdzie: } k^4 = \omega^2 \frac{\rho F}{EJ} \text{ lub } \omega = k^2 \sqrt{\frac{EJ}{\rho F}}.$$

Rozwiązanie równania postaci drgań własnych:

$$\begin{aligned} X(x) &= C_1 \sin kx + C_2 \cos kx + C_3 \operatorname{sh} kx + C_4 \operatorname{ch} kx \\ X'(x) &= C_1 k \cos kx - C_2 k \sin kx + C_3 k \operatorname{ch} kx + C_4 k \operatorname{sh} kx \\ X''(x) &= -C_1 k^2 \sin kx - C_2 k^2 \cos kx + C_3 k^2 \operatorname{sh} kx + C_4 k^2 \operatorname{ch} kx \\ X'''(x) &= -C_1 k^3 \cos kx + C_2 k^3 \sin kx + C_3 k^3 \operatorname{ch} kx + C_4 k^3 \operatorname{sh} kx \end{aligned}$$

Warunki brzegowe:

$$y(0) = 0, \quad \left. \frac{\partial y}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right|_{x=L} = 0, \quad \left. \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} \right|_{x=L} = 0.$$

Stąd:

$$\begin{aligned} X(0) = C_2 + C_4 = 0 &\rightarrow C_4 = -C_2 \\ X'(0) = C_1 + C_3 = 0 &\rightarrow C_3 = -C_1 \\ X''(L) = -C_1 k^2 [\sin kL + \operatorname{sh} kL] - C_2 k^2 [\cos kL + \operatorname{ch} kL] &= 0 \\ X'''(L) = -C_1 k^3 [\cos kL + \operatorname{ch} kL] + C_2 k^3 [\sin kL - \operatorname{sh} kL] &= 0 \end{aligned}$$

Wyznacznik charakterystyczny:

$$\begin{aligned} D &= \begin{vmatrix} \sin kL + \operatorname{sh} kL, & \cos kL + \operatorname{ch} kL \\ \cos kL + \operatorname{ch} kL, & -[\sin kL - \operatorname{sh} kL] \end{vmatrix} = \\ &= -\sin^2 kL + \operatorname{sh}^2 kL - \cos^2 kL - 2 \cos kL \operatorname{ch} kL - \operatorname{ch}^2 kL = 0. \end{aligned}$$

Stąd równanie charakterystyczne: $\cos kL \operatorname{ch} kL = -1$ i jego kilka pierwszych pierwiastków:

$$k_1 L = 1,87511, \quad k_2 L = 4,69409, \quad k_3 L = 7,85475, \quad k_4 L = 10,99557, \quad k_5 L = 14,13717$$

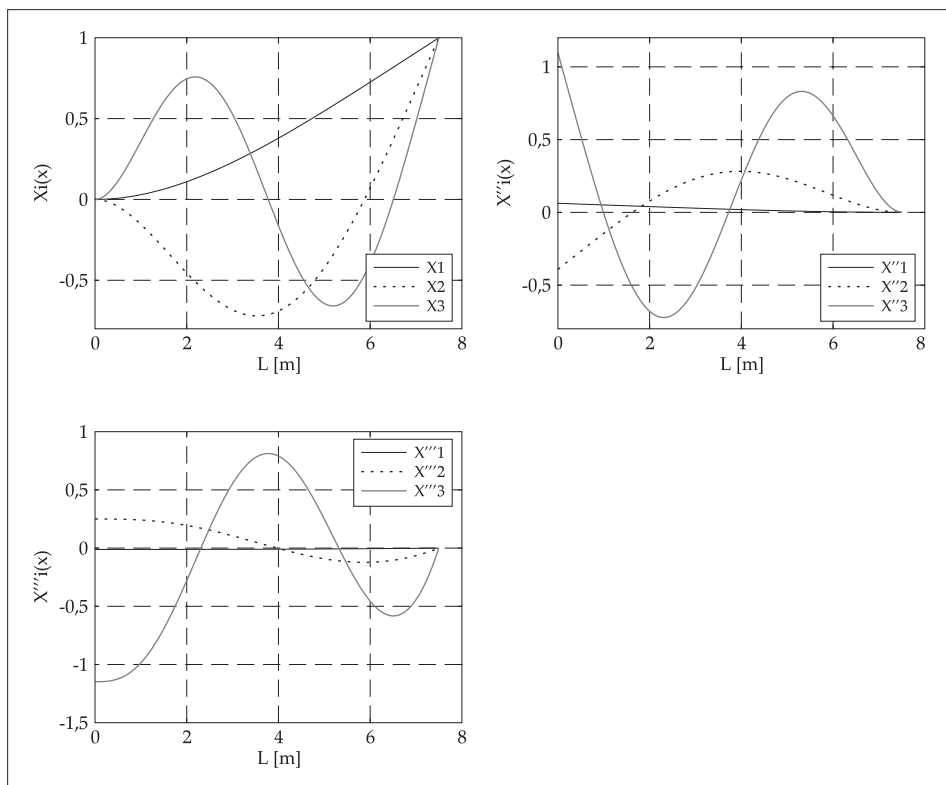
Częstości drgań własnych dla przyjętych danych:

$$\omega_1 = 20,0045 \text{ rad/s}, \quad \omega_2 = 125,3653 \text{ rad/s}, \quad \omega_3 = 351,0261 \text{ rad/s}.$$

Wyznaczamy wzór określający postać drgań własnych z dokładnością do C_1 .

$$X(x) = C_1 [\sin kx - shkx] + C_2 [\cos kx - chkx], \quad \text{gdzie } C_2 = \frac{\cos kL + \operatorname{ch} kL}{\sin kL - \operatorname{sh} kL} C_1$$

$$\text{Stąd: } X_i(x) = C_{1i} \left[(\sin k_i x - \operatorname{sh} k_i x) + \frac{\cos k_i L + \operatorname{ch} k_i L}{\sin k_i L - \operatorname{sh} k_i L} (\cos k_i x - \operatorname{ch} k_i x) \right].$$



Rycina 5. Trzy pierwsze postacie drgań belki jednorodnej oraz ich drugie i trzecie pochodne

Unormowaną postać drgań własnych przyjmujemy dla $X_i(L)=1$ i ostatecznie:

$$X_i(x) = \frac{shk_i L - \sin k_i L}{2 \sin k_i L shk_i L} [(\sin k_i x - shk_i x) + \frac{\cos k_i L + chk_i L}{\sin k_i L - shk_i L} (\cos k_i x - chk_i x)]$$

Na ryc. 5. przedstawiono pierwsze trzy postacie drgań oraz ich drugie i trzecie pochodne belki jednorodnej.

Analiza drgań lufy (belki niejednorodnej)

Rozważamy równanie:

$$E \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[J(x) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right] + \rho F(x) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0$$

Przyjmujemy rozwiązanie w postaci:

$$y(x, t) \approx \sum_{i=1}^n Y_i(x) T_i(t)$$

Jak pokazał Michlin, rozwiązanie jest zbieżne w sensie energii, gdy $n \rightarrow \infty$. Po podstawieniu do równania otrzymujemy:

$$\sum_{i=1}^n \{ [EJ(x)Y_i^{IV}(x) + 2EJ'(x)Y_i'''(x) + EJ''(x)Y_i''(x)]T_i(t) + \rho F(x)Y_i(x)\ddot{T}_i(t) \} = 0$$

Równanie powyższe mnożymy stronami przez $Y_k(x)$ ($k=1, 2, 3, \dots, n$) i całkujemy w granicach $0 \div L$.

$$\sum_{i=1}^n E \left\{ \int_0^L J(x) Y_i^{IV}(x) Y_k(x) dx \right\} + \left[2 \sum_{i=1}^n \int_0^L J'(x) Y_i'''(x) Y_k(x) dx \right] + \\ + \left[\sum_{i=1}^n \int_0^L J''(x) Y_i''(x) Y_k(x) dx \right] T_i(t) + \left[\sum_{i=1}^n \rho \int_0^L F(x) Y_i(x) Y_k(x) dx \right] \ddot{T}_i(t) = 0$$

Wyznaczamy składniki sum w powyższym równaniu całkując przez części. Na końcu uzyskamy:

$$[E \sum_{i=1}^n \int_0^L J(x) Y_i'(x) Y_k''(x) dx] T_i(t) + [\sum_{i=1}^n \rho \int_0^L F(x) Y_i(x) Y_k(x) dx] \ddot{T}_i(t) = 0$$

Oznaczmy:

$$E \int_0^L J(x) Y_i'(x) Y_k''(x) dx = K_{ki} \quad \rho \int_0^L F(x) Y_i(x) Y_k(x) dx = M_{ki} \quad (3),$$

zatem

$$\sum_{i=1}^n K_{ki} T_i(t) + \sum_{i=1}^n M_{ki} \ddot{T}_i(t) = 0$$

lub w postaci jawnej, jeżeli ograniczymy się do trzech pierwszych składników sum, $n=3$.

$$\begin{aligned} M_{11} \ddot{T}_1 + M_{12} \ddot{T}_2 + M_{13} \ddot{T}_3 + K_{11} T_1 + K_{12} T_2 + K_{13} T_3 &= 0 \\ M_{21} \ddot{T}_1 + M_{22} \ddot{T}_2 + M_{23} \ddot{T}_3 + K_{21} T_1 + K_{22} T_2 + K_{23} T_3 &= 0 \\ M_{31} \ddot{T}_1 + M_{32} \ddot{T}_2 + M_{33} \ddot{T}_3 + K_{31} T_1 + K_{32} T_2 + K_{33} T_3 &= 0 \end{aligned}$$

Wartości całek (3) dla przyjętych danych wynoszą:

$$\begin{aligned} M_{11} &= 205,9; M_{12} = -36,9; M_{13} = -4,04; M_{23} = -47,3; M_{22} = 258,2; M_{33} = 274,02; \\ M_{21} &= M_{12}; M_{31} = M_{13}; M_{32} = M_{23}; \\ K_{11} &= 185860,4; K_{12} = -175465,5; K_{13} = 94938,3; K_{23} = -3521980,5; K_{22} = 5874791,6; \\ K_{33} &= 43223583,6; \\ K_{21} &= K_{12}; K_{31} = K_{13}; K_{32} = K_{23}. \end{aligned}$$

Częstotliwości drgań własnych belki niejednorodnej wyznaczymy jako miejsca zerowe wyznacznika:

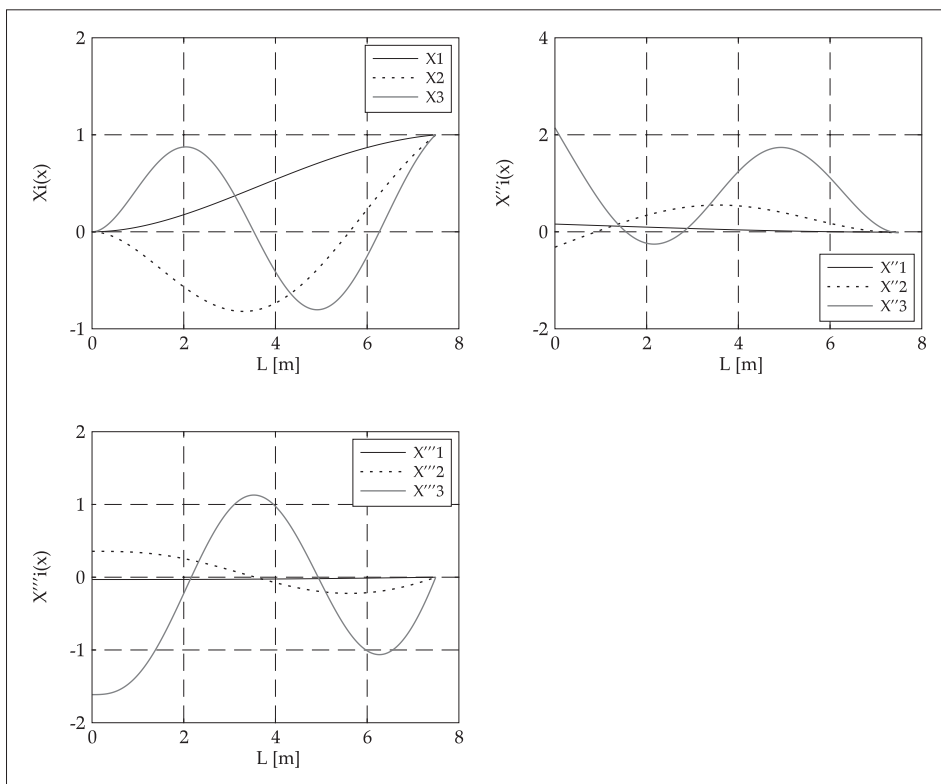
$$D = \begin{vmatrix} K_{11} - \omega^2 M_{11}, & K_{21} - \omega^2 M_{21}, & K_{31} - \omega^2 M_{31} \\ K_{21} - \omega^2 M_{21}, & K_{22} - \omega^2 M_{22}, & K_{32} - \omega^2 M_{32} \\ K_{31} - \omega^2 M_{31}, & K_{32} - \omega^2 M_{32}, & K_{33} - \omega^2 M_{33} \end{vmatrix}$$

$$\text{Stąd: } A_3 \omega^6 + A_2 \omega^4 + A_1 \omega^2 + A_0 = 0 \quad \text{lub} \quad \omega^6 + \frac{A_2}{A_3} \omega^4 + \frac{A_1}{A_3} \omega^2 + \frac{A_0}{A_3} = 0.$$

Z powyższego równania otrzymujemy częstotliwości drgań własnych lufy o zmiennym przekroju i wynoszą one:

$$\omega_1 = 30,202 \text{ rad/s}, \quad \omega_2 = 150,441 \text{ rad/s}, \quad \omega_3 = 399,005 \text{ rad/s}.$$

Postacie drgań pręta niejednorodnego (lufy) przedstawiono na ryc. 6.



Rycina 6. Postacie drgań belki niejednorodnej (lufy) oraz ich druga i trzecia pochodna

Analiza drgań wymuszonych pręta niejednorodnego (lufy) metodą Galerkina

Wychodzimy z następującego równania drgań wymuszonych, tj. równania (1) zapisanego inaczej.

$$E \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[J(x) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right] + \rho F(x) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \left(mg + m \frac{d^2 y_k}{dx^2} \dot{x}^2 + m \frac{dy_k}{dx} \ddot{x} - m \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \dot{x}^2 - 2m \frac{\partial^2 y}{\partial x \partial t} \dot{x} - m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - m \frac{\partial y}{\partial t} \ddot{x} \right) \delta[x - \xi(t)]$$

Rozwiązania przybliżonego metodą Galerkina poszukujemy w postaci:

$$y(x, t) = \sum_{i=1}^n Y_i(x) S_i(t),$$

Rozwiązanie to podstawiamy do równania wyjściowego (1).

$$E \frac{d^2}{dx^2} \left(J(x) \sum_{i=1}^n Y_i(x) S_i(t) \right) + \rho F(x) \sum_{i=1}^n Y_i(x) \ddot{S}_i(t) = \left[mg + m y_k'' \dot{x}^2 + m y_k' \ddot{x} - m Y_i''(x) \dot{x}^2 S(t) - 2m Y_i'(x) \dot{x} \dot{S}(t) - m Y_i(x) \ddot{S}(t) - m Y_i'(x) \dot{x} \dot{S}(t) \right] \delta[x - \xi(t)]$$

gdzie za $Y_i(x)$ przyjmujemy wyznaczone uprzednio postacie drgań własnych, funkcje $S_i(t)$ stanowią tu niewiadome zadania. Równanie to mnożymy stronami przez $Y_j(x)$ ($j=1, 2, 3, \dots, n$) oraz całkujemy względem x w granicach $0 \div L$.

$$\begin{aligned} & \left(\int_0^L EJ''(x) \sum_{i=1}^n Y_i'(x) Y_j(x) dx + 2 \int_0^L EJ'(x) \sum_{i=1}^n Y_i''(x) Y_j(x) dx + \int_0^L EJ(x) \sum_{i=1}^n Y_i^{IV}(x) Y_j(x) dx \right) S_i(t) + \\ & + \left(\int_0^L \rho F(x) \sum_{i=1}^n Y_i(x) Y_j(x) dx \right) \ddot{S}_i(t) = mg \int_0^L Y_j(x) \delta[x - \xi(t)] dx + m \int_0^L Y_j(x) y_k''(x) \dot{x}^2 \delta[x - \xi(t)] dx + \\ & - m \sum_{i=1}^n \left(\int_0^L Y_i''(x) Y_j(x) \dot{x}^2 \delta[x - \xi(t)] dx \right) S_i(t) - 2m \sum_{i=1}^n \left(\int_0^L Y_i'(x) Y_j(x) \dot{x} \delta[x - \xi(t)] dx \right) \dot{S}_i(t) + \\ & - m \sum_{i=1}^n \left(\int_0^L Y_i(x) Y_j(x) \delta[x - \xi(t)] dx \right) \ddot{S}_i(t) - m \sum_{i=1}^n \left(\int_0^L Y_i(x) Y_j(x) \ddot{x} \delta[x - \xi(t)] dx \right) \dot{S}_i(t) \end{aligned}$$

Stąd

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^n \left(\int_0^L \rho F(x) Y_j(x) Y_j(x) dx + m \int_0^L Y_i(x) Y_j(x) \delta[x - \xi(t)] dx \right) \ddot{S}_i(t) + \\ & + \sum_{i=1}^n \left(2m \int_0^L Y_i'(x) Y_j(x) \dot{x} \delta[x - \xi(t)] dx + m \int_0^L Y_i(x) Y_j(x) \ddot{x} \delta[x - \xi(t)] dx \right) \dot{S}_i(t) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \sum_{i=1}^n \left(\int_0^L EJ(x) Y_i''(x) Y_j''(x) dx + m \int_0^L Y_i''(x) Y_j''(x) x^2 \delta[x - \xi(t)] dx \right) S_i(t) = \\
 = & mg \int_0^L Y_j(x) \delta[x - \xi(t)] dx + m \int_0^L Y_j(x) y_k''(x) x^2 \delta[x - \xi(t)] dx + m \int_0^L Y_j(x) y_k'(x) \ddot{x} \delta[x - \xi(t)] dx
 \end{aligned}$$

Stąd

$$\begin{aligned}
 & \sum_{i=1}^n \left(\int_0^L \rho F(x) Y_i(x) Y_j(x) dx + m Y_i(\xi) Y_j(\xi) \right) \ddot{S}_i(t) + \\
 & + \sum_{i=1}^n [2m Y_i'(\xi) Y_j(\xi) \dot{\xi} + m Y_i(\xi) Y_j(\xi) \ddot{\xi}] \dot{S}_i(t) + \\
 & + \sum_{i=1}^n \left(\int_0^L EJ(x) Y_i''(x) Y_j''(x) dx + m Y_i''(\xi) Y_j''(\xi) \xi^2 \right) S_i(t) = \\
 & = mg Y_j(\xi) + m Y_j(\xi) y_k''(\xi) \xi^2 + m Y_j(\xi) y_k'(\xi) \ddot{\xi}
 \end{aligned}$$

Otrzymujemy równanie, które trzeba rozwiązać. Ze względu na złożoność wygodnie jest zrobić to cyfrowo. Oznaczmy:

$$\begin{aligned}
 & \int_0^L \rho F(x) Y_i(x) Y_j(x) dx + m Y_i(\xi) Y_j(\xi) = M_{jic} \\
 & m [2Y_i'(\xi) Y_j(\xi) \dot{\xi} + Y_i(\xi) Y_j(\xi) \ddot{\xi}] = C_{ji} \\
 & \int_0^L EJ(x) Y_i''(x) Y_j''(x) dx + m Y_i''(\xi) Y_j''(\xi) \xi^2 = K_{jic} \\
 & mg Y_j(\xi) + m Y_j(\xi) y_k''(\xi) \xi^2 + m Y_j(\xi) y_k'(\xi) \ddot{\xi} = Q_j
 \end{aligned}$$

Czyli:

$$\begin{aligned}
 & \int_0^L \rho F(x) Y_1^2(x) dx = M_{11}, \quad \int_0^L \rho F(x) Y_2(x) Y_1(x) dx = M_{12} = M_{21} \\
 & \int_0^L \rho F(x) Y_3(x) Y_1(x) dx = M_{13} = M_{31}, \quad \int_0^L \rho F(x) Y_2^2(x) dx = M_{22} \\
 & \int_0^L \rho F(x) Y_2(x) Y_3(x) dx = M_{23} = M_{32}, \quad \int_0^L \rho F(x) Y_3^2(x) dx = M_{33} \\
 & \int_0^L EJ(x) [Y_1''(x)]^2 dx = K_{11}, \quad \int_0^L EJ(x) Y_1''(x) Y_2''(x) dx = K_{12} = K_{21}
 \end{aligned}$$

$$\int_0^L EJ(x)Y_3''(x)Y_1''(x)dx = K_{13} = K_{31}, \quad \int_0^L EJ(x)[Y_2''(x)]^2 dx = K_{22}$$

$$\int_0^L EJ(x)Y_2''(x)Y_3''(x)dx = K_{23} = K_{32}, \quad \int_0^L EJ(x)[Y_3''(x)]^2 dx = K_{33}$$

$$M_{11C} = M_{11} + mY_1^2(\xi), \quad M_{12C} = M_{21C} = M_{12} + mY_1(\xi)Y_2(\xi)$$

$$M_{13C} = M_{31C} = M_{13} + mY_1(\xi)Y_3(\xi), \quad M_{22C} = M_{22} + mY_2^2(\xi)$$

$$M_{23C} = M_{32C} = M_{23} + mY_2(\xi)Y_3(\xi), \quad M_{33C} = M_{33} + mY_3^2(\xi)$$

$$K_{11C} = K_{11} + mY_1(\xi)[Y_1''(\xi)\xi^2 + Y_1'\xi]$$

$$K_{12C} = K_{12} + mY_1(\xi)[Y_2''(\xi)\xi^2 + Y_2'\xi]$$

$$K_{13C} = K_{13} + mY_1(\xi)[Y_3''(\xi)\xi^2 + Y_3'\xi]$$

$$K_{21C} = K_{21} + mY_2(\xi)[Y_1''(\xi)\xi^2 + Y_1'\xi]$$

$$K_{22C} = K_{22} + mY_2(\xi)[Y_2''(\xi)\xi^2 + Y_2'\xi]$$

$$K_{23C} = K_{23} + mY_2(\xi)[Y_3''(\xi)\xi^2 + Y_3'\xi]$$

$$K_{31C} = K_{31} + mY_3(\xi)[Y_1''(\xi)\xi^2 + Y_1'\xi]$$

$$K_{32C} = K_{32} + mY_3(\xi)[Y_2''(\xi)\xi^2 + Y_2'\xi]$$

$$K_{33C} = K_{33} + mY_3(\xi)[Y_3''(\xi)\xi^2 + Y_3'\xi]$$

$$C_{11} = 2mY_1'(\xi)Y_1(\xi)\xi, \quad C_{12} = 2mY_2'(\xi)Y_1(\xi)\xi$$

$$C_{13} = 2mY_3'(\xi)Y_1(\xi)\xi$$

$$C_{21} = 2mY_1'(\xi)Y_2(\xi)\xi, \quad C_{22} = 2mY_2'(\xi)Y_2(\xi)\xi$$

$$C_{23} = 2mY_3'(\xi)Y_2(\xi)\xi$$

$$C_{31} = 2mY_1'(\xi)Y_3(\xi)\xi, \quad C_{32} = 2mY_2'(\xi)Y_3(\xi)\xi$$

$$C_{33} = 2mY_3'(\xi)Y_3(\xi)\xi$$

$$Q_1 = mgY_1(\xi) + mY_1(\xi)y_k''(\xi)\xi^2 + mY_1(\xi)y_k'(\xi)\xi$$

$$Q_2 = mgY_2(\xi) + mY_2(\xi)y_k''(\xi)\xi^2 + mY_2(\xi)y_k'(\xi)\xi$$

$$Q_3 = mgY_3(\xi) + mY_3(\xi)y_k''(\xi)\xi^2 + mY_3(\xi)y_k'(\xi)\xi$$

Stąd

$$M_{11C}\ddot{S}_1(t) + M_{12C}\ddot{S}_2(t) + M_{13C}\ddot{S}_3 + C_{11}\dot{S}_1 + C_{12}\dot{S}_2(t) + C_{13}\dot{S}_3(t) +$$

$$+ K_{11C}S_1(t) + K_{12C}S_2(t) + K_{13C}S_3(t) = Q_1$$

$$\begin{aligned}
 M_{21C}\ddot{S}_1(t) + M_{22C}\ddot{S}_2(t) + M_{23C}\ddot{S}_3 + C_{21}\dot{S}_1 + C_{22}\dot{S}_2(t) + C_{23}\dot{S}_3(t) + \\
 + K_{21C}S_1(t) + K_{22C}S_2(t) + K_{23C}S_3(t) = Q_2 \\
 M_{31C}\ddot{S}_1(t) + M_{32C}\ddot{S}_2(t) + M_{33C}\ddot{S}_3 + C_{31}\dot{S}_1 + C_{32}\dot{S}_2(t) + C_{33}\dot{S}_3(t) + \\
 + K_{31C}S_1(t) + K_{32C}S_2(t) + K_{33C}S_3(t) = Q_3
 \end{aligned}$$

Otrzymany układ równań ma tzw. **postać ogólną**. Dla wygody całkowania cyfrowego należy go przekształcić do tzw. **postaci bezpośredniej** (w każdym równaniu występuje tylko jeden składnik z drugą pochodną). Zatem układ równań traktujemy jako algebraiczny o trzech niewiadomych: $\ddot{S}_1, \ddot{S}_2, \ddot{S}_3$ i rozwiązujemy go.

Mamy więc: $\ddot{S}_1(t) = \frac{\Delta_1}{\Delta}, \quad \ddot{S}_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta}, \quad \ddot{S}_3 = \frac{\Delta_3}{\Delta}$, gdzie

$$\Delta = \begin{vmatrix} M_{11C} & M_{12C} & M_{13C} \\ M_{21C} & M_{22C} & M_{23C} \\ M_{31C} & M_{32C} & M_{33C} \end{vmatrix} \quad \Delta_1 = \begin{vmatrix} h_1 & M_{12C} & M_{13C} \\ h_2 & M_{22C} & M_{23C} \\ h_3 & M_{32C} & M_{33C} \end{vmatrix}$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} M_{11C} & h_1 & M_{13C} \\ M_{21C} & h_2 & M_{23C} \\ M_{31C} & h_3 & M_{33C} \end{vmatrix} \quad \Delta_3 = \begin{vmatrix} M_{11C} & M_{12C} & h_1 \\ M_{21C} & M_{22C} & h_2 \\ M_{31C} & M_{32C} & h_3 \end{vmatrix}$$

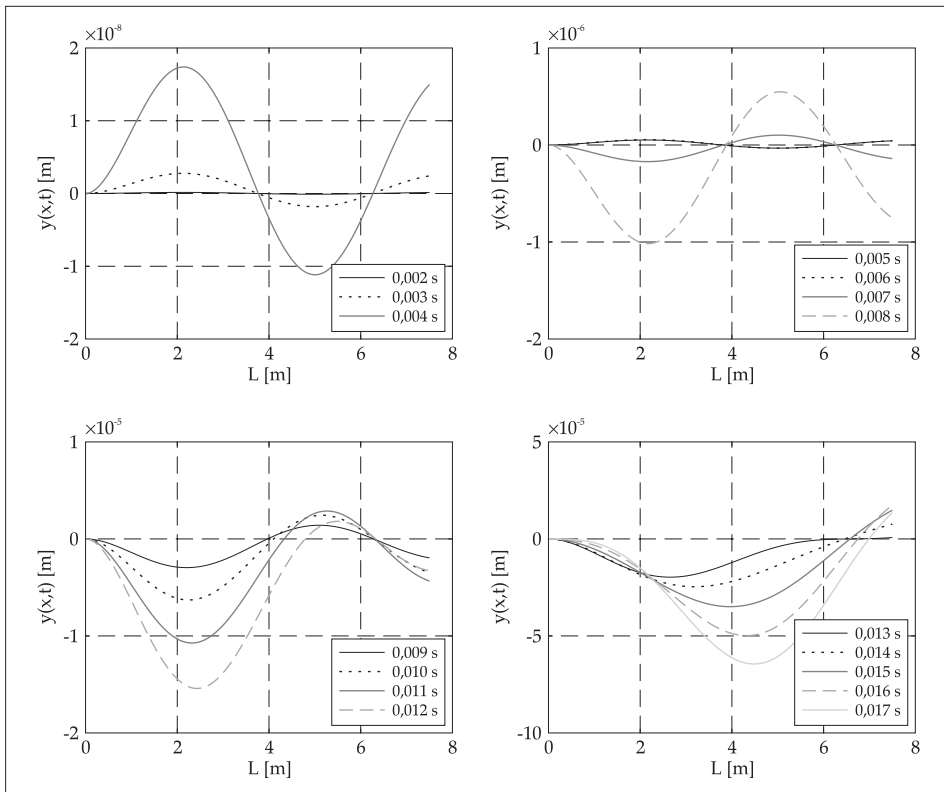
$$\begin{aligned}
 h_1 &= Q_1 - [C_{11}\dot{S}_1 + C_{12}\dot{S}_2(t) + C_{13}\dot{S}_3(t) + K_{11C}S_1(t) + K_{12C}S_2(t) + K_{13C}S_3(t)] \\
 h_2 &= Q_2 - [C_{21}\dot{S}_1 + C_{22}\dot{S}_2(t) + C_{23}\dot{S}_3(t) + K_{21C}S_1(t) + K_{22C}S_2(t) + K_{23C}S_3(t)] \\
 h_3 &= Q_3 - [C_{31}\dot{S}_1 + C_{32}\dot{S}_2(t) + C_{33}\dot{S}_3(t) + K_{31C}S_1(t) + K_{32C}S_2(t) + K_{33C}S_3(t)]
 \end{aligned}$$

Po rozwiązaniu powyższego układu równań uzyskujemy dane potrzebne do równania (3),

$$y(x, t) \approx \sum_{i=1}^3 Y_i(x)S_i(t) = Y_1(x)S_1(t) + Y_2(x)S_2(t) + Y_3(x)S_3(t) \quad (3),$$

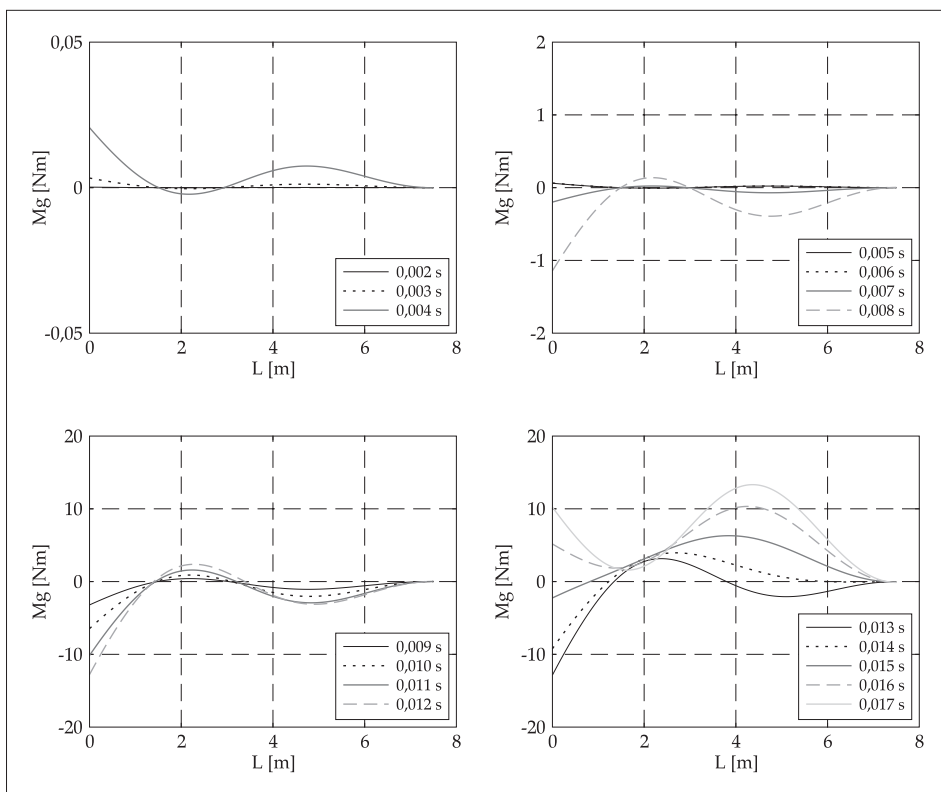
które stanowi przybliżone rozwiązanie rozpatrywanego problemu.

Wyniki obliczeń przedstawiono w sposób graficzny na kolejnej rycinie (ryc. 7). Widzimy tu linie ugięcia belki niejednorodnej (lufy) w kolejnych szesnastu chwilach.



Rycina 7. Ugięcie belki niejednorodnej (lufy) w kolejnych szesnastu chwilach (od chwili początku wystrzału do chwili opuszczenia lufy przez pocisk)

Wyniki obliczeń momentu gnącego działającego na rozpatrywaną w artykule belkę niejednorodną przedstawiono w sposób graficzny na kolejnej rycinie — 8. Momenty gnące belki niejednorodnej (lufy) zobrazowano w kolejnych szesnastu chwilach.



Rycina 8. Moment gnący belkę niejednorodną (lufę) w kolejnych szesnastu chwilach

Streszczenie

Drgania układów ciągłych należą do zagadnień o złożonym opisie matematycznym. W artykule przedstawiono drgania poprzeczne (giętnę) belki niejednorodnej na przykładzie lufy armatniej. Zaprezentowano metodologię poszukiwania postaci i częstości drgań własnych pręta jednorodnego i na tej podstawie wyznaczono postaci i częstości drgań pręta niejednorodnego (lufy armatniej). Do obliczeń wybrano przybliżoną metodę Galerkin. Wynikiem obliczeń jest prezentacja ugięcia belki niejednorodnej (lufy) w kolejnych szesnastu chwilach.

Summary

Vibrations of continuous systems are issues of a complex mathematical description. In this article transverse (flexural) vibrations of a heterogeneous bar, on the example of a cannon barrel are presented. Methodology of finding the form of vibrations and frequency of own vibrations of a homogeneous rod is shown, and on this basis, forms and frequencies of a heterogeneous rod (cannon barrel) were calculated. Approximate Galerkin method was chosen for calculations. The result of calculations is a presentation of deflection of a heterogeneous bar (barrel) in sixteen subsequent moments of time.

Literatura

1. Awrajcewicz J., Krysko A., *Drgania układów ciągłych*, Warszawa 2000.
2. *Drgania i fale*, red. Kaliski S., Warszawa 1966.
3. Sieriebriakow M., *Balistyka wewnętrzna*, tłum. R. Kossowski, Warszawa 1955.

Mirosław Radwański

(Kujawska Szkoła Wyższa we Włocławku)

PODSTAWOWA ANALIZA DRGAŃ UKŁADÓW CIĄGŁYCH

Słowa kluczowe: drgania; układy ciągłe; częstość drgań; postacie drgań; belka; zagadnienia brzegowe

BASIC ANALYSIS OF VIBRATIONS OF CONTINUOUS SYSTEMS

Key words: vibrations; continuous systems; vibrations frequency; types of vibrations; bar; boundary conditions

Analiza drgań własnych układów ciągłych polega na określeniu ich częstotliwości oraz postaci. Ograniczymy się tu do układów jednorodnych, w szczególności do równań (1) podłużne drgania pręta prostego i (8) — drgania giętne belki. Do rozwiązania zastosujemy metodę rozdzielania zmiennych Fouriera. Rozwiązania, polegające na wyznaczeniu częstotliwości i postaci drgań własnych układu noszą też nazwę rozwiązania **zagadnień brzegowych układu**. Samo równanie (1) lub (8) nie opisuje drgań. Oprócz równania należy jeszcze **podać warunki początkowe i warunki brzegowe**.

Podłużne drgania własne pręta prostego

Równanie ogólne podłużnych drgań pręta ma postać:

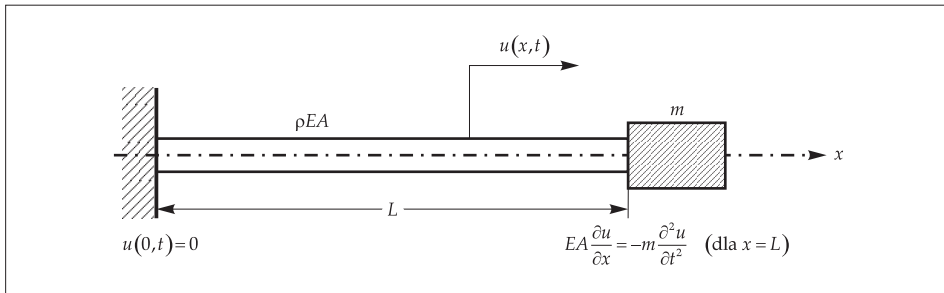
$$\rho(x)A(x)\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} - \frac{\partial}{\partial x} \left[A(x)E(x)\frac{\partial u(x,t)}{\partial x} \right] = p(x,t).$$

Jeżeli pręt jest jednorodny to $\rho = const$, $A = const$, $E = const$, wtedy równanie można zapisać:

$$\rho A \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} - AE \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = p(x,t) \quad \text{lub} \quad \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} - a^2 \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{\rho A} p(x,t) = \bar{p}(x,t)$$

gdzie: $\bar{p}(x,t) = \frac{p(x,t)}{\rho A}$ i $a = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$

Weźmy dla przykładu pręt pokazany na ryc. 1.



Rycina 1. Schemat pręta

W przypadku drgań własnych rozwiązywane tutaj równanie ma postać:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0 \tag{1}$$

Równanie to jest drugiego rzędu z uwagi na pochodną względem czasu i z uwagi na pochodną względem x . Aby zagadnienie drgań własnych zostało w pełni określone, należy podać dwa warunki początkowe oraz dwa warunki brzegowe.

Warunki początkowe mówią: czy pręt w chwili początkowej, tj. dla $t=0$, był już rozciągnięty, np. według jakiejś funkcji $w(x)$ i czy było to rozciągnięcie statyczne, czy też przekroje pręta miały jakąś prędkość $v(x)$. Warunki początkowe formułujemy więc następująco:

$$u(x,0) = w(x) \quad \left. \frac{\partial u}{\partial t} \right|_{t=0} = v(x)$$

Warunki brzegowe mówią o tym, jak pręt jest zamocowany lub jakie inne oddziaływania występują na jego końcach. Pręt jak na ryc. 1 ma lewy koniec ($x=0$) utwierdzony, a więc $u(0,t)=0$, zaś do prawego końca jest przytwierdzo-

na doskonale sztywne bryła o masie m . W trakcie podłużnych drgań pręta bryła ta przemieszcza się wzdłuż osi x i oddziałuje na prawy koniec pręta siłą

$$\text{bezwładności równą } B = -m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \Big|_{x=L}.$$

Metoda rozdzielania zmiennych Fouriera polega na tym, że dla wielu równań różniczkowych o pochodnych cząstkowych, dla zagadnień jednowymiarowych, rozwiązania możemy poszukiwać w postaci następującego iloczynu dwóch funkcji:

$$u(x, t) = X(x)T(t)$$

Rozwiązanie to winno spełniać równanie (1), a więc wyznaczamy:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = X(x) \frac{d^2 T}{dt^2} = X(x) \ddot{T}(t), \quad \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{d^2 X(x)}{dx^2} T(t) = X''(x) T(t)$$

Po podstawieniu powyższego do równania (1) otrzymujemy:

$$X(x) \ddot{T}(t) - a^2 X''(x) T(t) = 0.$$

Dzieląc powyższe równanie przez iloczyn $X(x)T(t)$, uzyskujemy

$$\frac{\ddot{T}(t)}{T(t)} = a^2 \frac{X''(x)}{X(x)} \quad (2).$$

Wynik ten należy skomentować. Po lewej stronie otrzymanej równości występuje funkcja czasu, zaś po prawej funkcja x . Równość taka może mieć miejsce jedynie wtedy, gdy lewa i prawa jej strona są stałymi. Jak się za chwilę okaże, stała ta winna być ujemna. Przyrównajmy lewą stronę równości (2) do stałej ujemnej.

$$\frac{\ddot{T}(t)}{T(t)} = -\omega^2 \quad \text{stąd} \quad \ddot{T}(t) + \omega^2 T(t) = 0 \quad (3).$$

Z równania tego wynika, dlaczego przyjęto stałą ujemną, bowiem rozwiązanie równania (3) jest ograniczone (harmoniczne). Gdyby stała ta była dodatnia, rozwiązanie równania (3) miałoby postać wykładniczą i rosłoby do nieskończoności, a drgania własne układu liniowego nie mogły być nieograniczone.

Analogicznie zapiszemy prawą stronę równania (2).

$$X''(x) + \frac{\omega^2}{a^2} X(x) = 0 \quad \text{lub} \quad X''(x) + k^2 X(x) = 0 \quad (4),$$

gdzie: $k = \omega/a$.

Zajmiemy się rozwiązaniem równania (4). Jego całka ogólna ma postać:

$$X(x) = C_1 \cos kx + C_2 \sin kx \quad (5).$$

Stałe C_1 i C_2 należy tak dobrać, żeby rozwiązanie (5) spełniało warunki brzegowe w każdej chwili czasu, więc:

$$\begin{aligned} u(x, t) = X(0)T(t) = 0 \quad \text{stąd} \quad X(0) = 0 \\ EA \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=L} = -m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \Big|_{x=L} \quad \text{stąd} \quad EAX'(L)T(t) = -mX(L)\ddot{T}(t). \end{aligned}$$

Biorąc pod uwagę równanie (3), mamy: $\ddot{T}(t) = -\omega^2 T(t)$, więc $EAX'(L) = m\omega^2 X(L)$. Ostatecznie warunki brzegowe są następujące:

$$X(0) = 0 \quad X'(L) - \frac{m\omega^2}{EA} X(L) = 0 \quad (6).$$

Podstawiamy teraz (5) do (6), daje to $X(0) = C_1 = 0$, więc $X(x) = C_2 \sin kx$ oraz $X'(L) - \frac{m\omega^2}{EA} X(L) = C_2 k \cos kL - \frac{m\omega^2}{EA} C_2 \sin kL = 0$.

Zauważmy, że $\omega^2 = k^2 a^2 = k^2 E/\rho$, stąd przy $C_2 \neq 0$ (jest to konieczne, bo w przeciwnym razie $u \equiv 0$) otrzymujemy:

$$k \cos kL = \frac{mk^2 E}{EA\rho} \sin kL \quad \text{lub} \quad \cos kL = kL \frac{m}{\rho AL} \sin kL.$$

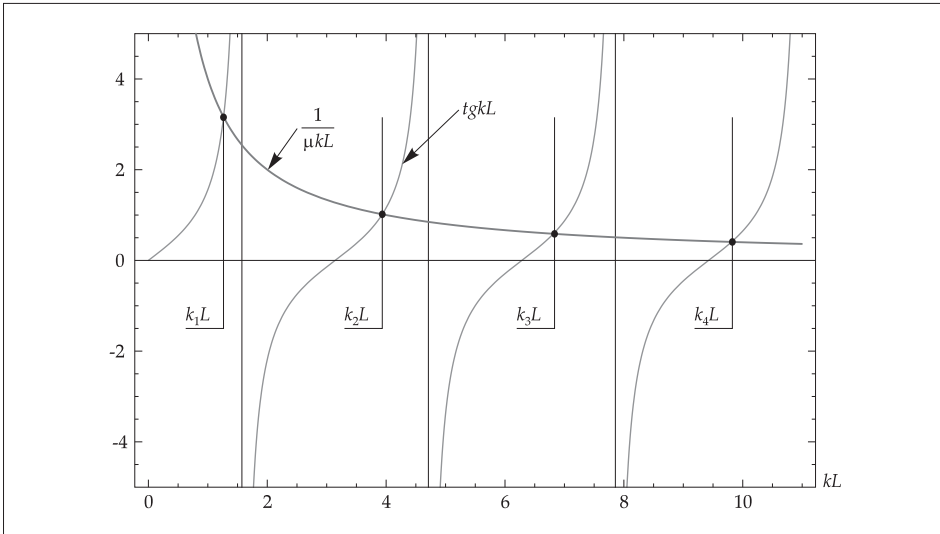
Ta ostatnia równość daje:

$$\text{tg}(kL) = \frac{1}{\mu kL} \quad (7),$$

gdzie: $\mu = \frac{m}{\rho AL}$ jest stosunkiem masy skupionej na prawym końcu pręta do masy samego pręta.

Z równości (7) możemy wyznaczyć kL , tym samym częstotliwości drgań własnych ω .

Rozwiązanie równania (7) w formie graficznej pokazano na ryc. 2.



Ryc. 2. Prezentacja rozwiązania równania (7)

W tabeli 1. podano wartości wybranych iloczynów k_iL ($i=1,2,3,\dots$), możemy teraz obliczyć kolejne częstotliwości drgań własnych układu.

$$\omega_i = k_i a = k_i \sqrt{\frac{E}{\rho}} = k_i L \sqrt{\frac{E}{\rho L^2}}$$

Układ ciągły ma nieskończenie wiele częstotliwości drgań własnych. Dlatego niekiedy układy ciągłe nazywają się układami o **nieskończenie wielu stopniach swobody**.

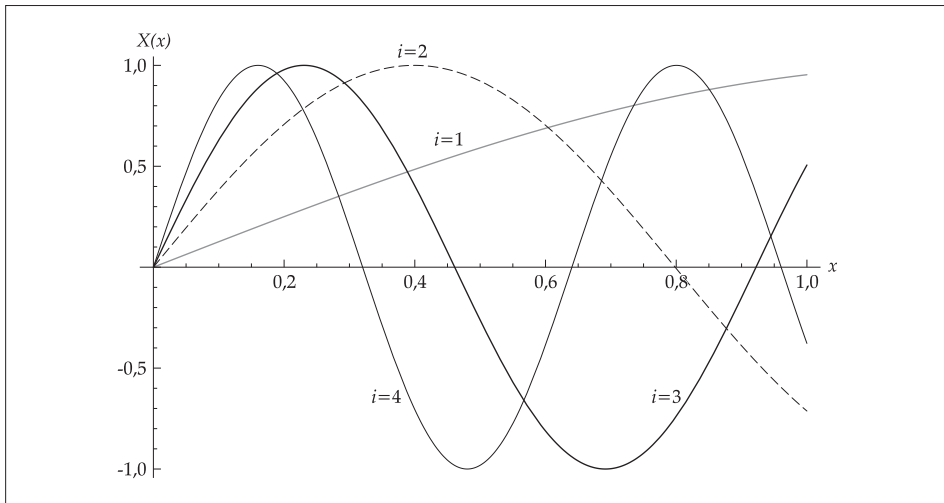
Funkcje $X_i(x)$ dla kolejnych k_iL noszą nazwę funkcji własnych układu. Skoro jednak mamy nieskończenie wiele wartości k_iL , to również mamy nieskończenie wiele funkcji własnych. Funkcje własne układu zapisujemy przy $C_2=1$. Zatem ciąg funkcji własnych dla rozważanego przykładu okazuje się następujący:

$$X_i(x) = \sin(k_i L \frac{x}{L}).$$

Tabela 1. Wartości iloczynów $k_i L$ dla wybranych wartości μ

	$\mu=0,25$	$\mu=0,50$	$\mu=1,00$	$\mu=5,00$	$\mu=10,00$
$K_1 L$	1,265	1,077	0,860	0,433	0,311
$K_2 L$	3,935	3,644	3,426	3,204	3,173
$K_3 L$	6,814	6,578	6,437	6,315	6,299
$K_4 L$	9,812	9,630	9,529	9,446	9,435

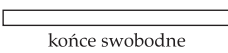
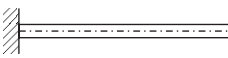
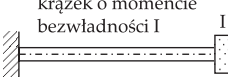
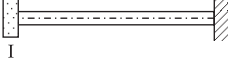
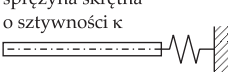
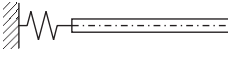
Na ryc. 3 pokazano cztery pierwsze funkcje własne dla $\mu=0,25$.



Rycina 3. Cztery funkcje własne belki (ryc. 1) dla $\mu=0,25$

Na końcu artykułu w tabeli 2 pokazano zestawienie warunków brzegowych dla drgań podłużnych pręta. Analiza drgań skrętnych pręta jest analogiczna względem analizy drgań podłużnych pręta, rozwiązuje się tu analogiczne równanie (1), inne są współczynniki a także współrzędne (np. x — drgania podłużne φ — drgania skrętne), istota jednak pozostaje taka sama, nie zostanie zaprezentowana w tym miejscu. W zamieszczonej poniżej tabeli 4 pokazano warunki brzegowe drgań skrętnych.

Tabela 4. Warunki brzegowe dla drgań skrętnych belki (wałka)

Schemat mocowania	Warunek dla $x=0$	Warunek dla $x=L$
 końce swobodne	$GJ_0 \left. \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right _{x=0} = 0$	$GJ_0 \left. \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right _{x=L} = 0$
	$\varphi(0, t) = 0$	$GJ_0 \left. \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right _{x=L} = 0$
 krążek o momencie bezwładności I	$\varphi(0, t) = 0$	$GJ_0 \left. \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right _{x=L} = -I \left. \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} \right _{x=L}$
 I	$GJ_0 \left. \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right _{x=0} = I \left. \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} \right _{x=0}$	$\varphi(L, t) = 0$
 sprężyna skrętna o sztywności κ	$GJ_0 \left. \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right _{x=0} = 0$	$GJ_0 \left. \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right _{x=L} + \kappa \varphi(L, t) = 0$
 κ	$GJ_0 \left. \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right _{x=0} - \kappa \varphi(0, t) = 0$	$GJ_0 \left. \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right _{x=L} = 0$

Drgania poprzeczne prętów (giętne belki)

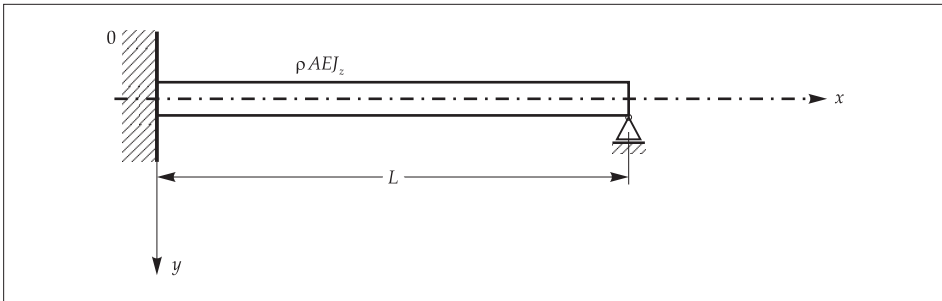
Równanie ogólne ma postać:

$$\rho(x)A(x)\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(E(x)J_z(x)\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) = q(x, t).$$

Jeżeli pręt jest jednorodny to $\rho = \text{const}$, $A = \text{const}$, $E = \text{const}$, $J_z = \text{const}$ i brak jest wymuszenia, wtedy równanie można zapisać:

$$\rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + EJ_z \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = 0 \quad (8).$$

Jako przykład niech posłuży pręt pokazany na ryc. 4.



Rycina 4. Schemat belki

Warunki początkowe:

$$y(x,0) = f_1(x) \quad \left. \frac{\partial y}{\partial t} \right|_{x=0} = f_2(x)$$

Warunki brzegowe:

$$\text{dla } x=0 \text{ jest } y(0,t)=0 \text{ oraz } \left. \frac{\partial y}{\partial x} \right|_{x=0} = 0$$

$$\text{dla } x=L \text{ jest } y(L,t) \text{ oraz } \left. \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right|_{x=L} = 0$$

Rozwiązanie równania poszukujemy w postaci:

$$y(x,t) = X(x)T(t) \tag{9}$$

$$X(0)T(t) \text{ czyli } X(0)=0 \quad X'(0)T(t)=0 \text{ czyli } X'(0)=0$$

$$X(L)T(t)=0 \text{ czyli } X(L)=0 \quad X''(L)T(t) \text{ czyli } X''(L)=0.$$

Podstawiamy (9) do (8).

$$\rho A X(x) \ddot{T}(t) + E J_z X^{IV}(x) T(t) = 0$$

Podobnie jak dla drgań podłużnych pręta dzielimy powyższe równanie przez $X(x)T(t)$ i przenosimy drugi składnik na stronę lewą.

$$\frac{\ddot{T}(t)}{T(t)} = - \frac{E J_z}{\rho A} \frac{X^{IV}(x)}{X(x)} = -\omega^2$$

Stąd otrzymujemy dwa równania różniczkowe zwyczajne:

$$\ddot{T}(t) + \omega^2 T(t) = 0 \quad (10)$$

$$X^{IV}(x) - k^4 X(x) = 0 \quad (11),$$

gdzie: $k^4 = \frac{\rho A}{EI_z} \omega^2$.

Całka ogólna równania (11) wynosi:

$$\begin{aligned} X(x) &= C_1 \sin(kx) + C_2 \cos(kx) + C_3 \operatorname{sh}(kx) + C_4 \operatorname{ch}(kx) \\ X'(x) &= C_1 k \cos(kx) - C_2 \sin(kx) + C_3 k \operatorname{ch}(kx) + C_4 k \operatorname{sh}(kx) \\ X''(x) &= -C_1 k^2 \sin(kx) - C_2 k^2 \cos(kx) + C_3 k^2 \operatorname{sh}(kx) + C_4 k^2 \operatorname{ch}(kx) \\ X'''(x) &= -C_1 k^3 \cos(kx) + C_2 k^3 \sin(kx) + C_3 k^3 \operatorname{ch}(kx) + C_4 k^3 \operatorname{sh}(kx) \\ X^{IV}(x) &= C_1 k^4 \sin(kx) + C_2 k^4 \cos(kx) + C_3 k^4 \operatorname{sh}(kx) + C_4 k^4 \operatorname{ch}(kx) = k^4 X(x). \end{aligned} \quad (12)$$

Jak widać, rozwiązanie (12) spełnia równanie (11). Stałe C_i dobieramy według warunków brzegowych:

$$\begin{aligned} \text{dla } x = 0 \text{ mamy } C_2 + C_4 &= 0, \text{ czyli } C_4 = -C_2 \text{ oraz } C_1 k + C_3 k = 0 \text{ czyli } C_3 = -C_1; \\ \text{dla } x = L \text{ mamy } C_1(\sin kL + \operatorname{sh}kL) - C_2(\cos kL - \operatorname{ch}kL) &= 0 \text{ oraz} \\ -C_1 k^2(\sin kL + \operatorname{sh}kL) - C_2 k^2(\cos kL + \operatorname{ch}kL) &= 0. \end{aligned}$$

Z uwagi na niewiadome C_1 i C_2 otrzymaliśmy układ równań jednorodnych (prawe strony są równe zero). Warunkiem, aby nie były równe zero jednocześnie, jest:

$$\Delta = \begin{vmatrix} \sin kL - \operatorname{sh}kL & \cos kL - \operatorname{ch}kL \\ -(\sin kL + \operatorname{sh}kL) & -(\cos kL + \operatorname{ch}kL) \end{vmatrix} = 0.$$

Warunek zostaje spełniony, gdy: $\cos kL = 0$ albo $\operatorname{th}kL = \operatorname{tg}kL$.

Stałe całkowania możemy wyznaczyć z dokładnością do jednej ze stałych np. C_1 . Wtedy:

$$C_2 = -C_1 \frac{\sin kL - \operatorname{sh}kL}{\cos kL - \operatorname{ch}kL} \quad C_3 = -C_1 C_4 = C_1 \frac{\sin kL - \operatorname{sh}kL}{\cos kL - \operatorname{ch}kL}.$$

Funkcje (12) przyjmują postać:

$$X(x) = C_1 \left[\sin kx - \frac{\sin kL - shkL}{\cos kL - chkL} \cos kx - shkx + \frac{\sin kL - shkL}{\cos kL - chkL} chkx \right]$$

$$X''(x) = C_1 k^2 \left[-\sin kx + \frac{\sin kL - shkL}{\cos kL - chkL} \cos kx - shkx + \frac{\sin kL - shkL}{\cos kL - chkL} chkx \right].$$

Gdyby $\cos kL = 0$, to $X''(L) = \pm 2C_1 k^2 \neq 0$ i nie jest spełniony ostatni z warunków brzegowych. Zatem częstotliwość drgań własnych wyznaczamy z równania:

$$tghkL = tgkL \quad (13).$$

Wyznaczamy na tej podstawie $k_i L$, gdzie $i = 1, 2, 3, \dots$ a następnie:

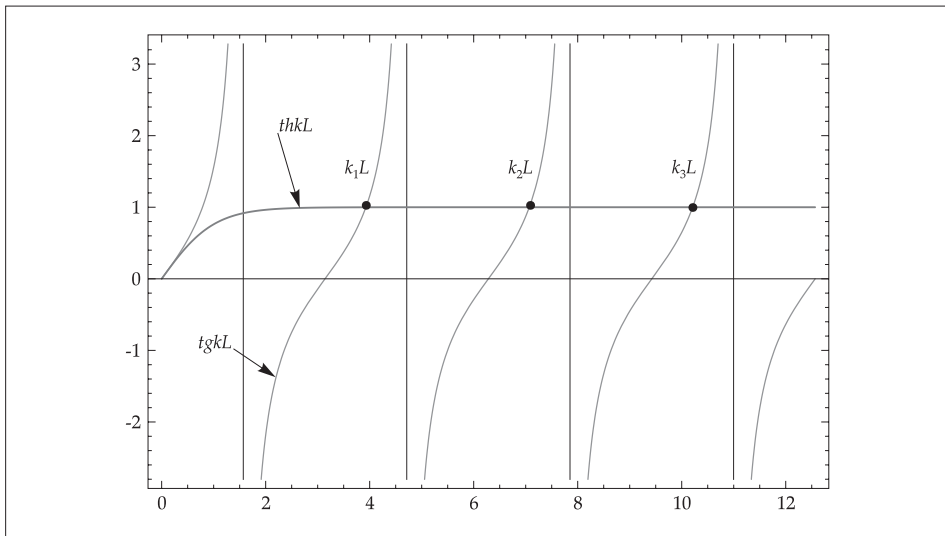
$$\omega_i = (k_i L)^2 \sqrt{\frac{EJ_z}{\rho AL^4}}.$$

Kilka kolejnych $k_i L$ wynosi:

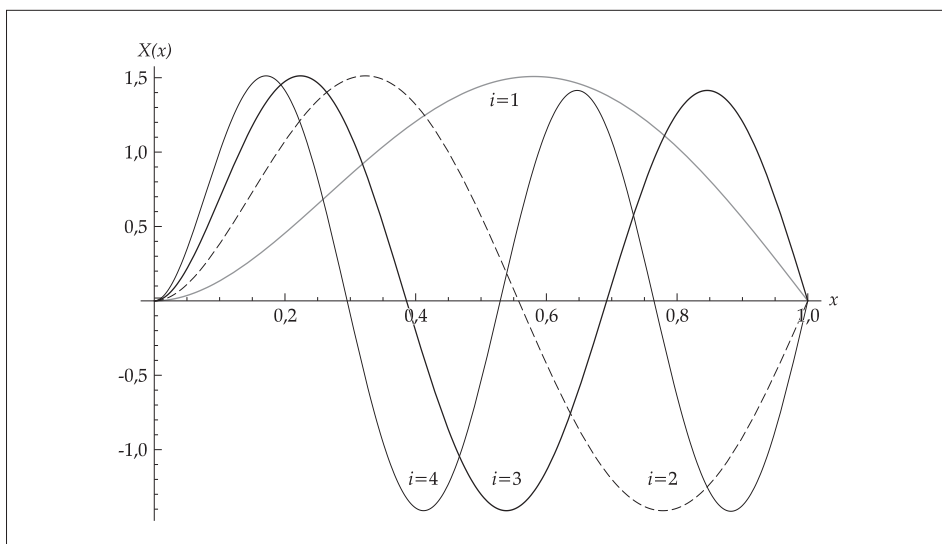
$$k_1 L = 3,9266 \quad k_2 L = 7,0685 \quad k_3 L = 10,2102 \quad k_4 L = 13,3518.$$

Ostateczna postać funkcji własnych w rozważanym przykładzie jest następująca:

$$X_i(x) = \sin k_i x - shk_i x - \frac{\sin k_i L - shk_i L}{\cos k_i L - chk_i L} (\cos k_i x - chk_i x).$$



Rycina 5. Prezentacja rozwiązania równania (13)



Rycina 6. Cztery funkcje własne belki (ryc. 4)

Ortogonalność funkcji własnych podłużnych belki

Funkcje własne układu ciągłego (podobnie jak w liniowych układach dyskretnych o wielu stopniach swobody) cechują się ważną własnością, a mianowicie są **ortogonalne**. Weźmy pod uwagę równanie (4). Winno być ono spełnione dla każdej z funkcji $X_i(x)$, a więc zapiszmy to równanie dla $X_i(x)$ oraz dla $X_j(x)$, gdzie i oraz j są dwiema dowolnie wybranymi liczbami naturalnymi:

$$X_i''(x) + k_i^2 X_i(x) = 0$$

$$X_j''(x) + k_j^2 X_j(x) = 0.$$

Wykonujemy teraz następujące działania: pierwsze z powyższych równań mnożymy stronami przez $X_j(x)$, a drugie przez $X_i(x)$, następnie odejmujemy je stronami od siebie.

$$X_i''(x)X_j(x) - X_j''(x)X_i(x) + (k_i^2 - k_j^2)X_i(x)X_j(x) = 0.$$

Całkujemy względem x w granicach $0 \div L$.

$$\int_0^L [X_i''(x)X_j(x) - X_j''(x)X_i(x)] dx + (k_i^2 - k_j^2) \int_0^L X_i(x)X_j(x) dx = 0 \quad (14).$$

Pierwszą z tych całek możemy scałkować przez części:

$$\begin{aligned} \int_0^L [X_i''(x)X_j(x) - X_j''(x)X_i(x)] dx &= [X_i'(x)X_j(x) - X_j'(x)X_i(x)]_0^L - \\ \int_0^L [X_j'(x)X_i'(x) - X_i'(x)X_j'(x)] dx &= [X_i'(x)X_j(x) - X_j'(x)X_i(x)]_0^L = \\ &X_i'(L)X_j(L) - X_j'(L)X_i(L) - X_i'(0)X_j(0) + X_j'(0)X_i(0). \end{aligned}$$

Podstawmy do powyższego warunki brzegowe

$$X_i(0) = 0, \quad X_i'(L) = \frac{m\omega_i^2}{EA} X_i(L) \quad \text{lub} \quad j,$$

otrzymamy:

$$\int_0^L [X_i''(x)X_j(x) - X_j''(x)X_i(x)] dx = \frac{m}{EA} (\omega_i^2 - \omega_j^2) X_i(L)X_j(L).$$

Po podstawieniu do (14) otrzymujemy:

$$\begin{aligned} \frac{m}{EA} (\omega_i^2 - \omega_j^2) X_i(L)X_j(L) + \frac{1}{a^2} (\omega_i^2 - \omega_j^2) \int_0^L X_i(x)X_j(x) dx &= 0 \\ \text{lub} \quad (\omega_i^2 - \omega_j^2) \left[\frac{m}{\rho A} X_i(L)X_j(L) + \int_0^L X_i(x)X_j(x) dx \right] &= 0. \end{aligned}$$

W powyższym iloczynie występują alternatywy: 1) $i=j$, wówczas pierwszy czynnik jest równy zeru, 2) $i \neq j$ wówczas drugi czynnik jest równy zeru. Zatem

$$\left[\mu L X_i(L)X_j(L) + \int_0^L X_i(x)X_j(x) dx \right] \begin{cases} = 0 & \text{gdy } i \neq j \\ \neq 0 & \text{gdy } i = j \end{cases} \quad (15),$$

gdzie: $\mu = \frac{m}{\rho AL}$.

Równanie to przedstawia warunki ortogonalności funkcji własnych układu ciągłego.

Ortogonalność funkcji własnych dla drgań giętych belki

Wróćmy do równania (11). Musi je spełniać każda z funkcji własnych. Weźmy dwie dowolne funkcje własne, dla każdej z nich równanie (11) będzie miało następującą postać:

$$\begin{aligned} X_i^{IV} - k_i^4 X_i &= 0 \\ X_j^{IV} - k_j^4 X_j &= 0. \end{aligned}$$

Przeprowadzimy teraz taką samą operację jak uprzednio dla drgań podłużnych, mnożymy stronami pierwsze równanie przez $X_j(x)$ a drugie przez $X_i(x)$, następnie odejmujemy je od siebie i całkujemy w granicach od 0 do L. Otrzymujemy:

$$\int_0^L [X_i^{IV}(x)X_j(x) - X_j^{IV}(x)X_i(x)] dx - (k_i^4 - k_j^4) \int_0^L X_i(x)X_j(x) dx = 0 \quad (16).$$

Pierwszą z tych całek możemy scałkować przez części:

$$\begin{aligned} \int_0^L [X_i^{IV}(x)X_j(x) - X_j^{IV}(x)X_i(x)] dx &= X_i''(L)X_j(L) - X_i''(0)X_j(0) - X_i''(L)X_j'(L) + \\ & X_i''(0)X_j'(0) - X_j''(L)X_i(L) + X_j''(0)X_i(0) + X_j''(L)X_i'(L) - X_j''(0)X_i'(0) + \\ \int_0^L X_i''(x)X_j''(x) dx - \int_0^L X_j''(x)X_i''(x) dx &= X_i''(L)X_j(L) - X_i''(0)X_j(0) - X_i''(L)X_j'(L) + \\ & X_i''(0)X_j'(0) - X_j''(L)X_i(L) + X_j''(0)X_i(0) + X_j''(L)X_i'(L) + X_j''(0)X_i'(0) = 0. \end{aligned}$$

Zatem z (16) mamy:

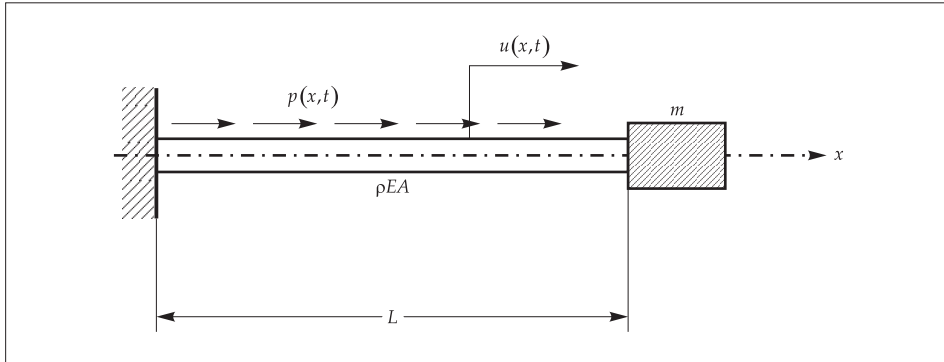
$$(k_i^4 - k_j^4) \int_0^L X_i(x)X_j(x) dx = 0.$$

Warunki ortogonalności są następujące:

$$\int_0^L X_i(x)X_j(x) dx \begin{cases} = 0 & \text{dla } i = j \\ \neq 0 & \text{dla } i \neq j \end{cases} \quad (17).$$

Drgania wymuszone układów ciągłych

Weźmy pod uwagę pręt z masą skupioną na końcu obciążony zmiennym w czasie podłużnym obciążeniem ciągłym rozłożonym wzdłuż pręta według funkcji $p(x,t)$ [N/m] jak na ryc. 7.



Rycina 7. Schemat belki obciążonej wzdłużnie

Równanie podłużnych drgań pręta jest następujące:

$$\rho A \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} - AE \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = p(x,t),$$

gdzie: $\rho = \text{const}$, $A = \text{const}$, $E = \text{const}$.

Rozwiązania tego równania poszukujemy w postaci

$$u(x,t) = \sum_{i=1}^{\infty} S_i(t) X_i(x) \quad (18).$$

Zauważmy, że jest to szereg Fouriera, w którym $S_i(t)$ są poszukiwanymi współczynnikami, a $u(x,t)$ jest rozwinięte w szereg względem ortogonalnych funkcji własnych $X_i(x)$, które należy wyznaczyć z rozwiązania drgań własnych dla danych warunków brzegowych.

Podstawmy (18) do (1), (żądamy, aby (18) spełniało to równanie).

$$\sum_{i=1}^{\infty} \ddot{S}_i(t) X_i(x) - a^2 \sum_{i=1}^{\infty} S_i(t) X_i''(x) = \bar{p}(x,t) = \frac{p(x,t)}{\rho A}$$

gdzie: $a^2 = E/\rho$.

Należy teraz wykorzystać warunki ortogonalności (15). W tym celu mnożymy powyższe równanie stronami przez:

$$X_j(x)[1 + \mu L \delta(x - L)], \text{ gdzie } \mu = \frac{m}{\rho AL},$$

a następnie całkujemy względem x w granicach $0 \div L$.

$$\sum_{i=1}^{\infty} \left\{ \int_0^L X_i(x) X_j(x) [1 + \mu L \delta(x - L)] dx \right\} \ddot{S}_i(t) - a^2 \sum_{i=1}^{\infty} \left\{ X_i''(x) X_j(x) [1 + \mu L \delta(x - L)] dx \right\} S_i(t) = \int_0^L \bar{p}(x, t) X_j(x) [1 + \mu L \delta(x - L)] dx.$$

Wykorzystamy teraz warunki ortogonalności (15) oraz fakt, że $X_i''(x) = -k_i^2 X_i(x)$. Otrzymujemy:

$$\left[\int_0^L X_j^2(x) dx + \mu L X_j^2(L) \right] \ddot{S}_j(t) + k_j^2 a^2 \left[\int_0^L X_j^2(x) dx + \mu L X_j^2(L) \right] S_j(t) = \int_0^L \bar{p}(x, t) X_j(x) dx.$$

Funkcje własne dla rozpatrywanego pręta już wyznaczyliśmy wcześniej $X_i(x) = \sin(k_i x)$. Stąd otrzymamy:

$$\left[\frac{L}{2} + \mu L \sin^2 k_j L \right] \ddot{S}_j(t) + k_j^2 a^2 \left[\frac{L}{2} + \mu L \sin^2 k_j L \right] S_j(t) = \int_0^L \bar{p}(x, t) \sin k_j x dx \quad \text{lub}$$

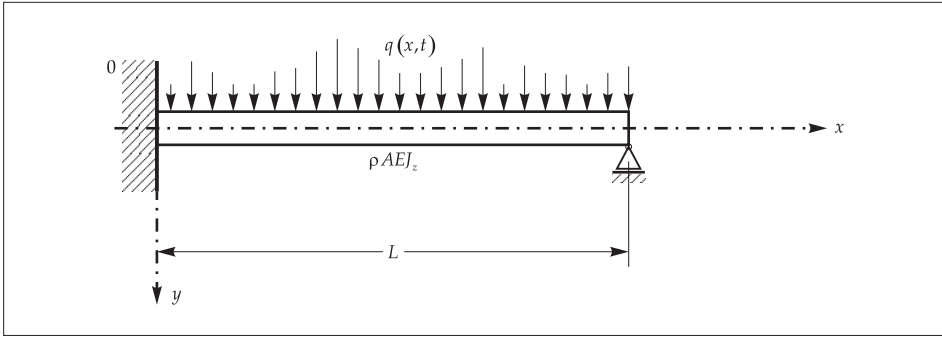
$$\ddot{S}_j(t) + \omega_j^2 S_j(t) = \frac{1}{\rho AL} \frac{2}{1 + 2\mu \sin^2 k_j L} \int_0^L p(x, t) \sin k_j x dx \quad j = 1, 2, 3, \dots \quad (19),$$

gdzież: $k_j a = \omega_j$.

Rozwiązując kolejno powyższe równanie, wyznaczymy $S_j(t)$ i na podstawie (18) otrzymujemy pełne rozwiązanie dla drgań wymuszonych. Jest to szereg nieskończony, można jednak wykazać, że dla rozpatrywanych w praktyce przypadków szereg ten jest zbieżny w zwykłym sensie. Można ograniczyć się do skończonej liczby składników.

$$u(x, t) \approx \sum_{i=1}^n S_i(t) X_i(x)$$

Weźmy pod uwagę drgania giętne belki wymuszone obciążeniem $q(x, t)$ zmiennym w czasie i rozłożonym na belce w sposób ciągły (ryc. 8). Niech $\rho = \text{const}$, $A = \text{const}$, $E = \text{const}$, $J_z = \text{const}$.



Rycina 8. Schemat belki drgającej poprzecznie (drżania gięte)

Równanie drżan giętych ma postać:

$$\rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + EJ_z \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = q(x, t) \quad (20).$$

Rozwiązania równania poszukujemy w postaci:

$$y(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} S_i(t) X_i(x) \quad (21).$$

Najpierw należy wyznaczyć funkcje własne $X_i(x)$ dla danych warunków brzegowych belki. Chcemy teraz, żeby (21) spełniło równanie drżan (20).

$$\sum_{i=1}^{\infty} \rho A \ddot{S}_i(t) X_i(x) + \sum_{i=1}^{\infty} EJ_z S_i(t) X_i^{(4)}(x) = q(x, t).$$

Wykorzystamy (11), tj. $X_i^{(4)}(x) = k_i^4 X_i(x)$. Stąd:

$$\sum_{i=1}^{\infty} \rho A \ddot{S}_i(t) X_i(x) + \sum_{i=1}^{\infty} EJ_z S_i(t) k_i^4 X_i(x) = q(x, t).$$

Należy teraz wykorzystać warunki ortogonalności (17). Zatem mnożymy stronami powyższe równanie przez $X_j(x)$, a następnie całkujemy względem x w granicach $0 \div L$.

$$\sum_{i=1}^{\infty} \left\{ \rho A \int_0^L X_i(x) X_j(x) dx \right\} \ddot{S}_i(t) + \sum_{i=1}^{\infty} \left\{ EJ_z k_i^4 \int_0^L X_i(x) X_j(x) dx \right\} S_i(t) = \int_0^L q(x,t) X_j(x) dx.$$

Na podstawie warunków (17) otrzymamy:

$$\sum_{i=1}^{\infty} \left\{ \rho A \int_0^L X_j^2(x) dx \right\} \ddot{S}_j(t) + \sum_{i=1}^{\infty} \left\{ EJ_z k_i^4 \int_0^L X_j^2(x) dx \right\} S_j(t) = \int_0^L q(x,t) X_j(x) dx$$

lub

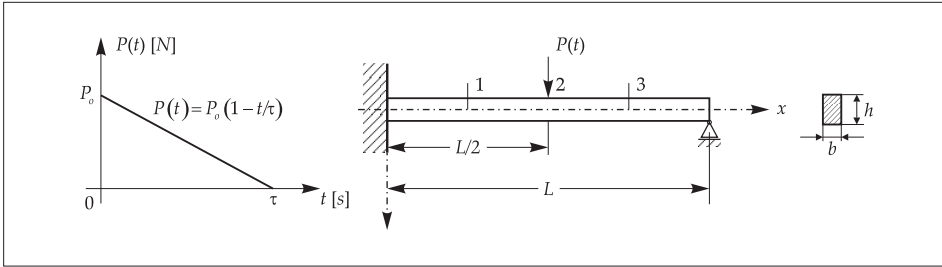
$$\ddot{S}_j(t) + \omega_j^2 S_j(t) = \frac{\int_0^L q(x,t) X_j(x) dx}{\rho A \int_0^L X_j^2(x) dx} \quad j = 1, 2, 3, \dots \quad (22).$$

Jest to układ niezależnych równań, których rozwiązania dają $S_j(t)$ i na podstawie (21) wyznaczmy pełne rozwiązanie dla drgań wymuszonych. Podobnie jak w przypadku drgań podłużnych pręta ograniczymy się do skończonej liczby składników powyższego rozwiązania:

$$y(x,t) \approx \sum_{i=1}^n S_i(t) X_i(x) \quad (23).$$

Przykład

Belka jak na ryc. 9 obciążona jest zmienną w czasie siłą P_0 do zera w sposób liniowy. Dane: $P_0 = 100$ N, $\tau = 2$ s, $L = 5$ m, $b = 0,02$ m, $h = 0,05$ m, $\rho = 8000$ kg/m³, stąd $EJ_z = 42937$ Nm². Wyznaczyć przebiegi $S_j(t)$ dla $j=1, j=2, j=3$ oraz ugięcia belki w punktach 1, 2 i 3, tj. $y_1(t) = y(L/4, t)$, $y_2(t) = y(L/2, t)$, $y_3(t) = y(3L/4, t)$.



Rycina 9. Schemat belki i obciążenia do przykładu

We wzorze (22), po jego prawej stronie, podstawiamy:

$$q(x, t) = P(t) \delta\left(x - \frac{L}{2}\right).$$

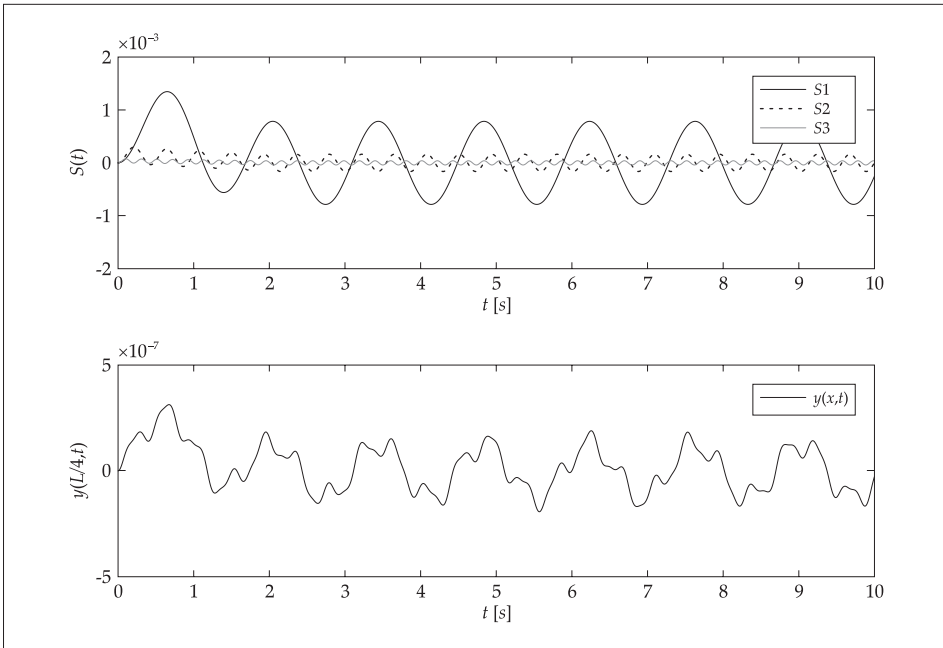
Równanie (22) przyjmie postać:

$$\ddot{S}_j(t) + \omega_j^2 S_j(t) = \frac{P(t) X_j(L/2)}{\rho A \int_0^L X_j^2(x) dx}.$$

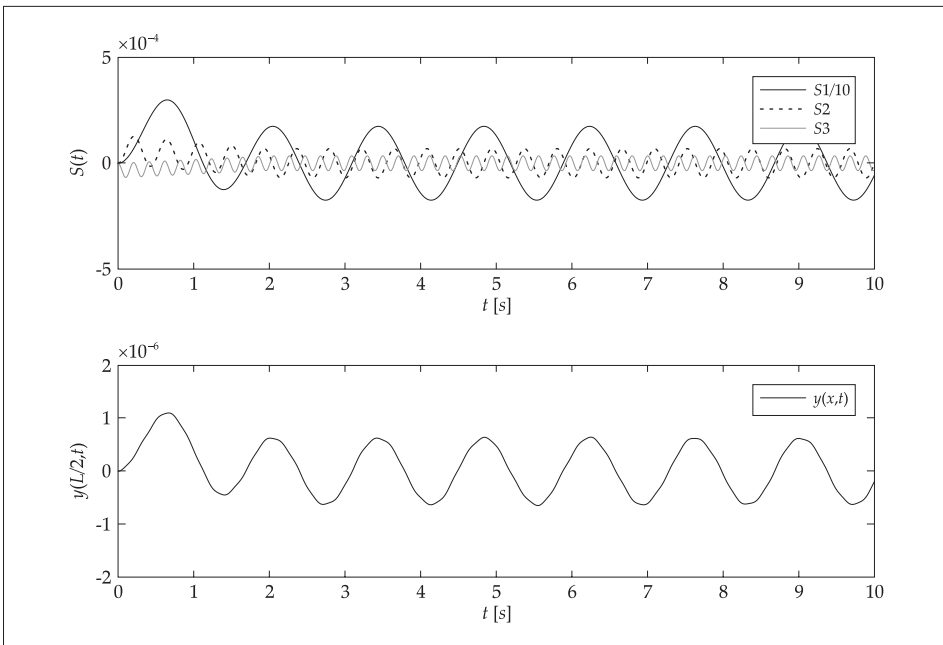
Funkcje własne dla belki jak na ryc. 9 zostały już wyznaczone wcześniej:

$$X_i(x) = \sin k_i x - shk_i x - \frac{\sin k_i L - shk_i L}{\cos k_i L - chk_i L} (\cos k_i x - chk_i x).$$

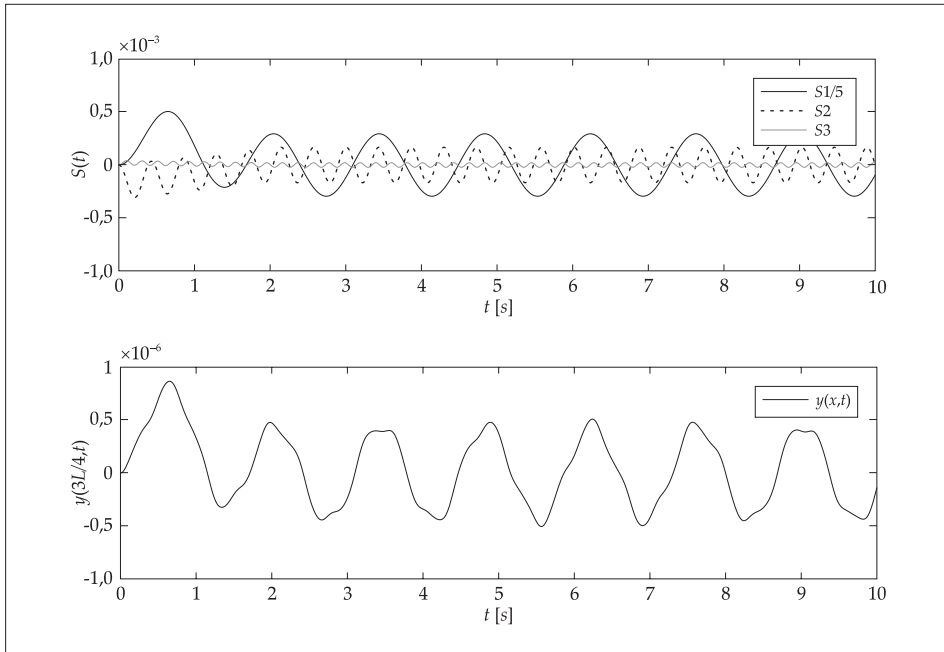
Dla pierwszych trzech wartości mamy: $k_1 L = 3,9266$, $k_2 L = 7,0685$, $k_3 L = 10,2102$.
 Stąd częstotliwości drgań własnych wynoszą: $\omega_1 = 4,5182$, $\omega_2 = 14,6415$, $\omega_3 = 30,5492$.
 Rozwiązanie pokazano na rycinach 10, 11, 12, 13.



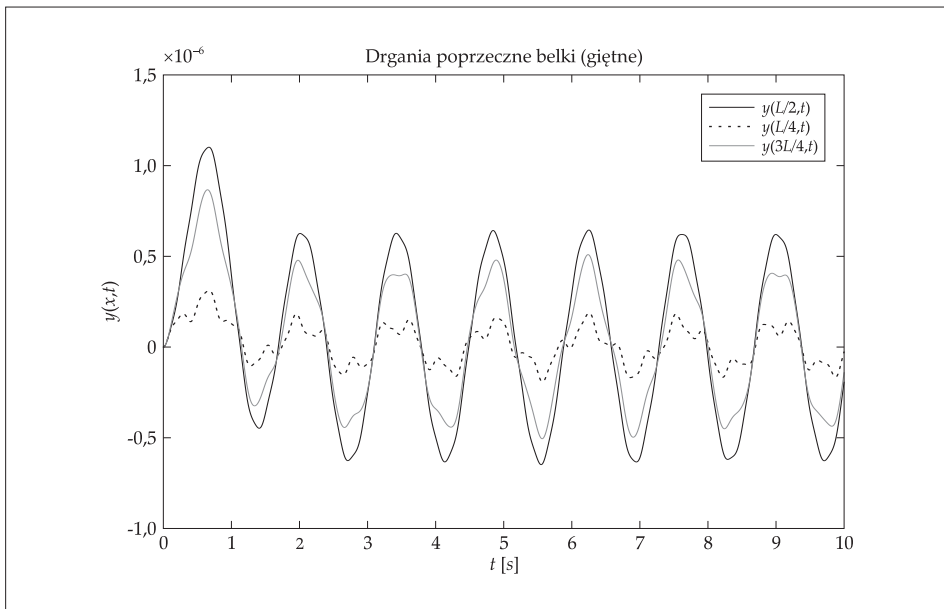
Ryc. 10. Funkcje $S_j(t)$ oraz ugięcie belki $y(L/4,t)$



Ryc. 11. Funkcje $S_j(t)$ oraz ugięcie belki $y(L/2,t)$. Wartości $S_1(t)$ podzielono przez 10 (przeskalowano wartości), żeby kolejne funkcje były lepiej widoczne



Ryc. 12. Funkcje $S_j(t)$ oraz ugięcie belki $y(3L/4,t)$. Wartości $S_1(t)$ podzielono przez 5 (przeskalowano wartości), żeby kolejne funkcje były lepiej widoczne



Ryc. 13. Ugięcia belki dla $x=L/4$, $x=L/2$, $x=3L/4$ w funkcji czasu (rysunek zbiorczy ryc. 10, 11, 12)

Tabela 2. Warunki brzegowe dla drgań podłużnych belki (pręta)

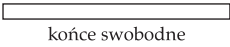


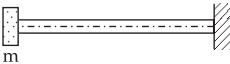

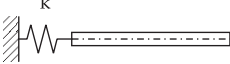

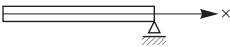

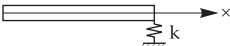
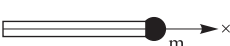


Schemat mocowania	Warunek dla $x=0$	Warunek dla $x=L$
 końce swobodne	$EA \frac{\partial u}{\partial x} \Big _{x=0} = 0$	$EA \frac{\partial u}{\partial x} \Big _{x=L} = 0$
	$u(0,t) = 0$	$EA \frac{\partial u}{\partial x} \Big _{x=L} = 0$
	$u(0,t) = 0$	$EA \frac{\partial u}{\partial x} \Big _{x=L} = -m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \Big _{x=L}$
	$EA \frac{\partial u}{\partial x} \Big _{x=0} = m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \Big _{x=0}$	$u(L,t) = 0$
	$EA \frac{\partial u}{\partial x} \Big _{x=0} = 0$	$EA \frac{\partial u}{\partial x} \Big _{x=L} + ku(L,t) = 0$
	$EA \frac{\partial u}{\partial x} \Big _{x=0} - ku(0,t) = 0$	$EA \frac{\partial u}{\partial x} \Big _{x=L} = 0$

Tabela 3. Warunki brzegowe dla drgań poprzecznych (giętnych) belki

Rodzaj zamocowania	Warunki brzegowe	
	dla $x=0$	dla $x=L$
 koniec swobodny	$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0, \quad \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} = 0$	$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0, \quad \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} = 0$
	$y = 0, \quad \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0$	$y = 0, \quad \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0$
	$y = 0, \quad \frac{\partial y}{\partial x} = 0$	$y = 0, \quad \frac{\partial y}{\partial x} = 0$
	$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0, \quad -EJ_z \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} = ky$	$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0, \quad EJ_z \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} = ky$
	$y = 0, \quad \kappa \frac{\partial y}{\partial x} = EJ_z \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$	$y = 0, \quad \kappa \frac{\partial y}{\partial x} = -EJ_z \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$
	$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0, \quad m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -EJ_z \frac{\partial^3 y}{\partial x^3}$	$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0, \quad m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = EJ_z \frac{\partial^3 y}{\partial x^3}$
	$m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -EJ_z \frac{\partial^3 y}{\partial x^3}$	$m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = EJ_z \frac{\partial^3 y}{\partial x^3}$
	$I_z \frac{\partial^3 y}{\partial t^2 \partial x} = EJ_z \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$	$I_z \frac{\partial^3 y}{\partial t^2 \partial x} = -EJ_z \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$

Streszczenie

W artykule przedstawiono równania oraz metodologię rozwiązania pozwalającą zaprezentować drgania układów ciągłych. Rozpatrywano belki jednorodne, ich drgania podłużne i poprzeczne. Pokazano na wybranych przykładach sposób wyznaczania częstości i postaci drgań własnych układu. Przedstawiono jedno pełne rozwiązanie, gdzie obliczono ugięcia obciążonej belki w wybranych miejscach w funkcji czasu. Na końcu zamieszczono tabele warunków brzegowych wielu praktycznie analizowanych belek (prętów, wałków).

Summary

In this article equations and methodology of solution, enabling to present vibrations of continuous systems are presented. Longitudinal and transverse vibrations of homogeneous bars are considered. Using selected examples the methods of designating frequency and types of free vibrations of a system are presented. One complete solution was shown, in which deflections of a bar, laden at selected points, as a function of time were calculated. At the end, tables of boundary conditions of many practically analyzed bars (rods, cylinders) are published.

Literatura

1. Awrajcewicz J., Krysko A., *Drgania układów ciągłych*, Warszawa 2000.
2. Cichoń Cz., Cecot W., Krok J., Pluciński P., *Metody komputerowe w liniowej mechanice konstrukcji*, Kraków 2010.

Michał Sójka

(Kujawska Szkoła Wyższa we Włocławku)

BADANIE PROCESÓW STARZENIA OLEJÓW PRZEKŁADNIOWYCH W PROCESIE EKSPLOATACJI PRZEKŁADNI PLANETARNYCH

Słowa kluczowe: oleje smarowe; przekładnia zębata; tarcie; smarność; warstwa graniczna; dodatki nisko-tarciowe

QUALITY MONITORING DEGRADATIVE CHANGES GEAR OILS DURING OPERATION OF TRANSMISSION GEAR

Key words: lubricating oils; gear box; friction; lubrication; boundary layer; low friction additives

Wprowadzenie

Prawidłowe działanie grup węzłów tarcia w przekładni, takich jak: współpraca kół zębatach i łożysk tocznych oraz ślizgowych, decyduje o sprawności technicznej przekładni i jest uzależnione od jakości środków smarnych (olejów przekładniowych) oraz od ilości zanieczyszczeń generowanych w procesie ich eksploatacji, przedostających się do oleju [1]. W trakcie eksploatacji w oleju zachodzą także procesy fizykochemiczne powodujące zmiany, w szczególności własności smarnych oleju oraz wartości parametru lepkości kinematycznej [4].

Degradacyjne zmiany w olejach smarowych powstają na skutek współdziałania elementów układów tribologicznych wewnątrz przekładni, samych materiałów, z jakich zbudowana jest przekładnia oraz w wyniku przedostawania się zanieczyszczeń z otoczenia przekładni. Zmiany te mają charakter trwałe i są odzwierciedleniem pojawiania się nowych własności nazywanych eksploatacyjnymi. Natomiast cechy te decydują o przydatności w procesie użytkowania.

Specyfika zanieczyszczenia obiegowych olejów przekładniowych polega na ciągłym gromadzeniu się w nich zanieczyszczeń, ponieważ układy smarowania są układami o obiegu zamkniętym [14]. Intensywność zanieczyszczenia oleju przekładniowego zależy od takich czynników jak:

- stan techniczny i warunki eksploatacji przekładni,
- rodzaj i stan układu filtracji,
- rodzaj stosowanego oleju i ilość dolewek,
- rodzaj stosowanych uszczelnień.

Postęp w technologii produkcji olejów bazowych i pakietów dodatków uszlachetniających umożliwił produkcję olejów przekładniowych o wysokich wskaźnikach lepkości [10]. Obiegowe oleje przekładniowe o określonej lepkości kinematycznej, odznaczające się wysokim wskaźnikiem lepkości, zapewniają w niskich temperaturach lepkość pozwalającą na ich pompowanie, co z kolei gwarantuje dobre własności rozruchowe układu smarowania, a w temperaturze pracy odpowiada za odpowiednią trwałości filmu smarowego, co jest gwarancją właściwego smarowania węzłów tarcia w przekładni.

Wraz z rozwojem wysokosprawnych przekładni zębatych olejom przekładniowym stawiane są coraz wyższe wymagania jakościowe, przy jednoczesnym zachowaniu norm ekologicznych. Wartości parametrów olejów świeżych mogą jednak znacznie odbiegać od wartości, jakimi charakteryzują się oleje eksploatowane. Podstawowe własności fizykochemiczne oraz użytkowe olejów wyznacza się w laboratoriach metodami standardowymi. Obecnie istnieje cała różnorodność metod badawczych, z których najnowszą jest skaningowa metoda Brookfielda dotycząca nowego kryterium oceny pompowalności olejów, w których określa się dwa parametry: indeks żelowania i temperaturę żelowania [5].

Identyfikacja obiektu i przedmiotu badań

Obiektem badań są oleje przekładniowe stosowane w przekładniach zębatych z zanurzeniowym systemem smarowania. Przedmiotem badań — procesy starzeniowe zachodzące w olejach silnikowych w trakcie ich eksploatacji.

Na skutek oddziaływania czynników wymuszających w trakcie pracy przekładni następuje zmiana stężenia dodatków uszlachetniających w oleju oraz zmiana ich własności. Własności te opisywane zbiorami cech mierzalnych i niemierzalnych można określać w trakcie badań. Jednocześnie można zauważyć narastanie kontaminacji i ich kumulowanie się w oleju. Wówczas stan oleju w danej chwili t można opisać wektorem \bar{x} , co określono zależnością 1.

$$\bar{x}(t) = \langle x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t) \rangle \quad (1),$$

gdzie: $x_i(t)$ — wartość pojedynczej cechy opisującej stan oleju w chwili t .

Do opisu stanu oleju przekładniowego lub innego materiału eksploatacyjnego wyznacza się składowe, których wartości uwzględniają stan oleju świeżego oraz te, które opisują zmiany starzeniowe. W czasie użytkowania przekładni produkty zużycia węzłów tarcia są wypłukiwane przez olej, gromadzą się w nim, zwiększając koncentrację. Również cząstki stałe i pary przedostające się do przekładni z otoczenia poprzez uszczelnienia labiryntowe oraz systemy przewietrzania skrzyni przekładni są dodatkowym źródłem zanieczyszczeń. Specyficzną grupę zanieczyszczeń stanowią produkty starzenia powstające w wyniku utleniania, rozkładu i polimeryzacji węglowodorów oraz dodatków uszlachetniających zawartych w tych olejach, powodując zmiany składu chemicznego oleju [1].

Wystarcza to, aby istotne własności eksploatacyjne oleju spowodowały przejście ze stanu zdatności w stan niezdatności. Intensywność procesów starzenia i ich przebieg jest uzależniony od jakości środka smarowego, warunków eksploatacji oraz stanu przekładni. Decydują one o stopniu i szybkości degradacji oleju, doprowadzając jego stan do granicznego.

Nie istnieją uniwersalne metody wyznaczania stanu granicznego oleju, uzasadniające wyznaczenie chwili przekroczenia krytycznych wartości parametrów determinujących jego główne cechy użytkowe. Przyczyną trudności w opracowaniu uniwersalnej metodyki prognozowania czasu pracy oleju przekładniowego jest brak jednoznacznych relacji zachodzących między stanem oleju a trwałością przekładni zębatej [11].

Obecnie decyzję o wymianie olejów podejmuje się według ścisłych zaleceń producentów przekładni, przeważnie z dużymi zapasami trwałości. Zalecenia te, w zależności od typu przekładni, producenta i stosowanego oleju bywają znacząco różne. W niektórych typach przekładni producenci przyjmują strategię stosowania oleju przewidzianego na czas trwałości przekładni bez możliwości jego wymiany. Dotyczy to jednak głównie przekładni ślimakowych małych i średnich mocy [9]. W przypadku przekładni zębatych z wymuszonym układem smarowania w przeważającej większości stosowana jest strategia eksploatacyjna według potencjału eksploatacyjnego. Olej wymienia się po określonym czasie pracy przekładni wyrażonym w miesiącach lub — w przypadku przekładni wyposażonych w systemy liczenia godzin pracy — w motogodzinach. Po osiągnięciu założonej wartości jednego z tych kryteriów oleje są wymieniane niezależnie od rzeczywistego ich stanu, nawet wtedy, gdy posiadają one jeszcze znaczny potencjał użytkowy. Wykorzystanie tego potencjału w sposób znaczący zwiększyłoby efektywność działania systemu.

W tabeli przedstawiono wartości wybranych parametrów oleju przekładniowego według różnych źródeł w literaturze przedmiotu. Jak wynika z przedstawionych w tabeli danych, wartości tych parametrów według różnych autorów i producentów przekładni i olejów przekładniowych są rozbieżne — nie jest możliwe jednoznaczne określenie stanów granicznych olejów przekładniowych [3].

Tabela. Porównanie granicznych wartości wybranych parametrów oleju przekładniowego według różnych źródeł w literaturze

Lp.	Parametr	Total	Adamenko/ Zelinskaia	Voith	H. Krause	K. Baczewski	ZF	MTU	EIF Disola
1.	Lepkość kinematyczna w 40°C	spadek 20%	-35%; +25%	-40%; +20%	-25%; +35%	-40%; +20%	-15%; +25%	-15%; +10%	-15%; +25%
2.	Lepkość kinematyczna w 100°C	spadek o 20%	-15%; +20%	-	spadek o 20%	-25%; +10%	-	-	-
3.	Zawartość wody (objętość)	poniżej 0,2%	poniżej 0,05%	-	poniżej 0,5%	-	-	poniżej 0,2%	poniżej 0,2%
4.	Koncentracja żelaza	-	-	-	100 ppm	-	maks. 80 ppm	maks. 70 ppm	-
5.	Koncentracja krzemu	-	-	-	maks. 30 ppm	-	maks. 20 ppm	maks. 15 ppm	-

Przekładnie zębate bez wymuszonego systemem smarowania — ze smarowaniem zanurzeniowym — nie są wyposażone w systemy filtrowania oleju [10]. W układach smarowania rozbryzgowego i zanurzeniowego do olejów przekładniowych najczęściej stosowane są magnetyczne separatory cząstek ferromagnetycznych, najczęściej instalowane na korkach spustowych oleju. W przekładniach dużej mocy ze smarowaniem obiegowym stosuje się filtrację oleju filtrami papierowymi lub szczelinowymi. Stosowanie filtracji w obiegowych układach smarowania znacząco obniża koncentrację cząstek stałych w oleju, dotyczy to zarówno pierwiastków metalicznych, jak i niemetalicznych. Przy braku możliwości stosowania filtracji oleju, brak pompy wymuszającej obieg, obniżenie kontaminacji cząstek ferromagnetycznych osiąga się poprzez stosowanie separatorów magnetycznych instalowanych w zbiornikach oleju i misach olejowych. Separatory te nie ograniczają ilości kontaminacji cząstek niemetalicznych i metalicznych niebędących ferromagnetykami.

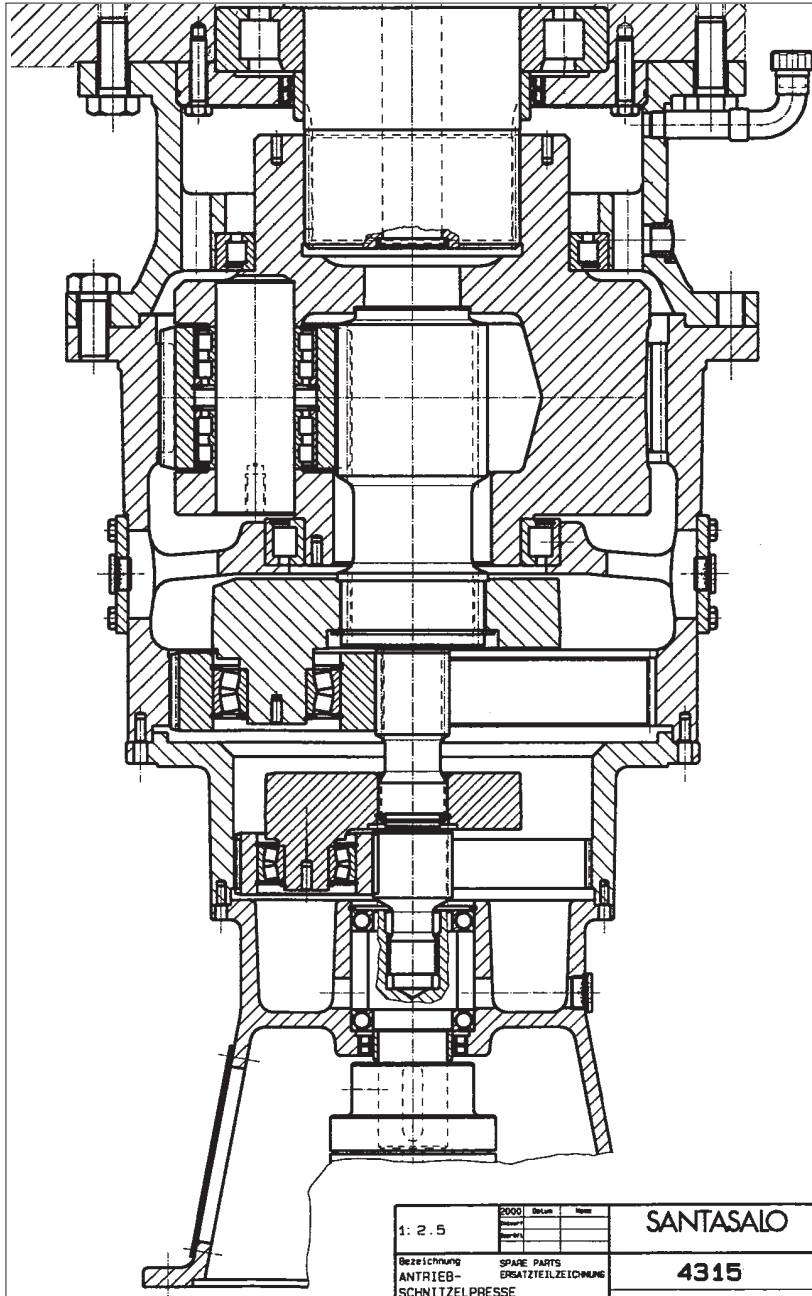
Metodyka badań

Badaniom poddano przekładnie zębate planetarne MOVENTAS typu P30 061N. Moc przenoszona przez pojedynczą przekładnię wynosiła 55 kW. Wszystkie z badanych przekładni wyposażone były w zanurzeniowy system smarowania. Jako środek smarny stosowano oleje przekładniowe polialfaolefinowe (PAO) klasy lepkości ISO VG220, klasie jakości API GL-4, przewyższające wymagania norm DIN 51517 cz. 3.



Rycina 1. Przekładnie planetarne Moventas typu P30 061N

Przekładnie pracowały w sposób ciągły z obciążeniem bliskim obciążeniu maksymalnemu dla danego typoszeregu przekładni.



Rycina 2. Przekładnia planetarna Moventas typu P30 061N — przekrój

Przekładnie nie posiadały systemów filtracyjnych, zastosowano separatory magnetyczne do wychwytywania ferromagnetycznych cząstek stałych niesionych w oleju.

Badania eksploatacyjne polegały na okresowym poborze próbek olejów przekładniowych. Próbki w ilości 220 ml pobierane były co około 168 godzin pracy. Po przekroczeniu wartości wybranych parametrów — koncentracji cząstek stałych: żelaza i krzemu — częstotliwość pobierania próbek zwiększono do okresu 48 godzin. Wówczas wielkość próbki wynosiła 30 ml. W próbkach tych badano zawartość istotnych pierwiastków metalicznych i zmiany ich wartości. W niniejszej pracy podjęto próbę wydłużenia resursu olejów silnikowych na podstawie oceny zmian zawartości istotnych pierwiastków metalicznych.

Objętość próbki tygodniowej podyktowana była badaniem lepkości kinematycznej w 40°C na aparacie Englera — pojemność zbiornika kapilary 200 ml. Koncentracje cząstek stałych badano spektroskopem emisyjnym — wymagana wielkość próbki 10 ml.

Próbki oleju pobierano bezpośrednio z otworu rewizyjnego przekładni za pomocą olejnicy z przewodem elastycznym.

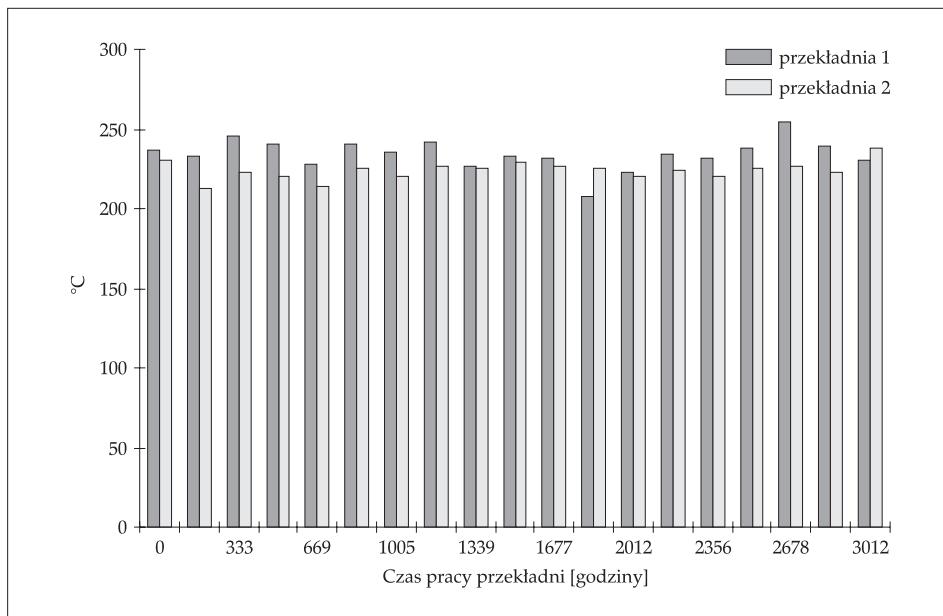
Badaniom pilotażowym podlegały poniższe parametry oleju:

- 20 pierwiastków metodą spektrometrii emisyjnej,
- lepkość kinematyczna w 40°C,
- lepkość kinematyczna w 100°C,
- temperatura zapłonu w tyglu otwartym,
- zawartość wody,
- własności smarne na aparacie 4-kulowym według PN-C-04147 (P_n , P_z , I_n),
- własności smarne na aparacie semi-Timken.

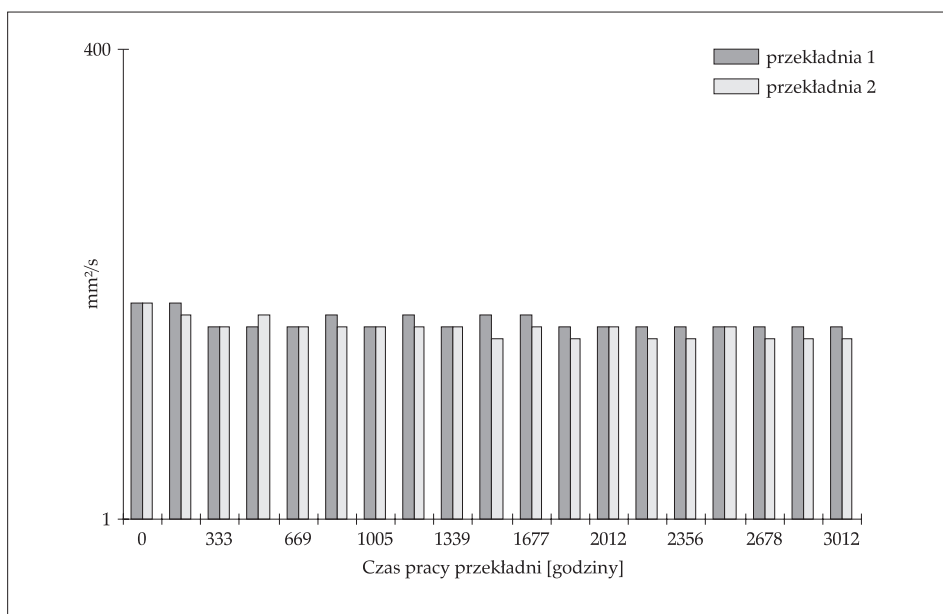
Próbki pobierano systematycznie i na bieżąco dokonywano wyznaczania wartości wybranych parametrów. Badania pilotażowe prowadzono zwiększając rewers oleju o 50%, do 3000 godzin.

Wybrane wyniki badań pilotażowych przedstawiono na rycinach 3 i 4.

Na podstawie wyników badań pilotażowych ograniczono ilość badanych parametrów oleju. W związku z dużą ilością zmiennych dokonano analizy korelacji zachodzących pomiędzy koncentracjami badanych pierwiastków w funkcji przebiegu. Analizę wykonano w programie GRETL metodą KMNK (klasyczna metoda najmniejszych kwadratów). Odrzucono te pierwiastki, których koncentracje nie zmieniały się lub wykazywały niewielką zmienność ocenioną statystycznie.



Rycina 3. Przebieg zmian temperatury zapłonu oleju w przekładniach Moventas P30 061N, nr 1 — ciemnoszary, nr 2 — jasnoszary



Rycina 4. Przebieg zmian lepkości kinematycznej oleju w przekładniach Moventas P30 061N, nr 1 — ciemnoszary, nr 2 — jasnoszary

Podobnie zweryfikowano i przeanalizowano adekwatność doboru własności fizykochemicznych oleju, w efekcie czego wyeliminowano następujące parametry opisujące stan oleju:

1) zawartość wody — wszystkie badane próbki oleju wykazywały zawartość wody poniżej 0,2%,

2) lepkość kinematyczna w 100°C — wykazano silną korelację z lepkością kinematyczną badaną w 40°C, (temperatura pracy oleju w przekładni wahała się w granicach 42–68°C,

3) temperatura zapłonu w tyglu otwartym — nie wykazano istotnej zmienności,

4) własności smarne na aparacie 4-kulowym:

— najwyższe obciążenie niezacierające,

— obciążenie zespawania,

— współczynnik zużycia pod obciążeniem — badania smarności na aparacie 4-kulowym zastąpiono badaniami smarności na aparacie semi-Timken.

Wartości powyższych parametrów nie zmieniały się w cyklu badań lub wykazywały niewielką zmienność. Własności smarne oleju badano wyłącznie na aparacie semi-Timken z uwagi na możliwość dokonywania badań bezpośrednio w miejscu, gdzie eksploatowana jest dana przekładnia, a także ze względu na krótszy czas trwania pojedynczego badania przy dużej powtarzalności otrzymywanych wyników. Do badań olejów w dalszych seriach przyjęto dwa parametry fizykochemiczne, które uznano za istotne oraz koncentracje dwóch pierwiastków:

— lepkość kinematyczna w 40°C,

— własności smarne na aparacie semi-Timken,

— koncentracje cząstek żelaza,

— koncentracje cząstek krzemu.

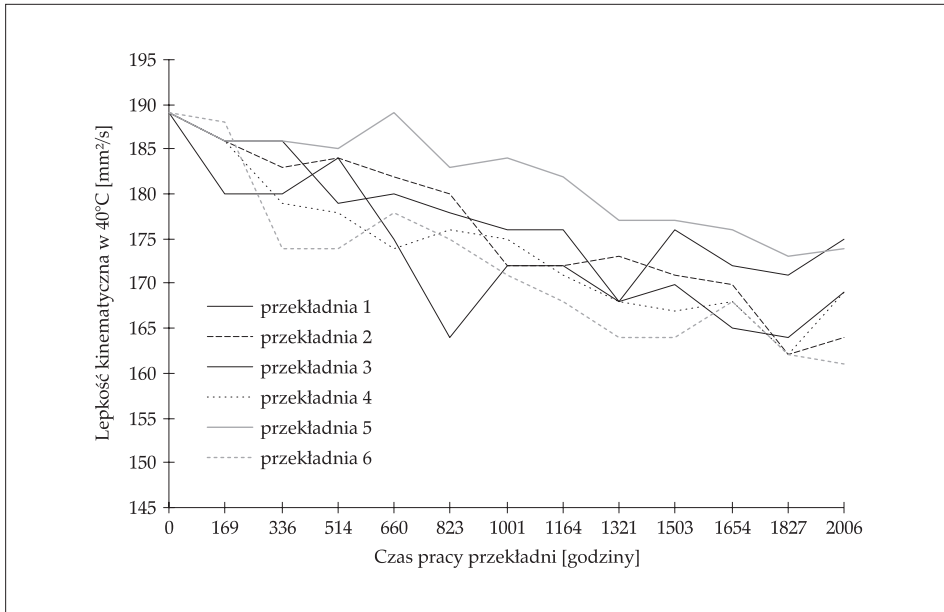
Przyjęte do dalszych badań kontaminacje reprezentują dwie grupy pierwiastków:

— koncentracje cząstek żelaza — produkty zużycia węzłów trybologicznych,

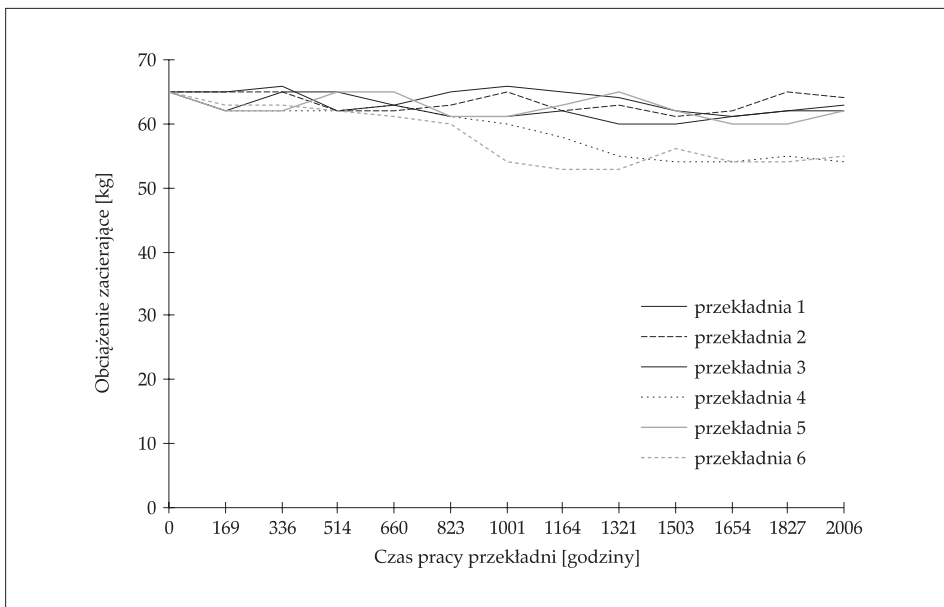
— koncentracje cząstek krzemu — zanieczyszczenia pochodzące z otoczenia przekładni.

Wyniki i analiza badań

W rozpatrywanych systemach transmisji mocy za pośrednictwem przekładni typoszeregu Moventas P30 061N przyjęta została strategia wymiany oleju przekładniowego według potencjału eksploatacyjnego — resursu. Resurs oleju ustalono na 2000 godzin pracy przekładni. Wyniki badań zmian własności



Rycina 5. Przebieg zmian lepkości kinematycznej oleju w przekładniach nr 1 do 6

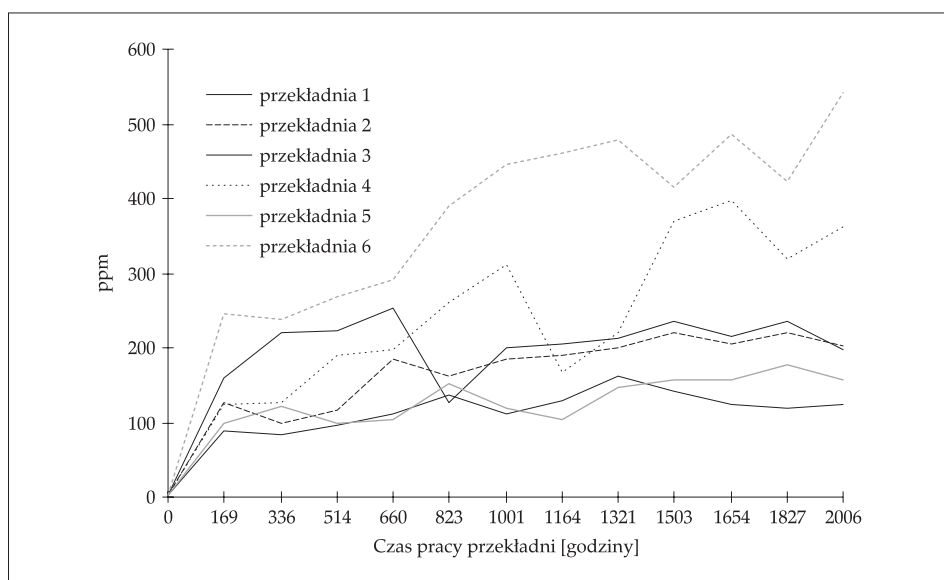


Rycina 6. Przebieg zmian smarności oleju w przekładniach nr 1 do 6

fizykochemicznych oraz zmian koncentracji produktów zużywania się węzłów trybologicznych i cząstek stałych pochodzących z otoczenia przekładni w celu lepszego zobrazowania zmian zostały przedstawione w formie wykresów.

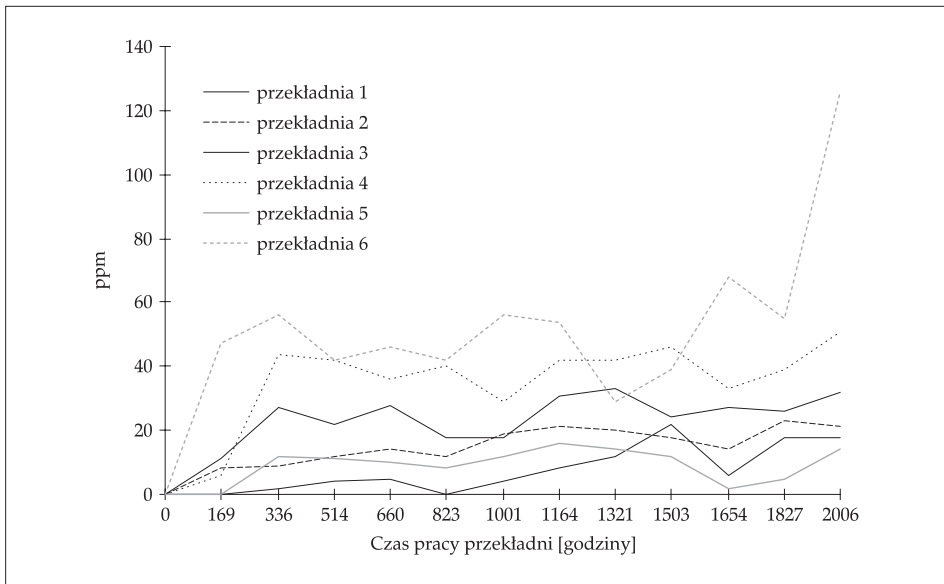
Rycina 5 obrazuje zmiany lepkości badanych olejów w zależności od czasu pracy przekładni. Zaobserwować można, że wyjściowa wartość lepkości w żadnym wypadku nie spełniła deklarowanych przez producenta wartości 220 mm²/s, co może świadczyć o niskiej jakości dodatków odpowiedzialnych za lepkość kinematyczną oleju. Wraz z przebiegiem czasu eksploatacji lepkość ulegała obniżeniu z wyjściowych 189 mm/s² do poziomu 161 mm/s², co daje spadek o około 15%. Zaobserwowano stopniowe stabilizowanie się tego parametru po czasie pracy około 1000 godzin.

Z ryciny 6 wynika, że w przypadku czterech przekładni parametr smarności pozostawał na niezmiennym poziomie, natomiast smarność oleju w dwóch przekładniach uległa pogorszeniu. Spadek smarności oleju w przekładniach 4 oraz 6 wyniósł około 17%.



Rycina 7. Przebieg zmian koncentracji cząstek żelaza w oleju w przekładniach nr 1 do 6

Na rycinach 7 i 8 przedstawiono zależność pomiędzy koncentracją pierwiastków w badanych olejach a ich czasem pracy od wymiany. Zaobserwować można wyraźną rozbieżność zmienności tych parametrów pomiędzy poszczególnymi przekładniami wynikającą najprawdopodobniej z różnicy potencjałów eksploatacyjnych i stanu technicznego przekładni. Należy nadmienić, iż w przypadku nagłego wzrostu koncentracji któregoś z pierwiastków



Rycina 8. Przebieg zmian koncentracji cząstek krzemu w oleju w przekładniach nr 1 do 6

mamy do czynienia z wyraźnym sygnałem diagnostycznym, a nośnikiem tego sygnału jest olej przekładniowy.

W badanych próbkach w przypadku dwóch przekładni oznaczonych jako 4 oraz 6 stwierdzono nagłą zmianę koncentracji żelaza i zwiększenie szybkości jej narastania, co świadczyć może o zjawisku przyspieszonego zużycia się węzłów trybologicznych na skutek występujących stanów niezdatności.

W przypadku monitorowania zmian koncentracji krzemu zaobserwowano podwyższoną zawartość tego pierwiastka w przekładniach oznaczonych jako 4 oraz 6. Ponadto w przypadku przekładni 6 pod koniec resursu ilość cząstek krzemu lawinowo wzrosła. Świadczyć to może o nieszczelności przekładni przy jednoczesnym znaczącym zanieczyszczeniu jej otoczenia.

Podsumowanie

Proces monitorowania wybranych parametrów olejów przekładniowych, stosowanych w przekładniach zębatych planetarnych, umożliwił sformułowanie wniosków dotyczących podniesienia poziomu bezpieczeństwa eksploatacji, trwałości i niezawodności przekładni zębatych. Zmiany wartości wybranych parametrów olejów przekładniowych mogą być traktowane jako sygnał diagno-

styczny informujący o stanie jakościowym przekładni i o warunkach jej otoczenia.

Zaobserwowano związek pomiędzy zmianami własności fizykochemicznych badanych olejów oraz narastaniem w nich procesu kontaminacji. Stwierdzono, iż monitorowanie koncentracji produktów zużywania się elementów przekładni (kół zębatach i łożysk) w olejach oferuje możliwość oceny zachodzących procesów niszczących. Zauważono, że produkty zużycia węzłów tribologicznych oraz zanieczyszczenia pochodzące z otoczenia przekładni gromadzą się w oleju smarowym i są nośnikiem informacji diagnostycznej. Systematyczne sprawdzanie wartości najważniejszych parametrów świadczących o ich zdolności może umożliwić wyznaczenie stanów granicznych, przy których olej przestaje spełniać m.in. funkcję smarowania w przekładni zębatej. Na podstawie obserwowanych zmian własności fizykochemicznych i szybkości narastania kontaminacji można podejmować racjonalne decyzje, dotyczące przedłużania okresów między wymianami oleju przekładniowego, co w sposób znaczący może przyczynić się do obniżenia kosztów eksploatacji obiektów technicznych, jakimi są przekładnie zębate w rozpatrywanym systemie transmisji mocy.

W badanej grupie przekładni zaobserwowano zróżnicowanie w szybkości narastania kontaminacji. W olejach dwóch przekładni dostrzeżono dodatkowo skorelowany wzrost zawartości cząstek krzemu i cząstek żelaza. Związki krzemu niesione w oleju mogą powodować zużycie ściernie generując narastanie cząstek metalicznych w oleju. Zwiększona ilość cząstek stałych stanowi niebezpieczeństwo przedwczesnego zużycia elementów przekładni.

W przypadku eksploataowania przekładni w otoczeniu o dużym zanieczyszczeniu (zapylenie) należy stosować skuteczne metody uszczelnień. Niezależnie od warunków zewnętrznych zaleca się stosowanie filtracji w obiegowych systemach smarowania przekładni zębatach. Wychwytywanie cząstek ferromagnetycznych niesionych w oleju za pomocą separatorów magnetycznych jest mało skuteczne przy szybkim narastaniu ich ilości, co ma miejsce w przypadku przedostania się do przekładni twardych zanieczyszczeń niemetalicznych (karborund, tlenek krzemu).

Wyniki badań przedstawione w opracowaniu mogą stanowić istotny czynnik w podejmowaniu decyzji dotyczących procesów zapewnienia zdolności obiektów technicznych, jakimi są przekładnie zębate.

Streszczenie

Niniejsze opracowanie dotyczy oceny i analizy wyników jakościowych badań eksploatacyjnych olejów przekładniowych a w szczególności wyników badań szybkości narastania kontaminacji wybranych pierwiastków metalicznych w badanych olejach. Na podstawie wyników badań eksploatacyjnych wyznaczono zawartości pierwiastków metalicznych w badanych olejach przekładniowych w zależności od czasu pracy przekładni. Na podstawie analizy literatury przedmiotu i badań własnych stwierdzono, że dla systemów smarowania przekładni, brakuje wygodnych

i wiarygodnych metod oceny stanów granicznych olejów przekładniowych. W niniejszej pracy podjęto próbę monitorowania olejów przekładniowych na podstawie oceny zmian zawartości istotnych pierwiastków metalicznych oraz zmian wartości parametrów fizykochemicznych.

Summary

The paper presents the results of investigations and analyses the results of performance tests and quality of performance gear oils studies slew rate of contamination of selected metallic elements in the studied oils. Based on the results of field tests determined on the content of metallic elements in the test gear oils depending on the time of the gear unit. Based on the analysis of literature and own studies found for the gear lubrication systems, the lack of convenient and reliable methods of assessing the limit states gear oils. This paper is an attempt to monitor the gear oils on the basis of changes in the content of essential metallic elements and changes in the physico-chemical parameters.

Literatura

1. Baczewski K., *Zanieczyszczenia płynów eksploatacyjnych*, „Paliwa, Oleje i Smary w Eksploatacji” 1997, nr 33.
2. Białka Z., Kędzierski K., *Pobieranie próbek produktów naftowych*, „Paliwa, Oleje i Smary w Eksploatacji” 1998, nr 53, s. 23–25.
3. Grądkowski M., Szczerek M., *Diagnostyka stanów oleju eksploatowanego*, w: *Współczesne problemy klasyfikacji, certyfikacji i eksploatacji olejów silnikowych*, Konferencja MTP „MOTORYZACJA'98”, Poznań 1998.
4. Hebda M., Wachal A., *Trybologia*, Warszawa 1980.
5. Laber S., Laber A., Cedro K., *Badania w zakresie nowej technologii wymiany oleju w silnikach spalinowych*, „Problemy Maszyn Roboczych” 2000, z. 15.
6. Muślewski Ł., *Podstawy efektywności działania systemów*, Radom–Bydgoszcz 2010.
7. Szczerek M., Tuszyński W., *Badania tribologiczne. Zacieranie*, Radom 2000.
8. Tuszyński W., Kalbarczyk M., Michalak M., *Badanie wpływu samochodowych i przemysłowych olejów przekładniowych na mikropitting kół zębatych*, Radom 2011.
9. Hoehn B.-R., Oster P., Tobie T., Michaelis K., *Test Methods for Gear Lubricants*, „Goriva i Maziva” 2008, nr 2 (47), s. 129–152.
10. *Nadzór nad stanem maszyny i oleju*, w: *Przemysłowe środki smarne. Poradnik*, Warszawa 2003.
11. Lewitowicz J., Zboiński M., *Monitorowanie kontaminacji w procesie eksploatacji układów hydraulicznych statków powietrznych*, XIV Konferencja Naukowa *Problemy Rozwoju Maszyn Roboczych*, Zakopane 2001.
12. Lindstedt P., *Stabe interakcje w procesie diagnozowania wycieków z układów hydraulicznych*, „Prace Naukowe ITWL” 2000, z. 10, Warszawa.
13. Borowczyk H., Zboiński M., *Analiza wybranych modeli kontaminacji cieczy roboczej układu hydraulicznego*, „Prace Naukowe ITWL” 2000, z. 11, Warszawa.
14. Zboiński M., *Badania struktury jakościowej i ilościowej zanieczyszczeń w układach hydraulicznych i ich wpływu na trwałość podstawowych zespołów*, Warszawa 2007.

Grzegorz Śmigielski

(Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy)

LINIA OPÓŹNIAJĄCA IMPLEMENTOWANA W UKŁADZIE FPGA

Słowa kluczowe: linia opóźniająca; układy programowalne; FPGA; systemy pomiarowe

DELAY LINE IMPLEMENTED IN AN FPGA DEVICE

Key words: delay line; programmable devices; FPGA; measurement systems

Wstęp

Linia opóźniająca jest układem, który umożliwia opóźnienie elektrycznego sygnału wejściowego o ściśle określoną wartość jednostki czasu. Sygnał wejściowy może być analogowy — linie tego typu są bardzo popularne chociażby w technice akustycznej — lub cyfrowy. Linie, w których opóźniany jest sygnał cyfrowy, są powszechnie stosowane w sprzęcie pomiarowym (np. oscyloskopach).

Realizacja opóźnienia w liniach opóźniających jest możliwa dzięki propagacji sygnału poprzez elementy analogowe lub logiczne — cyfrowe. Obecnie linie opóźniające tworzone są głównie z elementów cyfrowych, nawet w przypadku przesyłania sygnału analogowego. Taki stan rzeczy spowodowany jest niską ceną układów cyfrowych oraz większymi możliwościami, które ze sobą niosą. Przykładowo opóźnienie sygnału akustycznego można zrealizować poprzez przetworzenie go na postać cyfrową za pomocą przetwornika A/C, zapamiętanie go w pamięci cyfrowej, a następnie przetworzenie z powrotem na postać analogową przez przetwornik C/A po zadany czasie opóźnienia. Wartość tego czasu może być w zasadzie dowolna w przeciwieństwie do układów analogowych, w których opóźnienie jest ściśle zależne od ilości elementów, z których składa się tor opóźniający.

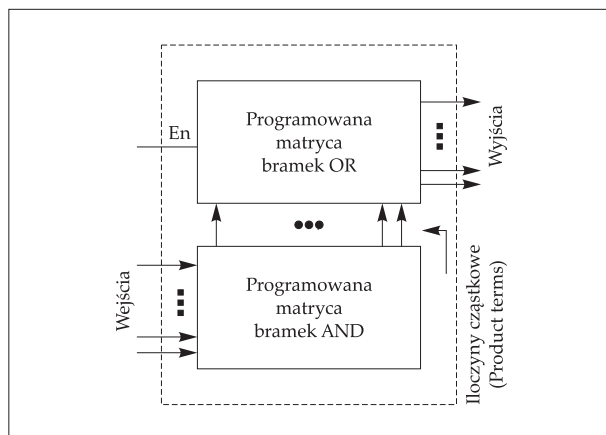
Niniejszy artykuł skupia się na linii opóźniającej zbudowanej z elementów logicznych układu programowalnego i stosowanej do opóźnienia sygnałów cyfrowych.

Układy programowalne

Programowalne układy logiczne (PLD) są specjalnymi układami cyfrowymi, które posiadają strukturę umożliwiającą zmianę (najczęściej wielokrotną) połączeń wewnątrz samego układu. Standardowe układy cyfrowe posiadają strukturę z góry określoną przez producenta i użytkownik nie ma możliwości jej modyfikacji. Układy programowalne można podzielić na dwie kategorie [1]:

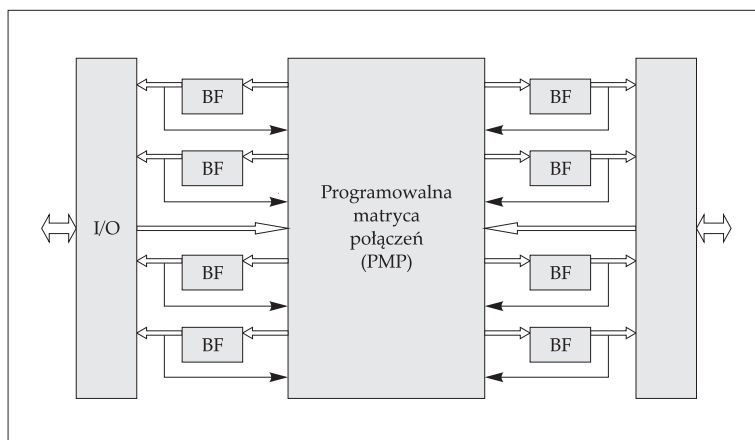
— programowalne struktury logiczne (PLD — *Programmable Logic Device*)
i złożone programowalne struktury logiczne (CPLD — *Complex PLD*),

— programowalne matryce bramkowe (FPGA — *Programmable Gate Array*).
Najtańszymi i najprostszymi układami programowalnymi są układy PLD (GAL, PAL, PLA) — ryc. 1. Ich podstawowy element konstrukcyjny stanowi programowalna matryca AND lub/i OR i zespoły elementów wyjściowych, które w najprostszymi przypadkach ograniczają się do przerzutników i trójstanowych buforów wyjściowych, a w bardziej rozbudowanych obejmują dodatkowo multipleksery oraz bramki XOR.



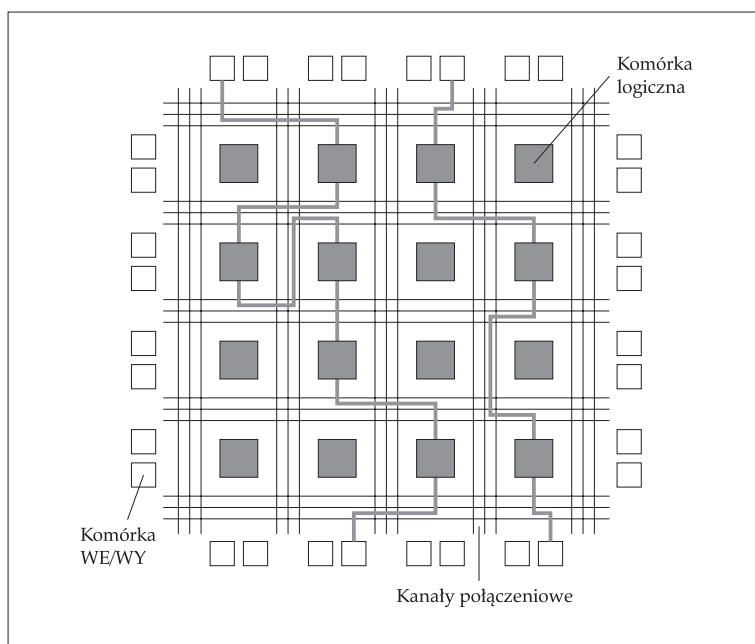
Rycina 1. Struktura blokowa prostego układu PLA [1]

W układach CPLD (ryc. 2) można wyróżnić pewną liczbę bloków funkcjonalnych BF, w skład których wchodzi programowalna matryca bramek AND i nieprogramowalna matryca bramek OR. Bloki funkcjonalne połączone są za pośrednictwem programowalnej matrycy połączeń PMP. Matryca ta ma zazwyczaj postać zespołu multiplekserów, których celem jest skierowanie sygnałów wejściowych na określone programowo wyjścia.



Rycina 2. Struktura układu CPLD [1]

Układ typu FPGA (ryc. 3) tworzy matryca komórek logicznych, które komunikują się między sobą i z zaciskami zewnętrznymi poprzez poziome i pionowe linie (przewody) poprowadzone w kanałach połączeniowych. Budowa komórki logicznej oraz struktura połączeń jest zależna od typu układu i producenta, jednak najczęściej zawiera takie elementy jak multiplexery, bramki XOR, przerzutniki oraz tablice LUT (*Look Up Tables*) [2].

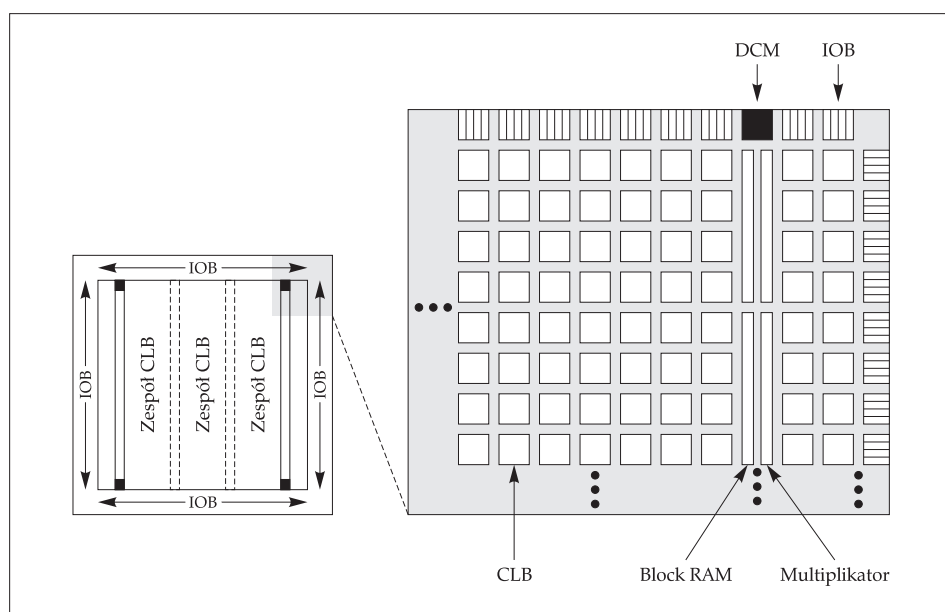


Rycina 3. Struktura układu FPGA [1]

Wykonanie połączeń między poszczególnymi elementami układów programowalnych jest możliwe poprzez „przepalenie bezpieczników” (FUSE, anti-FUSE) lub zaprogramowanie komórek pamięci ulotnych bądź nieulotnych (EEPROM, EPROM, SRAM). Mapa połączeń jest tworzona w programie komputerowego wspomaganie projektowania najczęściej na podstawie schematu ideowego lub opisu układu w specjalnym języku opisu sprzętu (VHDL, Verilog).

Realizacja linii opóźniającej

Projekt przykładowej linii opóźniającej został zrealizowany z wykorzystaniem zestawu prototypowego Spartan 3E Starter. Jest ona wyposażona w układ FPGA z rodziny SPARTAN 3: XC3S500E-4FG320C posiadający 10476 komórek ekwiwalentnych [3].



Rycina 4. Architektura układu Spartan 3 [4]

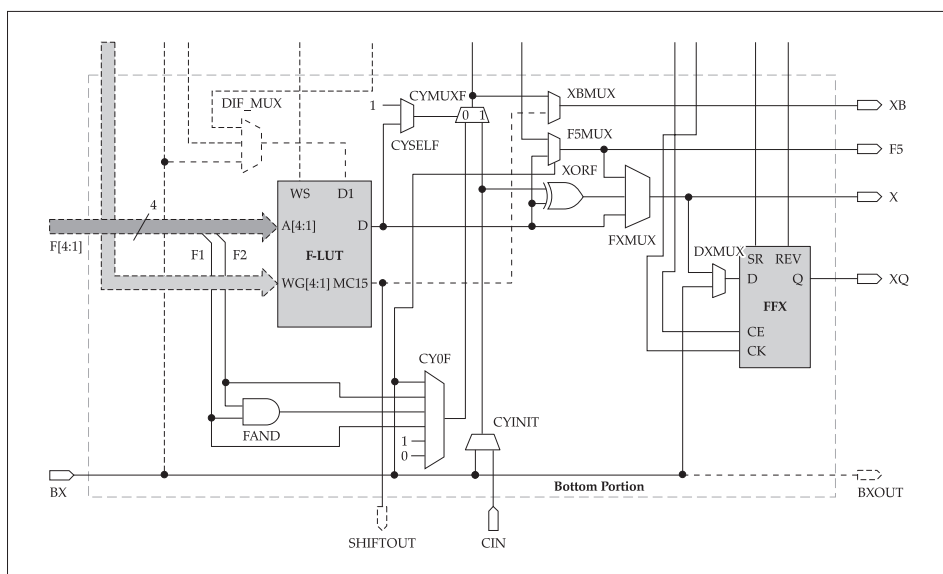
Architektura układu Spartan (ryc. 4.) składa się z dwóch podstawowych elementów tj. bloków logicznych (*Configurable Logic Blocks* — CLB) oraz bloków wejściowo-wyjściowych (*Input/Output Blocks* — IOB). Funkcje logiczne są realizowane w blokach CLB; każdy blok składa się z czterech elementów SLICE, z których każdy zawiera dwie tablice LUT, dwa przerzutniki typu D, układy

przeniesień logicznych, multipleksery oraz bramki. Bloki IOB pełnią funkcję interfejsu pomiędzy wyprowadzeniami zewnętrznymi układu a blokami CLB. Połączenia pomiędzy blokami CLB są realizowane poprzez główną matrycę połączeń (*General Routing Matrix* — GRM). Dodatkowo układy posiadają bloki pamięci RAM (Block RAM), bloki mnożące (Multiplier) oraz bloki korekcji i zarządzania zegarem (DCM — *Digital Clock Manager*). Regularna struktura układu FPGA sprzyja implementacji linii opóźniającej.

Do realizacji projektu został wykorzystany pakiet Xilinx ISE 14.2 w wersji edukacyjnej. Projekt linii opóźniającej został wykonany na poziomie struktury układu przy pomocy programu FPGA Editor, natomiast układy wyboru wartości opóźnienia linii i dzielenia częstotliwości sygnału wejściowego zostały opisane w języku VHDL.

Zgodnie z ideą przedstawioną we wstępie opóźnienie sygnału cyfrowego można uzyskać, kierując go przez odpowiednią ilość elementów logicznych. W zrealizowanym układzie sygnał wejściowy został doprowadzony do dwóch wejść — BX oraz F1, a następnie do wejść multipleksera CYMUXF (należącego do komórki logicznej).

Wyjście multipleksera zostało połączone z wyjściem XB. Wejście sterujące multiplekserem połączone z wejściem F4 poprzez tablicę LUT. W przypadku doprowadzenia zera logicznego do wejścia sterującego F4 multiplekser CYMUXF łączy wejście F1 z wyjściem XB, natomiast w przypadku doprowadzenia jedynki logicznej — wejście BX z wyjściem XB. Czas propagacji sygnału doprowadzonego do multipleksera przez wejście F1 jest krótszy niż



Rycina 5. Fragment bloku CLB [3]

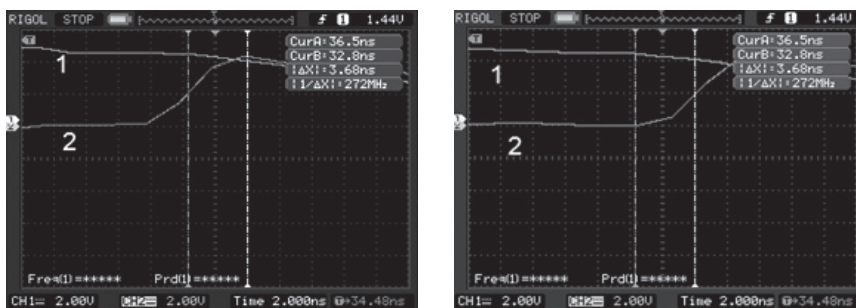
w przypadku doprowadzenia go przez wejście BX, dzięki czemu uzyskiwana jest różnica czasów, która wyznacza rozdzielczość czasową linii opóźniającej.

Łącząc wyjście XB z wejściami F1 i BX SLICE'a kolejnego konfigurowalnego bloku logicznego (CLB), można uzyskać wielosegmentową linię opóźniającą. Maksymalna liczba elementów opóźniających będzie zależna od zastosowanego układu.

W ramach testowego projektu połączono 31 elementów SLICE leżących w pionie (od SLICE_X0Y0 do SLICE_X0Y60). Ze względu na powtarzającą się strukturę połączeń został przygotowany skrypt wykonujący połączenia poszczególnych elementów. Implementacja projektu przebiegła następująco: najpierw w strukturze układu programowalnego został umieszczony moduł wyboru wartości opóźnienia i zmiennego dzielnika częstotliwości. Następnie w programie FPGA Editor został uruchomiony skrypt łączący kolejne elementy SLICE oraz wyjścia układu sterującego z wejściami sterującymi linii opóźniającej (F4).

Pomiary

Sprawdzenia działania linii opóźniającej dokonano za pomocą oscyloskopu Rigol 1102D. Wykonano pomiary czasów opóźnień sygnału wejściowego, którego źródłem był oscylator kwarcowy o częstotliwości 50 MHz znajdujący się na płytce prototypowej. Częstotliwość sygnału zegarowego została podzielona programowalnym dzielnikiem częstotliwości zaimplementowanym w strukturze. Na rycinie 6 przedstawiono fragmenty przebiegów sygnałów: 1 — referencyjnego i 2 — po przejściu przez linię opóźniającą dla sygnału o częstotliwości 25 MHz.



Rycina 6. Przebieg sygnału po przejściu przez linię opóźniającą — 2, względem sygnału referencyjnego — 1 (po lewej — bez opóźnienia, po prawej — z maksymalnym opóźnieniem 31 segmentów)

Z przeprowadzonych pomiarów wynika, iż całkowite opóźnienie wynosi 3,68 ns (ryc. 6), a rozdzielczość czasowa linii, czyli jednostkowe opóźnienie wynosi około 118 ps. Idea realizacji linii opóźniającej jest więc jak najbardziej poprawna, a parametry można poprawić korzystając z lepszych (droższych) układów. Aby zrealizować opóźnienia całkowite o większych wartościach, należy użyć większej ilości zasobów układu programowalnego.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono projekt prostej 31-segmentowej linii opóźniającej zrealizowanej w stosunkowo tanim układzie FPGA zestawu dydaktycznego Spartan 3E Starter. Uzyskana wartość jednostkowego opóźnienia około 100 ps jest zadowalająca. Niewątpliwą zaletą implementacji linii opóźniającej w układzie programowalnym jest możliwość realizacji w nim całego systemu pomiarowego, którego linia opóźniająca jest tylko częścią. Potencjalne zastosowanie linii opóźniających to oscyloskopy, generatory arbitralne, wysokostabilne źródła czasu, zegary wielofazowe oraz sprzęt pomiarowy dedykowany do specjalistycznych zastosowań [5].

Streszczenie

W artykule został przedstawiony przykład linii opóźniającej zrealizowanej w układzie FPGA. Zaletą takiego rozwiązania jest możliwość zmiany czasu opóźnienia podczas działania układu oraz to, że linia opóźniająca może być częścią większego systemu pomiarowego zaimplementowanego w strukturze programowalnej. Projekt linii został zrealizowany z wykorzystaniem płytki prototypowej Spartan 3E Starter, wyposażonej w układ XC3S500E.

Summary

The article presents example of delay-line implemented in an FPGA structure. The advantage of such solution is the possibility of changing of delay during the system of work. Besides the delay-line can be a part of complex measurement system implemented in an programmable structure. The project was realized using evaluation board Spartan 3E Starter featuring XC3S500E device.

Literatura

1. Kalisz J., *Podstawy techniki cyfrowej*, Warszawa 2007, s. 492.
2. Pawłowski M., Skorupski A., *Projektowanie złożonych układów cyfrowych*, Warszawa 2010, s. 248.
3. DS312 Spartan-3E FPGA Family Data Sheet July 19, 2013. [dostęp: 10.06.2017] https://www.xilinx.com/support/documentation/data_sheets/ds312.pdf

4. Majewski J., Zbysiński P., *Układy FPGA w przykładach*, Legionowo 2007, s. 224.
5. Zieliński M., *Wybrane aspekty pomiaru funkcji intensywności procesów niestacjonarnych w zakresie nano i pikosekundowych rozdzielczości systemu pomiarowego*, Toruń 2000, s. 116.

Krzysztof Wierzcholski

(Kujawska Szkoła Wyższa we Włocławku)

BIO-HYDRO-ELEKTRO-MAGNETO-DYNAMIKA MAZI STAWOWEJ I POTU TRENINGOWEGO W PROCESIE PRZEMIANY MATERII

Słowa kluczowe: hydrodynamiczne smarowanie stawów; smarowanie skóry człowieka potem; bieganie; efekt BMI; efekt BMR — przemiany materii; utrata nadwagi

BIO- HYDRO- ELECTRO- MAGNETO- DYNAMICS OF SYNOVIAL FLUID AND TRAINED SWEAT IN BASAL METABOLIC RATE PROCESS

Key words: human joint hydrodynamic lubrication; skin-sweat lubrication; running; BMI effect; Basal Metabolic Rate — effect; slimming process

Wprowadzenie

Tematem niniejszej pracy jest nowa idea poprawy przemiany materii wraz z obniżeniem wieku metabolicznego sportowca. Pomysł ten jest realizowany przez hydrodynamiczne smarowanie chrząstek stawowych z dwuwarstewką fosfolipidów występujących w połączeniach stawowych narządów ruchu z korpusem całego ciała. Smarowanie jest dawkowane pulsującym polem elektromagnetycznym oraz aplikowane treningiem biegu i chodu [1–3]. Wykazuje się tezę o doskonaleniu terapii zwiększającej przemianę materii wraz z energią spalania cellulitu poprzez pulsujące elektromagnetyczne smarowanie połączone z treningiem biegu i chodu. Doskonalenie metod treningu podczas pulsującej elektromagnetycznej terapii sportowca w dyscyplinie biegania i gimnastyki dostosowanej dla właściwych częstotliwości i indukcji oraz kształtów linii sił pola oraz czasu zabiegu wskazuje na możliwość uzyskania optymalnych rezultatów [4, 5].

Dodatkowo przedstawione zostaną fragmenty badań naukowych autora wykazujące, że znaczne efekty spalania tkanki tłuszczowej i znaczne obniżenie wskaźnika BMI oraz poprawę indeksu przemiany materii wraz z różnicą pomiędzy całkowitą dzienną skonsumowaną ilością kalorii a ilością kalorii spalonych

osiąga się, korzystając podczas treningu z ciasnych, dobrze dopasowanych do ciała ubrań treningowych. Na szczególną uwagę zasługuje dyscyplina biegania lub gimnastyki wspomaganej polem elektromagnetycznym [6, 7]. Pomiedzy dobrze dopasowanym do ciała ubraniem treningowym a powierzchnią skóry znajduje się cienka ruchoma szczelina, w której prędzej czy później pojawia się przynajmniej kilkudziesięciomikrometrowa warstewka potu. Preferuje się tu legginsy i body lub rajtuzy elastyczne bez stopy (damskie, męskie firmy Brubech do nabycia w Inter Sport).

Właściwie opisane warunki brzegowe przepływu potu smarującego ciało w niestacjonarnej szczelinie wraz z wnikaniami potu do warstwy porowatej mikrofibry rajtuz oraz ruchoma powierzchnia mikrofibry w trakcie treningu i ruchoma powierzchnia skóry na skutek wysiłku umożliwiają prawidłowe wyznaczenie rozkładu ciśnienia hydrodynamicznego i sił tarcia. Siła nośna wywołana ciśnieniem hydrodynamicznym zmniejsza naprężenia na powierzchni ciała powodowane ruchem postępowym i obrotowym kończyn górnych i dolnych oraz ruchem całego korpusu, natomiast styczne do skóry siły tarcia w szczelinie umożliwiają jej w miarę równomierne rozłożenie się na całej powierzchni ciała w elastycznym stroju gimnastycznym. Ten fakt zapewnia poczucie lekkości i swobody, eliminując zmęczenie, a jednocześnie równomierny nacisk na ciało przyczynia się do szybszego spalania tkanki tłuszczowej w podobny sposób jak w przypadku masażu odchudzającego, dzięki czemu uzyskujemy obniżenie wagi ciała, prawidłowe BMI oraz obniżenie wieku metabolicznego.

Niniejsza praca podaje orientacyjne wyniki pomiaru ilości kroków, dystansu w kilometrach, ilości spalonych kalorii, masy ciała, wskaźnika BMI. Ponadto przedstawiony został model obliczeniowy niestacjonarnego hydrodynamicznego smarowania ruchomej powierzchni skóry cienką warstewką potu ograniczonego cienką, porowatą powierzchnią stroju sportowego.

W badaniach eksperymentalnych wykorzystuje się następujące przyrządy i materiały: PEMF Magcell-Arthro przyrząd elektroniczny do zabiegów chrząstki stawowej. Analizator Tanita BC480 MA do pomiaru składu ciała, krokomierz Garmin Ltd. 2015, doświadczenie autora zdobyte w niemieckich instytucjach badawczych, a także wywiady lekarskie od pacjentów i studentów.

Metabolizm i wiek metaboliczny

Metabolizm czyli przemiana materii określona indeksem BMR (*Basal Metabolic Rate*) lub PPM (podstawa przemiany materii) jest to całokształt przemian chemicznych, energetycznych zachodzących w organizmie żywym. Są to procesy

syntezy (anabolizmu) oraz procesy rozpadu (katabolizmu) energii dostarczanej do czynności życiowych [8–10].

Wskaźnik BMR określa minimalny i niezbędny poziom energii (kcal), jakiej potrzebuje organizm do utrzymania podstawowych czynności życiowych w czasie spoczynku (oddychanie, trawienie, utrzymanie temperatury ciała itp.). Organizm powinien nagromadzić taką ilość energii, aby po odjęciu energii spalanej podczas aktywności fizycznej pozostała niezbędna wartość energii wyrażonej indeksem BMR obliczanym dla każdego indywidualnie. Jeśli tej energii zabraknie, organizm spala odpowiednio taką ilość tłuszczów, aby zagwarantować sobie swoje BMR. Wtedy człowiek chudnie. Niska przemiana materii (niski indeks BMR) utrudnia utratę tkanki tłuszczowej. Wyższy poziom BMR powoduje zwiększenie zapotrzebowania na kalorie [11–19].

Stan równowagi metabolicznej i stan zachwiania równowagi metabolicznej identyfikowany z procesem utraty i wzrostu masy ciała opisują następujące nierówności:

$$\text{równowaga metaboliczna: } BMR = \Delta Q = \Sigma Q - BQ \quad (1),$$

$$\text{utrata masy ciała: } BMR > \Delta Q = \Sigma Q - BQ \quad (2),$$

$$\text{wzrost masy ciała: } BMR < \Delta Q = \Sigma Q - BQ \quad (3).$$

Przedstawimy teraz uproszczoną metodę wyznaczania indeksu BMR w przypadku równowagi metabolicznej. Krokometrze typu GARMIN dokonują elektronicznego pomiaru dobowego pozyskania całkowitej energii ΣQ jako energii niezbędnej do pełnienia podstawowych funkcji życiowych wraz z spalaniem energii podczas aktywności w ciągu doby dla konkretnej osoby. Odejmując od tak opisanej sumy dobową wartość pomierzonej energii spalanej BQ (*Activities Burn Energy*), uzyskamy BMR według wzoru (1). Jest to więc całkowita dzienna energia pobrana w kcal minus energia spalona w kcal [19–23].

M.D. Mifflin oraz S.T.St. Jeor podali następujący wzór na wyznaczanie przybliżonej wartości indeksu BMR [24–27]:

$$BMR = \left(\frac{10,0 \cdot M_a}{1 \text{ kg}} + \frac{6,25 \cdot H_s}{1 \text{ cm}} - \frac{5,0 \cdot A_y}{1 \text{ rok}} + \Delta \right) \frac{\text{kcal}}{\text{dzień}} \quad (4),$$

gdzie: M_a — masa całego ciała w kg,

H_s — wzrost w centymetrach,

A_y — wiek w pełnych latach.

Dla mężczyzn przyjmujemy $D = +5$, dla kobiet $D = -161$.

Na metabolizm wpływ mają głównie następujące wskaźniki [11–19]:

- 1) *BMI (Body Mass Index)* — stosunek wagi ciała do kwadratu wzrostu.
- 2) Procentowa zawartość tłuszczów w całym organizmie.
- 3) Procentowa zawartość tłuszczów wisceralnych (trzewnych).
- 4) Procentowa zawartość wody w całym organizmie.
- 5) Procentowa zawartość kości i mięśni.

Indeks *BMI* = masa ciała w kg dzielona przez wzrost w m do kwadratu. Wartości wskaźnika w zależności od masy ciała i wzrostu opisuje tabela.

Tabela 1. Zakresy wartości *BMI* dla niedowagi, wagi zdrowej, nadwagi, stopni otyłości

Klasyfikacja		BMI (kg/m ²)
Underweight	Niedowaga	<18,5
Optimum weight	Waga zdrowa	18,5–24,9
Overweight first step	Nadwaga 1 st.	25,0–26,9
Overweight 2-nd step	Nadwaga 2 st.	27,0–29,9
Obesity first step	Otyłość 1 st.	30,0–34,9
Obesity second step	Otyłość 2 st.	35,0–39,9
Obesity third step	Otyłość 3 st.	40,0–49,9
Overobesity	Otyłość skrajna	>50,0

Wiek metaboliczny to obraz tego, ile organizm ma lat oraz czy jego kondycja jest dobra czy wręcz odwrotnie — słaba. Wiek metaboliczny wskazuje wiek charakterystyczny dla indywidualnego tempa metabolizmu. Wskazuje też średni wiek związany z typem przemiany materii. Jeśli wiek metaboliczny jest

wyższy od wieku rzeczywistego, to oznacza, że należy zwiększyć tempo przemiany materii poprzez aktywność fizyczną, spalanie tkanki tłuszczowej itp.

Segmentowy analizator składu ciała produkcji japońskiej Tanita BC480 MA wskazany na ryc. 1 dokonuje w czasie 20 sekund pomiaru usytuowania tkanki tłuszczowej i masy mięśni, wody zewnątrz i wewnątrz komórkowej, wskaźnika tkanki wisceralnej i w końcu odczytu wieku metabolicznego. Technologia ta wykorzystuje się najnowsze światowe osiągnięcia z dziedziny bioimpedancji elektrycznej [24–27].



Rycina 1. Segmentowy analizator składu ciała Tanita BC480MA

Analizator SBCA, BC-418 MA wskazany na ryc. 1 składa się z 5 części a mianowicie: kadłuba (słupiec), lewego ramienia, prawego ramienia, łoża lewej stopy i łoża prawej stopy.

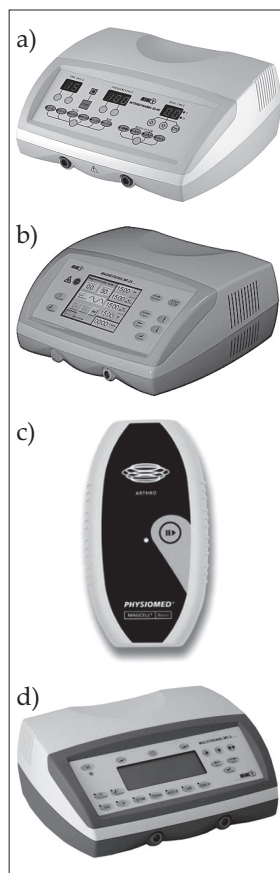
Pole elektromagnetyczne

Przedstawimy teraz różnego rodzaju aparaty wytwarzające pole elektromagnetyczne dla potrzeb treningu sportowego [24–27]. Ryc. 2a ilustruje aparat MF-8 do emitowania pola indukcji magnetycznej. Opracowano dla niego specjalne aplikatory do terapii okolic głowy oraz małych powierzchni ciała. Niewielka masa aparatu umożliwi przenoszenie go w dowolne miejsce w trakcie terapii.

Na ryc. 2b pokazano wielokanałowy aparat MF-24 do magnetoterapii i laseroterapii. W aparacie zastosowano innowacyjny system sterowania. Częstotliwość pola magnetycznego w MF-8 zmienia się od 1 do 100 Hz, natomiast zmiana indukcji pola magnetycznego przyjmować może wartości od 0 do 20 mT. Masa aparatu wynosi 6,2 kg, a rozmiar sterownika $142 \times 364 \times 335$ mm. Zasilanie obejmuje zakresy: $230 \text{ V} \times 50 \text{ Hz} \times 300 \text{ W}$. Aparat ten może dostarczyć linie emitowanego pola magnetycznego w postaci sinusoidy, prostokąta, a nawet trójkąta. Kształty te mają istotne znaczenie przy magnetoterapii w zależności od rodzaju treningu sportowego lub schorzenia pacjenta.

Przedstawimy teraz na ryc. 2c kieszonkowy przyrząd nowoczesnej generacji — PEMF Magcell Arthro — do terapii chrząstki stawowej pulsującym polem elektromagnetycznym. Ten zasilany baterią, podręczny aparat jest bezprzewodowy oraz łatwy w obsłudze. W trakcie treningów emituje wytworzone pole elektromagnetyczne. Jest wyposażony w aktywny magnetyczny dysk o powierzchni 28 cm^2 regulowany w trakcie zabiegów i treningów. Obroty dysku w przedziale zmian 2 Hz uzyskują częstotliwości między

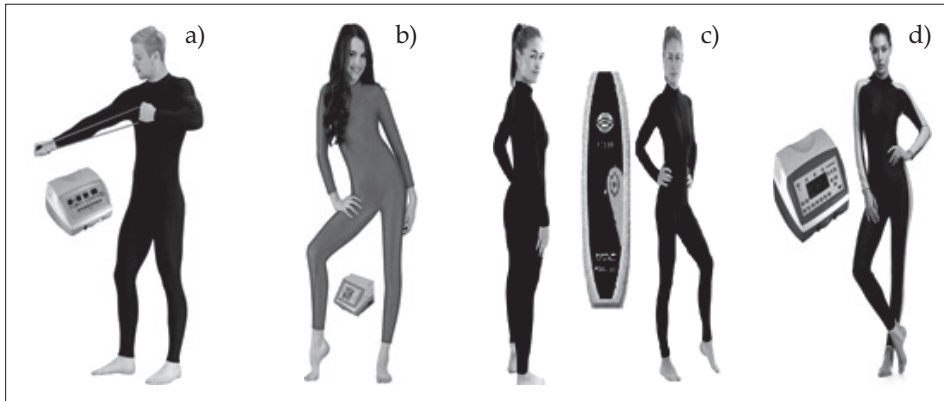
Rycina 2. Przyrządy wytwarzające pole elektromagnetyczne dla potrzeb terapii:
a) MF-8 (pole magnetyczne); b) MF-24 — pole magnetyczne;
c) Magcell Arthro — pole magnetyczne i elektromagnetyczne;
d) MT-3 wytwarza pole elektryczne podczas elektroterapii



4 i 12 Hz. Przyrząd Magcell Arthro pokazany na ryc. 2c dostarcza zmienną indukcję pola magnetycznego o wartości gęstości strumienia około 105 mT.

Przyrząd elektroniczny MT-3 pokazany na ryc. 2d produkuje prąd elektryczny o natężeniu od 0 do 50 mA, przy częstotliwości w przedziale 1–100 Hz. Aparat MT-3 ma masę 2,5 kg, wymiary 150×370×340 mm oraz zasilanie mocą 230 V/50 Hz/50 VA. Stosuje się go często do elektro-gimnastyki. W tym przypadku zaleca się sportowcom ubieranie ciasnych trykotów lub obcisłych dresów treningowych.

Aparaty przedstawione na ryc. 2. współpracują z ćwiczącymi sportowcami. Ten rodzaj terapii łączący trening fizyczny z dawkowaniem odpowiedniego pola elektromagnetycznego ilustruje ryc. 3.



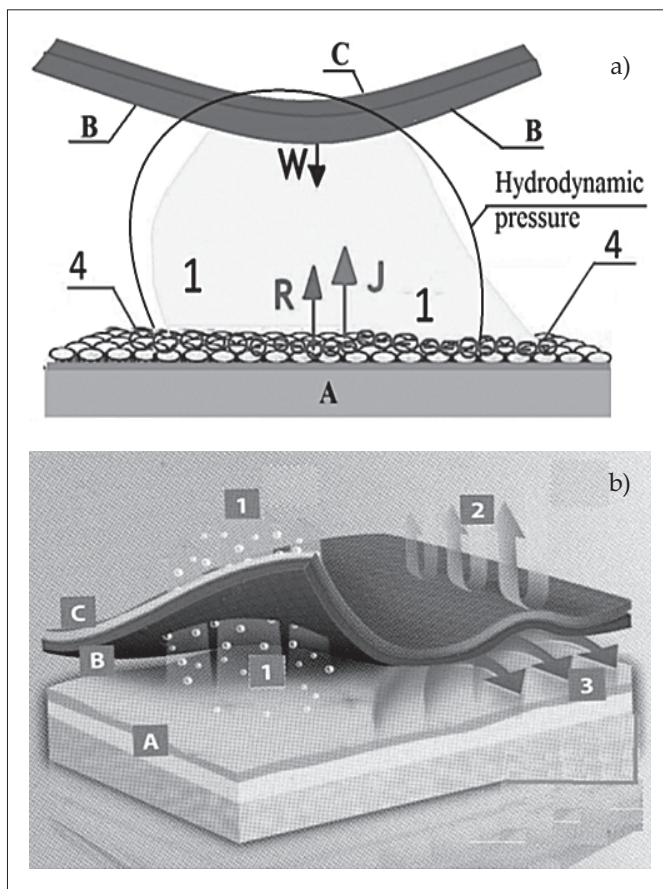
Rycina 3. Współpraca trenujących sportowców z aparatami emitującymi pole elektromagnetyczne

Ciasne rajtuzy i rajstopy gimnastyczne umożliwiają lepsze przenikanie linii sił dawkowanego pola elektromagnetycznego poprzez fibrę trykotu, nieomal niewidoczną warstwę potu wytworzonego podczas treningu na powierzchni ciała i przez skórę dochodzą aż do mięśni, a także do chrząstki stawów.

Elektro-hydro-magnetyczne smarowanie chrząstki mazią stawową oraz ciała potem

Rycina 4a, b przedstawia hydrodynamiczne smarowanie powierzchni stawowych pokrytych chrząstką stawową opasanych nanometrową powierzchnią fosfolipidów przy współudziale mazi stawowej oraz dawkowanego pola elektromagnetycznego, które jest wspomagane ciśnieniem hydrodynamicznym

powstałym w cienkiej warstwie potu zalegającego pomiędzy elastycznym, dobrze dopasowanym do ciała trenującego sportowca trykotem dresu. Im dres jest ciaśniej dopasowany, tym cieńsza jest szczelina pomiędzy ciałem a trykotem, grubość warstwy potu maleje, a tym samym ciśnienie hydrodynamiczne osiąga większą wartość. Takie ciśnienie rozkłada się nie tylko w miejscach połączeń stawowych, lecz także na całym ciele trenującego sportowca.



Rycina 4. Wypełnienie potem szczeliny pomiędzy zewnętrzną powierzchnią (A) skóry sportowca a wewnętrzną powierzchnią (B) obcisłego dresu: a) schemat rozkładu ciśnienia hydrodynamicznego w szczelinie; b) ilustracja efektów przepływowo-termicznych potu w szczelinie.

Oznaczenia: R — siła odpychająca, J — mikro gęstość prądu dawkowana aplikatorem, C — wewnętrzna warstwa kombinezonu treningowego, W — obciążenie zewnętrzne, opór powietrza, 1 — wypływ tworzonoego potu, 2 — termiczna izolacja kombinezonu, 3 — temperatura na powierzchni ciała, 4 — warstewka chrząstki stawowej z ładunkiem elektrostatycznym i warstewką fosfolipidów

Efekt równomiernego rozkładu ciśnienia hydrodynamicznego na obszarze prawie całego ciała sportowca nie tylko wspomaga siłę nośną poszczególnych stawów podczas treningu, lecz wywołuje dodatkowo równomierne spalanie tkanki tłuszczowej w całym ciele. Zjawisko to jest bardzo cenne w przypadkach treningów mających na celu utratę nadwagi. Treningi odchudzające wykonywane w przypadku korzystania z luźnego dresu powodują często nadmierną utratę otyłości w miejscach niepożądanych pozostawiając zwłaszcza u mężczyzny minimalną utratę wydatnej otyłości brzusznej. Dobrze dopasowane rajtuzy treningowe powodujące równomierny rozkład naprężeń modelują całe ciało sportowca wraz z równomierną utratą otyłości na powierzchni całego ciała. Do takich treningów zalecane są całościowe kombinezony treningowe obejmujące część górną i dolną ciała (rajtuzy i body). Elastyczne kombinezony o nazwie Ganzkörperanzug produkowane są przez niemieckie firmy specjalizujące się w wytwarzaniu odzieży sportowej. Taki kombinezon ma mężczyzna na ryc. 3a i kobieta na ryc. 3b.

Naprężenia rozkładają się równomiernie na powierzchni kombinezonu na naprężenia styczne i normalne względem powierzchni ciała sportowca. Naprężenia normalne redukują opory powietrza powstałe w trakcie biegania. Naprężenia styczne zmniejszają siły tarcia powstałe w trakcie ruchu postępowego i obrotowego kończyn sportowca w czasie treningu.

Lepkość mazi stawowej i potu

Istotny wpływ na powstałe naprężenia na powierzchni ciała trenującego sportowca ma lepkość dynamiczna mazi stawowej i potu powstałego na powierzchni ciała. Lepkość wyrażamy w jednostkach Pas, to znaczy Ns/m^2 . Lepkość dynamiczna mazi stawowej zmienia się w zakresie od 0,0030 Pas do 0,3000 Pas. Lepkość dynamiczna potu przyjmuje wartości w zakresie od 0,0012 Pas do 0,0035 Pas. Pole elektromagnetyczne zwiększa lepkość dynamiczną zarówno potu, jak i mazi stawowej. Zależność tę można wyrazić następującym prostym wzorem:

$$\eta(pH, We, E) = \eta_0 \left[1 + \delta_E(pH, We, E) \cdot E^2 \right], \quad (5)$$

gdzie δ_E jest współczynnikiem wpływu natężenia pola elektrycznego E na wartość lepkości dynamicznej medium smarującego. Współczynnik ten zarówno dla potu, jak i dla mazi stawowej zależy od: nasiąkliwości We podłoża oraz od bezwymiarowego wskaźnika koncentracji jonów wodorowych pH w medium. Według informacji autora wartość współczynnika δ_E dla mazi stawowej oraz

potu nie została dokładnie zmierzona na drodze eksperymentalnej. Jednakże na podstawie wstępnie przeprowadzonych kalkulacji dla $pH=8$ uzyskujemy $\delta_E=0.003 \text{ m}^2/\text{V}^2$.

Na podstawie badań własnych oraz znanych wzorów Amontonsa można dla biologicznego modelu trenującego sportowca przedstawić następujące proste zależności dla sił tarcia F_R [N], nośności stawów P [N] oraz współczynników tarcia μ_f :

$$F_R = \frac{\eta U_s S}{\varepsilon_T}, \quad P_N = \frac{R_\rho^2 \cdot \eta^2}{\varepsilon_T^2 \cdot \rho}, \quad F_R = \mu_f P_N, \quad \mu_f = \frac{U_s S \rho \varepsilon_T}{\eta R_\rho^2} = \text{Re} \cdot \left(\frac{S}{R_\rho^2} \right) \quad (6),$$

gdzie: η — lepkość dynamiczna potu lub mazi stawowej [Pas];

U_s — prędkość liniowa współpracujących powierzchni biologicznych lub powierzchni dresu [m/s];

S — obszar współpracujących powierzchni [m²];

ε_T — średnia wartość wysokości szczeliny stawowej lub szczeliny pomiędzy powierzchnią wewnętrzną dresu treningowego a ciałem sportowca;

ρ — średnia wartość gęstości potu lub mazi stawowej zmieniająca się na ogół od 700 do 1150 kg/m³;

R_ρ — promień krzywizny współpracujących powierzchni m;

$Re=U_s \varepsilon_T \rho / \eta$ — liczba Reynoldsa.

Z równań (6) wynika, że wzrost lepkości potu lub mazi stawowej powoduje spadek wartości współczynnika tarcia czyli lepszy poślizg elastycznego dresu po ciele sportowca w trakcie treningu.

Wnioski

1) Pulsujące pole elektromagnetyczne (PEMF) dawkowane w trakcie biegania lub treningu sportowego:

— obniża wiek metaboliczny *Human Metabolic Age* (HMA),

— zwiększa indeks *Basal Metabolic Rate* (BMR w kcal),

w porównaniu z wiekiem metabolicznym oraz wskaźnikiem BMR wyrażonym w kcal osiągniętym bez dawkowania pulsującego pola elektromagnetycznego.

2) Ciasno dopasowany dres lub cały kombinezon treningowy przy dawkowanym pulsującym polu elektromagnetycznym przyspiesza efekt przemiany materii w trakcie wielokrotnego treningu, zwiększając procentową zawartość wody w ciele, zwiększa też masę mięśni i tkanki kostnej, ale obniża masę ciała wraz z zawartością tkanki tłuszczu zewnętrznego i wewnętrznego, tzw. tłuszczu trzewnego.

Streszczenie

Tematem niniejszej pracy jest nowa idea poprawy przemiany materii wraz z obniżeniem wieku metabolicznego sportowca polegająca na hydrodynamicznym smarowaniu chrząstek stawowych z dwuwarstwą fosfolipidów występujących w połączeniach stawowych narządów ruch z korpusem całego ciała. Smarowanie jest połączone z pulsującym polem elektromagnetycznym oraz treningiem biegu i chodu. Dodatkowo przedstawione zostaną fragmenty badań naukowych autora wykazujące, że znaczne efekty spalania tkanki tłuszczowej i znaczne obniżenie wskaźnika BMI oraz poprawę indeksu przemiany materii BMR osiąga się poprzez hydrodynamiczne smarowanie ciała potem zalegającym w szczelinie pomiędzy skórą sportowca a ciasnym dobrze dopasowanym dressem podczas treningu.

Summary

The topic of the presented paper concerns a new idea of hydrodynamic lubrication of human joint cartilage with PL bilayer, using pulsed electro-magnetic field implemented by the run and walk training. Here it is proved the thesis that the pulse-electro-magnetic lubrication connected with the run-walk training increases burn energy, metabolism and finally leads to the improvement of the performed therapy. Moreover in this paper it is presented that the hydrodynamic lubrication of the human skin by the thin layer of sweat is restricted on the tight fitting dress surface during the sport training. Finally the aim of this paper is to determine the influence of the above mentioned sportsman skin hydrodynamic lubrication by the sweat during the training effort implemented with electro-magnetic field on the fat cells burning and loss of body weight.

Literatura

1. Andersen Olaf S., Roger E. i in., *Bilayer Thickness and Membrane Protein Function: An Energetic Perspective*. „Annular Review of Biophysics and Biomolecular Structure” 36(1), s. 107–130, DOI: 10.1146/annuref.biophys.36.040306.132643, Retrieved 12 Dec. 2014.
2. Bhushan B., *Nanotribology and Nanomechanics of MEMS/NEMS and BioMEMS/BioNEMS Materials and Devices*, „Microelectronic Engineering” 2007, 84, s. 387–412.
3. Bagnato G.L., Miceli G., Marino N., Sciortinod, Bagnato G.F., *Pulsed Electromagnetic Fields in Knee Osteoarthritis: a Double Blind, Placebo-controlled, Randomized Clinical Trial*, „PMIDs 24106421, Rheumatology” 2016, 55, s. 755–762.
4. Chagnon G., Rebouah M., Favier D., *Hyperelastic Energy For Soft Biological Tissues: A Review*, „Journal of Elasticity” 2015, t. 120, z. 2, s. 129–160.
5. Cieślak G., Sieroń A., Adamek M., Żmudzinski J., *Wykorzystanie zmiennego pola magnetycznego w leczeniu choroby zwyrodnieniowej stawów*, „Balneol. Pol.” 1992, t. 34, nr 1–4, s. 133–148.
6. Cwanek J., *The Usability of the Surface Geometry Parameters for the Evaluation of the Artificial Hip Joint Wear*, Rzeszów University Press, Rzeszów 2009.
7. Czaban A., Frycz M., Horak W., *Effect of the Magnetic Particles Concentration on the Ferro-Oil's Dynamic Viscosity in Presence of an External Magnetic Field in the Aspect of Temperature Changes*, „Journal of KONES Powertrain and Transport” 2013, t. 20, nr 2, 55–60.
8. Gadomski A., Beldowski P., Rubi Miguel P., Urbaniak W., Auge Wayne K., Santamaria-Holek I., Pawlak Z., *Some Conceptual Thoughts Toward Nanoscale Oriented Friction in a Model of Articular Cartilage*, „Mathematical Biosciences” 2013, 244, s. 188–200.

9. Ianniti T., Fistetto G., Esposito A., Rottigi V., Palmieri B., *Pulsed Electromagnetic Field Therapy for Management of Osteoarthritis-related Pain, Stiffness and Physical Function. Clinical Experience in the Elderly*, „PMIDs:26705327, Clinical Interventions in Aging” 2013, 8; s. 1289–1293.
10. Maurel W., Wuy., Thalmann D., *Biomechanical Modells for Soft Tissue Simulation*, Springer Verlag Berlin–Heidelberg 1998.
11. Negm A., Lorberg A., Macintyre N.J., *Efficacy of Flow Frequency Pulsed Subsensory Threshold Electrical Stimulation vs Placebo in Pain and Physical Function in People with Knee Osteoarthritis. Systematic Review with Meta-analysis*, „PMIDs:26562074, Osteoarthritis and Cartilage” 2013, 21, s. 1281–1289.
12. Rosensweig R.E., Kaiser R., Miskolczy G., *Viscosity of Magnetic Fluid*, „Journal of Colloid and Inference Science” 1969, 4, s. 680–686.
13. Sandyk R., *Immediate Recovery of Cognitive Functions and Resolution of Fatigue by Treatment with Weak Electromagnetic Fields in a Patient with Multiple Sclerosis*, „Int. J. Neurosci.” 1997, 90, s. 59–74.
14. Sandyk R., *Therapeutic Effects of Alternating Current Pulsed Electromagnetic Fields in Multiple Sclerosis*, „J. Altern. Complement. Med.” 1997, 3, s. 365–386.
15. Sandyk R., *Treatment with AC Pulsed Electromagnetic Fields Improves Olfactory Function in Parkinson’s Disease*, „Int. J. Neurosc.” 1999, 97, s. 225–233.
16. Siauve N., Scorretti R., Burais N., Nicolas L., *Electrorheological and Magnetorheological Fields and Human Body. A New Challenge for the Electromagnetic Field Computation*, „International Journal of Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering” 2003, t. 22, nr 3, s. 457–469.
17. Sieroń A., Biniszkiwicz T., Biniszkiwicz K., *Subiektywna ocena efektów leczniczych słabych pól magnetycznych*, „Acta Bio-Optica et Informatica Medica” 1998, 4, s. 133–137.
18. Sieroń A., *Applications of Magnetic Field in Medici (Zastosowania pól magnetycznych w medycynie)*, Alfa Med. Press, Bielsko-Biała 2000.
19. Spur G., Uhlmann E., Patzwald R., *Rheometer for Investigating the Magnetoviscous Effect of Magnetic Fluids*, „Magnetohydrodynamics” 2001, t. 37, nr 3, s. 279–284.
20. Wierzcholski K., *Pressure Distribution in Human Joint Gap for Elastic Cartilage and Time Dependent Magnetic Field*, „Russian Journal of Biomechanics” 2003, Vol. 7, No. 1, 24–46, Perm.
21. Wierzcholski K., *Friction Forces in Human Joint for Unsymmetrical Synovial Fluid Flow with Variable Viscosity, Magnetic Field in Curvilinear Co-ordinates*, „Acta of Bioengineering and Biomechanics” 2001, Vol. 3, Supl. 2, 619–626, Perm.
22. Wierzcholski K., *Tribologie für instabil belastete menschliche Gelenke im magnetischen Feld*, „International Colloquium of Tribology” 2004, Vol. III, 1717–1724, Technische Akademie Esslingen.
23. Wuschech H. i in., *Effects of PEMF on Patients With Osteoarthritis. Results of a Prospective, Placebo-Controlled Double-Blind Study*, „Willey Periodicals, Inc. Electromagnetics, PMIDs: 23973142” 2015, 36, 576–576, 570–585.
24. www.eie.com.pl, [dostęp: marzec 2014].
25. www.resmedica.com.pl, [dostęp: marzec 2014].
26. www.fizjoterapia24.pl, [dostęp: marzec 2014].
27. www.tanita.co

INFORMACJE O AUTORACH

- Paweł Bukowski** — dr inż. nauk technicznych, dyrektor Instytutu Tribologii i Eksploatacji przy Zamiejscowym Wydziale Mechanicznym w Grudziądzu Kujawskiej Szkoły Wyższej we Włocławku, tribolog, eksploatacysta o specjalności maszyny robocze i pojazdy.
- Zenon Pawlak** — prof. dr hab., pracownik naukowo-dydaktyczny Uniwersytetu Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy, biotribolog.
- Joanna Podemska** — pedagog, socjolog i psycholog zarządzania, a przede wszystkim psychosomatyk, wykładowca nauk humanistycznych na Zamiejscowym Wydziale Mechanicznym Kujawskiej Szkoły Wyższej we Włocławku.
- Mirosław Radwański** — dr inż. nauk technicznych, specjalizuje się w dziedzinie dynamiki maszyn, adiunkt Wydziału Nauk Technicznych Kujawskiej Szkoły Wyższej we Włocławku oraz Zamiejscowego Wydziału Mechanicznego w Grudziądzu.
- Michał Sójka** — dr inż., dziekan Zamiejscowego Wydziału Mechanicznego w Grudziądzu Kujawskiej Szkoły Wyższej we Włocławku, autor wielu publikacji z dziedziny tribologii i eksploatacji, w pracy zawodowej zajmuje się rozwiązywaniem problemów w rzeczywistych systemach produkcyjnych oraz wspomaganiem służb utrzymania ruchu w zakładach przemysłowych.
- Grzegorz Śmigieński** — dr, pracownik naukowo-dydaktyczny Uniwersytetu Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy, programista komputerowych systemów sterowania.
- Wiesław Urbaniak** — dr inż., pracownik naukowo-dydaktyczny Uniwersytetu Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy. W swojej pracy naukowej zajmuje się badaniami smarowania stawów naturalnych oraz łożysk stalowych spiekanych z dodatkiem substancji warstwowych.
- Krzysztof Wierzcholski** — prof. zw. dr hab. inż., w pracy naukowej zajmuje się m.in. badaniami zjawisk tarcia, zużycia, reologii płynów nienewtonowskich, nano- i mikro-mechanizmami.

„ZESZYTY NAUKOWE KSW”

Zasady przygotowania materiałów — informacje dla Autorów

UWAGI OGÓLNE

1. Objętość tomu nie może przekraczać 15 arkuszy wydawniczych.
2. Obowiązuje złożenie wersji elektronicznej.
3. Artykuł nie może być nigdzie wcześniej publikowany.

BUDOWA ARTYKUŁU

1. Imię i nazwisko autora/autorów (w pełnym brzmieniu) oraz afiliacja (podać pełną nazwę uczelni lub instytucji wraz z siedzibą).
2. Tytuł pracy w języku polskim i angielskim.
3. Streszczenie w języku polskim (do 6 wierszy).
4. Streszczenie w języku angielskim (do pół strony).
5. Słowa kluczowe (6–8 słów) w języku polskim i angielskim.
6. Tekst artykułu.
7. Notka o autorze: tytuł, stopień naukowy, aktualne miejsce pracy.

SKŁAD ARTYKUŁU

1. Artykuł nie może liczyć więcej niż 1 arkusz wydawniczy (ok. 13–15 stron wydruku komputerowego, wliczając w to materiał graficzny (mapy, wykresy, tabele, fotografie).

2. Tekst należy składać na formacie A4, przy uwzględnieniu marginesów: górnym i lewym — po 25 mm, czcionką Times New Roman 12-punktową z odstępami międzywierszowymi — 1,5. Tekst powinien być złożony do lewego marginesu z zachowaniem wcięć akapitowych (niejustowany). Nie można samodzielnie dokonywać adiustacji, np. poprzez stopniowanie pisma. Należy unikać stosowania wyróżnień i podkreśleń w tekście (zwłaszcza wielozdaniowych, np. kursywy, pogrubień, wersalików).

Podział na śródtytuły należy ograniczyć do pierwszego i drugiego rzędu. Wtręty obcojęzyczne w tekście należy pisać kursywą, cytaty — w cudzysłowie pismem prostym, natomiast źródło cytatu zamieścić w przypisie. Nie należy opatrzyć przypisami tytułów, śródtytułów, tytułów tabel itp. Jeżeli wymagają one objaśnienia — opatrzyć gwiazdką. Notki źródłowe (przy tabelach, ilustracjach, rycinach itp.) podaje się bezpośrednio pod odpowiednim materiałem.

3. Dostarczona praca powinna być kompletna i zawierać: tekst główny, przypisy, literaturę, streszczenie, przewidziane dodatki i załączniki (aneksy, tabele, ryciny, mapy, ilustracje itp.).

INFORMACJE UZUPEŁNIAJĄCE

Przypisy

Cytowanie dokumentów piśmienniczych

Publikacja zwarta: A. Olubiński, *Konflikty małżeńskie a warunki i efekty wychowania w rodzinie*, Toruń 1987, s. 76.

Artykuł w publikacji zbiorowej: Z. Węgiński, *Swoistość polskiego pedagoga a problemy edukacji globalnej*, [w:] *Etos pedagogów i edukacji wobec problemów globalizacji*, pod red. U. Ostrowskiej, Bydgoszcz–Olsztyn 2002, s. 89–90.

Artykuły w czasopiśmie: E. Kośmicki, *Jak żyć w warunkach globalizacji*, „Przegląd Pedagogiczny” 2002, nr 2, s. 26.

Maszynopisy lub rękopisy (wzór): J. Krzemiński, *Dzieje pożarnictwa powiatu morskiego*, mps (lub rkps), Gdańsk 1971, s. 22.

Cytowanie dokumentów elektronicznych

Obowiązkowe elementy zapisu (kursywą zaznaczono komponenty istotne dla opisów publikacji elektronicznych): autor/autorzy, tytuł, *nośnik* (online, CD-ROM), miejsce wydania, wydawca, data wydania, *data dostępu* (element obowiązkowy dla dokumentów online), *warunki dostępu* (adres internetowy). Przykłady:

Książka elektroniczna: *Encyklopedia Omnia* [CD-ROM]. Warszawa: De Agostini Polska, cop. 2001. ISBN 83-907040-4-8.

Czasopismo: „Biuletyn Oświatowy” [online]. Gliwice: Nowator, 2004 [dostęp: 25 listopada 2004]. Dostępny w World Wide Web: <http://www.muza.art.pl/0703/home.htm>.

Inne artykuły ze stron internetowych: *Annual report for the year 2001–2002* [online]. Cambridge: The University of Cambridge Library, 2004 [dostęp: 6 maja 2004]. Dostępny w internecie: http://www.lib.cam.ac.uk/About/annual_report_2001-2.pdf.

Szczegółowe informacje o elementach i ich kolejności w opisach dokumentów elektronicznych znajdują się w normie PN-ISO 690-2:1999.

Tabele: opracowane w programie MS Word lub MS Excel. Każda tabela powinna posiadać kolejny numer, tytuł własny (u góry) oraz źródło (u dołu tabeli). Nie stosować edycji ramek, cieniowania wierszy, kolumn itp.

Ryciny: Ryciny lub rysunki powinny mieć jednolitą numerację. Należy dostarczyć czarno-białe. Legendy powinny być zamieszczone na rycinach, ale tytuł i źródło należy wpisać nad lub pod ryciną. Wykresy mogą być opracowane w MS Excel lub MS Word.

W rycinach opracowanych komputerowo linie nie powinny być cieńsze niż 0,3 pkt., a symbole i opisy muszą być czytelne nawet po zmniejszeniu. Jeśli ryciny opracowane są ręcznie, powinny mieć postać bardzo czytelnego czystorysu nadającego się do skanowania.

Ryciny powinny odpowiadać wielkości, w jakiej wystąpią w publikacji, tj. maksymalnie 126×190 mm. Należy je dostarczyć w postaci odrębnych plików (program graficzny CorelDRAW X3). Ryciny wykonane w innych aplikacjach powinny być zapisane w formacie *.eps lub *.wmf umożliwiającymi import do Corela.

Ilustracje: Fotografie muszą być opatrzone podpisem wraz z podaniem nazwiska autora, datą wykonania fotografii, podaniem źródła i/lub nazwy właściciela. Wymagana jest pisemna zgoda autora lub właściciela na bezpłatne reprodukowanie. Zgoda wymagana jest także w przypadku, gdy fotografia lub obiekt znajdujący się na fotografii pochodzi ze zbiorów określonej instytucji. Brak zgody, którą winien dostarczyć autor, uniemożliwi reprodukowanie.

Skanowane fotografie barwne i czarno-białe powinny mieć rozdzielczość minimum 600 dpi, rysunki liniowe czarno-białe 1200 dpi. Autor może dostarczyć materiał ilustracyjny oryginalny, jednakże o wysokiej jakości technicznej, gwarantującej dobrą jakość reprodukcji.

Niedopuszczalne jest wlamywanie fotografii do MS Word. Materiał skanowany powinien być dostarczony w osobnych plikach w postaci bitmapy zapisanej w formatach: TIFF, JPG lub EPS. Miejsce wlamania należy zaznaczyć na lewym marginesie.

Uwaga: Nie przyjmuje się kserokopii materiałów graficznych ani materiałów z internetu.

Jeżeli cytowane fragmenty tekstu lub element graficzny są chronione prawem autorskim, wymagana jest pisemna zgoda autora oryginału lub właściciela praw autorskich na bezpłatne wykorzystanie w pracy.

**Recenzja artykułu zgłoszonego do publikacji w Zeszytach Naukowych
Kujawskiej Szkoły Wyższej we Włocławku**

Tytuł artykułu

Proszę ocenić artykuł ze względu na poniższe kryteria, zaznaczając kolumnę w właściwą oceną

Kryteria	Tak	Nie	Wymaga uzupełnienia
Czy tytuł artykułu odpowiada jego treści?			
Czy słowa kluczowe i streszczenie artykułu są adekwatne do treści?			
Czy cel artykułu jest wyraźnie określony i został zrealizowany?			
Czy zagadnienia przedstawione w artykule są istotne poznawczo?			
Czy opracowanie jest oryginalne względem istniejących publikacji?			
Czy treści prezentowane są w sposób przejrzysty i logiczny?			
Czy dobór literatury jest właściwy pod względem aktualności i kompleksowości?			
Czy artykuł ma właściwą strukturę i jest poprawny pod względem językowym i redakcyjnym?			
Czy ewentualne materiały dodatkowe (zdjęcia, ilustracje, wykresy itp.) zostały dobrane we właściwy sposób?			

Uwagi i sugestie

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

Artykuł:

- nadaje się do publikacji w przedstawionej formie
- nadaje się do publikacji po uwzględnieniu uwag recenzenta
- nie nadaje się do publikacji

Imię i nazwisko recenzenta

Tytuł (stopień naukowy) recenzenta

Afiliacja recenzenta

.....
data sporządzenia recenzji

.....
podpis recenzenta

Książki i czasopisma Wydawnictwa Uczelnianego KSW
można zamawiać: listownie, telefonicznie
i pocztą elektroniczną

Books and magazines of the Publishing House of KSW
can be ordered: by mail, by telephone, by e-mail

Wydawnictwo Uczelniane KSW
87-800 Włocławek, pl. Wolności 1
tel. +48 660 722 691
e-mail: wydawnictwa@ksw.wloclawek.pl

**Dwieście trzydziesta dziewięta publikacja
Kujawskiej Szkoły Wyższej
we Włocławku**