

Badania i Rozwój Młodych Naukowców w Polsce

Technika i inżynieria



www.mlodzinaukowcy.com

Poznań 2021

Redakcja naukowa

dr Jędrzej Nyćkowiak

dr hab. Jacek Leśny, prof. UPWR

Wydawca

Młodzi Naukowcy

www.mlodzinaukowcy.com

wydawnictwo@mlodzinaukowcy.com

ISBN (całość 978-83-66392-91-5)

ISBN (wydanie online 978-83-66743-28-1)

ISBN (wydanie drukowane 978-83-66743-27-4)

Ilość znaków w książce: 407 tys.

Ilość arkuszy wydawniczych: 10.2

Data wydania: maj 2021

Niniejsza pozycja jest monografią naukową. Jej rozdziały zostały wydrukowane zgodnie z przesłanymi tekstami po ich zaakceptowaniu przez recenzentów. Odpowiedzialność za zgodne z prawem wykorzystanie użytych materiałów ponoszą autorzy poszczególnych rozdziałów.

Spis treści

1. Analiza możliwości sterowania aplikacją mobilną za pomocą interfejsu mózg-komputer	7
<i>Katarzyna Białas, Michał Kędziora</i>	
2. Standardy wytwarzania oprogramowania wbudowanego w branży motoryzacyjnej	15
<i>Marek Brykczyński</i>	
3. Dzisiejsze systemy nawigacji satelitarnej	23
<i>Bartłomiej Dziewoński</i>	
4. Wpływ wielkości geometrycznych płatuowca na jego charakterystyki aerodynamiczne przy prędkościach większych od prędkości dźwięku	31
<i>Bartłomiej Dziewoński</i>	
5. Metody i zastosowanie technologii druku 3D	38
<i>Fenc Rafał, Piórkowski Paweł</i>	
6. Etyka w pracy inżyniera	44
<i>Fenc Rafał, Piórkowski Paweł</i>	
7. Badanie izoterm adsorpcji metanu na węglu kamiennym, w powiązaniu z jego właściwościami fizykochemicznymi i technologicznymi	50
<i>Stanisław Kozioł, Katarzyna Czerw, Katarzyna Zarębska, Paweł Baran</i>	
8. Model ekonometryczny jako narzędzie wspierające proces decyzyjny w organizacji	57
<i>Marcinek Paulina, Brzychczy Edyta, Smol Marzena</i>	
9. Wpływ czynnika ludzkiego na bezpieczeństwo w transporcie drogowym	65
<i>Nazarewicz Sybilla, Kozłowicz Katarzyna</i>	
10. Wpływ geometrii układu jezdnego na kontakt z podłożem kołowych środków transportu	72
<i>Nazarewicz Sybilla, Kozłowicz Katarzyna</i>	
11. Koszty w projektowaniu procesów technologicznych	78
<i>Piórkowski Paweł, Fenc Rafał, Waszczuk Kamil</i>	
12. Badania obrabiarek w stanie spoczynku	85
<i>Piórkowski Paweł, Fenc Rafał, Waszczuk Kamil</i>	
13. Analiza architektury budynku szkolnego typu ‘tysiąclatka’ z drugiej połowy XX wieku	92
<i>Weronika Skowronek</i>	
14. Predykcja sił reakcji w płycie rozciąganej przy użyciu sieci neuronowej i metody elementów skończonych	99
<i>Smolnicki Michał</i>	
15. Wykorzystanie sieci neuronowych we wspomaganie analiz metodą elementów skończonych	105
<i>Smolnicki Michał</i>	
16. Systemy informatyczne w systemie ochrony zdrowia	112
<i>Katarzyna Tomaszewicz, Anna Grajewska, Karolina Borkowska, Adrian Świącki, Agnieszka Polecka, Edyta Rysiak, Izabela Prokop</i>	

Przedmowa

Szanowni Państwo, wydawnictwo „Młodzi Naukowcy” oddaje do rąk czytelnika monografię dotyczącą nauk technicznych i inżynierskich. Prezentowana monografia składa się z 16 rozdziałów w których poruszane jest dość szerokie spektrum zagadnień związanych z wykorzystaniem zaawansowanych technologii informatycznych, ekonometrii, architektury, a także bezpieczeństwa ruchu i etyki inżynierskiej.

Można uznać, że pierwszy rozdział dotyczy z całą pewnością bardzo zaawansowanych technologii dotyczących możliwości sterowania aplikacją mobilną za pomocą interfejsu mózg-komputer. Jeszcze niezbyt dawno, tego typu możliwości opisywano w książkach fantastyki naukowej, obecnie mamy już dostęp do komercyjnie wytwarzanych urządzeń. Urządzenia te wykorzystują znane technologie z diagnostyki zdrowotnej w połączeniu z zaawansowanym oprogramowaniem

Kolejne rozdziały dotyczą standardów wytwarzania oprogramowania wbudowanego w branży motoryzacyjnej. Potrzeby ich powstania wynikają z dużej ilości stosowanych zespołów kontrolnych i sterujących we współczesnych samochodach. Wdrożenie pewnych standardów oprogramowania do tych zespołów może pozytywnie wpływać na jakość i koszty wytwarzania oprogramowania.

Kolejne rozdziały dotyczą wykonywania obliczeń inżynierskich służących do wyznaczania sił jak i innych analiz wykonywanych przy użyciu sieci neuronowych i metod elementów skończonych. Wykorzystanie sieci neuronowych ma wielu zwolenników jak i przeciwników, jednak wydaje się, że ich opinie nacechowane są względami pozamerytorycznymi. Prawdopodobnie najbardziej słuszne jest traktowanie tej metody jako jednego z wielu narzędzi obliczeniowych, które tak jak i inne metody do pewnych zastosowań nadają się lepiej, a do innych gorzej. Podejście czysto pragmatyczne z wyszczególnieniem pozytywów jak i negatywów tych metod w danym zastosowaniu wydaje się tu najbardziej słuszne.

Jeden z rozdziałów dotyczy raczej rzadko podejmowanego zagadnienia etyki w pracy inżyniera. Rozpatrując zagadnienia związane z postępem technologicznym i ich wpływ na życie i zdrowie człowieka oraz środowisko naturalne wchodzimy w szerokie spektrum zagadnień czy inżynier tworząc nowe technologie, patentując wynalazki powinien rozpatrywać wszystkie możliwe konsekwencje swojej pracy i czy w ogóle jest w stanie to zrobić. Wydaje się że jest to niemożliwe, ale mimo wszystko powinien kierować się zasadą nie szkodenia innym i przewidywania skutków na tyle, na ile jest to możliwe.

Innym ciekawym zagadnieniem jest analiza architektury budynku szkolnego typu ‘tysiąclatka’ z drugiej połowy XX wieku. Chyba każdy mieszkaniec Polski zna to pojęcie i widział taki budynek, bo powstało ich blisko 1500, wszystkie o bardzo podobnych kształtach i stylistyce. Prawdopodobnie olbrzymia większość z nich do dzisiaj funkcjonuje jako szkoły i z powodu ich ilości są właściwie synonimem tego pojęcia. W rozdziale omówiono zasady projektowe jakie przyświecały architektom w okresie ich powstawania.

Powyżej przedstawiłem tylko wybrane zagadnienia poruszane w monografii z zakresu nauk technicznych i inżynierskich. Czytelnikom życzę wielu przemyśleń związanych z tematyką zaprezentowanych prac badawczych. Ja uważam, że doktoranci i młodzi badacze z pasją i bardzo profesjonalnie podchodzą do swojej pracy, a doświadczenie jakie nabierają publikując prace w monografiach wydawnictwa Młodzi Naukowcy, pozwoli im efektywnie doskonalać swój warsztat pracy.

dr hab. Jacek Leśny
prof UPWR

1. Analiza możliwości sterowania aplikacją mobilną za pomocą interfejsu mózg-komputer

Analysis of the possibility of controlling a mobile application using the brain-computer interface

Katarzyna Białas, Michał Kędziora

Katedra Informatyki Stosowanej, Wydział Informatyki i Zarządzania, Politechnika Wrocławska
Opiekun naukowy: dr inż. Michał Kędziora

Michał Kędziora : michal.kedziora@pwr.edu.pl

Katarzyna Białas: bialas.katarzyna1996@gmail.com

Słowa kluczowe: sygnał EEG, akwizycja fal mózgowych, system BCI

Streszczenie

Interfejsy mózg-komputer (BCI) to systemy bezpośredniej komunikacji pomiędzy człowiekiem a maszyną, których główną rolą jest przenoszenie sygnału mózgowego na sygnał sterujący. Sygnał mózgowy jest rejestrowany za pomocą elektroencefalografii (EEG). Możliwości jakie daje stosowanie systemów BCI w informatyce to oprócz sterowania prostymi urządzeniami czy robotami, możliwość analizy emocji, zachowania użytkownika, adaptacji interfejsu lub samego działania aplikacji na podstawie aktywności umysłowej badanego.

W związku ze specyfiką wykorzystywanego do badań interfejsu mózg-komputer NeuroSky MindWave Mobile, wyróżniono dwa potencjały mózgowy, które wykorzystano w dalszej analizie: stan skupienia oraz stan relaksacji. W prezentowanej pracy zaproponowano eksperymenty dotyczące delegacji zadań w aplikacji mobilnej przy pomocy aktywności umysłowej użytkownika związanej z poziomem skupienia nad powierzonym zadaniem oraz automatycznej zmiany i adaptacji interfejsu aplikacji mobilnej, zgodnej z poziomem relaksacji umysłowej osoby badanej.

Na podstawie zdefiniowanych scenariuszy przeprowadzono eksperymenty na grupie badawczej oraz uzyskane wyniki poddano analizie. Eksperyment związany z wykonaniem akcji w aplikacji za pomocą poziomu uwagi użytkownika osiągnął 75% sukcesu, a eksperyment dotyczący poziomu medytacji 79.17% wskaźnika powodzenia. Z przeprowadzonych badań, wynika, że sterowanie aplikacją mobilną za pomocą fal mózgowych i interfejsu mózg-komputer jest możliwe, a użytkownikom w grupie badanej łatwiej było kontrolować aplikację za pomocą poziomu relaksacji.

1. Wstęp

W dzisiejszym świecie coraz częściej dąży się do uproszczenia komunikacji między człowiekiem a maszyną cyfrową. Do niedawna problemem w rozwoju tej dziedziny nauki był wysoki próg wejścia związany z samym kosztem odpowiedniego interfejsu, najczęściej opartego na pomiarze fal mózgowych – EEG, jego inwazyjnością, czy też dostępnością oprogramowania do takich urządzeń. Jednak interfejsy mózg-komputer stały się w ostatnich latach bezpieczne, nieinwazyjne i znacznie bardziej dostępne, co w niedługim czasie może spowodować upowszechnienie się takich rozwiązań i zwiększyć dostępność dla przeciętnego użytkownika nie tylko do celów przemysłowych i medycznych, ale także konsumenckich, takich jak sterowanie inteligentnym domem, obsługa aplikacji z dziedziny szeroko rozumianej rozrywki, edukacji czy szkolnictwa.

W 2007 roku wraz z grą NeuroBoy ukazało się pierwsze, dostępne cenowo, konsumenckie urządzenie EEG firmy NeuroSky. Było to urządzenie pionierskie pod względem zastosowania na taką skalę technologii suchych sensorów EEG. W kolejnych latach wielu twórców gier komputerowych współpracowało z firmą przy różnych projektach, co zaowocowało intensywnym rozwojem interfejsów NeuroSky. Dostarczając rozwiązania dla branży rozrywkowej, firma opracowała kilka linii produktów dla rozwiązań BCI. Drugą linią produktów jest seria zestawów NeuroSky MindWave. Rodzina MindWave składa się z urządzeń MindWave i MindWave Mobile. Pierwsza przeznaczona

jest tylko do łączenia się z komputerami stacjonarnymi, zarówno PC jak i Mac, druga - MindWave Mobile dedykowana jest również dla urządzeń mobilnych (Wikipedia, Neurosky official site).

Analizując artykuły, publikacje i inne źródła wiedzy w prezentowanej tematyce, można zauważyć, że mechanizmy kontroli, zarówno maszyn, jak i aplikacji komputerowych poprzez akwizycję fal EEG, można odnaleźć jako opisane w literaturze. Aplikacje mobilne sterowane przez interfejsy mózg-komputer są jednak w dalszym ciągu warte opracowania i dalszego zbadania (Zmarzły i in. 2007; Holewa i Nawrocka 2014; Chodak i Broniec 2009; Katona i in. 2014; Paszkiel 2015). W cytowanych przykładach można znaleźć tylko kilka egzemplarzy takich aplikacji, które jednak mają ograniczoną funkcjonalność i platformy systemowe. Większość rozwiązań skupiała się jedynie na pozyskiwaniu sygnału mózgowego jako podstawowego medium kontrolnego i tylko kilka z nich prezentowało model sterowania umożliwiającą odpowiedź w postaci pętli zwrotnej, na zmiany w sygnale mózgowym użytkownika.

Biorąc pod uwagę wszystkie wymienione powyżej korzyści oraz potencjały badawcze, wybrano - MindWave firmy NeuroSky i postanowiono zbadać możliwości wykorzystania tego interfejsu mózg-komputer do sterowania aplikacją mobilną.

2. Materiał i metody

2.1 Urządzenie NeuroSky MindWave Mobile

Zgodnie ze specyfikacją techniczną producenta (Neurosky), zestaw MindWave Mobile 2 mierzy i przesyła widmo mocy EEG oraz wartości aktywności umysłowych, takich jak poziom uwagi, poziom relaksacji, które wyliczane są w oparciu o wbudowane algorytmy. Urządzenie składa się z ramienia czujnika, zestawu słuchawkowego i klipsa na ucho. Całość wykorzystuje moduł TGAM ASIC. Sprzęt zasilany jest jedną baterią AAA, która wystarcza na 8 godzin pracy. Połączenie między urządzeniem EEG a komputerem jest nawiązywane za pomocą standardu Bluetooth. Za pośrednictwem tego medium odbywa się również wymiana danych z modułem EEG i systemem BCI. MindWave Mobile obsługuje platformy: Windows (XP / 7/8/10), Mac (OSX 10.8 lub nowszy), iOS (iOS 8 lub nowszy) i Android (Android 2.3 lub nowszy).



Rys. 1. Urządzenie MindWave Mobile (Neurosky, Inc.), źródło (Neurosky).

Zestaw pomiarowy EEG NeuroSky charakteryzuje się szerokim zastosowaniem w branży gier i rozrywki, dlatego firma wprowadziła kilka podstawowych funkcji, które są wbudowane w układ o nazwie ThinkGear. Algorytmy eSense (Neurosky) są zbiorem opracowanych procesów do charakteryzowania stanów umysłowych badanego. Obliczenia stojące za tą technologią opierają się na wzmocnieniu surowego sygnału fal mózgowych z wyłączeniem szumów otoczenia i zniekształceń generowanych przez ruch mięśni. Mierniki eSense w NeuroSky MindWave Mobile 2 to sposób na

pokazanie, jak efektywnie użytkownik angażuje uwagę (podobnie do koncentracji) lub relaksuje się (podobnie jak medytacja). Wbudowany algorytm może również wykryć mrugnienia, wysiłek umysłowy i znajomość zadania. Producent NeuroSky stale poszerza wachlarz algorytmów, które są dostępne w nowszych generacjach urządzenia.

Łatwość i wygoda korzystania z danych o zaangażowaniu umysłowym zebranych podczas działania użytkownika może być podstawą do podejmowania decyzji w systemach BCI oraz do sterowania urządzeniami i aplikacjami.

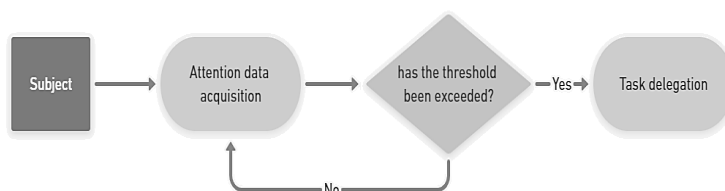
W przypadku mierników skupienia i relaksacji wartości przedstawiają względną skalę od 0 do 100. Jest to porównawcza skala eSense, a nie reprezentacja określonej jednostki. Dla celów badawczych w niniejszej pracy można ją również porównać ze skalą procentową w korelacji 1:1.

Aby zbadać możliwości sterowania aplikacją mobilną za pomocą opisanego interfejsu, zaproponowano eksperymenty, które wykorzystują wbudowane algorytmy eSense urządzenia MindWave Mobile 2. Biorąc pod uwagę, że większości fal mózgowych nie można świadomie modulować (Chodak i Broniec 2009) sterowanie oparte na zmianach w samym sygnale EEG nie miałyby zastosowania, gdyby nie kontekst i znaczenie, które spowodowało te zmiany. Algorytmy eSense - dla skupienia i relaksacji korzystają z bogatego spektrum informacji EEG i wskazują rzeczywiste zaangażowanie zachowania użytkowników w całym procesie. Jest to doskonała baza do wykorzystania takich wbudowanych algorytmów na poziomie sprzętowym, jak szybki i efektywny moduł sterujący w aplikacji mobilnej.

2.2 Eksperymenty

Pierwszym zaproponowanym eksperymentem jest delegowanie zadań według poziomu uwagi użytkownika. Celem tego eksperymentu jest wykonanie przez system określonego zadania w momencie, gdy użytkownik skupi się na zamierzonej akcji. Mierzony jest poziom uwagi użytkownika i po przekroczeniu określonego progu wyzwalane jest działanie.

Na schemacie przedstawiono przebieg opisywanego eksperymentu. Obiekt badawczy jest podany akwizycji danych dotyczących poziomu uwagi, następnie sprawdzany jest warunek przekroczenia zadanego progu poziomu uwagi. Progi mierzone są za pomocą algorytmu eSense w skali 0-100 i dobierane według poziomu trudności wykonania eksperymentu. W momencie, gdy określony dla eksperymentu próg uwagi zostanie przekroczony, system wyzwała zdefiniowane zadanie i kończy przebieg eksperymentu.

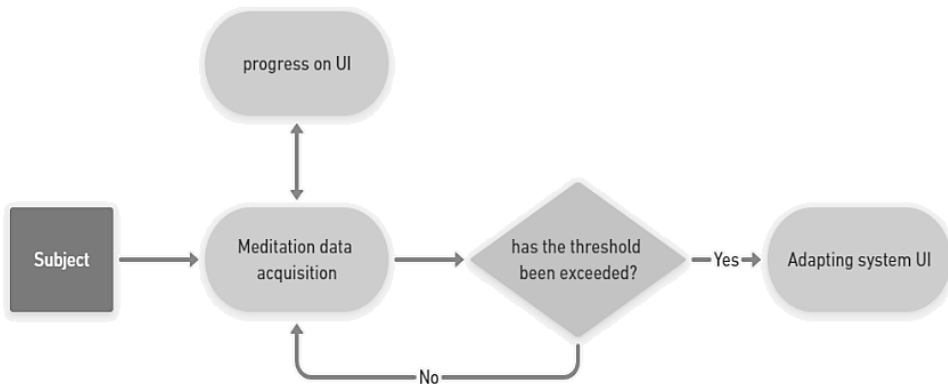


Rys. 2. Schemat blokowy pierwszego eksperymentu: delegowanie zadań według poziomu uwagi użytkownika.

Drugim zaproponowanym eksperymentem jest dostosowywanie interfejsu użytkownika systemu do poziomu medytacji (relaksacji) badanego.

Podobnie jak w przypadku eksperymentu opartego na poziomie uwagi, celem tego eksperymentu jest dostosowanie interfejsu użytkownika do poziomu medytacji, gdy użytkownik ma poziom medytacji określony przez algorytm eSense, powyżej zdefiniowanego progu. Obiekt badawczy, w tym eksperymentem jest podany akwizycji danych dotyczących poziomu medytacji, w tym samym czasie wskazywany jest postęp w warstwie interfejsu użytkownika, synchronizacja odbywa się na bieżąco. Następnie sprawdzany jest warunek przekroczenia zadanego progu poziomu medytacji. Analogicznie jak w przypadku eksperymentu z poziomem uwagi, w tym eksperymentem również, progi mierzone są za pomocą algorytmu eSense w skali 0-100 i dobierane według poziomu trudności wykonania eksperymentu. W momencie, gdy określony dla eksperymentu próg medytacji

(relaksacji) zostanie przekroczony, system dostosowuje interfejs użytkownika i kończy przebieg eksperymentu.



Rys. 3. Schemat blokowy drugiego eksperymentu: dostosowanie interfejsu użytkownika systemu do poziomu medytacji użytkownika.

Kontrola osiągniętego poziomu uwagi i medytacji w czasie rzeczywistym jest ważnym czynnikiem dla pomyślnego wykonania testu przez użytkownika. Na ekranie istnieje potrzeba umieszczenia wskaźnika postępu wykonanego zadania.

Biorąc pod uwagę powolną adaptację algorytmów eSense i ich zakresów wartości do użytkownika, istnieje potrzeba przeprowadzania eksperymentów na kilku progach wartości koncentracji i medytacji, aby móc ocenić skuteczność rozwiązania zarówno dla wartości podstawowych, jak i tych uważanych za nieznacznie podwyższone i podwyższone.

Aplikacja służąca do przeprowadzania testów posiada trzy predefiniowane poziomy ustawień – łatwy (ang. *easy*), średni (ang. *medium*) i trudny (ang. *hard*) definiujące poziomy trudności, na jakich użytkownik może wykonać test. Poza omawianymi, możliwe jest ustawienie alternatywnych wartości w trybie niestandardowym (ang. *custom*). Sposób prezentacji ustawień aplikacji znajduje się na schemacie (Rys. 4).

2.3 Grupa badawcza i sposób przeprowadzenia badań

Wstępne badania przeprowadzono na 4 osobowej grupie osób w młodym wieku. Planowano poszerzenie grupy badawczej w celu potwierdzenie poprawności wyników, jednak z powodu okoliczności (pandemia COVID-19, która miała wpływ na postęp prac badawczych), grupa wstępna stała się grupą docelową badań. Z tego powodu zaproponowano scenariusze testowe, które podniosły jakość badań dzięki zastosowaniu ustawień aplikacji i różnych poziomów trudności wykonywanych testów.

Każdy użytkownik wykonał co najmniej 5 testów aktywności umysłowej (odpowiednio test uwagi i medytacji) w oparciu o konfigurację – *ustawienia* - zaproponowaną w tabeli. Uczestnicy zostali poinformowani o możliwości ponownego przystąpienia do testu w przypadku problemów ze sprzętem lub oprogramowaniem, które mogą mieć wpływ na wyniki.

Poniższa tabela (Rys. 5) przedstawia konfigurację aplikacji do wykonywania eksperymentów dla testu uwagi (ang. *attention*) oraz medytacji (ang. *meditation*):

Za każdym razem, po wykonaniu działań odpowiadających obu badaniom, niezależnie od sukcesu bądź porażki wykonanej próby, system zapisuje wyniki w postaci sygnatury czasowej, średnich pomiarów poziomu uwagi i medytacji, flagi oznaczającej powodzenie bądź niepowodzenie badania, ustawionego poziomu trudności eksperymentu oraz czasu trwania eksperymentu w milisekundach.

Rys. 4. Ekran ustawień aplikacji służącej do przeprowadzania testów, wraz z predefiniowanymi wartościami.

Test Name	Setting level [%]				
	Easy	Medium	Hard	Custom1	Custom2
Attention	50	75	95	85	100
Meditation	50	75	95	85	100

Rys. 5. Konfiguracja ustawień eksperymentu uwagi i medytacji.

3. Wyniki i dyskusja

3.1 Przedstawienie wyników

Zebrano 48 wyników czynności na które składają się 24 zapisy czynności umysłowych należących do testu uwagi i 24 rekordy należące do testu medytacji.

Poniżej (Rys. 6 i Rys. 7) przedstawione zostaną statystyki dotyczące wskaźników sukcesu i niepowodzeń dla obu testów.

Setting Level	Setting Threshold Value [%]	Attempt count	Successes	Failures	Success rate	Failure rate
EASY	50	6	6	0	100%	0%
MEDIUM	75	5	5	0	100%	0%
CUSTOM_85	85	5	4	1	80%	20%
HARD	95	4	2	2	50%	50%
CUSTOM_100	100	4	1	3	25%	75%
TOTAL:		24	18	6	75,00%	25,00%

Rys. 6. Wyniki testu uwagi - wskaźniki sukcesu i niepowodzenia.

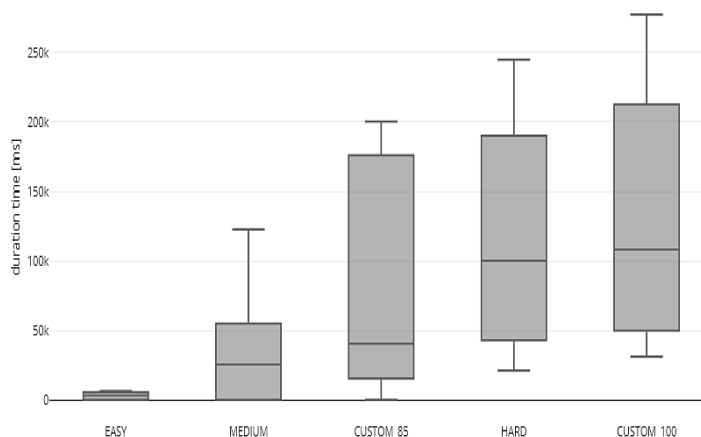
Poziomy „łatwy” i „średni” miały najwyższe wskaźniki sukcesu - 100%. Podobnie wysoki wynik uzyskano dla poziomu „niestandardowego” z progiem 85. Tylko jedna próba zakończyła się niepowodzeniem, co daje 80% skuteczności. Znaczący spadek wskaźnika sukcesu odnotowano w próbach z progiem trudności 95 i 100 - „trudnym” i drugim „niestandardowym” poziomem. W przypadku poziomu „trudnego” sukcesy i porażki wynosiły po 50%, co można uznać za poziom graniczny wykonania zadania, natomiast na poziomie najwyższym - „niestandardowy” z progiem 100 - wskaźnik sukcesu wyniósł tylko 25%. Globalnie, w przypadku eksperymentu dot. poziomu uwagi wskaźnik sukcesu wyniósł 75%, co można uznać za dobry wynik.

Setting Level	Setting Threshold Value [%]	Attempt count	Successes	Failures	Success rate	Failure rate
EASY	50	5	5	0	100%	0%
MEDIUM	75	5	5	0	100%	0%
CUSTOM_85	85	5	5	0	100%	0%
HARD	95	4	2	2	50%	50%
CUSTOM_100	100	5	2	3	40%	60%
TOTAL:		24	19	5	79,17%	20,83%

Rys. 7. Wyniki testu medytacji (relaksacji) - wskaźniki sukcesu i niepowodzenia.

Całkowity współczynnik powodzenia wszystkich prób w drugim eksperymencie jest wyższy niż w eksperymencie dot. poziomu uwagi i wynosi 79,17%. Ogólny wskaźnik niepowodzenia wynosi 20,83%. W teście medytacji istnieją 3 poziomy z 100% skutecznością: „łatwy”, „średni” i „niestandardowy” z progiem 85. Poziom graniczny dla łatwości wykonania zadania jest dość podobny do testu uwagi, ponieważ w teście medytacji na „trudnym” poziomie wskaźniki sukcesu i niepowodzenia również wynoszą 50%. Na najwyższym poziomie trudności, w teście medytacji, widać poprawę wyników. Współczynnik sukcesu dla „niestandardowego” poziomu z progiem 100 wynosi 40%, co jest znacznie lepszym wynikiem, niż odpowiadający wynik na tym poziomie w teście uwagi.

Na podstawie intuicji można było przewidzieć, że wraz ze wzrostem poziomu trudności zadania wydłużał się również czas trwania eksperymentu. Wykres pudełkowy dla eksperymentu związanego z poziomem uwagi (Rys. 8) pokazuje również, że wartość czasu trwania dla poziomu „łatwego” jest znacznie krótsza niż dla innych poziomów w tym teście.

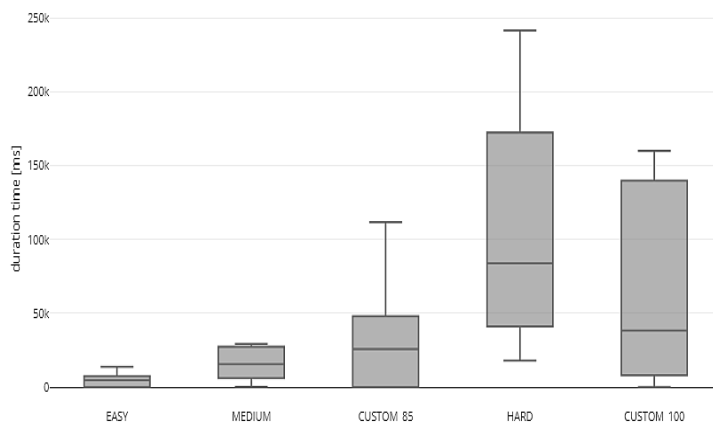


Rys. 8. Wykres pudełkowy czasu trwania na różnych poziomach ustawień - Test uwagi.

Podobnie jak w teście uwagi, w przypadku testu dot. poziomu relaksacji (medytacji) wprowadzono analizę czasu trwania eksperymentów pod względem poziomów trudności.

Poprawa wyników testu medytacji na najwyższym „niestandardowym” poziomie z progiem 100 jest również widoczna na wykresie pudełkowym czasów trwania (Rys. 9). Okazuje się, że

eksperymenty na poziomie „trudnym” trwały najdłużej i jednocześnie przyjmowały najszerszy zakres wartości. Mediana dla poziomu „trudnego” jest większa niż mediana dla poziomu „niestandardowego” z progiem 100. Mediany innych poziomów wykazują tendencję wzrostową zgodnie z rosnącymi progami. Podobnie jak w przypadku testu uwagi, poziom „łatwy” ma najkrótszy czas trwania w porównaniu ze wszystkimi poziomami.



Rys. 9. Wykres pudełkowy czasu trwania na różnych poziomach ustawień - Test medytacji.

3.2 Dyskusja wyników

Aby sprawnie zbudować mechanizm sterujący w aplikacji mobilnej z wykorzystaniem interfejsu mózg-komputer, należy stosować tylko te progi trudności, które są dobrze tolerowane przez większość użytkowników. Na podstawie przeprowadzonych badań można również stwierdzić, że poziom trudności należy korygować osobno w testach dotyczących poziomu uwagi i relaksacji na podstawie wartości obliczonych za pomocą algorytmów eSense urządzenia NeuroSky MindWave Mobile 2, ponieważ: w teście uwagi wyraźnie niższy poziom trudności sprawiał użytkownikom problemy, niż w przypadku eksperymentu z poziomem relaksacji. Nawet przy najwyższych ustawieniach testu relaksacji umysłowej użytkownika, co oznaczało uchwycenie poziomu medytacji na maksymalnej wartości, większość badanych nie miała problemu z osiągnięciem wyniku w zadowalającym czasie.

Ważnym aspektem, który może również pośrednio wpływać na wyniki testów, jest rozpraszanie uwagi przez otoczenie. Badani zgłaszali wysokie wskazania na wielkość zakłóceń z otoczenia zewnętrznego podczas wykonywania testów. Wynikają one z tego, że eksperymenty nie były prowadzone w warunkach laboratoryjnych, w specjalnie przygotowanych pomieszczeniach, tylko w warunkach domowych. Takie podejście odzwierciedlało naturalne środowisko stosowania proponowanego rozwiązania, czyli codziennego sterowania aplikacją mobilną z wykorzystaniem BCI.

W trakcie obserwacji eksperymentów odnotowano rozproszenia w postaci:

- dźwięków przedmiotów codziennego użytku z otoczenia
- obecności innych osób w przestrzeni badania/badanego
- alarmu w telefonie komórkowym, który został uruchomiony podczas badania
- wygaszanego ekranu telefonu komórkowego badanej osoby ze względu na automatyczny tryb oszczędzania energii.

Jednak, jak widać z przeważającej liczby udanych prób w przeprowadzonych eksperymentach, te rozproszenia nie miały większego wpływu na powodzenie badania.

4. Wnioski

Po konsultacjach z uczestnikami eksperymentów, stwierdzono, że badania okazały się dla nich satysfakcjonujące i dostrzegają w nich potencjał rozwojowy. Nawet pomimo statystycznie

adekwatnej liczby sukcesów w przeprowadzonych testach warto wziąć pod uwagę opinie użytkowników jako głównych odbiorców rozwiązania, zadowolenie z takiego podejścia do sterowania aplikacją mobilną, a także rzeczywisty wpływ na aktywną pomoc w codziennych operacjach, uruchamianie automatycznych zadań lub zwiększanie wygody codziennego życia.

Biorąc pod uwagę dynamiczną ewolucję systemów BCI i rosnącą popularność nisko kosztowych rozwiązań dla masowego użytku, opracowane zagadnienia i wykonane eksperymenty badawcze mogą przyczynić się do popularyzacji modelu sterowania aplikacją mobilną w oparciu o interfejs mózg-komputer we wdrażanych na rynku aplikacjach mobilnych.

5. Literatura

- Chodak J, Broniec A (2009) Sterowanie prostym urządzeniem elektrycznym za pomocą sygnału EEG. *Automatyka*, 13(3), Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie.
- Katona J, Farkas I, Ujbanyi T et al. (2014) Evaluation of the Neurosky Mindflex EEG headset brain waves data. *IEEE 12th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI)*, 91–94
- Nawrocka A, Holewa K (2014) Sterowanie robotem mobilnym z wykorzystaniem sygnału eeg — controlling the mobile robot using EEG signal. XI konferencja naukowa Majówka Młodych Biomechaników im. prof. Dagmary Tejszerskiej
- NeuroSky. Mindwave mobile 2 available now improved comfort. <http://neurosky.com/2018/06/mindwave-mobile-2-available-now-improved-comfort/>. Dostęp: 2020-10-24.
- Neurosky. Neurosky official site. <http://neurosky.com>. Dostęp: 2020-10-24
- Paszkiel S (2015) Akwizycja sygnału EEG przy użyciu neurosky mindwave mobile na potrzeby procesów sterowania realizowanych z poziomu systemu android. *Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering*, 84:237–244
- Wikipedia. Interfejs mozg–komputer. https://pl.wikipedia.org/wiki/Interfejs_mozg-komputer. Dostęp: 2020-10-24.
- Zmarzły S, Szmechta M, Paszkiel S i in. (2007) Analiza sygnału elektroencefalograficznego EEG jak medium pośredniczące w procesie komunikacji BCI. *Politechnika Opolska Wydział Elektrotechniki Automatyki i Informatyki Instytut Elektroenergetyki*

2. Standardy wytwarzania oprogramowania wbudowanego w branży motoryzacyjnej

Embedded software development standards in automotive industry

Marek Brykczyński

Katedra Silników Spalinowych i Pojazdów, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej

Marek Brykczyński : mb000208@student.ath.edu.pl

Słowa kluczowe: AUTOSAR, Automotive SPICE, ISO 26262, bezpieczeństwo funkcjonalne

Streszczenie

Wytwarzanie oprogramowania wbudowanego w branży motoryzacyjnej spełniającego wymagania standardów takich jak AUTOSAR, Automotive SPICE i ISO 26262, MISRA-C 2012, HIS, CERT-C 2016.

1. Wstęp

Współczesne pojazdy samochodowe wyposażone są w szereg systemów wspomagających kierowcę oraz zwiększających komfort jazdy. Każdy z tych systemów sterowany jest poprzez jednostkę kontrolną elektroniki ECU (ang. Electronics Control Unit), która zawiera w sobie mikrokontroler oraz inne peryferia. Każda jednostka kontrolna elektroniki musi być zaprogramowana, wobec tego wytworzone musi zostać dla niej oprogramowanie wbudowane, unikalne dla każdego układu elektronicznego w samochodzie. W zależności od klasy (segmentu) samochodu ilość jednostek kontrolnych będzie różna. W przypadku samochodu klasy premium liczba jednostek kontrolnych zawiera się w przedziale 70 do 100. Dla samochodów niższych klas liczba zawiera się w przedziale 30 do 50 (Charette RN 2009). W branży motoryzacyjnej oprogramowanie wbudowane wytwarzane jest w zgodzie szeregiem standardów branżowych, wymagane jest to między innymi przez producentów pojazdów samochodowych.

Tab. 1. Standardy dotyczące wytwarzania oprogramowania w branży motoryzacyjnej.

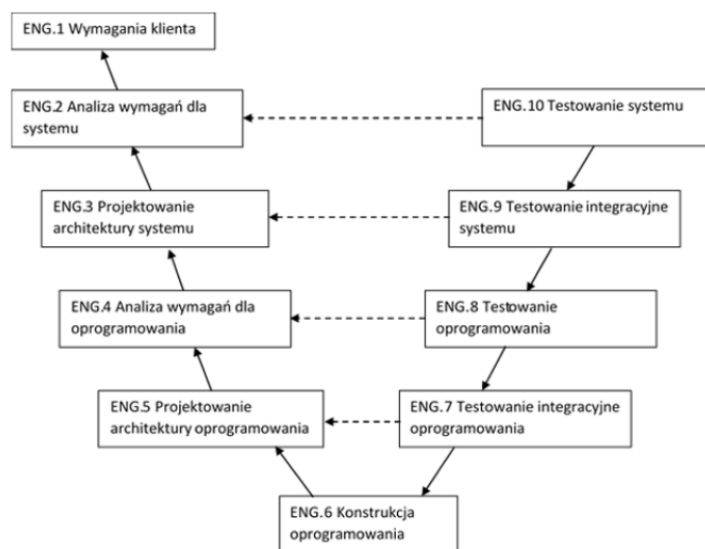
Lp.	Standard	Znaczenie
1	ASPICE (Automotive Software Process Improvement and Capability dEtermination)	Definicja procesu wytwarzania oprogramowania i wyznaczania jego zdolności
2	AUTOSAR (Automotive Open System Architecture)	Otwarta architektura systemu
3	ISO 26262 Part 6	Bezpieczeństwo funkcjonalne
4	ISO 17356 OSEK/VDX	System operacyjny
5	ISO 14229 UDS (Unified Diagnostics Services)	Serwisy diagnostyczne
6	MISRA C 2012 (Motor Industry Software Reliability Association)	Standard tworzenia oprogramowania w branży motoryzacyjnej mający na celu przeciwdziałanie działaniu kodu innego niż zamierzone
7	CERT-C	Standard wytwarzania oprogramowania w zakresie minimalizacji słabości w obszarze cyberbezpieczeństwa

2. Przegląd standardów

2.1 Automotive SPICE

Standard Automotive SPICE definiuje proces wytwarzania oprogramowania. Punktem wejściowym do tego procesu są wymagania klienta, które następnie dekomponowane są do poziomu wymagań systemowych i wymagań oprogramowania. Wyróżnione w tym procesie są etapy tworzenia zarówno architektury systemu i oprogramowania.

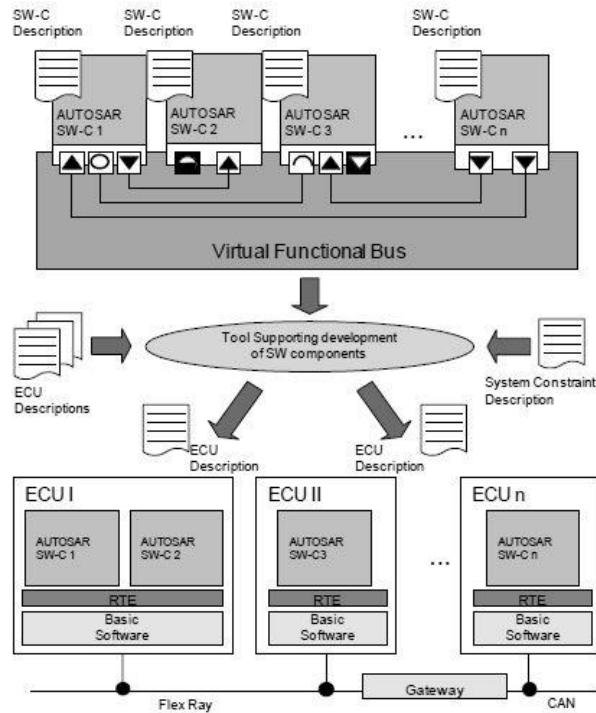
Na Rys.1. przedstawiony został model V wytwarzania oprogramowania (PAM 2.5 – ang. Process Assessment Model). Model V definiuje zarówno śledzenie wertykalne jak/i horyzontalne. Śledzenie wertykalne ma na celu wskazanie na podstawie jakich wymagań oprogramowania powstał dany komponent architektury oprogramowania oraz na podstawie których wymagań klienckich powstały dane wymagania oprogramowania. Śledzenie horyzontalne ma na celu wskazanie za pomocą jakich scenariuszów na i jakim poziomie odbyło się sprawdzenie zgodności z wymaganiami/architekturami. Na poziomie testów integracyjnych sprawdza się zgodność z architekturą oprogramowania. Poziom testów oprogramowania sprawdza zgodność z wymaganiami oprogramowania. Poziom testów integracyjnych systemu weryfikuje jego zgodność z założoną architekturą systemu. Testy systemowe sprawdzają czy wymagania systemowe są spełnione. Model V wymaga aby każdy pojedynczy przypadek testowy był połączony wprost do wymagania wobec którego sprawdza poprawność implementacji.



Rys. 1. Model V wytwarzania oprogramowania (Automotive SPICE PAM 2.5).

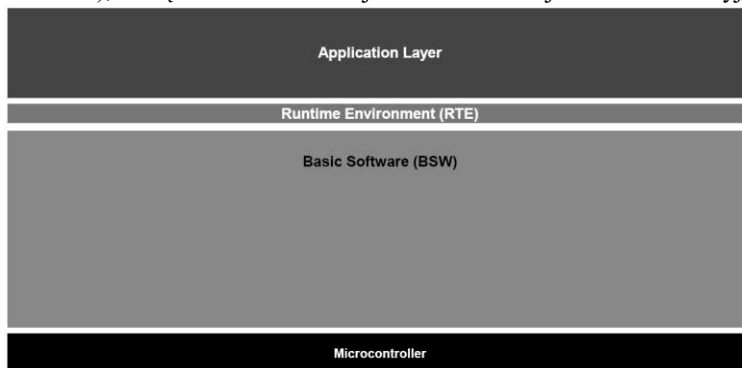
2.2 AUTOSAR

Standard AUTOSAR definiuje architekturę systemów w branży motoryzacyjnej. Pierwsze prace nad standardem AUTOSAR rozpoczęły się w sierpniu 2002 roku. Główni partnerzy tworzący ten standard to producenci samochodów, dostawcy pierwszego poziomu, producenci półprzewodników, dostawcy oprogramowania i wiele innych. Spośród głównych partnerów wymienić można takie firmy jak: BMW Group, BOSCH, Continental, DAIMLER, Ford, GM, PSA Peugeot Citroen, TOYOTA, Volkswagen. Pomimo faktu że wymienione firmy są rywalami rynkowymi, stworzenie wspólnego standardu motywowane jest ideą: „Pracujmy wspólnie nad standardami. Rywalizujemy poprzez implementację (ang. Work together on standards. Compete on implementation)” (AUTOSAR 2015). Na Rys.2. przedstawiony został koncept wirtualnej magistrali funkcyjnej wykorzystywanej do alokacji funkcjonalności do jednostek ECU na poziomie projektowania architektury samochodu.



Rys. 2. Wirtualna magistrala funkcyjna (ang. Virtual Functional Bus)(AUTOSAR 2015).

Z wykorzystaniem VBF funkcjonalności alokowane są do jednostek kontrolnych w oderwaniu od rzeczywistych magistral komunikacyjnych, takich jak CAN, CAN FD, FlexRay. Alokacja funkcjonalności odbywa się na poziomie warstwy aplikacji, niezależnie od warstwy sprzętowej. Na Rys.3. przedstawione zostały podstawowe warstwy AUTOSAR. Warstwa aplikacji (ang. Application Layer) jest całkowicie niezależna od sprzętu. Za interakcję z sprzętem odpowiedzialna jest warstwa podstawowego oprogramowania (ang. BSW Basic Software). Warstwa aplikacji (APP) komunikuje się z warstwą BSW poprzez warstwę środowiska czasu pracy RTE (ang. Run Time Environment), którą można rozumieć jako zbiór interfejsów komunikacyjnych.



Rys. 3. Wysokopoziomowa dekompozycja warstw oprogramowania w AUTOSAR (AUTOSAR 2015).

2.3 Bezpieczeństwo funkcjonalne ISO 26262 – część 6

W zakresie urządzeń bezpieczeństwa w branży motoryzacyjnej zarówno system jak/i oprogramowanie wytwarzane są zgodnie z normą ISO 26262.

W przypadku oprogramowania jest to część szósta wspomnianego dokumentu. Specyfikacja ta definiuje proces oraz rekomendacje w jaki sposób powinny być rozwijane poszczególne

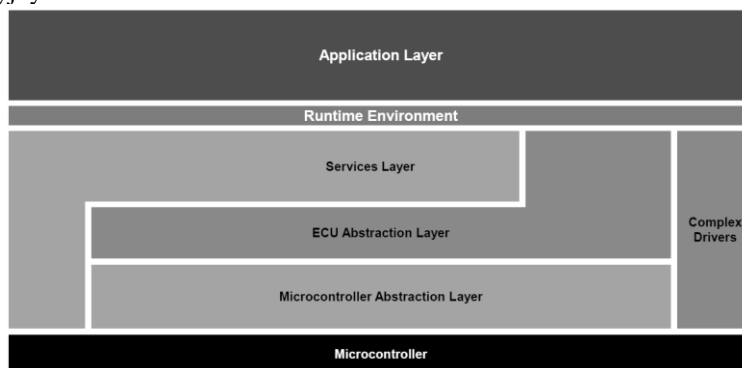
funkcjonalności w odniesieniu do ich poziomu ASIL (ang. Automotive Safety Integrity Level). W Tab.2. przedstawione jest porównanie zakresów poziomu bezpieczeństwa z różnych norm branżowych w przemyśle (Verhulst i Sputh 2013). Poziom ASIL poprzez zastosowanie analogii do istniejących jednostek miar, takich jak na przykład metr na sekundę, można interpretować jako miarę redukcji ryzyka. Standard ISO 26262 między innymi rekomenduje następujące praktyki: zapewnienie niskiego poziomu złożoności cyklometrycznej (w przypadku warunków logicznych jest liczba liniowo niezależnych od siebie ścieżek), analizę statyczną kodu, analizę dynamiczną kodu w odniesieniu do przestrzegania „legalnych” zakresów sygnałów, procedury recenzji i inspekcji kodu, przeprowadzanie testów jednostkowych, przeprowadzanie testów integracyjnych, badanie pokrycia kodu, badanie pokrycia MC/DC (ang. Modified Condition Decision Coverage) tj. sprawdzenie czy w każdym wyrażeniu logicznym pojedynczy wyraz wpływa na końcowy rezultat. Każda z wymienionych przykładowych rekomendacji musi być udokumentowana.

Tab.2. Zestawienie norm bezpieczeństwa funkcjonalnego i zdefiniowanych poziomów.

Standard	Poziom bezpieczeństwa funkcjonalnego od najniższego (lewo) do najwyższego (pravo)				
Programowalna elektronika (IEC-61508)	SIL-0	SIL-1	SIL-2	SIL-3	SIL-4
Motoryzacja (ISO 26262)	ASIL-A	ASIL-B	ASIL-C	ASIL-D	-
Lotnictwo (DO-178/254)	DAL-E	DAL-D	DAL-C	DAL-B	DAL-A
Kolejnictwo (CENELEC 50126/128/129)	SIL-0	SIL-1	SIL-2	SIL-3	SIL-4

2.4 System operacyjny OSEK/VDX – ISO 17356

Opisany w jednym z poprzednich podpunktów AUTOSAR w dokładniejszej dekompozycji warstwy oprogramowania podstawowego definiuje podwarstwę serwisów systemowych a w niej system operacyjny.



Rys. 4. Dokładniejsza dekompozycja warstwy BSW oprogramowania w AUTOSAR.

System operacyjny OSEK/VDX (niem. Offene Systeme und deren Schnittstellen für die Elektronik in Kraftfahrzeugen, ang. Vehicle Distributed eXecutive) jest systemem statycznym, tj. wszystkie występujące w nim wątki, stopy i mechanizmy wzajemnej ekskluzji są zdeterminowane na etapie konfiguracji a następnie kompilacji oprogramowania. W systemie OSEK/VDX nie występuje dynamiczne tworzenie i alokacja zadań.

2.5 Zunifikowane serwisy diagnostyczne (UDS) – ISO 14229

Standard UDS definiuje protokół wymiany informacji diagnostycznych pomiędzy jednostką kontrolną elektroniki a urządzeniem zewnętrznym. Za pomocą zunifikowanych serwisów diagnostycznych. Serwisami UDS można z urządzenia uzyskać szereg danych takich jak kody

błędów, zrzuty parametrów środowiskowych zapisanych wraz z wystąpieniem błędu, parametry inżynierskie. Dodatkowo w zależności od uprawnień danej sesji diagnostycznej oraz poziomu dostępu, w jednostce wywoływać można różne procedury kalibracyjne niezbędne podczas procesu produkcji. Nawet pomimo posiadania odpowiednich uprawnień w nawiązanym już połączeniu z jednostką elektroniki, dostęp do części serwisów może zostać odrzucony w przypadku gdy prędkość pojazdu samochodowego jest różna od zera kilometrów na godzinę. Pojazdy opuszczające linię produkcyjną posiadają zablokowany i zabezpieczony dostęp części serwisów. Autoryzowane stacje obsługi w zależności od producenta samochodu mogą posiadać rozszerzony dostęp do części serwisów.

Tab. 3. Przykładowe serwisy UDS.

Serwis	Meaning	Znaczenie
0x10	DiagnosticSessionControl	Kontrola sesji diagnostycznej
0x3E	TesterPresent	Tester obecny
0x11	ECUReset	Żądanie resetu jednostki
0x14	ClearDiagnosticInformation	Kasowanie pamięci błędów
0x19	ReadDTCInformation	Czytanie pamięci błędów
0x22	ReadDataByIdentifier	Czytaj dane wg identyfikatora
0x2E	WriteDataByIdentifier	Zapisz dane wg identyfikatora

Lista serwisów przedstawiona w Tab.3. ograniczona jest do tylko kilku wybranych głównych funkcji, dla większości z serwisów UDS zdefiniowane są jeszcze podfunkcje. Pełen zestaw informacji dostępny jest w standardzie ISO 14229.

2.6 MISRA C 2012

Obecnie obowiązującym w branży motoryzacyjnej standardem dotyczącym zastosowania języka C w systemach bezpieczeństwa jest MISRA-C 2012, standard ten jest już trzecim wydaniem, poprzednie to MISRA-C 1998 i MISRA C 2004. Umotywowaniem do wydania pierwszego standardu w roku 1998 było obserwowane w przemyśle samochodowym zwiększające się zastosowanie języka C w systemach czasu rzeczywistego, które wynikało z jego dostępności pod różne platformy sprzętowe. Dodatkowo język C jest niezależny od platformy sprzętowej w odróżnieniu od assemblera. Ta niezależność jak/i możliwość ponownego użycia części oprogramowania w zupełnie innych platformach sprzętowych jeszcze bardziej go rozpowszechniała. Celem standardu MISRA jest zredukowanie ilości błędów wynikających z niepoprawnego zastosowania języka programowania oraz jego nieścisłości. Główne grupy błędów to: błędy programisty, niepoprawne zrozumienie języka przez programistę, kompilator nie wykonuje tego co jest oczekiwane przez programistę, kompilator zawiera błędy i błędy w trakcie wykonywania programu (MISRA 2012). Przykładem może być poniższy kawałek pseudokodu

```
#define TRUE 1U
if (isBrakingRequested = TRUE){
    brake();}
else{
    doNothing();}
```

Z punktu widzenia kompilatora powyższy kawałek kodu jest jak najbardziej poprawny, jednak jego zachowanie jest zgoła inne od zamierzonego. Jest to podyktowane błędem w warunku logicznym if, gdzie zamiast porównania logicznego („==”) zrealizowana jest operacja przypisania („=”). W konsekwencji program nigdy nie wykona instrukcji else wyrażenia logicznego. Nowocześniejsze kompilatory mają możliwość przeprowadzania analizy statycznej kodu w trakcie kompilacji, w zależności od ustawień projektu można otrzymać ostrzeżenie lub błąd w trakcie budowania oprogramowania.

2.7 Metryki oprogramowania HIS

HIS (niem. Hersteller initiative Software, ang. Manufacturer's software initiative) to inicjatywa wytwórców w zakresie oprogramowania. Pięć grup roboczych od producentów samochodów Audi, BMW Group, DaimlerChrysler, Porsche i Volkswagen, których celem jest stworzenie uzgodnionych standardów w zakresie standardowych modułów oprogramowania dla sieci, opracowanie dojrzałości procesu, testów oprogramowania, narzędzi wytwórczych oprogramowania i programowania ECU. Metryki oprogramowania są podstawą skutecznego zarządzania projektami i jakością. Za pomocą metryk oprogramowania można oszacować jakość oprogramowania i proces jego rozwoju (Kuder 2008).

Tab. 4. Wybrane metryki HIS.

Metryka	Znaczenie	Wartość max
Liczba ścieżek "PATH"	Liczba niepowtarzalnych ścieżek	0 do 80
Liczba wyrażeń "GOTO"	Liczba skoków bezwarunkowych	0
Złożoność cyklotematyczna "v(G)"	Liczba liniowo niezależnych cykli w grafie reprezentującym kod $v(G) = E - N + 2P$	1 do 10
Liczba wywoływanych funkcji "CALLS"	Liczba wywołań innych funkcji (powtarzne wywołanie nie jest wliczane)	0 do 7
Liczba parametrów funkcji "PARAM"	Ilość wejściowych argumentów przekazywanych do funkcji	0 do 5

Na podstawie Tab.2. przeanalizowany zostanie poniższy pseudokod

```

if (1 == a){
    funkcja1();}
else{
    funkcja2();}
if (2 == b){
    funkcja3(1, 1, 2, 3);}
else{
    funkcja2();}
    
```

Metryki HIS dla powyższego wycinka kodu są następujące: PATH = 4, GOTO = 0. $v(G) = 3$, CALLS = 3, PARAM = 4. Analizowany przykład funkcji jest stosunkowo prosty, jednak na podstawie metryk niektóre jego wskaźniki zbliżają się do maksymalnych wartości dopuszczalnych (PARAM) a inne osiągnęły prawie jedną trzecią dopuszczalnego progu ($v(G)$). Wart nadmienienia jest fakt, że żadna metryka nie może być przekroczona w kodzie produkcyjnym. Zastosowanie tego typu metryk dla komponentów oprogramowania wynika z wymagań normy ISO 26262, która mocno zaleca ograniczanie stopnia skomplikowania kodu jako mechanizm zmniejszający prawdopodobieństwo występowania w nim defektów.

2.8 CERT-C

Cyberbezpieczeństwo jest jednym z kluczowych aspektów w przemyśle motoryzacyjnym. Idea tworzenia standardu narodziła się w 2006 roku podczas posiedzenia komitetu standaryzującego język C (formalnie ISO/IEC JTC1/SC22/WG14) (Seacord w 2013, SEI CERT w 2016). Współczesne samochody wyposażone są w odpowiednie urządzenia komunikacyjne pozwalające na wgranie do nich nowszych wydań oprogramowania bez konieczności wizyty w autoryzowanej stacji obsługi, z języka angielskiego procedura ta nazywa się on-the-fly. Standard CERT-C ukierunkowany

jest głównie na zabezpieczone techniki programowania w języku C, których celem jest usunięcie fragmentów kodu będących wrażliwych na wyciek informacji lub intencjonalne wymuszenia zewnętrzne powodujące niepoprawne działanie (Mathworks 2021).

a)	b)
<pre>enum { TABLESIZE = 100 }; static int table[TABLESIZE]; int *f(int index) { if (index < TABLESIZE) { return table + index; } return NULL; }</pre>	<pre>enum { TABLESIZE = 100 }; static int table[TABLESIZE]; int *f(int index) { if (index >= 0 && index < TABLESIZE) { return table + index; } return NULL; }</pre>

Rys.5. Przykładowy kawałek kodu a) niepoprawny b) poprawny (SEI CERT 2016).

Przedstawione na Rys.5. przykładowe wycinki kodu obrazują zasadę standardu CERT ARR-30C, która wymaga aby nie tworzyć lub używać wskaźników które wykraczają poza obszar tablicy (SEI CERT 2016). Wycinek kodu przedstawiony na Rys.5a. posiada słabość w postaci akceptowania argumentu funkcji który pozwoli na „wyskoczenie” wskaźnikiem poza obszar pamięci w której znajduje się tablica, która jest zdefiniowana jako obiekt prywatny dla modułu w którym jest zaalokowana. Analizowana funkcja f zwraca wskaźnik do obiektu w pamięci, wobec tego, niezabezpieczona odpowiednio może doprowadzić do wycieku informacji. Na Rys.5b. przedstawiona została przykładowa implementacja rozwiązania tego problemu. Z uwagi na fakt że funkcji pobiera jako argument zmienną znakową integer, istnieje możliwość że zostanie wywołana z wartością ujemną w tym miejscu, będzie to skutkowało przesunięciem się przed adres początkowy tablicy. Dodatkowo funkcja powinna być odporna na wyjście poza jej adres końcowy.

3. Podsumowanie

Zakres wymagań z jakimi związane jest tworzenie oprogramowania w przemyśle samochodowym obrazuje jak pracochłonne jest to zagadnienie. Wszystkie zebrane w tym opracowaniu standardy są rezultatem wielu lat doświadczeń inżynierów, stosowanie ich jest jak najbardziej zasadne. Zgrubnie pogrupować je można na: procesowe, systemowe i jakościowe. Celem standardów procesowych i jakościowych jest ukierunkowanie wytwarzania oprogramowania w taki sposób aby finalny kod był: pozbawiony defektów, nie skutkował awariami urządzeń oraz był łatwy do dalszego rozwoju (utrzymania). Odbywa się to poprzez usystematyzowany proces rozwoju produktu mający swój punkt początkowy na etapie dekompozycji wymagań klienta, kolejno: tworzenie wymagań systemowych i architektury systemu, tworzenie wymagań oprogramowania i architektury oprogramowania, konstrukcji oprogramowania wraz z testami jednostkowymi, testów integracyjnych oprogramowania, testów oprogramowania, testów integracyjnych systemu i testów systemu. Zgodność z standardami jakościowymi takimi jak: MISRA-C 2012, CERT-C 2016 i metryki HIS realizowane jest poprzez wykonywanie analiz statycznych i dynamicznych oprogramowania, które dostarczają wyniki o miejscach potencjalnych błędów tak, aby można było je sprawdzić i naprawić przed wydaniem oprogramowania. Standardy systemowe unifikują sposoby zachowania się finalnych urządzeń oraz ich interakcję z środowiskiem zewnętrznym. Standard AUTOSAR definiuje wspólną architekturę systemu dla całego przemysłu samochodowego, oznacza to, że zarówno producenci pojazdów samochodowych jak podwykonawcy wraz z możliwymi kontrahentami dostarczają ustandaryzowane oprogramowanie w zakresie modułów zdefiniowanych w AUTOSAR. W zależności od funkcjonalności danego urządzenia oraz platformy sprzętowej występować będą różnice. Przykładem różnic niech będzie jednostka kontrolna ECU 1 wyposażona w magistralę

FlexRay i jednostka kontrolna ECU 2, są one wyposażone w inny zestaw modułów AUTOSAR do obsługi magistral.

4. Literatura

- AUTOSAR (2015) Virtual Functional Bus. AUTOSAR 4.2
AUTOSAR (2015) Layered Software Architecture. AUTOSAR 4.2
Automotive SIG (2010) Automotive SPICE Process Reference Model
Charette RN (2009) This Car Runs on Code. IEEE Spectrum
MISRA (2012). Guidelines for the use of the C language in critical systems. MISRA-C:2012
ISO 14229-1 Road vehicles — Unified diagnostic services (UDS)
Kuder H (2008) HIS Source Code Metrics
Mathworks (2021.02.01) <https://www.mathworks.com/discovery/cert-c.html>
Seacord RC (2013) C Secure Coding Rules: Past, Present, and Future. InformIT
SEI CERT (2016) C Coding Standard Rules for Developing Safe, Reliable, and Secure Systems
Verhulst E, Spith BHC (2013) ARRL: A criterion for compositional safety and systems engineering: A normative approach to specifying component. Software Reliability Engineering Workshops (ISSREW), 2013 IEEE International Symposium
Watson AH, McCabe TJ (1996) A Testing Methodology Using the Cyclomatic Complexity Metric, NIST Special Publication 500-235

3. Dzisiejsze systemy nawigacji satelitarnej

Today's satellite navigation systems

Bartłomiej Dziewoński

ORCID ID: 0000-0003-3106-5969

Akademicki Klub Lotniczy, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Politechnika Wrocławska

Opiekun naukowy: Dr inż. Marek Głogowski

Wiesław Wędrychowicz: marek.glogowski@pwr.edu.pl

Słowa kluczowe: radiolatarnia, pozycjonowanie, segment kosmiczny, GPS, Galileo

Streszczenie

W tej pracy zostaną przedstawione zasady działania radionawigacyjnych systemów nawigacyjnych szczególnie tych wykorzystujących segment kosmicznych czyli tzw. systemów nawigacji satelitarnej. O mówione zostaną schematy nadawania i odbierania sygnałów doprowadzające do uzyskania informacji o położeniu obiektu na powierzchni ziemi. Omówiony zostanie rozwój systemów nawigacji satelitarnej na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat.

Przeprowadzony zostanie przegląd istniejących systemów nawigacji satelitarnej oraz tych aktualnie powstających. Systemy zostaną przeanalizowane pod kątem innowacyjności rozwiązań, zasięgu operacyjnego, wielkości danego systemu oraz kosztów i zaplecza technologicznego, które pochłonął projekt systemu i doprowadzenie go do gotowości operacyjnej.

1. Wstęp

Jednym z fundamentalnych problemów, z jakimi musi się mierzyć człowiek udający się w jakąkolwiek podróż jest problem lokalizacji. Przez całe wieki ludzi stosowali różne metody nawigacji w oparciu o obserwację rzeźby terenu czy układów gwiazdnych. W dzisiejszych czasach określić pozycję człowieka realizujemy przez określenie współrzędnych względem punktów orientacyjnych, takie określanie lokalizacji możemy realizować przez:

- a) Pomiar dwóch kątów
- b) Pomiar odległości
- c) Pomiar kąta i odległości
- d) Pomiar stosunku odległości statku powietrznego do co najmniej dwóch par radiolatarni
- e) Zliczenie zmian współrzędnych obiektu, począwszy od punktu o znanych współrzędnych.

Skupiając się zatem na samej metodyce określania położenia możemy wydzielić następujące rodzaje systemów nawigacyjnych:

- a) Kątowe
- b) Odległościowe
- c) Odległościowo-kątowe
- d) Hiperboliczne
- e) Zliczeniowe.

Mówiąc jednak o sposobach nawigacji w lotnictwie bardziej praktycznym będzie wyróżnienie systemów nawigacji według odrębnej klasyfikacji z podziałem na:

- a) Systemy średniego i bliskiego zasięgu
- b) Systemy radionawigacyjne dalekiego zasięgu
- c) Satelitarne systemy radionawigacyjne
- d) Urządzenia do nawigacji bezwładnościowej
- e) Systemy lądowania przy ograniczonej widoczności.

Każdy z systemów jest reprezentowany przez różne systemy nawigacyjne różnego pokolenia. W ostatnim dwudziestolecu rozwój metod nawigacji idzie w kierunku znacznego zwiększenia znaczenia sygnałów odbieranych w ramach systemów nawigacji satelitarnej. Systemy te

bowiem swoją ogromną precyzją postrzegane są jako „panaceum” na wszelkie problemy z systemami nawigacyjnymi i radiolatarniami obecnymi wyłącznie na powierzchni ziemi.

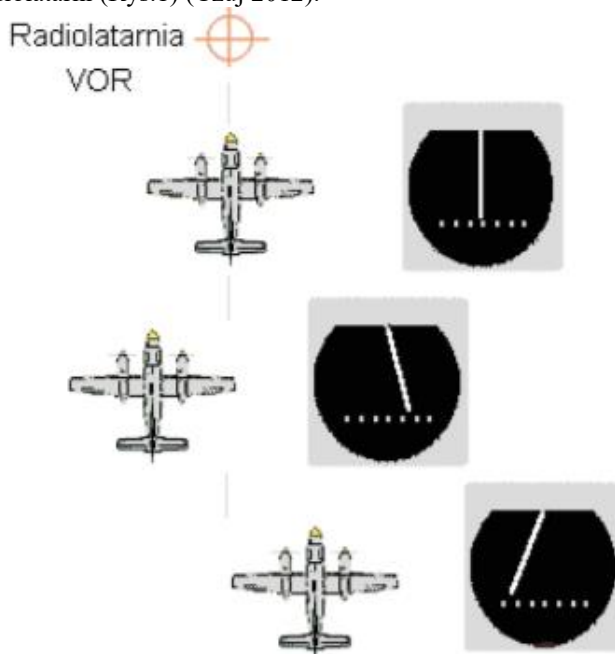
W celu lepszego zrozumienia działania systemu nawigacji należałoby omówić zasadę działania systemów radionawigacji na podstawie których będziemy mieli odniesienie do pojęć stosowanych w przypadku radionawigacji satelitarnej omówionej w dalszej części pracy.

2. Opis zagadnienia

Rozpoczynając opis systemów radionawigacyjnych należałoby zacząć od systemu VOR. Jest to rodzaj radiolatarni stosowanej w lotnictwie wykorzystującej pasmo radiowe. W sygnale emitowanym z radiolatarni tego typu przeznaczona jest informacja azymutalna (Czuj 2012). W ten sposób przyrządy pokładowe mogą wyeksponować takie informacje jak:

- a) Namiar magnetyczny statku powietrznego od radiolatarni
- b) Osiągnięcie żądanego namiaru do lub od radiolatarni
- c) Minięcie radiolatarni
- d) Identyfikator radiolatarni.

Działanie tego systemu w prosty sposób można porównać do latarni morskiej, która nadaje nie tyle sygnał świetlny a radiowy. Radiolatarnia bowiem nadaje wiązkę sygnału radiowego, która obraca się wokół radiolatarni (Rys.1) (Czuj 2012).

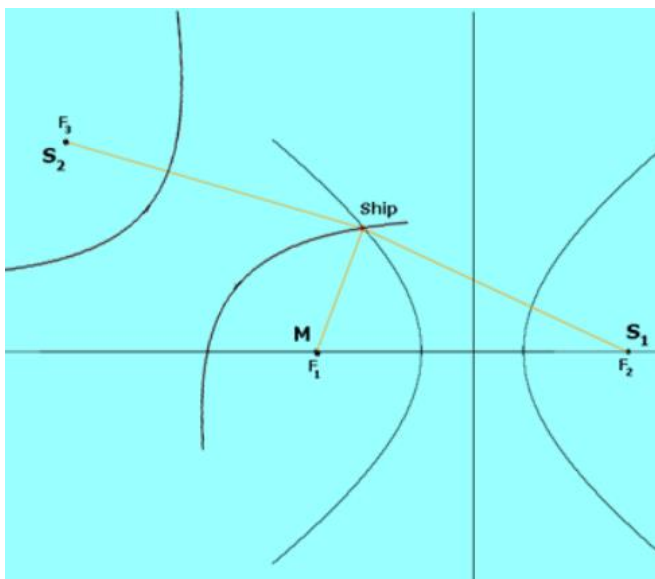


Rys. 1. - Zasada działania systemu w oparciu o sygnał z radiolatarni.

Innym systemem będącym zasadniczo usprawnioną wersją systemu VOR jest system VOR/DME. Jest to system dający rozpoznanie nie tylko w gestii informacji azymutalnej ale również pomiaru odległości. Jest to tzw. system odległościowo kątowy. Można przyjąć, że jest to połączenie systemu kąтового VOR z dalmierzem DME. Tego typu system jest stosowany w radionawigacji militarnej polskich samolotów F16 Block 50. Funkcjonuje jako kompatybilna część odległościowa systemu TACAN, taką pomoc radionawigacyjną określamy mianem VORTAC lub VOR/DMET (Czuj 2012). Sam system pomiaru pracuje na zasadzie odzewowej, oznacza to że obie jego części, pokładowa i ta naziemna są urządzeniami nadawczo odbiorczymi.

Przechodząc do systemów nawigacyjnych opierających swoją zasadę na mechanizmach geometrycznych należy w pierwszej kolejności skupić się na systemach hiperbolicznych.

Hiperboliczne systemy nawigacji opierają się na pomiarze czasowych stosunków sygnałów systematycznie nadawanych przez radiolatarnie. Nazewnictwo związane z hiperbolą wynika z tego, że zbiory punktów o stałej odległości między sobą wzajemnie oraz radiolatarnią mają kształty hiperboliczne, tzw. izochrony. Obiekt odbierający sygnały z jednej radiolatarni, zbiera punkty odniesienia i tworzy z nich hiperbolę po której się porusza. Gdy zaczyna odbierać sygnały od kolejnej radiolatarni tworzy nową hiperbolę a punkt przecięcia obu hiperbol wskazuje dokładną pozycję statku powietrznego, oczywiście znając pozycje kolejnych radiolatarni (Rys.2) (<http://mathcentral.uregina.ca/>).



Rys. 2. Zasada pozycjonowania na zasadzie hiperbol.

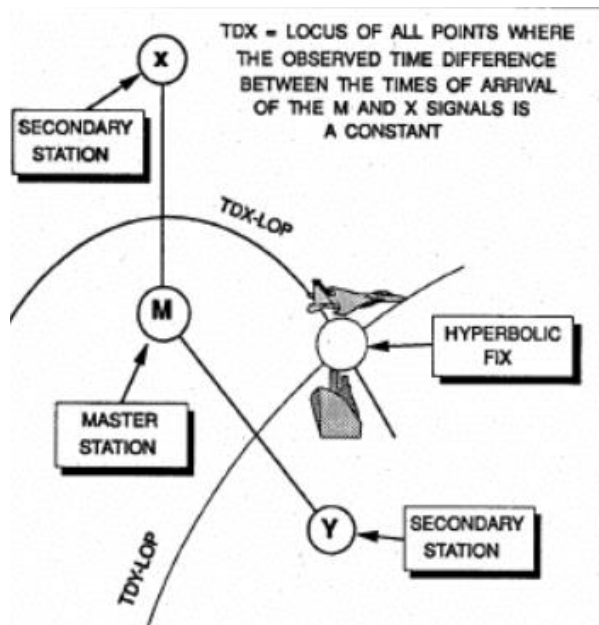
Nowoczesną i bardzo dokładną wersją systemów hiperbolicznych jest system LORAN (LONg RANGE Navigation). Zasada działania jest identyczna jak dla klasycznych systemów nawigacji hiperbolicznej jednak w przypadku tego systemu radiolatarnie zorganizowane w łańcuchy. Radiolatarnie główne nadają sygnał, który odbiera obiekt następnie pobudza również łańcuchy radiolatarni pomocniczych. Tworzą one dodatkowe hiperbole pomocnicze poprawiające dokładność określonego pomiaru (Rys.3) (Czuj 2012).

Nawigacja satelitarna jest rodzajem radionawigacji, który wykorzystuje fale radiowe nadawane ze sztucznych satelitów krążących na orbitach wokół ziemi. Dzięki tym sygnałom jest w stanie określać położenia punktów i poruszających się odbiorników wraz z parametrami ich ruchu na powierzchni Ziemi. System nawigacji satelitarnej pokrywa swoim zasięgiem całą ziemię, mówimy wtedy o systemach klasy GNSS (ang. Global Navigation Satellite Systems). Do takich systemów możemy zaliczyć najpopularniejszy system nawigacji satelitarnej GPS a dokładniej NAVSTAR-GPS a także rosyjski system GLONASS oraz europejski Galileo. Dzisiejsze systemy satelitarne zostały zapoczątkowane przez system Transit, który w 1958 roku stworzyło Laboratorium Fizyki Stosowanej Uniwersytetu Johnsa Hopkinsa w USA. System ten znalazł swoje zastosowanie w radionawigacji morskiej oraz jako pomoc geodezyjna.

Zasada wyznaczania pozycji w systemach nawigacji satelitarnej polega na pomiarze czasu propagacji sygnału oraz przesunięcia fazowego sygnału nadawanego przez satelitę poruszającego się po znanej orbicie. W geodezji i zastosowaniach militarnych w celu zwiększenia precyzji stosuje się pomiary kodowe, pomiary fazowe oraz orbity precyzyjne znając orbity satelitów z dokładnością do około 0,03 m. Znajomość odległości sztucznych satelitów i zarazem radiolatarni pozwala na wyznaczenie współrzędnych odbiornika. Istotną kwestią jest to, że na określenie pozycji pozwala

obserwacja przynajmniej 4 satelitów, gdyż w równaniach występują 4 niewiadome: współrzędne odbiornika XYZ oraz poprawka do zegara odbiornika (Góral 2007).

Korzystając z nawigacji satelitarnej nieopisanie pomocne okazują się efekty szczególnej oraz ogólnej teorii względności. Opisuje ona dokładnie zakrzywioną przez grawitację oraz prędkości czasoprzestrzeń w której poruszają się satelity i odbiorniki dając poprawkę czasową. Efekty ogólnej teorii względności mają wpływ na orbitę satelity a także jego sygnał, działanie jego zegara i zegara odbiornika.



Rys. 3. Zasada działania radiolatarni pomocniczych.

Obecnie funkcjonującymi systemami nawigacji satelitarnej są systemy zarówno stworzone w ubiegłym wieku, po odpowiednich modernizacjach jak i takie dopiero niedawno lokowane na orbitach okołozemskich. Możemy wymienić:

- Navstar-GPS
- GLONASS
- Galileo
- Beidou-1
- Beidou-2
- Beidou-3
- DORIS
- QZSS.

W kontekście pionierstwa rozwiązań radiolokacji z wykorzystaniem radiolatarni stacjonujących na orbitach okołozemskich skupiono się na trzech najbardziej zaawansowanych systemach nawigacji satelitarnej.

3. Przegląd literatury

Systemy nawigacji satelitarnej od kilkudziesięciu lat stanowią podstawę określania pozycji w wojsku oraz geodezji. Od początku tego tysiąclecia towarzyszą nam, również jako komercyjne źródło informacji na temat pozycji naszej bądź obiektów, które podłączyliśmy do sieci nawigacyjnych w ramach tzw. segmentu użytkownika. Dzisiejsze systemy nawigacji satelitarnej różnią się jednak wielkością, dokładnością oraz dostępnością.

Navigation Signal Timing and Ranging – Global Positioning System jest to system nawigacji satelitarnej stworzony przez Departament Obrony Stanów Zjednoczonych. Obejmuje on zasięgiem całą kulę ziemską. System składa się z trzech segmentów: kosmicznego w skład którego wchodzi 31 satelitów orbitujących wokół ziemi, segmentu naziemnego obejmującego stacje kontrolne i monitorujące na powierzchni ziemi i trzeciego, segmentu użytkownika czyli odbiorników sygnału. Sygnał GPS zawiera informację o układzie satelitów oraz wykorzystuje je w dalszej części do ustalenia swojej odległości od poszczególnych satelitów, dla których odbiornika jest w zasięgu. System ten jest utrzymywany i zarządzany przez Departament Obrony USA. Korzystać z jego usług może każdy posiadający odpowiedni odbiornik GPS.

System działa na obszarze całej Ziemi, bo w każdym punkcie globu widoczne są zawsze przynajmniej cztery satelity. Satelity krążą po orbitach na wysokości około 20200 km nad powierzchnią ziemi. System wielu nadajników jest bardzo kosztowny. Amerykanie regularnie muszą umieszczać na orbicie kolejne satelity w zastępstwie tych, które zeszyły z właściwej orbity lub uległy awarii. Ciekawym faktem jest to, że każdy z satelitów GPS został wyposażony w aparaturę NUDET przeznaczoną do natychmiastowego wykrywania wybuchów jądrowych na Ziemi (Góral 2007).

Obecnie istnieje pięć generacji (segmentów) satelitów systemu GPS, najnowsze realizują przesyłanie sygnałów już nie klasycznymi falami radiowymi a wiązkami laserowymi, co daje znacznie większą dokładność przy przejściu sygnału przez ziemską jonosferę. Poprawia do znacząco dokładność i funkcjonowanie systemu.

Istotnym jest udział systemu GPS w rozwoju geodezji. Systemy nawigacji satelitarnej począwszy od systemu GPS zostały z powodzeniem wykorzystane do badań oraz rozwoju technologii w zakresie geodezji. Obecny rozwój najnowocześniejszych i bardzo dokładnych geodezyjnych metod pomiarowych opiera się i jest zależna od dalszego rozwoju systemów nawigacji satelitarnej. Już nie tylko systemu GPS ale także GLONASS oraz GALILEO.

GLONASS jest to stworzony jeszcze za czasów ZSSR a obecnie rosyjski system nawigacji satelitarnej. Podobnie jak amerykański GPS funkcjonuje na zasadzie wyznaczanie pozycji w miejscu przecięcia czterech sfer o promieniach obliczonych na podstawie czasu propagacji sygnału i środkach znanych z depech nawigacyjnych dostarczanych przez satelity. Budowę systemu rozpoczęto 1 grudnia 1976 roku, dekretem Komitetu Centralnego Komunistycznej Partii Związku Radzieckiego. System z założenia powinien składać się z 24 satelitów rozmieszczonych na trzech orbitach. Chodź na przestrzeni lat od rozpoczęcia programu osiągnięto projektowaną liczbę satelitów to po 1995 roku w wyniku licznych awarii i braków finansowych system stracił funkcjonalność. Obecnie, w czasie rządów Władimira Putina system wrócił do funkcjonalności a obecnie przygotowywana jest kolejna wersja satelitów systemu tzw. GLONASS-K. Satelity charakteryzują się znacznie mniejszą awaryjnością i w przyszłości mają zastąpić najstarszą generację satelitów systemu GLONASS.

Europejski system nawigacji satelitarnej nosi nazwę Galileo. W odróżnieniu od amerykańskiego GPS, rosyjskiego GLONASS i chińskiego Beidou będzie kontrolowany przez instytucje cywilne. Jego zaletą i dużą przewagą nad innymi systemami nawigacji satelitarnej jest mniejszy promień błędu. Błąd wyznaczanie położenia przez system ma wynosić zaledwie 1 m na otwartych częstotliwościach i około 10 cm na częstotliwościach płatnych.

Początkowo projekt miał kosztować 1,8 mld euro, szacunki z 2000 mówiły już o 7,7 mld euro jednak w 2010 roku oszacowano całkowity koszt stworzenia i uruchomienia systemu na 22,2 miliardy euro.

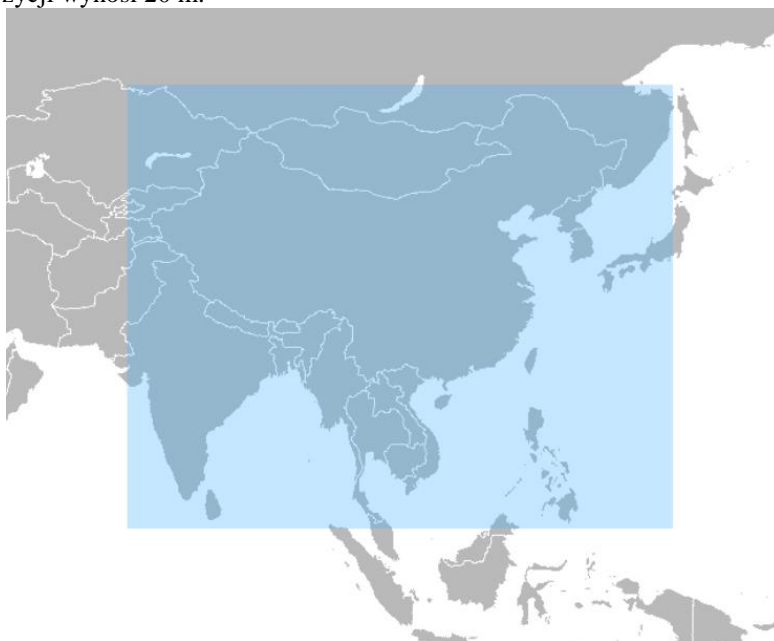
W roku 2020 system składał się z 3 satelitów typu In-Orbity-Validation, których zadaniem jest weryfikowanie sygnałów pozostałych 21 satelitów i nanoszenie ewentualnych poprawek, właśnie to daje systemowi tak dużą przewagę w dokładności określania pozycji. Docelowo system będzie składał się z 24 satelitów operacyjnych oraz 6 zapasowych, równomiernie rozmieszczonych na trzech orbitach. Satelity będą nadawać 10 sygnałów w trzech pasmach częstotliwości. Część sygnałów nie będzie zawierać żadnych danych i będzie służyć wyłącznie do wyznaczania poprawki jonosferycznej w celu zwiększenia dokładności (Januszewski 2006).

W skład segmentu naziemnego systemu wchodzi dwa niezależne pomniejsze segmenty. Segment kontroli satelitów mający kontrolować stan techniczny satelitów oraz uzupełniać brak w konfiguracji satelitów. Drugim segmentem składowym będzie naziemny system kontroli

funkcjonowania całego systemu Galileo Mission system. W jego skład wejdzie pięć stacji sterujących zapewniających ciągłą kontrolę i dwukierunkową łączność ze wszystkimi satelitami systemu.

W wyścig kosmiczny obejmujący umieszczanie na orbitach okołoziemskich systemów do pozycjonowania włączyły się również kraje azjatyckie. Beidou-1 jest to chiński eksperymentalny system nawigacji satelitarnej, który posłużył do dalszego rozwoju chińskiego programu nawigacji satelitarnej. System składał się z czterech satelitów, każdy z nich ważył 1000 kg. W przeciwieństwie do systemów GLONASS, GPS czy Galileo satelity Beidou-1 nie wykorzystują średniej orbity okołoziemskiej a orbitę geostacjonarną. Ze względu na znaczną wysokość orbitowania system ten nie wymaga dużej ilości satelitów chodzących w skład segmentu kosmicznego by pokrywać swoim zasięgiem znaczne obszary (Rys.4) (<https://www.wikipedia.org/>). Do nadawania system wykorzystuje częstotliwość 2491,75 MHz (Januszewski 2006) .

Pierwszy satelita systemu Beidou-1 został wyniesiony na orbitę 31 października 2000 roku ostatni zaś 25 maja 2003 roku. Najmniejsza różnica wskazań systemu wynosi 0,5 m natomiast biorąc pod uwagę dostępne rozwiązania segmentu naziemnego systemu, jego dokładność wskazania pozycji wynosi 20 m.



Rys. 4. Zasięg operacyjny systemu Beidou-1.

System Beidou-2 znany także pod nazwą COMPASS mylnie może być określany jako rozwinięcie systemu Beidou-1 jednak tak nie jest. System Beidou-2 powstał jako zupełnie nowy system nawigacji satelitarnej. Podczas jego tworzenia wzięto pod uwagę doświadczenia wynikające z systemu Beidou-1.

System składa się z 35 satelitów z czego 5 jest satelitami geostacjonarnymi. Z pozostałych 30 satelitów 27 znajduje się na średniej orbicie okołoziemskiej a 3 krążą na orbitach wykorzystywanych do synchronizacji sygnałów nadawanych na ziemię przez satelity systemu.

W przypadku Beidou-2 mamy do czynienia z dwiema wersjami dokładności pomiarów. Wykorzystując częstotliwości cywilne można liczyć wskazania z dokładnością 10 m. Wykorzystując segment militarny systemu z którego korzystają Siły Zbrojne Chińskiej Republiki Ludowej mamy do czynienia z dokładnością wskazań rzędu 0,1 m.

W skład systemu wdrożono eksperymentalny segment COMPASS-M1. Składa się on z satelity służącego do nanoszenia poprawki jonosferycznej i przesyłania jej do segmentu naziemnego systemu. Poprawka ta ma na celu zmniejszenie zwichrowania sygnałów podczas ich przejścia przez

ziemską jonosferę a co za tym idzie zwiększenie dokładności wskazania. Jest to podobne zastosowanie do tego stworzonego na potrzeby europejskiego systemu Galileo (Januszewski 2006).

System osiągnął swoją operacyjną gotowość w grudniu 2011 roku. Posiada wsteczną kompatybilność ze wszystkim satelitami systemów Beidou-1 co jedynie zwiększa jego dokładność. Zasięgiem obejmuje znacznie większy obszar niż system Beidou-1 (Rys.5) (<https://www.wikipedia.org/>).



Rys. 5. Zasięg operacyjny systemu Beidou-2.

Kolejną fazą chińskiego programu nawigacji satelitarnej jest system Beidou-3. Na potrzeby systemu wdrożono poprawki wyciągnięte z systemu Beidou-1 oraz Beidou-2. Najnowszy chiński system nawigacji satelitarnej osiągnął swoją gotowość 23 czerwca 2020. Składa się z 30 satelitów z czego 3 są satelitami geostacjonarnymi, 3 satelitami synchronizującymi a pozostałe 24 to satelity krążące na średniej orbicie okołoziemskiej. System do pracy wykorzystuje częstotliwość 2498,028 MHz.

Alternatywą do tworzonych w regionie Azji przez ChRL systemów będzie system Quasi-Zenith (QZSS). Jest to system powiększający możliwości operacyjne systemu Navstar-GPS w rejonach dalekiego wschodu, półwyspu indonezyjskiego oraz oceanii. System ten jest rozwijany przez Japońską Agencję Kosmiczną JAXA. W listopadzie 2018 roku operacyjna dostępność satelitów systemu wynosiła 4. Docelowo sam system, który miał służyć poprawianiu wyników innego zostanie przerodzony w samowystarczalny system nawigacyjny. Planowo system ma się składać z 7 satelitów.

W skład segmentu kosmicznego systemu wchodzi jeden satelita geostacjonarny oraz trzech satelitów orbitujących po eliptycznych orbitach typu tundra. Taki dobór orbit pozwolił na skoncentrowanie wysyłanych przez satelity sygnałów w obrębie dalekiego wschodu oraz oceanii zwiększając dokładność systemu.

Japoński system jest innowacyjny w skali wszystkich powstałych do tej pory systemów nawigacji satelitarnej. Satelity systemu wykorzystują inną, eksperymentalną metodę synchronizacji czasu (ang. crystal clock synchronization system). Użycie takiego rozwiązania eliminuje konieczność wykorzystania zegarów atomowych do synchronizacji czasu ziemia-orbita tym samym eliminując jedną z największych odchylek wpływających na dokładność pomiarów satelitarnych (Matsumoto et al. 2020).

4. Podsumowanie i wnioski

Rozwój systemów nawigacji satelitarnej z każdym rokiem wypiera systemy nawigacji naziemnej. Związane jest to ogromną dokładnością takich systemów. Mimo, że koszty stworzenia takich systemów są bardzo duże to i tak są mniejsze niż konieczność instalowania niezależnych radiolatarni nawigacyjnych na całym globie. Z systemów mogą korzystać wszyscy od organizacji rządowych i wojska po cywilne przedsiębiorstwa czy prywatnych użytkowników. Coraz więcej systemów osiąga swoją zdolność operacyjną a w najbliższym dziesięcioleciu planowana jest modernizacja oraz powiększenie trzech funkcjonujących już systemów nawigacji satelitarnej.

Wyraźnie zauważalny jest wpływ rozwoju satelitarnych systemów nawigacyjnych na inne sfery nauki oraz przemysłu. Wprowadzane nowe rozwiązania doprowadzają do znacznego rozwoju geodezji, fizyki kwantowej oraz transportu. Istotnym czynnikiem w rozwoju nawigacji satelitarnej są doświadczenia i eksperymenty przeprowadzane przez naukowców i użytkowników systemu, to one doprowadzają do stworzenia potrzeby unowocześnienia segmentu kosmicznego oraz naziemnego systemu. Dostarczone wyniki badań prowadzonych przez sektor prywatny i państwowy na całym świecie prowadzą do dostosowania modernizacji systemów pod potrzeby użytkowników i zarazem ogólnego rozwoju samych systemów nawigacji. Odważnym wnioskiem pracy jest wyprowadzenie tezy, że w ciągu najbliższych 30 lat rozwój i ogromna przepaść technologiczna między klasycznymi systemami nawigacji a tymi satelitarnymi doprowadzi do globalnego monopolu systemów satelitarnych. Będzie to jednak uzasadniony monopol, gdyż satelitarne systemy nawigacji już teraz są niedoścignione w niektórych aspektach pozycjonowania.

5. Literatura

- Czuj P (2012) Analiza istniejących systemów nawigacji lotniczej: Obsługa metrologiczna testera TACAN AN/ARM-188. Biuletyn WAT Vol. LXI, Nr 2
- Góral W (2007) Globalne systemy nawigacji satelitarnej. ISSN 1506-2864
- Januszewski J (2006) Systemy satelitarne GPS Galileo i inne. PWN
- Matsumoto K, Yamada H, Imai M, et al. (2020) Quasi-Zenith Satellite System-based Tour Guide Robot at a Theme Park. 2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration: 978-1-7281-6667-4
- <http://mathcentral.uregina.ca/>
- <https://www.wikipedia.org/>

4. Wpływ wielkości geometrycznych płatowca na jego charakterystyki aerodynamiczne przy prędkościach większych od prędkości dźwięku

Influence of an aircraft geometrical features at speeds greater than the speed of sound

Bartłomiej Dziewoński

ORCID ID: 0000-0003-3106-5969

Akademicki Klub Lotniczy, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Politechnika Wrocławska

Opiekun naukowy: dr inż. Wiesław Wędrychowicz

Wiesław Wędrychowicz: wieslaw.wedrychowicz@pwr.edu.pl

Słowa kluczowe: samolot, opór falowy, płat, przepływ

Streszczenie

W tej pracy zostaną omówione podstawowe zagadnienia i problemy związane z projektowaniem geometrii statków powietrznych, by były jak najbardziej ekonomiczne, wytrzymałe oraz funkcjonalne podczas lotów z prędkościami większymi od prędkości dźwięku.

Zostaną przeprowadzone analizy wpływu parametrów geometrycznych profili lotniczych, płatów przystosowanych do lotów naddźwiękowych a także kadłubów statków powietrznych. Poddane analizie zostaną między innymi takie czynniki jak grubości względne profili lotniczych, wydłużenia geometryczne płatów i kadłubów, skosy płatów stanowiących powierzchnie nośne statków powietrznych. Wynikiem analiz będzie przedstawienie jak najbardziej optymalnych parametrów dla samolotów pasażerskich wykonujących loty naddźwiękowe.

1. Wstęp

Lotnictwo pasażerskie w XX wieku stało się najsprawniejszym, najszybszym oraz najbezpieczniejszym środkiem transportu na ziemi. Dzięki nowym zdobyczom techniki możemy przemieścić się z jednego końca globu na drugi w nieosiągalnym dla innych środków transportu czasie. Podczas gdy konstruktorzy największych biur konstrukcyjnych prześcigają się w tworzeniu coraz to większych, bardziej niezawodnych i ekonomiczniejszych samolotów pasażerskich, tylko jednemu samolotowi pasażerskiemu w historii udało się przetrwać na rynku pokonując jedną barierę, barierę prędkości dźwięku. W 1973 roku British Aircraft Corporation w współpracy z Francuskim Aérospatiale wprowadziły do produkcji seryjnej samolot Concorde. Samolot ten osiągał pułap i prędkość dotąd niespotykane w lotnictwie cywilnym.

Na pułapie 18 290 metrów osiągał prędkość 2150 km/h ponad dwukrotnie przekraczając prędkość dźwięku. Przelot Concorde'a z Londynu do Nowego Jorku trwał zaledwie nieco ponad 3 godziny. Samolot ten był jednak bardzo nieekonomiczny, spalał ogromne ilości paliwa przez co ceny biletów były ogromne. Początkowo nie stanowiło to problemu gdyż samolot ten idealnie wpisywał się w niszę rynkową oferując szybki przelot biznesmenom zdolnym zapłacić wysoką cenę biletu, mimo to w obliczu rosnących cen paliwa, protestów związanych z uciążliwością gromu dźwiękowego jaki powodował samolot oraz zamachami terrorystycznymi z 11 września 2001 roku, które to znacząco wpłynęły na ilość podróżujących samoloty Concorde musiały zostać uznane za nierentowne i wycofane ze użytku. Stało się to w 2003 roku i od tamtego czasu nigdy już nie powrócono do komercyjnych lotów naddźwiękowymi samolotami pasażerskimi. Naddźwiękowe samoloty pasażerskie mogą znacznie skrócić czas podróży, szczególnie między kontynentami, a przez to odmienić oblicze nowoczesnego transportu publicznego w XXI wieku. W obliczu najnowszych osiągnięć techniki, inżynierii materiałowej, elektroniki i wykorzystania komputerowych metod projektowania wykonanie takie samolotu teraz mogłoby się okazać znacznie tańszym i sprawniejszym niż za czasów projektowania Concorde'a.

2. Opis zagadnienia

Dzięki zastosowaniu komputerowych metod projektowania, analizy przepływów i analizy wytrzymałości materiałów technika lotnicza doszła do etapu na którym parametry statków powietrznych w dużej mierze zależą od użytych do produkcji materiałów, sposobów wytwarzania podzespołów i długości wstępnej fazy projektowej. Czas potrzebny na zaprojektowanie, przetestowanie prototypów i wdrożenie do produkcji seryjnej zmalał z potrzebnych na to w czasach Concorde'a nawet 11 lat do 7 lat w przypadku Airbus'a A350XWB, którego oblotu dokonano w 2013 roku. Mimo tak zaawansowanych metod na przeszkodzie zwłaszcza w zaprojektowaniu samolotu naddźwiękowego staje szereg czynników. Bez dokładnej analizy zjawisk występujących przy lotach naddźwiękowych i opracowaniu sposobów ich unikania oraz optymalizowania charakterystyk płatowca pod kątem lotów z prędkościami przekraczającymi prędkość dźwięku stworzenie wytrzymałego, bezpiecznego i stosunkowo taniego w utrzymaniu samolotu nie byłoby możliwe.

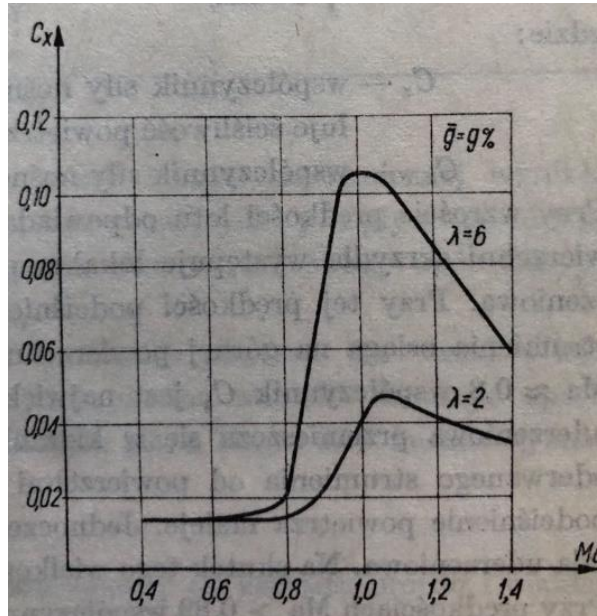
Powszechnym przekonaniem jest, że jedną z głównych przeszkód podczas osiągnięcia prędkości około dźwiękowych i naddźwiękowych przez statki powietrzne jest gwałtowny wzrost oporu samolotu. W rzeczywistości sam wzrost oporu jest tylko jednym z kilku czynników znacząco zmieniających aerodynamikę i właściwości lotne statku powietrznego przekraczającego prędkość dźwięku. Samemu wzrostowi oporu towarzyszy również zmiana wartości i przyłożenia siły nośnej statku powietrznego, zwiększone nagrzewanie aerodynamiczne oraz osłabienie lub całkowita utrata stateczności, a nawet skuteczności powierzchni sterowych (Cheda i Malski 1981).

Bardzo istotną kwestią dla samolotów pasażerskich jest ich oddziaływanie na środowisko. Hałas powodowany przez startujące silniki potrafi być bardzo uciążliwy dla osób mieszkających w okolicach lotnisk, z uwagi na rosnącą ilość połączeń oraz samolotów pasażerskich na świecie nie można również pominąć kwestii emisji spalin przez silniki turboodrzutowe. Linie lotnicze oraz producenci z sektora lotniczego z roku na rok starają się wspierać działania na rzecz ochrony środowiska. Tworząc coraz bardziej ekonomiczniejsze i cichsze samoloty oraz silniki, wprowadzana jest również możliwość dopłacenia kilku procent wartości biletu do zakupu przelotu na rzecz organizacji działających na rzecz ochrony środowiska.

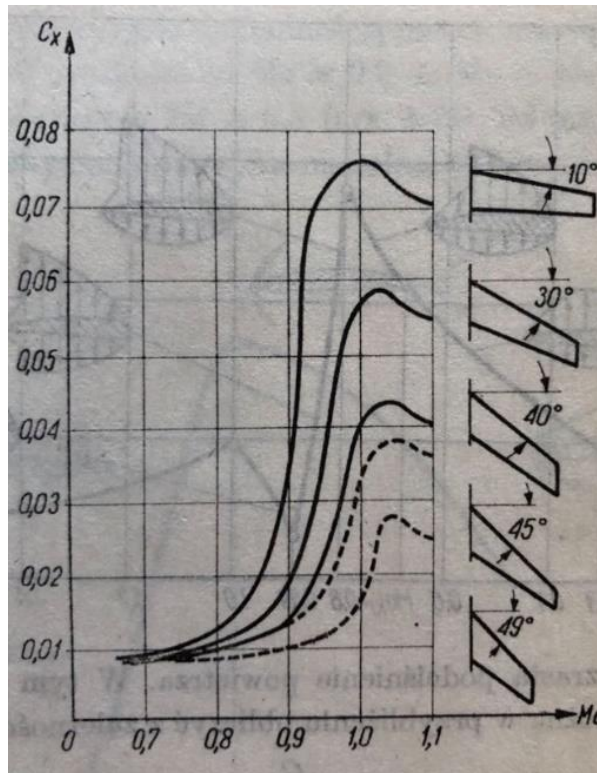
3. Przegląd literatury

Geometria profilu i skrzydła samolotu znacząco wpływają na powstawanie oporu falowego i rozwój oraz kryzysu falowego a co za tym idzie skutki z niego wynikające. Mechanizm powstawania oporu falowego jest następujący. Podczas opływu profilu lotniczego o wypukłych powierzchniach strumień powietrza miejscowo zwęża się do płaszczyzny w miejscu maksymalnej grubości profilu. Jeżeli prędkość przepływu jest dostatecznie duża to w miejscu maksymalnego podciśnienia struga osiąga wartości lokalnej prędkości dźwięku. Dzieje się to przy prędkości odpowiadającej Ma_{kr} . Następnie w rozszerzającym się przekroju strugi prędkość nie maleje a dalej rośnie tworząc cały przepływ, przepływem naddźwiękowym. Za profilem natomiast panuje ciśnienie wyższe, równe ciśnieniu otoczenia. Strumień natomiast ma prędkość poddźwiękową równą prędkości przepływu. Cząsteczki poruszające się w tylnej części profilu muszą wyhamować a ciśnienie musi spaść do wartości równym ciśnieniu otoczenia. Płynne wyhamowanie strumienia naddźwiękowego jest niemożliwe, zmiata ta niestety musi mieć charakter gwałtowny. Tworzy się powierzchnia prostopadła do profilu, na której występuje gwałtowne wyhamowanie i sprężenie poruszającego się strumienia powietrza. Powierzchnia ta stanowi czoło płaskiej fali zagęszczonego powietrza i nosi nazwę fali uderzeniowej. Podczas dalszego zwiększania prędkości obszar prędkości naddźwiękowych na powierzchniach profilu zwiększa się, fala uderzeniowa powiększa się powodując dalszy wzrost oporu falowego. Po powstaniu fali uderzeniowej na górnej powierzchni profilu wkrótce pojawia się ona również na dolnej powierzchni, powiększając i tak już duży opór. Dodatkowo na skutek gwałtownej zmiany ciśnienia następuje oderwanie się warstwy przyściennej a spowodowane tym zawirowania wpływają na zwiększenie się oporu kształtu. Gwałtowny proces wzrostu oporu aerodynamicznego stanowiący przeszkodę w postaci „tarczy” z zagęszczonego powietrza już w 1936 roku nazwano „bariera dźwięku”. Istnieje bezpośredni związek między takimi zależnościami geometrycznymi

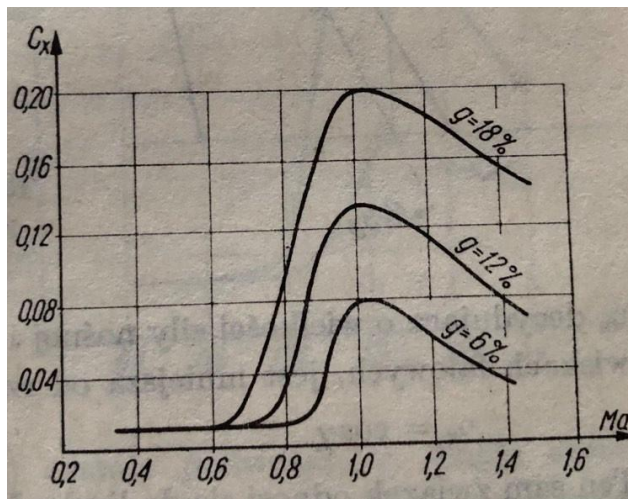
skrzydła jak jego wydłużenie (Rys.1), kąt skosu (Rys.2) oraz grubość względna profilu (Rys.3) a współczynnikiem oporu falowego w funkcji zwiększającej się liczby Macha. (Cheda i Małski 1981).



Rys. 1. Wpływ wydłużenia geometrycznego skrzydła na wielkość współczynnika oporu.



Rys. 2. Wpływ skosu skrzydła na wielkość współczynnika oporu w funkcji liczby Macha.



Rys. 3. Wpływ grubości względnej profilu lotniczego na wielkość współczynnika oporu w funkcji liczby Macha.

Można przyjąć że współczynnik oporu całkowitego C_x w zakresie prędkości od $Ma = 0,3$ do $Ma = Ma_{kr}$ jest niezmienny (dla stałego kąta natarcia) i równa się wartości oporu dla prędkości przepływu $Ma = 0,3$. Po przekroczeniu krytycznej liczby Macha, w wyniku powstawania omówionych wcześniej fal uderzeniowych na górnej i dolnej powierzchni skrzydła następują straty energii mechanicznej wynikające z gwałtownej zmiany parametrów przepływu. Intensywny wzrost oporu czołowego spowodowany wystąpieniem oporu falowego należy obliczać z zależności (Cheda i Malski 1981):

$$C_x = C_{xpr} + C_{xi} + C_{xf}$$

C_{xpr} – współczynnik oporu profilu, C_{xi} – współczynnik oporu indukowanego, C_{xf} – współczynnik oporu falowego

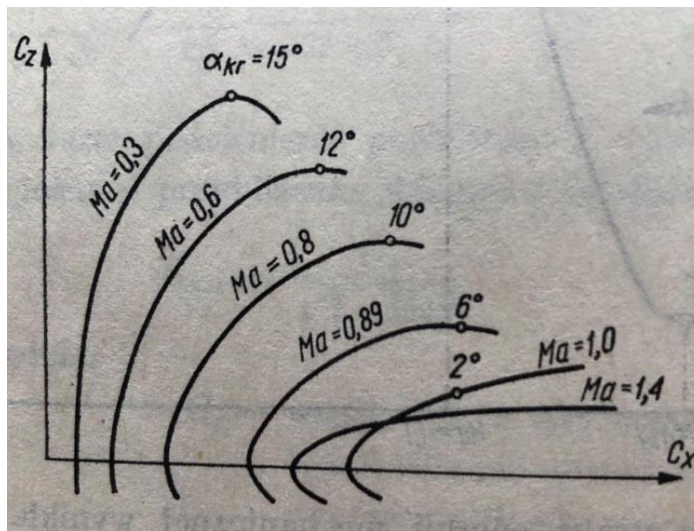
Przy prędkościach odpowiadających prędkości przepływu $Ma > 1$ współczynnik oporu falowego można obliczyć z zależności:

$$C_{xf} = \frac{4(\alpha^2 + \bar{g}^2)}{\sqrt{Ma^2 - 1}}$$

α – kąt natarcia, \bar{g} – grubość względna profilu

Zmiana liczby Macha powoduje zmianę przebiegu biegunowych skrzydła (Rys.4). Wartość współczynnika $C_{z_{max}}$ maleje w skutku zmniejszania się ciśnienia przy górnej powierzchni płata. W wyniku pochylania się krzywej w kierunku większych wartości liczby Macha oznacza zmniejszenie się doskonałości skrzydła oraz większy przyrost wartości współczynnika oporu całkowitego (Cheda i Malski 1981).

Przez pojęcie bariery cieplnej i nagrzewania aerodynamicznego statku powietrznego należy rozumieć nie tylko oddziaływanie cieplne samolotu z otoczeniem ale również takie czynniki jak oddziaływanie na konstrukcję ciepła powstałego w wyniku działania zespołu napędowego oraz ciepła powstałego w wyniku pracy instalacji i systemów pokładowych. Tarcie aerodynamiczne podczas lotów z bardzo dużymi prędkościami powstaje w wyniku zahamowania strug powietrza na powierzchniach profilu. Podczas opływu zawsze istnieje struga która napływa prostopadle do pewnego punktu na powierzchni skrzydła. W tym punkcie prędkość strugi zostaje całkowicie zahamowana a ciśnienie osiąga maksymalną wartość, nazywamy to ciśnieniem spiętrzenia.



Rys. 4. Naddźwiękowe biegunowe skrzydła samolotu.

Przez gwałtowny wzrost ciśnienia spowodowany wyhamowaniem strugi występuje tzw. temperatura hamowania. Powoduje ona szybkie nagrzewanie się ciała. Temperatura w punkcie spiętrzenia wynosi (Cichosz i Trościanko 1972):

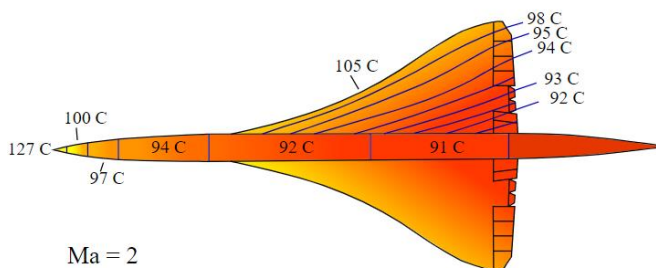
$$T_{\text{spiętrzenia}} = T_{\infty} \left(1 + \frac{Ma_{\infty}^2}{5} \right)$$

gdzie: T_{∞} , Ma_{∞} - temperatura, liczba Macha strumienia nie zaburzonego.

Inne punkty na powierzchni profilu również ulegają nagrzewaniu aerodynamicznemu (Rys.5) w wyniku spiętrzenia się ciśnienia (<https://commons.wikimedia.org/>). Ze względu na różną wartość wyhamowania strugi charakteryzują się niższą temperaturą hamowania, tzw. temperaturą zredukowaną.

$$T_r = T_{\delta} \left(1 + r \frac{k-1}{2} Ma_{\delta}^2 \right)$$

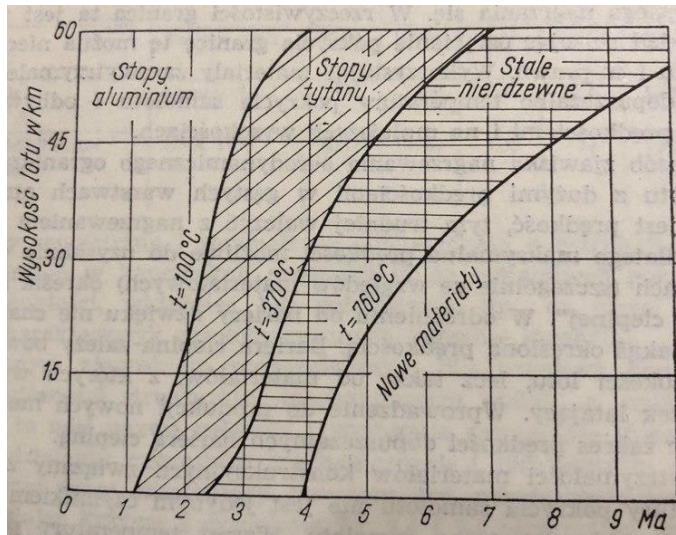
gdzie: T_{δ} , Ma_{δ} – temperatura i liczba Macha na granicy warstwy przyściennej, r – współczynnik temperatury zredukowanej, k – wykładnik adiabaty izentropowej, l – rozpiętość skrzydła.



Rys. 5. Temperatura poszycia samolotu Concorde.

W wyniku nagrzewania aerodynamicznego stosowalność obecnych materiałów konstrukcyjnych jest bardzo ograniczona (Rys.6) (Cichosz 1980). Już przy 100 stopniach Celsjusza rozpoczyna się proces utraty właściwości wytrzymałościowych przez aluminium a przy 370 °C swoje właściwości traci tytan. Dla bezpieczeństwa konstrukcji a przede wszystkim pasażerów należy przeprowadzić analizę nagrzewania się konstrukcji płatowca. Następnie neuralgiczne miejsca

poszycia należy wykonać z materiałów wytrzymałych na wysokie temperatury. Niestety podniesie to koszty wykonania takiego statku powietrznego. Jednakże znacząco wpłynie na poprawę osiągnięć oraz bezpieczeństwa podróżujących takim samolotem pasażerów.



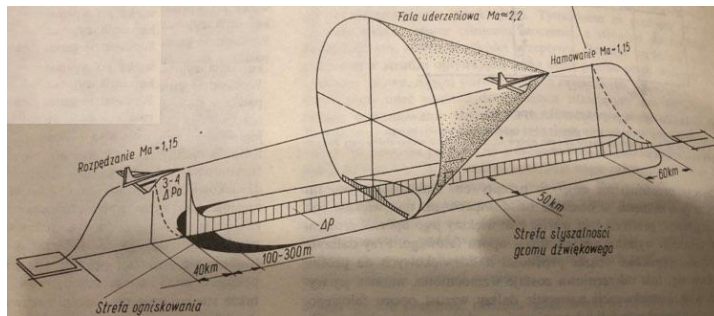
Rys. 6. Zakres stosowalności materiałów w zależności od wysokości w funkcji liczby Macha.

Podczas lotów samolotów dźwiękowych problemem nie jest tylko i wyłącznie hałas powodowany przez ich silniki podczas startu ale przede wszystkim tzw. grom dźwiękowy. Fala uderzeniowa powstająca przy przekraczaniu prędkości dźwięku osiąga głośność nawet ponad 100 decybeli. Gdyby loty z prędkościami naddźwiękowymi odbywały się z taką częstotliwością jak obecne loty pasażerskie z pewnością przeszkadzałoby to codziennym funkcjonowaniu. W 1994 roku Amerykańska Federal Aviation Administration przeprowadziła testy oddziaływania tzw. gromu dźwiękowego na codzienne funkcjonowanie miasta, badania miały ocenić wpływ transportu naddźwiękowego na życie amerykańców. Nad miastem Oklahoma City w Stanach Zjednoczonych na przestrzeni 6 miesięcy wygenerowano ponad 1200 gromów dźwiękowych.

Wyniki badań były bardzo niekorzystne dla wszystkich biur konstrukcyjnych pracujących nad prototypami pasażerskich samolotów naddźwiękowych. Populację miasta liczącą nieco ponad 500 000 ludzi reprezentowało 15 000 osób które zgłosiły się do programu. Ponad 9500 osób zgłosiło skargi o zniszczenie mienia wywołane głośnością tzw. gromu dźwiękowego. 4629 formalnie domagało się zapłaty za zniszczenia a 229 skarg dotyczyło popękanych szyb w oknach oraz zniszczonego tynku na domach. Negatywne wyniki badania oraz brak przychylności opinii publicznej wpłynęły na zahamowanie a w konsekwencji zamknięcie amerykańskiego programu lotniczego transportu naddźwiękowego co zmusiło takie firmy jak Boeing do wycofania się z zaawansowanych już prac nad pasażerskim samolotem naddźwiękowym Boeing 2707. Również w konsekwencji Federal Aviation Administration zakazała komercyjnych lotów nad lądem, podczas których miałyby zostać przekroczone liczba Macha równa $Ma = 1$. Podobne przepisy zaczęły funkcjonować na całym świecie ograniczając takie samoloty jak Concorde, latając na trasie Ameryka Północna – Europa mógł on osiągnąć prędkość przelotową do której był stworzony dopiero nad Oceanem Atlantyckim. Stąd wnioski, że analiza kształtu aerodynamicznego i jego oddziaływania na głośność tzw. gromu dźwiękowego jest bardzo ważnym aspektem podczas projektowania naddźwiękowego samolotu pasażerskiego. Poniżej przedstawiony został schemat zmiany ciśnienia w fali uderzeniowej generowanej przez samolot Concorde oraz zasięgu jej słyszalności (Rys.7) (Cichosz 1972).

Samoloty zdolne przekraczać prędkość dźwięku i latać na bardzo dużych pułapach łączy jedna wspólna rzecz, silniki turboodrzutowe o bardzo dużych wartościach ciągu. Niestety takich parametrów nie można uzyskać małym kosztem, silniki te zużywają bardzo duże ilości paliwa

szczególnie podczas lotu z wykorzystaniem tzw. dopalacza. Już w czasach Concorde'a było to problemem gdyż Concorde zużywając bardzo dużo paliwa był w stanie zabrać mniej pasażerów od poddźwiękowych szerokokadłubowych samolotów pasażerskich kursujących na dalekosiężnych trasach.



Rys. 7. Zakres słyszalności fali uderzeniowej generowanej przez samolot Concorde.

4. Podsumowanie i wnioski

W pracy dokonano kompletnej analizy zagadnień towarzyszących lotom naddźwiękowym. Poruszono tematy konstrukcji statków powietrznych zdolnych do przekraczania prędkości dźwięku. Przeprowadzono rozpoznanie w kierunku zależności geometrycznych konstrukcji pasażerskich samolotów naddźwiękowych.

Przedstawione zależności wyraźnie pokazują, że istotny wpływ na osiągi, ekonomiczność oraz charakterystyki lotne statku powietrznego ma geometria samego płatowca. Można zauważyć wyraźny związek między smukłością konstrukcji a także kątami ustawienia poszczególnych podzespołów płatowca a napływającymi strugami powietrza. Zależności te zmieniają się wyraźnie w okolicach prędkości około-dźwiękowych by po przekroczeniu prędkości dźwięku ulec zmianie a wręcz podążać zgodnie z zależnościami wręcz odwrotnymi do tych, które można zauważyć przy prędkościach poddźwiękowych. Najważniejszym czynnikiem pod względem ekonomiczności wyraźnie jest opór statku powietrznego, który rośnie do wartości prędkości dźwięku a następnie gwałtownie maleje po jej przekroczeniu w wyniku ustania fal uderzeniowych. Przy projektowaniu statków powietrznych również zwrócić uwagę na gwałtowny spadek siły nośnej istniejący po przekroczeniu bariery dźwięku, wpływ przybiera charakter tak bardzo zaburzonego, że siła nośna maleje do wartości mniejszych niż przy braku ściśliwości powietrza. Istotnym z punktu widzenia konstrukcyjnego będzie również odpowiedni dobór materiałów do konstrukcji płatowca i jego pułapu operacyjnego tak by temperatury poszycia podczas prędkości przelotowej oscylowały w granicach stosowności danego materiału.

5. Literatura

- Cheda W, Malski M (1981) Techniczny poradnik lotniczy – Płatowce. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności WKŁ
- Cichosz E, Trościanko S (1972) Poradnik do projektowania samolotów – część 1. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności WKŁ
- Cichosz E (1980) Rozwój samolotów naddźwiękowych. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności WKŁ
- Cichosz E (1972) Sekrety prędkości samolotów. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności WKŁ <https://commons.wikimedia.org/>

5. Metody i zastosowanie technologii druku 3D

Methods and application of 3D printing technology

Fenc Rafał, Piórkowski Paweł

Katedra Obrabiarek i Technologii Mechanicznych, Wydział Mechaniczny,
Politechnika Wroclawska

Opiekun naukowy: prof. dr hab. inż. Wacław Skoczyński

Rafał Fenc: rafal.fenc@pwr.edu.pl

Słowa kluczowe: drukarka, przyrost, prototypowanie, stereolitografia

Streszczenie

Praca przedstawia różne rodzaje i możliwości zastosowania drukarek 3D w projektowaniu nowych elementów.

Druk 3D jest technologią przyrostową, polegającą na drukowaniu materiału warstwa po warstwie w jednej płaszczyźnie. Technologia ta bardzo szybko się rozwija i daje coraz to nowe możliwości wykonania skomplikowanych elementów, niemożliwych do wykonania innymi, tradycyjnymi technikami lub ich wykonanie nimi byłoby bardzo drogie. Do rozwoju druku 3D przyczyniła się zwiększająca się produkcja na zamówienia indywidualne – produkcja jednostkowa lub krótkoseryjna. Dodatkowo dzięki niemu czas i koszt prototypowania nowych produktów i rozwiązań znacznie się obniżył. Ze względu na rodzaj zastosowanego materiału wyróżnia się trzy podstawowe grupy metod: termoplasty w postaci żyłki, żywice światłoutwardzalne oraz technologie proszkowe.

Najpopularniejszą metodą jest metoda FDM z grupy termoplastów w żyłce i dlatego na jej przykładzie przedstawiono problemy występujące podczas drukowania. Zalicza się do nich między innymi: skurcz materiału podczas drukowania czy rozwarstwianie się materiału. Jednakże korzyści z druku przeważają nad jej wadami.

Obecnie technologia ta jest ciągle rozwijana i udoskonalana. Na chwilę obecną można wydrukować prawie wszystko – począwszy od elementów z tworzywa sztucznego poprzez elementy betonowe po metalowe. Przyszłość związana z drukiem 3D to przemysł 4.0 oraz bioprinting pozwalający wydrukować w pełni funkcjonalny narząd, gdzie materiałem drukowanym będą nawet żywe komórki.

1. Wstęp

W dzisiejszych czasach powstaje coraz to więcej przedmiotów wyprodukowanych nie tylko przez firmy przemysłowe ale także przez pojedyncze osoby, które swoje projekty wdrażają w życie tworząc je samodzielnie w domu. Żyjemy w czasach, w których liczy się wygoda. Z tego powodu, gdy czegoś potrzebujemy co ułatwi nam życie – chcemy to mieć. Umożliwia nam to druk 3D, dzięki któremu możemy zaprojektować potrzebny nam przedmiot i wydrukować, a po chwili możemy go już używać. Oczywiście są to głównie elementy typu stojak, podstawa, obudowa, itp. Jednakże wykorzystując druk 3D możemy zrealizować wiele innych i bardziej rozbudowanych projektów, np. zaprojektować części do małego samochodu typu zabawka, a potem go złożyć w całość (dodając elektronikę robiąc zdalnie sterowany samochód). Dzięki nieograniczonej możliwości (poza wymiarami elementów drukowanych) drukarki 3D zyskują duże zainteresowanie nie tylko pojedynczych osób ale także dużych firmy – głównie konstrukcyjnych, gdzie drukarka 3D przyspiesza prototypowanie projektów i jednocześnie zmniejsza koszt produkcji prototypu.

Obecnie zastosowanie druku 3D jest szeroko wykorzystywane. Przykładowymi elementami wykonanymi technologią druku 3D są domy, gdzie materiałem drukowanym może być nawet beton (Dodziuk 2019). Innym przykładem jest wydrukowany metalowy most przez firmę MX3D w Holandii (Przychodniak 2018). Możliwe zastosowanie tej technologii jest także w medycynie, np. do wykonania wkładki do protezy nogi z różnych materiałów w celu komfortowego i możliwie jak najmniej bolesnego korzystania z protezy (Sengeh 2014). Ogólnie technologia druku 3D pozwala

nam wydrukować dowolny kształt, który jest trudny lub nawet niemożliwy do wykonania innymi metodami. Natomiast przyszłość druku 3D należy przede wszystkim do przemysłu 4.0 oraz do medycyny w biodrukowaniu (bioprinting) pozwalającej wydrukować w pełni funkcjonalny narząd.

2. Opis zagadnienia

Druk 3D jest stosunkowo młodą technologią przyrostową, która bardzo szybko się rozwija i daje coraz to nowe możliwości wykonywania skomplikowanych elementów niemożliwych do wykonania innymi – tradycyjnymi technikami lub ich wykonanie nimi byłoby bardzo drogie. Jest to addytywna metoda wytwarzania elementów, która jest coraz bardziej popularna w otaczającym nas świecie ze względu na swoją prostotę i możliwość wykonania skomplikowanych geometrycznie elementów. Na podstawie prognoz (Piątek 2018) wykorzystanie technologii przyrostowej w każdej dziedzinie wzrośnie mniej więcej dwukrotnie a za region o najszybszym rozwoju tej technologii uważa się Azję. Obecnie istnieje wiele metod druku 3D zaczynając od technologii druku aż do różnorodności stosowanych materiałów do druku. Głównymi obszarami technologii przyrostowej są: zastosowania domowe, druk na życzenie, przemysł wytwórczy oraz strefa niszowa, np. druk żywności (Badurek 2018). Dodatkowo warto zaznaczyć, że umieszczenie drukarki np. w statku kosmicznym czy morskim pozwala na wydrukowanie elementów zapasowych czy wymiennych w razie jakichś awarii – pozwala to na szybką naprawę na miejscu.

3. Przegląd literatury

Początki prac nad nową metodą wytwórczą, wytwarzania przyrostowego to późne lata 60-te XX wieku, kiedy to naukowcy z Battelle Memorial Institute w stanie Ohio w USA utwardzili żywicę poprzez jej naświetlanie dwoma wiązkami lasera o różnej długości fali. W 1967 r. Duńczyk Wyn K. Swainson niezależnie od naukowców z USA zgłosił wniosek patentowy oparty o to samo rozwiązanie. W roku 1974 firma Formigraphic Engine Co. zaprezentowała system utwardzania żywicy za pomocą wiązek laserów i proces ten nazwano obróbką fotochemiczną. Na początku lat 80-tych pracę nad wytwarzaniem obiektów przestrzennych poprzez utwardzanie żywicy światłoutwardzanej i lasera rozpoczęły niezależnie trzy osoby: Hideo Kodama z Japonii, Alan Herbert z Francji oraz Charles Hull z USA. Wszyscy trzej opracowali podobną technologię i zgłosili ją do opatentowania. Hideo Kodoma zgłosił patent w 1980r. natomiast z powodu braku działającego urzędnika i zgodnie z prawem japońskim jego patent wygasł. Z kolei prace Alana Herbert'a nie zostały docenione przez firmę, w której pracował i jego projekt wytwórczy został odrzucony. Za początki druku 3D przyjmuje się moment pojawienia się stereolitografii wymyślonej przez Charles'a Hull'a w 1984 roku, kiedy patent został zgłoszony 2 lata później – 1986 roku (Ślusarczyk 2017). Metoda druku polega na wykonywaniu elementu warstwa po warstwie w jednej płaszczyźnie. Aby wykonać element na drukarce 3D wystarczy mieć komputerowy model 3D elementu i dostęp do drukarki a wtedy w ciągu paru minut można ten element wytworzyć. Czas wydruku zależy od parametrów drukarki, dokładności i wielkości przedmiotu. Wraz ze wzrostem wielkości i dokładności elementu rośnie czas jego wykonania. Natomiast dokładność zależy od wysokości pojedynczej warstwy – im mniejsza wysokość warstwy tym dokładniejszy wydruk. Materiałem wykorzystywanym w druku jest głównie filamet z tworzywa sztucznego w postaci nitki zawiniętej na rolce. Inne metody druku 3D pozwalają na wytwarzaniu elementów z innych materiałów. Możliwy jest druk z tworzywa sztucznego, z żywicy światłoutwardzalnych, a także z materiałów sproszkowanych, takich jak np. sproszkowany beton, gips, metal. Pozwala nam to na wykorzystanie tej technologii do szerokiego spektrum wytwarzania elementów z różnych materiałów i do różnego zastosowania.

Najczęściej druk 3D wykorzystywany jest do tworzenia różnego typu prototypów lub makiet. Trzeba jednak pamiętać, że możemy wydrukować tylko pojedyncze elementy składające się później na skomplikowany przedmiot. Nie ma możliwości wydrukowania od razu złożonego przedmiotu. Technologia druku prędko się rozwija i na chwilę obecną elementy wykonane z druku 3D wykorzystywane są także w przemyśle lotniczym, samochodowym, w medycynie jako różne protezy, w sporcie – odzież ochronna (Badurek 2018), w cukiernictwie do drukowania w czekoladzie,

a także w sztuce do drukowania rzeźb niekoniecznie z tworzywa sztucznego czy metalu, ale np. z lodu (Ciardullo et al. 2016). Dzięki tej technologii możemy już wydrukować praktycznie wszystko, a ogranicza nas jedynie nasza wyobraźnia i przestrzeń robocza wykorzystywanej drukarki.

Ogólny podział druku 3D zależy od rodzaju zastosowanego materiału i technologii druku. Dzieli się on na trzy grupy: termoplasty w żyłce, żywice światłoutwardzalne oraz technologie proszkowe (Ślusarczyk 2018). Do każdej z tych grup można przypisać różne technologie wytwarzania elementu. Poniżej przedstawiono opis podstawowych i najbardziej powszechnych metod druku 3D.

Pierwsza z nich to metoda FDM (Fused Deposition Modeling) i metoda FFF (Fused Filament Fabrication) należące do grupy termoplastów w żyłce. Powszechnie stosowana metoda FDM polega na drukowaniu termoplastu w postaci żyłki rozgrzewanej do stanu półciekłego w głowicy drukującej i wyciskanej przez nią nanosząc kolejne warstwy druku. Po ostygnięciu materiał się utwardza. Metoda FDM różni się od FFF tym, że technologia FDM jest stosowana do rozwiązań profesjonalnych, a FFF bardziej stosowana przez „młodych entuzjastów” bazująca na projekcie Rep – Rap (maszyny samoreplikującej w postaci drukarki 3D). Podstawowym materiałem do druku metodą FDM jest między innymi ABS, PLA, ASA oraz PET. Istnieją także nowoczesne formy filamentu zawierające procentowy udział grafitu wpływający na większą wytrzymałość elementu wydrukowanego. Wykorzystanie takiego materiału wymaga zastosowania specjalnej głowicy rubinowej, gdyż grafit niszczy powszechnie stosowane dysze.

Do drugiej grupy podziału technologii druku 3D zaliczamy żywice światłoutwardzalne. Można w niej wyróżnić metody: SLA (StereoLithography Apparatus), DLP (Digital Light Processing), PolyJet i MJP (Multi – Jet Printing). Technologia druku 3D tymi metodami polega na stopniowym utwardzaniu żywicy światłoczułej. Wymienione metody rozróżniamy poprzez sposób dostarczenia światła do żywicy i jej utwardzeniu. W przypadku SLA światło utwardzające żywicę doprowadzone jest za pomocą wiązki lasera; w DLP – utwardzenie przebiega za pomocą emitowanego światła przez projektor; w metodach PolyJet i Multi – Jet Printing – energia świetlna emitowana jest za pomocą lampy UV. Ogólnie metody te polegają na utwardzeniu się żywicy poprzez działanie światła i wynurzaniu kolejno po sobie utwardzonych warstw ze zbiornika z ciekłą żywicą – w przypadku metody DLP, a w metodzie PolyJet platforma robocza oddala się od źródła światła tworząc w ten sposób element warstwę po warstwie.

Ostatnia grupa druku 3D wykorzystuje technologie proszkowe do których zaliczamy między innymi SLS (Selective Laser Sintering) i MJF (Multi Jet Fusion). Obie metody polegają na selektywnym spiekaniu sproszkowanych tworzyw sztucznych przy użyciu wiązki lasera w metodzie SLS, a przy technologii MJF dochodzi także ich zgrzewanie. Proces powstawania wydruku realizowany jest poprzez nakładanie na stół roboczy warstwy materiału i spiekaniu go tworząc pierwszą warstwę. Po zastygnięciu pierwszej warstwy proszku nakładana jest druga warstwa i ponownie jest ona stapiana lub zgrzewana w metodzie MJF. Proces powtarza się w cyklicznie, aż nie zostanie wydrukowany cały element. Do technologii proszkowych zaliczamy także takie metody jak: SLM (Selective Laser Melting), DMLS (Direct Metal Laser Sintering) i EBM (Electron beam melting). Przebieg procesu druku 3D tymi metodami przebiega podobnie jak w technologii SLS tyle, że w tych metodach występuje selektywne topienie sproszkowanych metali. Dzięki tej technologii możemy wydrukować różne, skomplikowane elementy z metalu. Kolejne metody zaliczane do tej grupy druku to CJP (Color Jet Printing) i Binder Jetting. Polegają one na selektywnym sklejanii proszku gipsowego dla metody CJP i piasku dla metody Binder Jetting. W tej technologii możliwe jest drukowanie elementów w pełnym kolorze, np. figurki gipsowe lub nawet wizualizacja topograficzna terenu.

Każda z wyżej wymienionych metod posiada swoje wady i zalety. Do zalet zaliczamy przede wszystkim możliwość wykonania elementów o skomplikowanych kształtach, gdzie wykonanie ich inną metodą byłoby niemożliwe lub bardzo drogie. Wsuwa się z tego kolejna zaleta, że wykonanie elementu metodą druku 3D jest tanie w przypadku produkcji jednostkowej, gdzie w przemyśle produkcja jednostkowa jest dużo droższa niż seryjna. Dodatkowo istnieje możliwość wykonania prototypu w celu sprawdzenia poprawności wykonania elementu przed rozpoczęciem produkcji seryjnej i zabezpieczenie się przed wykonaniem niepoprawnej serii przedmiotów. W zależności od wybranej metody druku zaletą jest dokładność, precyzja i wierne odwzorowanie kształtu. Dużym

atutem jest możliwość drukowania z różnych materiałów i możliwość samodzielnego przygotowania elementu. Różnorodność i uniwersalność pozwala zwiększyć grono odbiorców i zastosować w różnych branżach. Ostatnią wymienioną zaletą jest ciągła praca nad dalszym rozwojem technologii druku 3D pozwalając przy tym zwiększać jej możliwości i zastosowania.

Niestety obok zalet znajdują się też wady, gdzie do głównej wady zaliczymy ograniczenie wielkości wydruku do przestrzeni roboczej drukarki. Dodatkowo w przypadku błędów w wydruku trzeba rozpocząć drukowanie od nowa. Przeważnie element drukowany jest przez kilka godzin więc kolejną wadą jest długi czas wykonania wydruku, duży hałas pracującej drukarki i wydzielane ciepło. Przy drukowaniu małych elementów osoba przygotowująca model musi posiadać sporą wiedzę i umiejętności z zakresu druku 3D ze względu na trudności w poprawnym wykonaniu małych wydruków. Ostatnią wadą jest mniejsza wytrzymałość elementów wydrukowanych od elementów wytworzonych metodami konwencjonalnymi.

Do wspomnianych wad związanych z błędem w wydruku można zaliczyć wiele sytuacji niepożądanych. Dla przykładu przedstawię kilka problemów, na które może się natknąć użytkownik drukarki 3D do druku metodą FDM. Wybrano tę metodę, ponieważ jest ona powszechnie stosowana dla elementów prototypowych, a także dostęp do takiego typu drukarki jest łatwiejszy niż do druku w innej technologii.

Pierwszą wadą jest temperatura platformy oraz skurcz materiału. W wyniku słabego grzania platformy drukowane wysokie elementy mogą ostygnąć przy podstawie i skurczyć się odrywając od platformy podczas druku. Wynikiem tego jest zmiana wysokości i nierówność płaszczyzny drukowanej przez co druk nie zachowuje swoich założonych wymiarów. Ogólnie temperatura platformy nie jest równomierna ponieważ w przeważającej części drukarek posiada ona czujnik temperatury umiejscowiony w centralnej części stołu i z tego powodu im dalej od czujka temperatura jest inna – niższa, ponieważ w centralnej części znajduje się także grzałka. Aby uniknąć skurczu materiału dobrze jest stosować komorę grzewczą, w której umieścimy nasz element. Pozwoli nam to ujednolicić temperaturę obszaru elementu drukowanego i podtrzyma ją przez okres drukowania minimalizując powstanie skurczu termicznego.

Kolejnym spotykanym problemem jest niedokładne sklejanie się warstw powodujące rozwarstwienie się materiału również możliwe powstanie na skutek skurczu materiału, ale także z powodu wibracji.

Rozpoczęty druk 3D nie może zostać przerwany. W takim przypadku należy rozpocząć go od nowa. Powodem przerwania druku może być przede wszystkim skończenie się materiału, zablokowanie się materiału co w rezultacie skutkuje brakiem materiału lub wyłączenie drukarki poprzez przerwę w dostawie energii elektrycznej. Ostatni problem został rozwiązany w taki sposób, że drukarki po ponownym uruchomieniu kontynuują drukowanie. Jednakże problem z brakiem materiału nie jest jeszcze do końca rozwiązany. Rozwiązaniem może być zastosowanie dokładnych czujników informujących, w którym momencie skończył się filament a następnie po uzupełnieniu przetopić część materiału i zacząć od nowa drukować.

Jednakże mimo wymienionych wyżej problemów podczas druku 3D metoda FDM (nad którymi likwidacją cały czas się pracuje) wciąż cieszy się zainteresowaniem ze względu na coraz to niższy koszt zakupu tego typu drukarki oraz nowymi możliwościami jakie ona nam daje.

Mimo wielu korzyści płynących z zastosowania i rozwoju technologii druku 3D istnieją także i zagrożenia z nim związane. W związku z tym, że na drukarce można wydrukować praktycznie wszystko istnieje zagrożenie, że ktoś wykorzysta to do wydrukowania elementów zagrażające życiu drugiego człowieka, np. broń palną. Mimo iż broń wykonana na drukarce 3D ma mniejszą wytrzymałość mechaniczną niż broń klasyczna, a jej zastosowanie jest niebezpieczne dla samego użytkownika to jednak istnieje ryzyko oddania z niej kilku strzałów zanim ulegnie uszkodzeniu (Płatek i Zahor 2009).

Przyszłość związana z drukiem 3D to przemysł 4.0 oraz bioprinting. W przemyśle 4.0 może mieć istotny wpływ na produkcję krótkoseryjną i „na żądanie”. Dzięki temu będzie można zredukować koszty transportu i magazynowania wyrobu (Piątek 2018). Druk 3D pozwala na automatyzację całego procesu wykonania jednego elementu do którego wcześniej zaliczano, cięcie, toczenie, frezowanie i szlifowanie. Wykorzystując druk 3D można od razu wydrukować element

automatycznie, na jednym stanowisku wykorzystując jedną maszynę – drukarkę 3D. Dodatkowo można zlikwidować magazyn części zamiennych zastępując go bazą plików modeli 3D, które w każdej chwili, gdy będzie taka potrzeba, będzie można wydrukować.

W raporcie Smart Industry Polska 2018 (przemysl-40.pl) dotyczącym przemysłu 4.0 już uwzględniono technologię druku 3D. Na wykresach przedstawiających: „Technologię o największym wpływie na wzrost zysków w podziale na rodzaj przemysłu”, „W jakim stopniu wdrożenie danej technologii ma wpływ na budowanie przewagi konkurencyjnej”, „Stopień trudności wdrożenia technologii” oraz „Technologię o największym wpływie na wzrost zysków w podziale na wielkość firmy” druk 3D wcale nie odstaje od innych technologii, a stopień trudności jego wdrożenia jest niski. Natomiast bardzo duży wpływ na zyski z zastosowania tej technologii mają głównie małe firmy, czyli w wytwarzaniu małoseryjnym lub jednostkowym.

Obecnie pracuje się nad drukiem 3D dla przemysłu umożliwiającym zwiększenie ilości osi w których można drukować a także nad rozszerzeniem rodzajów materiałów drukowanych wraz ze zwiększaniem ich wytrzymałości mechanicznych. Natomiast jeśli chodzi o medycynę to przełomowym rozwiązaniem będzie biodrukowanie (bioprinting) pozwalający wydrukować w pełni funkcjonalny narząd. Ta technologia znacząco różni się od klasycznego drukowania, gdyż materiałem drukowanym są żywe komórki. Aby stworzyć taki w pełni funkcjonalny narząd trzeba będzie wykorzystać różne typy komórek, co jest aktualnie dużym wyzwaniem (Ciemny 2017). Biodrukowanie nie będzie w stanie wydrukować w pełni funkcjonalnych organów, a jedynie tkanki lub fragmenty narządów wykorzystywane do testowania leków lub do zabiegów transplantologicznych (Ślusarczyk 2018). Mimo wszystko rozwój i dalsze prace nad technologiami addytywnymi wciąż trwają, a my będziemy świadkami co z tego wyniknie – lub może sami dołączymy do tworzenia dalszej przyszłości druku 3D.

W kolejnej części artykułu przedstawiono w jaki sposób wykonuje się druk 3D od powstania modelu do uruchomienia drukarki. Tak jak wcześniej skoncentrowano się na najpowszechniej stosowanej metodzie FDM.

Pierwszą czynnością po stworzeniu modelu jest zaimportowanie go do oprogramowania, w którym wprowadzimy parametry druku (którymi najważniejszymi jest: temperatura ekstrudera, czyli głowicy podającej filament, temperatura platformy na którą nakłada się materiał, grubość warstwy zależna od rodzaju dyszy oraz ilość i rodzaj wypełnienia materiałem) i wygenerujemy ścieżkę drukowania. Należy zaznaczyć, że w tej metodzie nie drukujemy wyłącznie stworzonego modelu, ale także raft i support'y. Zaczynając od raft'u jest to automatycznie generowane podłoże z filamentu w obszarze, którym znajduje się cały proces drukowania. Następnie support'y są to dodatkowe wsporniki pozwalające wytworzyć elementy na pewnej wysokości. Druk 3D tworzy element z dołu ku górze, więc support'y mają za zadanie umożliwić druk elementów w górnych elementach. Oba elementy dodatkowe mają znacznie mniejsze wypełnienie materiału niż cały model, który chcemy uzyskać i w ten sposób bez większych problemów będziemy mogli ich się pozbyć (oderwać, odkleić) od potrzebnego elementu.

Po wprowadzeniu powyższych danych i wygenerowaniu ścieżki druku program poinformuje nas o ilości zużytego materiału oraz o czasie drukowania. Teraz pozostaje tylko zadbać o to aby wystarczyło nam materiału i można rozpocząć drukowanie.

Wydrukowany element należy oczyścić z raft'u oraz z support'u i można go już wykorzystywać do przeznaczonych celów.

4. Podsumowanie i wnioski

Technologia druku 3D prężnie się rozwija i może być szeroko wykorzystywana. Obecnie wykorzystywany jest do tworzenia różnego typu prototypów lub do produkcji małoseryjnej lub jednostkowej głównie przez małe firmy. Pozwala on nam wykonać elementy o skomplikowanych kształtach nie możliwych do wykonania innymi metodami lub wykonanie takimi metodami byłoby bardzo drogie.

Technologia znajduje zastosowanie oprócz ogólnego przemysłu to także w przemyśle lotniczym, samochodowym, budowlanym, w medycynie, w sporcie, w cukiernictwie, a także

w sztuce. Trzeba zaznaczyć, że umieszczenie drukarki np. w statku kosmicznym czy morskim pozwala na wydrukowanie elementów zapasowych czy wymiennych w razie jakiejś awarii.

Wykorzystując druk 3D można wytworzyć elementy z wielu różnych materiałów (nie tylko z tworzyw sztucznych), nawet z betonu czy metalu. W tym celu należy korzystać z odpowiedniej metody tej technologii przyrostowej, do której zaliczamy termoplasty, żywice światłoutwardzalne lub technologie proszkowe. Najbardziej rozpowszechnioną metodą jest metoda druku FDM z termoplastów, gdzie podstawowymi materiałami wsadowymi są między innymi ABS, PLA, ASA bądź PET. Tworząc element na drukarce 3D trzeba pamiętać, że części wydrukowane nie zawsze są takie jak zamodelowane w programie komputerowym. Zdarza się zgubienie warstw w druku, czy oderwanie od platformy, skutkujące błędem wykonania lub niedokładne sklejenie warstw wpływające na wytrzymałość elementu. Wszystkie te sytuacje są wynikiem braku doświadczenia, doboru parametrów i rodzaju filamentu (dobrze jest mieć rozeznanie w materiałach a także wśród ich producentów). Wybranie odpowiedniej temperatury platformy, głowicy oraz rodzaju materiału nie jest łatwe. Oprócz zakupu samej drukarki należy rozważyć dodanie do niej komory grzewczej w celu polepszenia warunków druku, a tym samym polepszenie właściwości samego elementu drukowanego. Często przy ustawianiu parametrów trzeba wykorzystać swoje doświadczenie oraz wykonać próbne wydruki, aż w końcu uzyska się odpowiednie właściwości. Kolejnym elementem jest zależność pomiędzy wypełnieniem wydruku a wytrzymałością. Uzyskanie zadawalających wyników także wymaga doświadczenia, znajomości filamentu oraz wykonanie testów. Należy uświadomić sobie, że technologia przyrostowa mimo posiadanej drukarki 3D nie jest łatwa do zrealizowania (jeśli chce się mieć odpowiednie elementy), wymaga dużo doświadczenia i wiedzy a elementy wydrukowane nie zawsze są idealne.

Przyszłość druku 3D jest skierowana na przemysł 4.0, gdzie będzie można zredukować koszty transportu i magazynowania poprzez wytwarzanie elementów jednostkowych „na żądanie” czy w produkcji krótkoseryjnej. Drugim kierunkiem rozwoju tej technologii jest medycyna, a dokładniej biodrukowanie, które zrewolucjonizuje obecną medycynę. Natomiast obecnie dalsze prace nad technologiami addytywnymi wciąż trwają, a my będziemy świadkami co z tego wyniknie – lub może sami dołączymy do tworzenia dalszej przyszłości druku 3D.

5. Literatura

- Badurek J (2018) Drukowanie 3D – praktyka i prognozy. Computer World:
<https://www.computerworld.pl/news/Drukowanie-3D-praktyka-i-prognozy,410062.html>
- Ciardullo C, Montes J, Yashar M (2016) Martian Ice Habitats: Approaches to Additive Manufacturing with H2O Beyond Mars Ice House. AIAA SPACE.
- Ciemny K (2017) Dlaczego medycyna potrzebuje druku 3D. Medical Robotics Reports, vol. 6/2017: 71-77.
- Dodziuk H (2019) Druk 3D w budownictwie. Napędy i sterowanie, nr 6: 84-87.
- Piątek Z (2018) Rynek druku 3D coraz bardziej dojrzały. Przemysł 4.0: <http://przemysl-40.pl/index.php/2018/09/19/rynek-druku-3d-coraz-bardziej-dojrzaly>
- Płatek P, Zahor M (2009) Zastosowanie metody FDM techniki szybkiego prototypowania w procesie projektowania modułowego systemu broni strzeleckiej kalibru 5, 56 mm (MSBS-5,56). Problemy Techniki Uzbrojenia, R. 38, z. 110, 95-102.
- Przychodniak M (2018) Największy na świecie stalowy most z drukarki 3D. Centrum Druku 3D: <http://centrumdruku3d.pl/najwiekszy-na-swiecie-stalowy-most-z-drukarki-3d/>
- Raport z badań (2018) Smart Industry Polska 2018, Innowacyjność w sektorze mikro oraz małych i średnich przedsiębiorstwach produkcyjnych w Polsce. Ministerstwo Przedsiębiorczości i Technologii / Siemens: <http://przemysl-40.pl/wp-content/uploads/SIP2018.pdf>
- Sengeh D (2014) The sore problem of prosthetic limbs. TED 2014:
https://www.ted.com/talks/david_sengeh_the_sore_problem_of_prosthetic_limbs#t-199291
- Ślusarczyk P (2017) Wprowadzenie do technologii SLA. Centrum druku 3D:
<https://centrumdruku3d.pl/wprowadzenie-technologie-sla/>
- Ślusarczyk P (2018) 10 rzeczy, które powinniście wiedzieć o druku 3D. 3D w praktyce:
<https://3dwpaktyce.pl/2018/02/10-rzeczy-ktore-powinniscie-wiedziec-o-druku-3d/>

6. Etyka w pracy inżyniera

Ethics in the work of an engineer

Fenc Rafał, Piórkowski Paweł

Katedra Obrabiarek i Technologii Mechanicznych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska

Opiekun naukowy: prof. dr hab. inż. Wacław Skoczyński

Rafał Fenc: rafal.fenc@pwr.edu.pl

Słowa kluczowe: moralność, postępowanie, wykształcenie, patent, bezpieczeństwo.

Streszczenie

Praca przedstawia problemy etyczne z jakimi musi zmierzyć się inżynier podejmując pracę w zawodzie oraz sposoby radzenia sobie z nimi. Uwzględniono przy tym hierarchię wartości, zgodnie z którą powinien kierować się podczas wykonywania swojej pracy. W artykule zwrócono także uwagę na konieczność znajdowania i przewidywania zarówno zalet jak i wad nowych pomysłów (rozwiązań). Zauważono, że nie wszystkie projekty uznane początkowo za dobre, faktycznie takie są. Przedstawiono rozważania dotyczące tworzenia patentów w celu osiągnięcia korzyści materialnych, nawiązując przy tym do ratowania życia ludzkiego.

1. Wstęp

Ludzkosc od zarania dziejow interesowala sie nauka z checi poznania swiata. Początkowo obserwowano przyrodę i związane z nią zjawiska (np. zmiany pór roku i konsekwencje z tym związane). Z biegiem czasu naukę zaczęto pojmować szerzej, oprócz obserwacji i odkrywania doszło badanie. Otaczający nasz świat zaczęto opisywać wzorami matematycznymi i fizycznymi. W ten sposób pojawiły się nauki ścisłe, które z czasem pozwoliły ludzkości projektować i budować różnego typu maszyny, konstrukcje, budowle - pojawiła się technika (Borodkiewicz 2003). Osoby posiadające wiedzę naukowo – techniczną często zostają inżynierami (uczonymi). Wraz z rozwojem cywilizacji i pracą inżyniera powstało pytanie, czy te nowe budowle, wynalazki, projekty, które mają za zadanie służyć i ułatwiać życie człowiekowi nie przyczyniają się do pogorszenia otaczającego nas świata. Niszczenie terenów zielonych (np. wycinanie drzew w celach budowlanych, do ogrzania gospodarstw domowych czy też do wykorzystania jako surowiec przy produkcji papieru, który potem zostaje przeznaczony na książki, zeszyty, gazety czy ulotki, te ostatnie – często nie przeczytane od razu są wyrzucane do kosza), zanieczyszczanie gleby, wód i powietrza przyczyniają się do zmian klimatycznych, wymierania zwierząt a nawet do powstawania różnego rodzaju chorób i schorzeń. Powstaje więc pytanie: „Gdzie jest granica zaspokajania własnych potrzeb kosztem otaczającego nas świata, kto ustala tą granicę i kto jest za nią odpowiedzialny?” W związku z tym, że temat publikacji poświęcony jest etyce w pracy inżyniera, dlatego postanowiłem zaprezentować konkretne działania i dziedziny związane z inżynierami.

2. Opis zagadnienia

Według definicji: „Inżynier w oparciu o swoje gruntowne wykształcenie i praktykę zawodową jest zdolny do stosowania metod naukowych i naukowego punktu widzenia, do analizy i rozwiązywania problemów technicznych. Jest w stanie przyjąć odpowiedzialność za rozwijanie i stosowanie nauki i wiedzy inżynierskiej w szczególności w pracy badawczej, produkcji, nadzorowaniu, zarządzaniu oraz kształceniu inżynierów. Praca jego jest w przeważającej części umysłowa i nieszablona, nie jest to praca umysłowa, której umiejętności nabywa się w drodze rutyny ani pracy fizycznej. Wymaga ona kierowania się własnym myśleniem i własnym sądem oraz umiejętnościami nadzorowania technicznej i administracyjnej pracy innych. Wykształcenie i praktyka zawodowa inżyniera powinny dać mu szeroki pogląd na całość wiedzy technicznej, a zarazem gruntowną znajomość specyficznych zagadnień w swojej specjalności. Po zdobyciu odpowiedniego

doświadczenia inżynier powinien być zdolny do dawania autoryzowanych wskazań technicznych i przejęcia odpowiedzialności za kierowanie ważnymi pracami w swojej gałęzi” (Hoser 1970).

Analizując powyższą definicję można wywnioskować, że inżynier jest osobą mającą wiele ról w społeczeństwie m.in. nauczyciela, eksperta, wynalazcy, konstruktora i technologa. Dodatkowo powinien być profesjonalistą w swojej dziedzinie (Faszczewski 2015). Łącząc to pojęcie z pojęciem etyki określonej w sensie potocznym jako: „ogół norm moralnych uznawanych w pewnym czasie przez jakąś zbiorowość społeczną jako punkt odniesienia dla oceny i regulacji postępowania w celu integracji grupy wokół pewnych wartości, synonim moralności” (encyklopedia.pwn.pl) można stwierdzić, że etyka inżyniera – profesjonalisty – powinna być podstawą (wzorcem) norm postępowania i rozumieniem kodeksu etyki (istnieje również kodeks etyki inżyniera).

Jako przykład można podać ekologię lub ochronę środowiska. Kiedy zaczęto szczerzej badać zagadnienia związane z ochroną środowiska i negatywne skutki działania człowieka, gdzie w skład badaczy wchodziła także duża grupa inżynierów, profesjonalistów w swoich specjalnościach, to po przedstawieniu wyników ich badań inżynierowie innych specjalności również zaczęli zwracać uwagę na ten problem. Tym bardziej, że często to właśnie rezultat ich pracy negatywnie wpłynął na środowisko, z czego nie zdawali sobie sprawy przy realizacji swoich pomysłów. Innym przykładem mogą być zakłady produkcyjne, które w większości przypadków do wytworzenia produktu wykorzystują dużo energii cieplnej, która potem jest uwalniana do środowiska poprzez kominy wentylacyjne. Powszechnie stosowane są silniki spalinowe, dzięki którym możemy co prawda sprawnie przemieszczać się po świecie, ale niestety kosztem uwalniania spalin do środowiska. Z tego powodu powstaje obecnie dużo nowych wynalazków bardziej ekologicznych, np. powstają maszyny (roboty) czyszczące oceany, pojazdy wykorzystują ekologiczne paliwo itd. Mają one na celu zniwelowanie wyrządzonych szkód (oczyszczanie wód, ograniczanie spalin) oraz wykorzystywanie nowych technologii w istniejących już powszechnie maszynach, np. służących jako środek transportu.

3. Przegląd literatury

Istnienie etyki inżynierskiej spowodowane jest występowaniem ważnych decyzji moralnych jakim inżynier musi sprostać. Od jego pracy, czyli od wynalazków technicznych i poprawnego ich działania zależy często przyszłość człowieka a nawet całej ludzkości. Ochronę przed zagrożeniami moralnymi opisuje Kodeks Pracy Inżyniera zwany często: etosem inżyniera, który jest zbiorem norm i reguł pozwalających inżynierom na wewnętrzną samo-determinację w dążeniu do rozwijania określonej dziedziny techniki oraz pomocny w pewien sposób także podczas codziennej pracy zawodowej. Każdy inżynier musi zmierzyć się także z hierarchią wartości, która jest nierozłączną częścią techniki i która musi uwzględnić dobro człowieka jako jednostki i jako zbiorowości (Urbański 2017).

Niezwykle istotne jest aby osoba, która uzyska tytuł inżyniera po otrzymaniu dyplomu nadal się kształciła, stale poszerzając swoje wiadomości, gdyż wiedza uzyskana na uczelni wyższej często nie jest w pełni wystarczająca do podjęcia pracy (jest to najeczęściej wiedza czysto teoretyczna) dlatego zanim młody inżynier zacznie w pełni wykonywać swój zawód powinien zdobyć odpowiednie kompetencje (doświadczenie) na praktykach i stażach. W dzisiejszych czasach dużo osób zdobywa wykształcenie wyższe, ale czy posiadają one odpowiednią wiedzę? Czy sumiennie i rzetelnie uczyli się na studiach, aby mogli z pełną odpowiedzialnością i czystym sumieniem powiedzieć, że są dobrymi inżynierami? To pierwsze pytanie powinien zadać sobie absolwent każdej wyższej uczelni technicznej przed rozpoczęciem pracy. Należy też zadać sobie pytanie, czy wzięlibyśmy lub bierzemy odpowiedzialność za maszyny, elementy, które wykonujemy z uzyskanym już tytułem zawodowym (inżyniera).

Po pierwsze i najważniejsze, nie powinny one zagrażać życiu lub zdrowiu osób je obsługujących oraz osobom przebywającym w ich otoczeniu (Wajszczyk 2013). Bycie inżynierem wymaga rzetelnej i trudnej pracy nie tylko związanej z nauką, czy doszkalaniami się, ale również związanej z pracą nad sobą.

Postęp technologii spowodował, że niezauważalnie człowiek przestał żyć w naturalnym środowisku a zaczął żyć najpierw w sztucznym środowisku – pełnym budynków, maszyn, modyfikowanej żywności a potem w wirtualnym świecie stworzonym przez Internet. Wszystkie

maszyny powoli zaczynają mieć dostęp do Internetu, można je łączyć ze sobą, programować. Technika zmierza w kierunku, w którym człowiek nie będzie potrzebny (automatyzacja produkcji, autonomiczne samochody, itd.).

W tym kontekście warto zauważyć, że działania pracy inżynierów mają swoje plusy jak i minusy. Do plusów zaliczymy to, że mamy więcej wolnego czasu, mniej pracy, łatwiejszą komunikację ze światem, łatwiejszy dostęp do wiedzy, itd. Natomiast minusem jest, że człowiek żyje w świecie wirtualnym i spędza tam bardzo dużo czasu, zanika komunikacja międzyludzka w świecie realnym. Wciąż nie wiadomo czy i w jaki sposób wpływają na nas (na nasze ciało) fale elektromagnetyczne o czym dowiedzą się najprawdopodobniej dopiero przyszłe pokolenia (Kuciński 2002; Wdowiak i Mazurek 2016). Jednakże jest jeszcze jeden minus – praca. Im więcej automatyzacji tym mniej ludzi potrzebnych jest do pracy. I w tym przypadku widać mniej więcej jak została ustawiona hierarchia wartości, gdzie na pierwszym miejscu najprawdopodobniej był postęp, automatyzacja, rozwój cywilizacyjny oraz ogólny dostęp do wiedzy i łatwiejsza komunikacja.

Należy zauważyć, że praca inżyniera polega nie tylko na wykorzystywaniu posiadanej wiedzy, ale także wyobraźni. Tutaj akurat nie zauważono negatywnych skutków Internetu, albo na tym etapie były znacznie niżej w hierarchii wartości. Warto zacytować fragment przemówienia św. Jana Pawła II sprzed blisko 40-stu lat, które nadal wydaje się być aktualne: „Nauka i technologia są wspaniałym produktem ludzkiej twórczości danej przez Boga, otwierającym ogromne możliwości, z których wszyscy korzystamy. Wiemy jednak, że ten potencjał nie jest neutralny: może on być użyty tak dla postępu ludzkości, i dla jej degradacji. (...) Nadszedł już czas, aby społeczeństwo, a szczególnie świat nauki, zdało sobie sprawę z tego, że przyszłość ludzkości zależy w większym niż kiedykolwiek stopniu od naszych zbiorowych wyborów moralnych” (Jan Paweł II 1981).

Kolejną ważną kwestią w etyce inżyniera jest rozwiązywanie problemów w taki sposób aby było ono jak najlepsze. Żyjemy w czasach, w których dominuje pieniądź więc najbardziej cenione są rozwiązania najtańsze, gdzie często cena jest adekwatna do jakości. Zleceniodawca z reguły chce dostać produkt najtańszy przez co inżynier jest zmuszony do stosowania tańszych elementów - zamienników. W tym przypadku etykę inżyniera chroni hierarchia wartości, gdzie ważniejsza jest cena niż jakość lub czas używalności produktu do takiego jego uszkodzenia, którego naprawa nie będzie się opłacać. Niemniej jednak zamienniki lub elementy gorszej jakości muszą być na tyle dobre i bezpieczne, że ich zastosowanie nie narazi zdrowia człowieka obsługującego urządzenie, ani osób postronnych.

Przez ostatnie kilkanaście lat firmy produkujące części zamienne, elementy, maszyny, czy urządzenia zmieniły strategię z robienia trwałych, niezniszczalnych produktów na produkcję wyrobów, które mają popracować określony czas, a następnie ulec uszkodzeniu. Wiele firm, które nie przyjęło tej strategii upadło.

Skoro inżynier powinien być rzetelny, sumienny, odpowiedzialny to dlaczego tworzone przez niego produkty mają się niszczyć po określonym czasie? Należy pamiętać, że w kontekście etyki, gdzie wszystkie firmy zmieniają strategię, społeczeństwo kupuje w tych firmach bo są tańsze od innych co znaczy, że punkt odniesienia dla oceny i regulacji postawy się zmienił. A więc takie postępowanie w pracy inżyniera, czyli tworzenie produktów o określonym czasie trwałości we współczesnym świecie jest zgodne z etyką. Tylko, czy na pewno? Rozpatrując to zjawisko w szerszej perspektywie zaczynamy się zastanawiać co zrobić z produktami zepsutymi? Skoro wytwory nie są wieczne a mają określoną trwałość to zwiększa się znacząco ilość odpadów. Ten problem świat (inżynierowie) też powoli próbuje rozwiązać stosując recykling, biodegradowalne materiały, itp. Jednak skoro jest zapotrzebowanie na więcej produktów, to rośnie zapotrzebowanie na materiały, produkcja się zwiększa, następuje większe zużycie energii, itd. Niestety tą kwestią bardzo długo nikt się nie zajmował ponieważ najważniejsza była jak największa ilość sprzedanych wyrobów i co za tym idzie, jak największy zarobek i obrót pieniądza. Na szczęście ten problem być może zostanie częściowo rozwiązany, gdyż już wprowadzane są przepisy nakazujące tak produkować urządzenia, aby były naprawialne, a części do naprawy dostępne przez bardzo długi okres czasu.

Następną kwestią, którą chciałbym przedstawić jest ochrona środowiska, o której coraz częściej się mówi i jest ona nierozłączną częścią techniki. Jak wyżej wspomniałem rozwój techniki spowodował powstanie „betonowych” miast przez co na rzecz rozwoju, postępu zniszczone zostało

środowisko. Również wszelkiego rodzaju maszyny, pojazdy czy urządzenia zużywające olej napędowy lub benzynę wpłynęły co prawda na znaczny rozwój przemysłu, ale jak wspomniał w zacytowanym przemówieniu św. Jan Paweł II, że „ten potencjał nie jest neutralny”. Wszelkiego rodzaju toksyczne odpady, spaliny wydobywane z unowocześnianych urządzeń powodują negatywne zmiany w otaczającym nas środowisku, o którego dobro powinniśmy dbać każdego dnia. W tym przypadku świadomość społeczeństwa o problemie zanieczyszczeń również przyczynia się do zmiany oceny moralności. Inżynierowie wciąż starają się niwelować toksyczność spalin stosując różnego typu katalizatory, czy filtry cząstek stałych, wynaleziono też biopaliwa. Państwa wprowadzają restrykcyjne zakazy ograniczające wjazdy samochodów niespełniających określonych norm toksyczności, np. wjazd do niektórych europejskich stolic. Wciąż trwają prace nad udoskonalaniem pojazdów elektrycznych – głównie samochodów, w powszechnym użyciu są już elektryczne hulajnogi, motorowery. Prace nad elektrycznymi samochodami dalekiego zasięgu wciąż trwają. Ten rozwój kieruje się wartością ekologiczności, a cena takich pojazdów jest na niższej pozycji w hierarchii dlatego co prawda na razie nie każdy może sobie pozwolić na taki „luksus” ale etyka zawodowa tworzących je inżynierów na pewno nie jest sprzeczna z ich normami moralnymi. Na szczęście inżynierowie podejmują coraz więcej projektów związanych z ochroną środowiska. Część z nich jest już wprowadzona w życie a na niektóre trzeba będzie jeszcze trochę poczekać.

W tym miejscu chciałbym zwrócić uwagę na kolejny problem związany z pracą i wyborami z jakimi musi zmagać się inżynier. Pierwszym przykładem jest spojrzenie na rozwiązywany problem globalnie a nie tylko lokalnie. Chodzi o to, aby wprowadzając pewne rozwiązanie sprawdzić, czy wymiar korzyści będzie przeważał nad kosztami jego wykonania. Należy przy tym uwzględnić zarówno poniesione koszty związane z eksploatacją maszyn jak i koszty związane z wdrożeniem oraz produkcją.

Popularne w ostatnim czasie samochody elektryczne zostały wprowadzone z myślą o ochronie środowiska poprzez zmniejszenie wydzielenia dwutlenku węgla. Natomiast biorąc pod uwagę koszty związane z wykonaniem takiego pojazdu (chodzi głównie o akumulatory) oraz koszty pozyskania energii elektrycznej (obecnie w znacznym stopniu z elektrowni węglowych), korzyści z takiego rozwiązania napędu nie są niestety aż tak duże jak się początkowo wydawało (Cyrny 2019; Żuchowski 2019). Jednakże ciągły rozwój technologii pozwala nam optymistycznie spojrzeć w przyszłość jeśli chodzi o ekologiczność tej formy transportu. Należałoby również zauważyć, że najpierw priorytetem było stworzenie pojazdu elektrycznego, następnie zwiększenie jego zasięgu (nad czym wciąż trwają badania) a obecnie priorytetem jest zwiększenie ekologiczności przy produkcji akumulatorów, dzięki zastosowaniu nowych technologii. Podobny problem dotyczy także innych rozwiązań technologicznych – np. farm wiatrowych. Energia elektryczna pozyskiwana z wiatru, pod kątem zysków eksploatacyjnych, jest w pełni ekologiczna. Jednakże po raz kolejny grupa ekspertów (naukowców, inżynierów, itd.) musi wziąć pod uwagę wszystkie zalety i wady tego typu rozwiązania. Istotnym problemem jest to, że energia jest wytwarzana tylko w momencie, kiedy turbina jest napędzana siłą wiatru. Tak więc o dostarczeniu prądu do gospodarstw domowych, biur, fabryk, itd. będą decydowały warunki meteorologiczne. Aktualnym rozwiązaniem jest stosowanie rezerwy mocy, która dostarczy prąd podczas braku wiatru, co z kolei wiąże się z koniecznością rozbudowy infrastruktury gazowej (uokik.gov.pl).

Następny temat do przeanalizowania to dylemat pomiędzy ekologicznością a bezpieczeństwem. Uciążliwy hałas, wibracje oraz obracające się łopaty wirnika wiatraka stwarzają niebezpieczeństwo zwłaszcza dla migrujących ptaków. Co do hałasu to sporządzone odpowiednie normy dotyczące lokalizacji budowy farm w stosunku do terenu zamieszkanego (Jabłońska 2010). Analogiczne niebezpieczeństwo stwarzają ciche środki transportu, które mogą zostać nie zauważone przez innych uczestników drogi. Silniki spalinowe wydają charakterystyczne dźwięki, dzięki którym człowiek dodatkowo innym zmysłem niż zmysł wzroku, czyli zmysłem słuchu, może ”odeczuć” zbliżający się pojazd.

Warto zwrócić uwagę, jak dużo czynników musi zauważyć i uwzględnić projektant, konstruktor, technolog, inżynier – osoba odpowiedzialna za wprowadzenie nowego rozwiązania, aby swych dobrych intencji nie zmienić na poważne problemy. Jest to szczególnie ważne w pojęciu etyki

inżyniera, gdyż wprowadzając z pozoru dobre zmiany, wskazując innym nowe sposoby postępowania można zaszkodzić nie tylko przyrodzie ale i ludzkości.

Aby z czystym sumieniem wykonywać swoją pracę/pracę inżyniera trzeba rozważyć (przewidzieć) zarówno plusy jak i minusy tworzonego „dzieła”, wykorzystując przy tym swoją wiedzę, umiejętności i doświadczenie. Nie można zapomnieć o patrzeniu w przyszłość, bo często nie podejmując żadnych dodatkowych działań w początkowej fazie projektowej (w celu choćby niewielkiej modyfikacji) nie będzie można – w późniejszym okresie - rozwijać- i ulepszać tego „dzieła” tak, aby w końcu stało się idealne. Jednakże warto przy tym pamiętać o kosztach jakie jesteśmy w stanie ponieść aby ten cel osiągnąć.

Ostatnim zagadnieniem, jakie chciałbym poruszyć, także związane z etyką pracy inżyniera jest kwestia patentowania swoich rozwiązań. Patenty powstały w celu ochrony własności intelektualnej przed kradzieżą. Zgodnie z definicją przedstawioną przez Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej patent określa się jako: „prawo do wyłącznego korzystania z wynalazku przez określony czas, w sposób zarobkowy (przemysłowy, handlowy) [...]” (uprp.gov.pl). Oznacza to, że jeśli ktoś stworzy coś nowego i opatentuje swój pomysł to nikt bez jego zgody nie może tego pomysłu używać. Pojawia się pytanie, co i kiedy patentować oraz czy tworzenie patentów (w celu osiągnięcia korzyści materialnych) na wszystko jest etyczne? Oczywiście nikt nikomu nie może zabronić patentowania swoich pomysłów natomiast decyzja należy do samego pomysłodawcy i jego sumienia. Każdy powinien postawić sobie pytanie, czy powinno się patentować w celu korzyści materialnych rozwiązania, które powinny być ogólnie dostępne ponieważ mogą one uratować życie i zdrowie innych osób.

Przytoczę tu przykład, w którym wynalazca (inżynier, naukowiec) postanowił opatentować swój pomysł z korzyścią materialną (nie dotyczący życia ludzkiego) oraz przykład, gdzie pomysł został opatentowany ale udostępniony wszystkim bezpłatnie w celu niesienia pomocy drugiemu człowiekowi.

Pierwszym przypadkiem jest patent na bezworkowy odkurzacz Jamesa Dysona. Dzięki zgłoszeniu swojego wynalazku w urzędzie patentowym miał on zabezpieczenie prawne przed kradzieżą pomysłu przez inne firmy, z którymi starał się rozpocząć współpracę i demonstrował im swoje rozwiązania (Curley 2010). Odkurzacz bezworkowy nie wpływa w żadnym stopniu na bezpieczeństwo ludzkości więc jest to przykład patentu (w celu osiągnięcia korzyści materialnych), który nie narusza etyki pracy inżyniera (wynalazcy).

Drugim przykładem jest bezpłatne udostępnienie patentu na trzypunktowy pas bezpieczeństwa opracowanego przez pracownika Volvo inżyniera Nilsa Bohlina. Taką decyzję podjęto ze względu na szeroki interes społeczny, w celu poprawy bezpieczeństwa na drogach dla pasażerów wszystkich pojazdów niezależnie od marki. Pozwoliło to na powszechne zastosowanie pasów bezpieczeństwa w środkach transportu. I są one używane do dnia dzisiejszego, ratując życie bardzo wielu pasażerów (Tobolski 2019).

Tak więc decyzja o patentowaniu (lub nie patentowaniu) rozwiązania powinna być zgodna z etyką, uwzględniając fakt, że największą ludzką wartością jest bezpieczeństwo i życie a nie korzyści materialne.

4. Podsumowanie

Etyka w pracy inżyniera odgrywa znaczącą rolę zwłaszcza, że często to właśnie on musi podejmować decyzje nie do końca zgodne ze swoim sumieniem, gdyż we współczesnym świecie aby przeżyć (zapewnić materialny byt najbliższej rodzinie) często trzeba dokonywać trudnych wyborów. Na szczęście kierunek rozwoju technologii uwarunkowany jest zapotrzebowaniem i akceptacją społeczeństwa, gdzie ważną rolę odgrywa zarówno hierarchia wartości, która dzięki Kodeksowi Pracy Inżyniera chroni go przed zagrożeniem moralnym jak i coraz większa świadomość zagrożeń jakie wynikają z ignorowania spraw związanych z ochroną środowiska i bezpieczeństwem ludzi. Jednakże inżynier powinien być wzorem postępowania i nauczycielem. To od uczonych zależy nasza przyszłość – nie zawsze dobra, ale kierowana według wcześniej ustalonych wartości. To, czy jest się dobrym inżynierem zależy od zdobycia zaufania i uznania społeczeństwa. Należy też pamiętać, że praca nie powinna być przymusowa, powinna być powiązana z pasją oraz dawać satysfakcję. Jeżeli

chodzi o inżyniera to jego wynalazki powinny służyć nie tylko dobru człowieka ale też i środowiska, w którym żyjemy. Z jednej strony patenty mają chronić własność intelektualną pomysłodawcy, a z drugiej nie wszystkie patenty powinny być tworzone z myślą o osiągnięciu korzyści materialnych, lecz uwzględniać wyjątki bezpłatnego udostępniania, gdy mogą się przyczynić do ratowania ludzkiego życia. Wynalazki (rozwiązania technologiczne) powinny być bezpieczne i gwarantować bezpieczeństwo, uwzględniając przy tym wszystkie ich wady i zalety. Pamiętając o wyżej już wspomnianym przemówieniu św. Jana Pawła II dobrze jest zapamiętać, że postęp jest neutralny, ma dobre i złe strony. Nie zawsze jesteśmy w stanie przewidzieć wszystkie złe skutki i je zniwelować. Część negatywnych skutków możemy odczuć od razu, ale niestety często możemy je odczuć dopiero w późniejszym okresie albo nawet mogą być odczuwalne dopiero przez kolejne pokolenia.

5. Literatura

- Borodkiewicz P (2003) Etyka w pracy inżyniera. Referat wygłoszony w Domu Technika NOT, Poznań.
- Curley R (2010) Sir James Dyson (British inventor and industrial designer). Encyclopedia Britannica: <https://www.britannica.com/> [07.08.2020]
- Cyrny W (2019) Czy elektryczne samochody są etyczne?. Holistic.news: <https://holistic.news/czy-elektryczne-samochody-sa-etyczne/> [06.08.2020]
- Faszczewski M (2015) Etyka inżyniera. iAutomatyka.pl: <https://iautomatyka.pl/etyka-inzyniera/> [09.12.2019]
- Hoser J (1970) Zawód i praca inżyniera. Instytut Filozofii i Socjologii Polskiej Akademii Nauk: Ossolineum.
- Internetowa encyklopedia PWN, hasło: etyka, <https://encyklopedia.pwn.pl/haslo/etyka;3898956.html> [26.11.2019].
- Jabłońska K (2010) Czysta, ekologiczna energia wiatrowa. Głos Wielkopolski: listopad 2010.
- Jan Paweł II (1981) Przemówienie do przedstawicieli Uniwersytetu Narodów Zjednoczonych w Hiroszynie. Luty 1981.
- Kodeks zasad etyki zawodowej członków Polskiej Izby Inżynierów Budownictwa, <http://swk.piib.org.pl/zalaczniki/Kodeks%20Etyki.pdf> [19.11.2019].
- Kuciński S (2002) Wpływ telefonii komórkowej na zdrowie człowieka. II Krajowa Konferencja Naukowo – Techniczna „Ekologia w elektronice”, Warszawa, 5-6.12.2002r.
- Tobolski P (2019) Pasy bezpieczeństwa mają już 60 lat. Trailer: <https://trailer.pl/pasy-bezpieczenstwa-maja-juz-60-lat/> [06.08.2020].
- Urbański J (2017) Zasady etyki inżyniera i ich funkcjonowanie (abstrakt). Wykład.
- Urząd Ochrony Konkurencji i Konsumentów (2012) Raport: Kierunki rozwoju i ochrony konkurencji i konsumentów na rynku gazów w Polsce, <https://www.uokik.gov.pl/> [22.12.2020].
- Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej, Czym jest patent na wynalazek i prawo ochronne na wzór użytkowy?, <https://uprp.gov.pl/> [06.08.2020].
- Wajszczyk P (2013) Etyka zawodu inżyniera w świetle wybranych kodeksów. Annales. Etyka w życiu gospodarczym: vol.16, 241-258.
- Wdowiak A, Mazurek PA (2016) Wpływ pola elektromagnetycznego na rozród człowieka. Przegląd Elektrotechniczny: R. 92 Nr 1/2016.
- Żuchowski M (2019) Akumulatory w autach elektrycznych ulepszają się i zmieniają świat na lepsze. WP.pl: <https://e.autokult.pl/34753,akumulatory-w-autach-elektrycznych-ulepszaja-sie-i-zmieniaja-swiat-na-lepsze> [06.08.2020].

7. Badanie izoterm adsorpcji metanu na węglu kamiennym, w powiązaniu z jego właściwościami fizykochemicznymi i technologicznymi

Investigation of methane adsorption isotherms on hard coal in connection with its physical properties

Stanisław Kozioł, Katarzyna Czerw, Katarzyna Zarębska, Paweł Baran

Katedra Chemii Węgla i Nauk o Środowisku, Wydział Energetyki i Paliw, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

Opiekun naukowy: prof. nadzw. dr hab. inż. Paweł Baran

Stanisław Kozioł: skozioł@agh.edu.pl

Słowa kluczowe: sorpcja, przepuszczalność, zwięzłość

Streszczenie

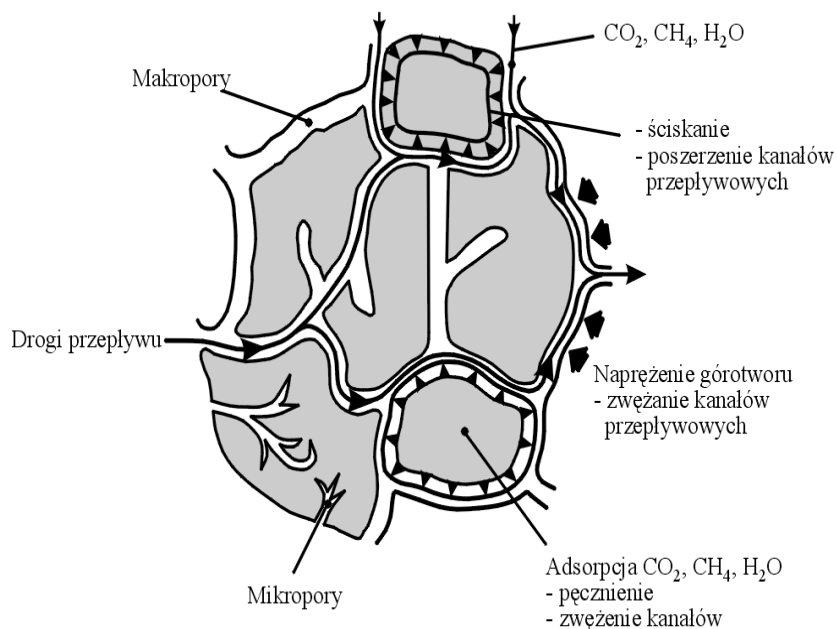
Węgiel kamienny jest porowatym ciałem stałym, posiadającym wysoko rozwiniętą powierzchnię wewnętrzną. Poprzez system mikro- i makro- porów, zdolny jest do pochłaniania par i gazów, co czyni go naturalnym sorbentem. W pokładach węgla kamiennego na terenie Górnośląskiego Zagłębia Węglowego, w skutek występowania przeobrażania substancji węglonośnych, bardzo często obecny jest metan. W poniższym rozdziale, przedstawiono wyniki badań adsorpcyjnych na wyranych próbkach węgla kamiennego w kontekście jego własności fizykochemicznych i technologicznych. Omówiono zastosowane metody badawcze, pochodzenie badanych próbek węglowych oraz ich skład elementarny. W wyniku przeprowadzonych badań, przyporządkowano węgle do jednej z kategorii przepuszczalności, co może posłużyć do opisanie zjawisk hydrodynamicznych, związanych z przepływem płynu przez złożę.

1. Wstęp

Analizując i badając zachodzące procesy sorpcyjne na materiale węglowym, wykorzystuje się dostępne w literaturze modele budowy wewnętrznej węgla kamiennego (Goodman i in. 2006). Do analizy zjawisk związanych z przepływem lub akumulacją par i gazów w matrycy węglowej, wykorzystać można model Seevalda. Na podstawie jego opisu stwierdzono, że za występowanie naprężeń oraz odkształceń odpowiada system mikro- i makro- porów, tworzących sumarycznie system biporowaty (Czapliński i Hołda 1982).

Poszukiwanie niekonwencjonalnych źródeł energii, doprowadziło do wzrostu zainteresowania odzyskiem gazu ziemnego, ze źródeł takich jak łupki lub pokłady węgla kamiennego. W celu pozyskania zasorbowanego gazu w matrycy węglowej, opracowano proces CBM. Polega on na wykonaniu odwiertu, a następnie wpompowaniu cieczy szczelinującej. Występujący wówczas spadek ciśnienia, pozwala na desorpcję części metanu z pokładu węgla kamiennego, a następnie jego transporcie w górę odwiertu na powierzchnię. Znajdująca się na powierzchni stacja, pozwala na odzyskanie metanu w separatorze wodno-gazowym. Zwiększenie efektywności tego procesu można osiągnąć poprzez iniekcję do złoża ditlenku węgla. Pojemność sorpcyjna węgla kamiennego, w dużym stopniu zależy od złożoności środowiska złożowego (Ceglarska-Stefańska i Zarębska 2005). Do czynników, mających największy wpływ na pojemność sorpcyjną węgla kamiennego zaliczyć można temperaturę, ciśnienie, zawartość wilgoci, porowatość, zawartość pierwiastkowego węgla a tym samym stopień metamorfizmu oraz pH wody, znajdującej się w obrębie złoża. W warunkach laboratoryjnych, aby jak najwierniej odwzorować warunki panujące w złożu, badania sorpcji przeprowadza się w zakresie temperatur od 298 K do 349 K oraz ciśnieniu do 15 MPa. Ze względów technologicznych, pomiary chłonności sorpcyjnej dla par i gazów są przeprowadzane na węglach suchych, jednakże ze względu na naturalnie występującą w pokładach wodę, uzasadnione jest badanie pojemności sorpcyjnej na próbkach węgla zawierających pewien procent wilgoci. Badania przeprowadzone do tej pory wykazały zależność pomiędzy chłonnością sorpcyjną, a zawartością wilgoci. Zawartość wilgoci na poziomie około 2%, powoduje redukcję sorpcji metanu nawet do 20%. Obecność wody, może również zmniejszyć chłonność metanu w dużo większym stopniu niż ditlenku

węgla. Węgłe znajdujące się w głębszych warstwach złoża, a tym samym węgłe o wyższym stopniu metamorfizmu, są mniej podatne na obecność wilgoci, niż węgłe o niższym stopniu metamorfizmu. Za spadek chłonności sorpcyjnej, odpowiada mechanizm polegający głównie na tworzeniu się skupisk cząstek wody wokół polarnych struktur występujących na powierzchni matrycy węglowej (Clarkson i Bustin 2000). Cząstki wody, blokują również dostęp do wewnętrznej przestrzeni porów i pustych przestrzeni międzycząsteczkowych. Adsorpcja cząstek wody na powierzchni węgla, jest kontrolowana przez grupy o podobnych właściwościach polarnych, na przykład karboksylowe lub hydroksylowe. Obszary polarne są preferencyjnie zajmowane przez cząstki wody, ze względu na jej polarną budowę, co przekłada się bezpośrednio na zmniejszoną sorpcję metanu. Węgłe niskozmetamorfizowane, o niskiej zawartości węgla a większej zawartości wilgoci, będą bardziej podatne na obniżenie chłonności sorpcyjnej metanu wywołanej obecnością wody, aniżeli węgłe wysoko zmetamorfizowane, o bardzo małej zawartości procentowej wilgoci. W poniższym rozdziale monografii, przedstawiono zależność pomiędzy stopniem uwęglenia, własnościami fizykochemicznymi i technologicznymi w odniesieniu do izoterm adsorpcji nadmiarowej metanu.



Rys. 1. Model węgla kamiennego wg. Seevalda.

2. Materiały i Metody

Badania eksperymentalne przeprowadzane były na próbkach węgla kamiennego, pochodzących z Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Każda z próbek, różniła się parametrami w stanie analitycznym takimi jak: zawartość pierwiastka C, zawartość wilgoci, zawartość wodoru oraz siarki (Tab. 1).

W ramach badań, dla każdej z sześciu próbek, przy użyciu aparatu AccuPyr 1310 wyznaczono gęstość helową. Pozwoliło to na określenie dokładnej gęstości próbki, uwzględniając występujące w niej pory (Tab. 2). Metoda ta jest nieniszcząca, a zastosowanie helu w urządzeniu zapobiega oddziaływaniu gazu badawczego z powierzchnią badanego ciała.

Na przedstawiany w tym rozdziale monografii eksperyment, składały się 3 niezależne etapy dotyczące pomiarów własności fizykochemicznych i technologicznych. Pierwszy etap, polegał na wyznaczeniu sorpcji nadmiarowej dla metanu. Badania przeprowadzane były metodą objętościową przy użyciu oryginalnej aparatury (Rys. 1). Zasada pomiaru adsorpcji przy podwyższonym ciśnieniu metodą objętościową, polega na rozprężeniu gazu o znanym wcześniej ciśnieniu i objętości z przestrzeni dozującej do ampułki, w której znajduje się sorbent w postaci węgla kamiennego. Przy

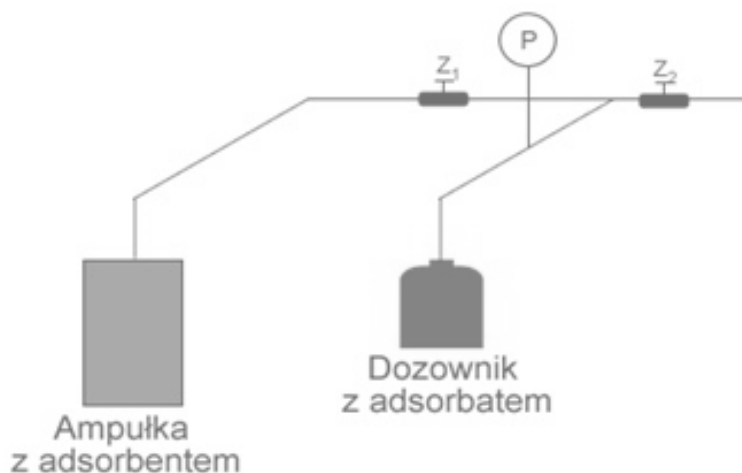
znajomości objętości martwej aparatu i objętości użytego dozownika, za pomocą praw gazowych możliwe jest wyznaczenie ilości zaadsorbowanego gazu. Dokładność pomiaru, zależy od dokładności pomiaru ciśnienia, kalibracji objętości urządzenia, gęstości sorbentu oraz stałości temperatury otoczenia. Ciśnienie mierzono za pomocą przetwornika ciśnienia typu S-10 firmy WIKA, pracującego w zakresie ciśnień od 0 do 100 bar, o klasie dokładności 0,25 BFSL (Best Fit Straight Line). Konstrukcja całego aparatu, zapewnia stałe termostatowanie ampulki jak i dozownika w zadanej temperaturze, z dokładnością do 0,1 K.

Tab. 1. Wyniki analizy elementarnej dla badanych próbek węgla.

Próbka	W ^a , [%]	C ^a , [%]	H ^a , [%]	S _t ^a , [%]
Coal 1	1,70	81,50	5,40	0,49
Coal 2	1,40	82,80	5,42	0,60
Coal 3	1,90	76,20	4,85	0,61
Coal 4	2,40	66,80	4,93	2,19
Coal 5	2,10	80,50	5,06	0,68
Coal 6	1,20	79,90	5,35	0,48

Tab. 2. Wyniki pomiarów gęstości helowej dla badanych próbek węgla.

Próbka	Gęstość helowa [g/cm ³]
Coal 1	1,2979
Coal 2	1,3172
Coal 3	1,3228
Coal 4	1,3244
Coal 5	1,3058
Coal 6	1,3207



Rys. 2. Schemat aparatury do pomiaru sorpcji w warunkach superkrytycznych.

Procedura pomiaru sorpcji wygląda następująco:

- Odgazowanie aparatu przy otwartych zaworach Z1 i Z2.
- Zamknięcie zaworu Z1 i napełnienie dozownika wybranym sorbatem.
- Zadozowanie sorbatu do ampulki poprzez otwarcie zaworu Z1.
- Wyczekiwanie na osiągnięcie stanu równowagi, zamknięcie zaworu Z1 i powtórne napełnienie dozownika sorbatem.

Osiągnięcie stanu równowagi termodynamicznej, czyli stanu, gdy wybrane makroskopowe parametry układu są stałe w czasie, było wyznaczane w momencie stałych w czasie wartości ciśnienia gazu w ampułce. Kolejny punkt izotermy wyznaczano poprzez zadozowanie kolejnej porcji sorbatu. Zasorbowaną ilość gazu obliczano z różnicy ciśnień przed i po adsorpcji, przy uwzględnieniu objętości martwej aparatu wyznaczonej przez odjęcie objętości ziaren węgla od całkowitej objętości aparatu. Objętość gazu przy danym ciśnieniu, temperaturze we wnętrzu ampułki obliczano z wyrażenia:

$$V_p^T = \left[V_n^S + \frac{V_{mol}^n}{V_{mol}} \cdot V_{ap} \right] \cdot \frac{1}{m}$$

V_n^S -objętość gazu zawartego w ampułce przy danym startowym ciśnieniu sorpcji, przeliczona na warunki standardowe [dm³]

V_{mol} -objętość molowa gazu w warunkach standardowych [dm³/mol]

V_{mol}^n -objętość molowa gazu, obliczona dla danego, aktualnie mierzonego ciśnienia i temperatury w ampułce [dm³/mol]

V_{ap} --objętość martwa próbki [dm³]

m- masa węgla [kg]

Drugim etapem badań, było wyznaczenie wskaźnika zwięzłości według Protodiakonowa. Przedstawia on wytrzymałość materiału na ściskanie pod ciśnieniem równym 10 MPa. Ze wzrostem wartości wskaźnika, badana próbka węgla jest trudniejsza w urabianiu. Właściwości próbek poddanych badaniu zostały przedstawione poniżej (Tab.3).

Tab. 3. Charakterystyka próbek dla wyznaczenia wskaźnika Protodiakonowa.

Próbka	Masa próbki [g]	Wysokość słupa pyłu [mm]
Coal 1	150,23	37,00
Coal 2	150,14	50,00
Coal 3	149,71	41,20
Coal 4	150,18	21,00
Coal 5	150,14	50,00
Coal 6	150,34	39,00

Ostatnim etapem badań było wyznaczenie gazoprzepuszczalności. Zasada pomiaru polega na przepuszczeniu gazu o określonej pojemności, lepkości dynamicznej przez próbkę węgla w kształcie cylindra. Współczynnik gazoprzepuszczalności, wyrażany jest w m² i charakteryzuje powierzchnię przekroju poprzecznego porów sorbentu, przez którą odbywa się przepływ gazu. Wymiary przestrzenne próbki węglowej, przedstawione zostały w Tab.4.

Tab. 4. Wymiary przestrzenne dla badanych próbek węgla.

Próbka	Wysokość [mm]	Średnica [mm]
Coal 1	28,00	40,60
Coal 2	28,10	40,80
Coal 3	28,20	41,20
Coal 4	28,00	32,80
Coal 5	28,20	41,70
Coal 6	28,20	41,70

3. Wyniki i dyskusja

Wyniki przeprowadzonych badań zestawiono poniżej. W Tab. 5 ukazano wartości parametry gazoprzepuszczalności dla badanych próbek węgla.

Tab. 5. Wyniki badania gazoprzepuszczalności dla badanych próbek węgla.

Próbka	Współczynnik gazoprzepuszczalności k_{prz} [10^{-15} m ²]
Coal 1	0,115
Coal 2	0,192
Coal 3	2,187
Coal 4	15,028
Coal 5	1,032
Coal 6	2,278

Na podstawie klasyfikacji przepuszczalności opracowanej przez Antoniego Kidybińskiego (Kidybiński 1982), otrzymane wyniki można przyporządkować do jednej z 4 kategorii:

- a) 10^{-15} – węgle nieprzepuszczalne
- b) 10^{-13} – 10^{-15} – średnioprzepuszczalne
- c) 10^{-12} – 10^{-13} – przepuszczalne
- d) $<10^{-12}$ – węgle bardzo dobrze przepuszczalne .

Węgiel Coal 4, przyporządkować można do grupy węgla przepuszczalnych. Pozostałe próbki węgla (Coal 1, Coal 2, Coal 3, Coal 5, Coal 6), zaliczyć można do grupy węgla półprzepuszczalnych. Zestawiając otrzymane wyniki gazoprzepuszczalności ze stopniem uwęglenia, widać wyraźną zależność pomiędzy współczynnikiem gazoprzepuszczalności, a metamorfizmem. Ze spadkiem zawartości pierwiastka C, wzrasta wartość współczynnika.

Tab. 6. Wyniki pomiarów współczynnika zwięzłości według Protodiakonowa.

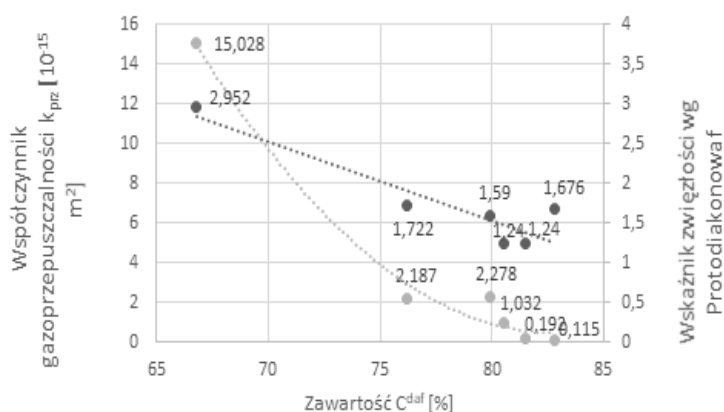
Próbka	Wskaźnik zwięzłości wg Protodiakonowa f
Coal 1	1,676
Coal 2	1,240
Coal 3	1,722
Coal 4	2,952
Coal 5	1,240
Coal 6	1,590

Dane przedstawione w tabeli (Tab.6), pozwalają na przyporządkowanie badanych węgla do kilku kategorii. Pierwsza z nich, dotyczy węgla łatwo urabialnych. Zaliczyć można do niej próbki Coal 2 oraz Coal 5. Druga grupa stanowi węgle trudno urabialne, których przedstawicielami są Coal 1, Coal 3 oraz Coal 6. Ostatnia grupa dotyczy węgla bardzo trudno urabialnych i zalicza się do niej próbka Coal 4. Porównując stopień uwęglenia ze wskaźnikiem

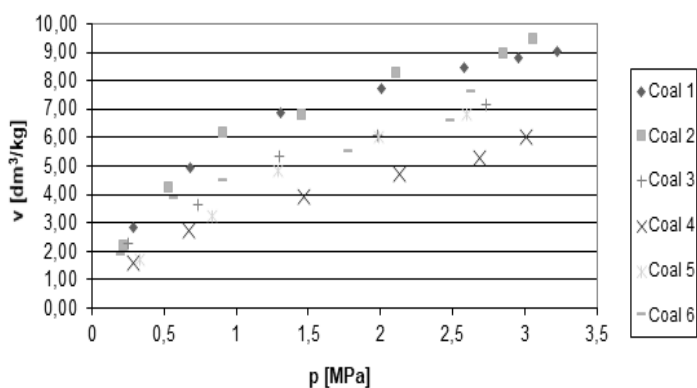
zwięzłości według Protodiakonowa, widać korelację. Wraz ze wzrostem zawartości pierwiastkowego węgla, łatwość urabialności węgla rośnie. W Tab. 7 zestawiono wymienione parametry technologiczne dla próbek, w kolejności malejącej zawartości węgla.

Tab. 7. Zależność pomiędzy stopniem uwęglenia a własnościami fizycznymi.

Próbka	C ^a , [%]	Wskaźnik zwięzłości wg Protodiakonowa f	Współczynnik gazoprzepuszczalności k _{prz} [10 ⁻¹⁵ m ²]
Coal 2	82,80	1,676	0,115
Coal 1	81,50	1,240	0,192
Coal 5	80,50	1,240	1,032
Coal 6	79,90	1,590	2,278
Coal 3	76,20	1,722	2,187
Coal 4	66,80	2,952	15,028



Rys. 3. Wykres zależności pomiędzy zawartością węgla a własnościami fizycznymi.



Rys. 4. Izoterm sorpcji nadmiarowej metanu na węglach kamiennych.

Na podstawie rysunku (Rys.4), zaobserwowano, iż próbką która najlepiej adsorbuje metan jest Coal 2. Cechuje się ona najwyższym stopniem uwęglenia, oraz najniższym wskaźnikiem gazoprzepuszczalności spośród wszystkich 6 próbek. Najmniej metanu zaadsorbowało się na próbce Coal 4. Próbką ta, stanowiła materiał najmniej uwęglony, o najwyższym współczynniku zwięzłości według Protodiakonowa i najwyższym współczynniku gazoprzepuszczalności. Można więc stwierdzić, że chłonność sorpcyjna, gazoprzepuszczalność i zwięzłość związana jest silnie ze

stopniem uwęglenia. Podobną zależność zaobserwowano w innej pracy (Baisheng i in. 2016). Autorzy powiązali stopień metamorfizmu węgla z jego wzrastającą chłonnością sorpcyjną względem metanu, co potwierdza wyniki naszych badań. Ponadto, autorzy tej pracy powiązali zawartość wilgoci z chłonnością sorpcyjną węgla kamiennego. Tworzące się aglomeraty wody w środowisku złożowym, zajmują miejsce w pustych przestrzeniach matrycy węglowej, pęknięciach struktury węglowej oraz makroporach stanowiących główne kanały transportowe metanu. Z tego też powodu, obecność wody w środowisku złożowym lub też obecność wilgoci zaadsorbowanej na powierzchni próbki, obniża w sposób znaczący możliwości transportowo-magazynujące węgla.

4. Wnioski

Na podstawie przedstawionych w rozdziale wyników można stwierdzić, że zawartość procentowa pierwiastkowego węgla jest ściśle powiązana z parametrami takimi jak wskaźnik zwięzłości według Protodiakonowa, gazoprzepuszczalność czy chłonność sorpcyjna względem metanu. Próbką o najniższej zawartości węgla, przyjmowała skrajne wartości- chłonność sorpcyjna osiągnęła najniższą wartość spośród wszystkich pozostałych, natomiast współczynnik zwięzłości i gazoprzepuszczalności osiągnęła najwyższą wartość. Analizując trendy światowe w poszukiwaniu alternatywnych źródeł energii, ze szczególnym naciskiem na alternatywne źródła gazu ziemnego można stwierdzić, że poszukiwanie zależności pomiędzy chłonnością sorpcyjną a właściwościami węgla jest niezwykle ważne. Wiedza ta, posłużyć może do modelowania i opisu zjawisk hydrodynamicznych, jakie mogą wystąpić podczas przepływu danego medium przez złożę, co może przyczynić się do zwiększenia efektywności procesów takich jak CBM.

5. Literatura

- Baisheng N, Xianfeng L, Shaofei Y i in. (2016) Sorption characteristics of methane among various rank coals: impact of moisture, Adsorption
- Ceglarska-Stefańska G, Zarebska K (2005) Sorption of Carbon Dioxide-Methane Mixtures. *Int. J. Coal Geol.*, 62 (4), 211–222.
- Ceglarska-Stefanska G, Zarebska K (2002) Expansion and Contraction of Variable Rank Coals During the Exchange Sorption of CO₂ and CH₄. *Adsorpt. Sci. Technol.*, 20
- Clarkson C, Bustin R (2000) Binary gas adsorption/desorption isotherms: effect of moisture and coal composition upon carbon dioxide selectivity over methane. *Int. J. Coal Geol.*, 42, 241–271 .
- Czapliński A, Hołda S (1982) Changes in Mechanical Properties of Coal due to Sorption of Carbon Dioxide Vapour. *Fuel*, 61 (12), 1281–1282.
- Goodman A, Favors R, Larsen J. I in. (2006) Coal Structure Rearrangement Caused by Sorption of CO₂. *Energy and Fuels*, 20 (6), 2537–2543.
- Karacan C (2003) Heterogeneous Sorption and Swelling in a Confined and Stressed Coal during CO₂ Injection. *Energy & Fuels*, 17 (6), 1595–1608.
- Kidybiński A (1982) Podstawy geotechniki kopalnianej, Śląsk,
- Xia T, Zhou F, Gao F i in. (2015) Simulation of Coal Self-Heating Processes in Underground Methane-Rich Coal Seams. *Int. J. Coal Geol.*, 141–142

8. Model ekonometryczny jako narzędzie wspierające proces decyzyjny w organizacji

The econometric model as a tool supporting the decision-making process

Marcinek Paulina⁽¹⁾, Brzychczy Edyta⁽²⁾, Smol Marzena⁽¹⁾

⁽¹⁾ Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Pracownia Surowców Biogenicznych, Kraków

⁽²⁾ Katedra Ekonomiki i Zarządzania w Przemśle, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, AGH w Krakowie

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Edyta Brzychczy, prof. AGH

Marcinek Paulina: marcinek@meeri.pl

Słowa kluczowe: ekonometria, weryfikacja modelu, analiza, informacje, predykcja

Streszczenie

Informacje stanowią kluczowy zasób występujący w każdym prawidłowo prosperującym przedsiębiorstwie. Dostęp do informacji pozwala na precyzyjne określenie dalszych ścieżek rozwoju przedsiębiorstwa, w tym między innymi kształtowanie się przewagi konkurencyjnej lub sprzedaży określonych dóbr i usług na przestrzeni przyszłych okresów. Kompleksowa inwentaryzacja danych pozwala także na późniejsze poddanie ich szczegółowej analizie, która może stanowić podstawę efektywnego oraz prawidłowego zarządzania przedsiębiorstwem. Znajomość zależności jakie występują pomiędzy analizowanymi zjawiskami w organizacji wspomaga podejmowanie decyzji dotyczących ważnych aspektów jej funkcjonowania. W pracy przedstawiono proces budowy i analizy modelu ekonometrycznego opisującego powiązania występujące między kosztami sprzedaży a sprzedażą netto ogółem. Wykazano, iż między badanymi zmiennymi występuje silna korelacja, a przeprowadzona weryfikacja potwierdziła poprawność zbudowanego modelu, który może zostać wykorzystany w praktyce i tym samym wspomóc proces decyzyjny w danej organizacji.

1. Wstęp

Jednym z kluczowych zasobów, które występują w każdej organizacji są informacje. Bez nich nie można w sposób precyzyjny oszacować w jakim kierunku kształtować się będą takie wielkości jak np. przewaga konkurencyjna, sprzedaż czy rozprzestrzenianie się działalności na kolejne obszary i rynki zbytu. Organizacja, która jest sprawnie zarządzana, musi posiadać dobrze prosperujący kanał wymiany informacji, pozwalający na efektywne osiąganie pożądaných celów (Kraszewska i Pujer 2017).

W czasie wykonywania zadań w organizacji gromadzone są dane, które w kolejnych etapach poddawane zostają szczegółowej analizie. Stanowi ona podstawę efektywnego zarządzania (Nowak 2002). Wykonywanie analiz obejmujących trendy sprzedaży, wyniki finansowe, ponoszone koszty, zatrudnienie czy inne ważne aspekty wpływające na prawidłowe funkcjonowanie organizacji, wspomaga osiągnięcie zakładanych celów. Z kolei brak wyników z tychże analiz może prowadzić do wydłużenia czasu realizacji planowanych działań, bądź też nieosiągnięcia zakładanych celów (Żukowska i in. 2016).

Znajomość istnienia zależności występujących między zjawiskami poddanymi badaniu wpływa pozytywnie na proces decyzyjny dotyczący kluczowych aspektów funkcjonowania danej organizacji. Dzięki takiej postawie, wykonywane działania zazwyczaj obarczone są mniejszym prawdopodobieństwem wystąpienia błędów, które mają bezpośredni wpływ na efektywność i jakość działalności (Penc 1996).

Głównym celem badawczym prac, których wyniki zaprezentowano w artykule, była budowa modelu ekonometrycznego, odwzorowującego zależność występującą pomiędzy kosztami sprzedaży, a sprzedażą netto ogółem w wybranym przedsiębiorstwie produkcyjnym (Marcinek 2019). Następnie

opracowany model został poddany weryfikacji. Wyniki przeprowadzonej analizy oraz opracowany model ekonometryczny mogą zostać wykorzystane do wspomagania procesu decyzyjnego.

2. Teoria ekonometrii

Ekonometria jest nauką, której początki sięgają czasów I wojny światowej. Obecnie, dzięki zaawansowanej technologii, zaczęła rozwijać się na skalę światową (Borkowski i in. 2004). Za odkrywców ekonometrii uważani są Ragnar Frisch oraz Jan Tinbergen, którzy jako pionierzy otrzymali Nagrodę Nobla z ekonomii. Natomiast termin „ekonometria” został wypowiedziany po raz pierwszy przez krakowskiego księgowego - Paweł Ciompa, który na początku XX wieku we Lwowie zaprezentował pracę pt. „Zarys ekonometrii i teoria buchaltri”. W ówczesnych czasach pojęcie to rozumiane było jako rachunkowość zarządcza (Dziechciarz i in. 2002). Słowo „ekonometria” powstało dzięki połączeniu dwóch greckich wyrazów: „oekonomia” (gospodarka) oraz „metreo” (mierzyć). Scalenie wspomnianych słów w całość umożliwia zdefiniowanie ekonometrii, która polega na mierzeniu powiązań zachodzących w gospodarce. W szerszym zakresie można ją rozumieć jako badanie z wykorzystaniem metod matematyczno-statystycznych, zależności ilościowych, które występują pomiędzy określonymi zjawiskami ekonometrycznymi (Goryl i in. 2009). Warto tu nadmienić, iż ekonometria to wypadkowa wielu nauk (matematyki, ekonomii, statystyki) (Dziechciarz i in. 2002).

2.1 Model ekonometryczny

Jednym z podstawowych narzędzi badawczych wykorzystywanych w ekonometrii jest model ekonometryczny występujący jako równanie lub układ równań. Pojęcie „model” występuje niemalże we wszystkich dyscyplinach naukowych. Zdaniem Irwina Brossa (Bross 1965) „*model to uproszczone odwzorowanie rzeczywistości*”. Jak można zauważyć, jest to ogólne stwierdzenie, które może zostać wykorzystane do opisu modeli z różnych dziedzin nauki. Zgodnie z przytoczoną definicją „uproszczone odwzorowanie rzeczywistości” oznacza, że do modelu mogą zostać dopuszczone tylko takie elementy, które w badanym przypadku są najważniejsze. Zazwyczaj model ekonometryczny jest próbą określenia występujących powiązań jednej zmiennej (zmiennej objaśnianej) z innymi (zmiennymi objaśniającymi). Można zatem przyjąć iż „*jest to konstrukcja formalna, która za pomocą pewnego równania lub układu równań przedstawia zasadnicze powiązania występujące pomiędzy rozpatrywanymi zjawiskami ekonometrycznymi*” (Hellwig 1973).

Jedną z najprostszych form modelu ekonometrycznego jest postać liniowa, którą wyraża się wzorem (Nowak 2002):

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1 X_1 + \alpha_2 X_2 + \dots + \alpha_k X_k + \varepsilon,$$

gdzie:

Y – zmienna objaśniana;

X_1, \dots, X_k - zmienne objaśniające;

$\alpha_1, \dots, \alpha_k$ - parametry strukturalne modelu;

ε - element losowy.

Wielkość zmiennej objaśnianej (zmiennej endogenicznej) otrzymuje się poprzez szacowanie. To zjawisko ekonomiczne, które opisane zostaje przez określone równanie lub układ równań badanego modelu. Nadrzędnym celem zmiennych objaśniających jest oszacowanie wielkości Y (Barczak 1998). Natomiast parametrami strukturalnymi są wartości, które występują przy określonej zmiennej i wyrażają ilościowy wpływ na badany atrybut. Posiadają opartą na danych wartość oszacowaną (Nowak 2002). Za pomocą elementu losowego wyrażana jest zmienna losowa posiadająca rozkład normalny, a jej oczekiwana wartość wynosi $E(\varepsilon)=0$ (Borkowski i in. 2004).

2.2 Budowa modelu ekonometrycznego

Stworzenie prawidłowego i w pełni praktycznego modelu ekonometrycznego to czasochłonny i wieloetapowy proces. Jego budowa wymaga rozległej wiedzy dotyczącej wielu sfer nauki (Bross 1965). W budowie modelu ekonometrycznego wyróżnia się sześć podstawowych etapów, do których należą (Gładysz, Mercik 2007):

- a) sformułowanie modelu;
- b) zebranie danych statystycznych;

- c) selekcja zmiennych objaśniających;
- d) estymacja paramentów modelu;
- e) weryfikacja model;
- f) interpretacja modelu.

Pierwszy etap budowy modelu ekonometrycznego to jego sformułowanie, czyli specyfikacja. Odbywa się w niej proces przyporządkowywania zestawu zmiennych objaśniających X opisywanej zmiennej objaśnianej Y oraz dokonywany jest wybór postaci analitycznej modelu (Bartosiewicz 1978). W dalszej części określa się źródła, z których zostaną pozyskane dane oraz przybliżony stopień ich wiarygodności. To stosunkowo trudna oraz złożona procedura, od której zależą dalsze kroki postępowania, jak również powodzenie badania jako całości. Powstały model w postaci hipotezy poddaje się w późniejszym etapie weryfikacji, mającej na celu sprawdzenie jego słuszności oraz poprawności. Warunkiem koniecznym do spełnienia, aby dana zmienna X_j pełniła funkcję zmiennej objaśniającej jest jej należyte zróżnicowanie (Barczak i Biolik 1998).

W drugim etapie budowy modelu ekonometrycznego jakim jest zebranie danych statystycznych odbywa się przygotowanie bazy danych stanowiącej podstawę szacowania parametrów strukturalnych, jak również struktury stochastycznej. Najpopularniejszym narzędziem wykorzystywanym do zmierzenia poziomu zróżnicowania zmiennych jest współczynnik zmienności, przedstawiany za pomocą następującego wzoru (Dziechciarz i in. 2002):

$$V_j = \frac{s_j}{\bar{x}_j},$$

gdzie:

s_j – odchylenie standardowe X_j ;

\bar{x}_j – średnia arytmetyczna X_j .

Wartość krytyczna współczynnika zmienności obierana jest zazwyczaj arbitralnie (najczęściej $V^*=0,10$). Zmienne spełniające nierówność $V_j < V^*$ uznaje się za niewystarczająco zróżnicowane, aby mogły zostać wykorzystane do budowy modelu i są z tego powodu eliminowane ze zbioru potencjalnych zmiennych objaśniających (Gawlik 2008).

W trzecim etapie, jakim jest selekcja zmiennych objaśniających, następuje ich wybór do budowanego modelu. Głównym celem tej fazy jest podział tzw. kandydatek (zmiennych objaśniających X) na trzy podstawowe grupy (Hastie i in. 2008):

- a) zmienne wprowadzane do modelu;
- b) zmienne niewprowadzane do modelu, ale mające swoje odzwierciedlenie w innych zmiennych znajdujących się w modelu;
- c) zmienne niewprowadzane do modelu, ze względu na brak wnoszonej informacji na temat zmiennej objaśnianej Y.

Istnieje wiele metod doboru zmiennych objaśniających, które są silnie skorelowane ze zmienną Y, natomiast słabo ze sobą. Zaliczamy do nich między innymi analizę korelacji, metodę wskaźników pojemności informacji zwanej również metodą Hellwiga czy metodę grafową (Hellwig 1973).

Estymacja parametrów strukturalnych to czwarty etap budowy modelu ekonometrycznego. W tym kroku ważny jest wybór metody estymacji, która ma bezpośredni wpływ na ostateczny wynik analizy. Na dobór określonego postępowania oddziałują charakterystyczne cechy danych statystycznych, jak również postać modelu, jego specyficzne właściwości i interpretacja. Wybór nieodpowiedniej metody estymacji może doprowadzić do wystąpienia błędów merytorycznych i w ostateczności do bezużyteczności całej analizy. Do metod najczęściej wykorzystywanych w tym etapie należą metoda najmniejszych kwadratów, analiza regresji i korelacji (Barczak i Biolik 1998).

Po etapie estymacji następuje weryfikacja opracowanego modelu, a więc najważniejsza faza występująca w jego procesie budowy. Jej celem jest sprawdzenie poprawności badanej zależności pod względem merytorycznym i formalnym. W tym etapie wykonuje się szereg testów dążących do jak najlepszego przeanalizowania modelu. Zaliczane są do nich statystyki dotyczące analizy wszystkich parametrów wchodzących w skład badanego zagadnienia (Gawlik 2008). Wykorzystanie oraz opis wybranych testów i metod weryfikacji zostały przedstawione w dalszej części pracy.

Ostatni etap w procesie budowy modelu ekonometrycznego stanowi jego praktyczne wykorzystanie, a także interpretacja uzyskanego w wyniku badania równania lub układu równań (Nowak 2002).

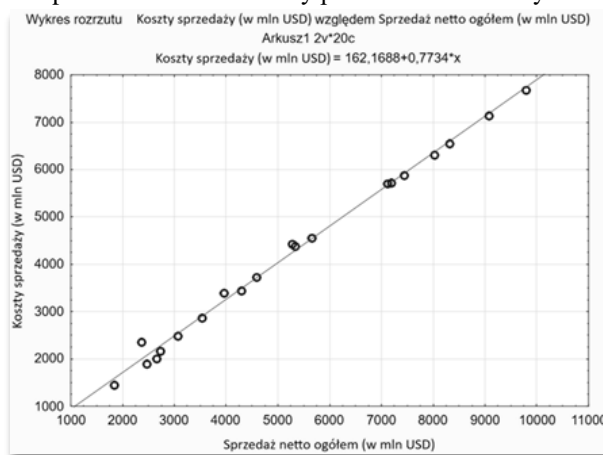
3. Budowa modelu ekonometrycznego – studium przypadku

W niniejszej części przedstawiono procedurę wyznaczania oraz weryfikacji modelu ekonometrycznego opisującego zależność kosztów sprzedaży od sprzedaży netto ogółem wybranej organizacji produkującej komponenty dla przemysłu motoryzacyjnego. Dane wejściowe wykorzystane do obliczeń pochodzą z raportów rocznych i obejmują okres 20 lat od 1998r. do 2017r. Zbiór danych został przedstawiony w tabeli 1. Większość analiz wykonano z wykorzystaniem programu STATISTICA.

Tab. 1. Dane wejściowe.

Rok	Koszty sprzedaży [mln USD]	Sprzedaż netto ogółem [mln USD]
1998	1450,70	1836,80
1999	1888,50	2458,60
2000	2003,10	2645,90
2001	2351,60	2351,60
2002	2176,50	2731,10
2003	2482,50	3069,20
2004	2874,20	3525,30
2005	2340,00	4293,80
2006	3735,50	4585,40
2007	4378,70	5328,60
2008	4425,40	5263,90
2009	3401,00	3961,80
2010	4559,50	5652,80
2011	5704,30	7114,70
2012	5716,30	7183,20
2013	5879,10	7436,60
2014	6548,70	8305,10
2015	6320,10	8023,20
2016	7137,90	9071,00
2017	7679,20	9779,30

W pierwszym etapie zebrane dane zostały przedstawione na wykresie rozrzutu (Rys.1).



Rys. 1. Wykres rozrzutu analizowanego modelu.

Analizując otrzymany wykres zauważono, iż punkty układają się z niewielkimi odchyleniami na linii prostej. Na tej podstawie można domniemywać o liniowej zależności między badanymi zmiennymi. Z tego też powodu, dla badanej zależności zaproponowano model w postaci:

$$K=a*S+b+\varepsilon,$$

gdzie:

K – zmienna objaśniana, którą są koszty sprzedaży [mln USD];

S – zmienna objaśniająca, którą jest sprzedaż netto ogółem [mln USD];

a, b – nieznanne parametry strukturalne badanego modelu;

ε – składnik losowy.

Przy pomocy programu STATISTICA, który wspomaga proces budowy modelu ekonometrycznego, wyznaczono współczynniki regresji liniowej dla dwóch serii danych (Tab. 2).

Tab. 2. Podsumowanie regresji zmiennej zależnej: Koszty sprzedaży (w mln USD).

N=20	R=0,9976 R ² =0,9953 Poprawiony R ² =0,9950 F(1,18)=3782,30 p<0,0000 Błąd standardowy estymacji: 135,44					
	b*	Błąd st. z b*	b	Błąd st. z b	t(18)	p
W. wolny			162,1688	72,4169	2,2394	0,0379
Sprzedaż	0,9976	0,0162	0,7734	0,0126	61,5001	0,0000

Wykorzystując estymację przeprowadzoną w programie otrzymano zależność liniową badanych kosztów od przychodów ze sprzedaży w postaci:

$$K=0,773*S+162,168 \text{ [mln USD]}.$$

Szczegółowe wielkości oszacowane w programie przedstawiono w Tab. 3.

Tab. 3. Zestawienie wielkości oszacowanych przez program.

Parametr	Opis	Wartość
N	liczba przypadków	20
K	ilość parametrów szacownych	2
n-k	liczba stopni swobody	18
R	korelacja występująca między badanymi danymi	0,9976
R ²	współczynnik determinacji	0,9952
$\overline{R^2}$	skorygowany R ²	0,9950
F	wartość statystyki F-Snedecora	3 782,30
Sey	standardowy błąd estymacji	135,44
a	parametr przy zmiennej objaśnianej	0,7734
b	wyraz wolny	162,1688
Sea	błąd standardowy współczynnika a	0,0125
Seb	błąd standardowy współczynnika b	72,4168
t(18)a	statystyka t-Studenta parametru a	61,5005
t(18)b	statystyka t-Studenta parametru b	2,2393

Powyższe wartości pozwalają przypuszczać, iż równanie linii regresji zostało wyznaczone w sposób poprawny. Aby to potwierdzić należy podjąć działania zmierzające do weryfikacji zbudowanego modelu, potwierdzające jego poprawność. W literaturze dotyczącej budowania modeli ekonometrycznych dostępne są różne testy służące do ich weryfikacji (Welfe 2009). Wybrane z nich przedstawiono w dalszej części pracy.

3.1 Badanie współczynnika determinacji

W procesie weryfikacji modelu wykorzystywany jest współczynnik determinacji $\overline{R^2}$. Opisuje on stopień, w jakim model wyjaśnia kształtowanie się zmiennej objaśnianej. Wspomniany współczynnik przyjmuje wartości mieszczące się w przedziale od 0 do 1. Definiowany jest za pomocą wzoru (Klimanek i Witkowski 2006):

$$\overline{R^2} = \frac{\sum_{t=1}^n (\hat{y}_t - \bar{y})^2}{\sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2}$$

gdzie:

y_t – rzeczywista wartość zmiennej objaśnianej;

\hat{y}_t – wyznaczona na podstawie modelu wartość zmiennej objaśnianej;

\bar{y} – średnia wartość zmiennej objaśnianej.

Wartość krytyczna współczynnika determinacji przyjmowana jest przez analityka w sposób samowolny. W praktyce zwykle uważa się, że jeśli $\bar{R}^2=0,6$ to model został zbudowany w sposób poprawny. Niemniej jednak im jego wartość jest wyższa, tym równanie bądź układ równań w precyzyjniejszy sposób wyjaśnia badane zjawisko (Nowak 2002). W rozpatrywanym przykładzie współczynnik determinacji kształtuje się na poziomie 0,99 i jest on wyższy od przyjętej wartości krytycznej, co oznacza poprawność zbudowanego modelu.

3.2 Badanie istotności wyznaczonych parametrów strukturalnych

Badanie istotności wyznaczonych parametrów strukturalnych wykonywane jest przy użyciu testu t-Studenta. W przypadku, gdy wygenerowana przez program wartość statystyki jest wyższa od wartości krytycznej to określony parametr jest istotny (Koślacz i in. 2003). Wartość krytyczna jest odczytywana z tablic t-Studenta dla określonego przez badacza poziomu istotności α oraz liczby stopni swobody. W badanym przypadku wspomniane parametry wynoszą odpowiednio 0,05 oraz 18. Poszukiwana wartość to $t_{kr}=2,101$. Wartości, które zostały otrzymane przy użyciu programu STATISTICA wynoszą $t(18)a=61,5005$ oraz $t(18)b=2,2393$. Nierówności $t(18)a>t_{kr}$, $t(18)b>t_{kr}$ świadczą o istotności wyznaczonych parametrów strukturalnych modelu. O istotności parametrów strukturalnych świadczy też wyliczona dla nich wartość poziomu istotności $p<0,05$.

3.3 Analiza istotności układu współczynników

Test Fishera-Snedecora wykorzystywany jest do sprawdzania statystycznej istotności parametrów występujących przy zmiennych objaśniających. Dane parametry można uznać za istotne, gdy wyliczona wartość F jest większa od wartości krytycznej F_{kr} . Statystykę F-Snedecora wylicza się wykorzystując wzór (Nowak 2002):

$$F = \frac{(n-k-1)}{k} * \frac{\bar{R}^2}{1-\bar{R}^2},$$

gdzie:

n – liczba danych;

k – liczba szacowanych parametrów;

\bar{R}^2 – wartość współczynnika determinacji.

Procedura postępowania podczas sprawdzenia statystyki Fishera-Snedecora przebiega w sposób następujący (Nowak 2002):

- obliczenie wartości empirycznej F,
- odczytanie wartości krytycznej F_{kr} z tablic F-Snedecora dla zadanych parametrów (określonego α , $m_1=k$ i $m_2=n-k-1$ stopni swobody),
- nierówność $F>F_{kr}$ oznacza, iż parametry modelu są istotne.

W analizowanym modelu $F(1,18) = 3\,782,30$, natomiast krytyczna wartość statystyki odczytana z tablic kształtuje się na poziomie 3,592. Oznacza to, iż układ współczynników jest istotny.

3.4 Analiza możliwości interpretacji modelu

Analizowany model reprezentuje zależność występującą między kosztami sprzedaży a sprzedażą. Z tego powodu powinien on spełniać poniższe założenia:

- a) wraz ze wzrostem wartości sprzedaży powinny wzrastać także koszty ($a>0$);
- b) dla dowolnej wielkości sprzedaży, koszt powinien być nieujemny ($b\geq 0$).

W analizowanym przykładzie współczynniki a oraz b są dodatnie i tym samym poprawnie odzwierciedlają rzeczywistość. Z modelu wynika, że wzrost wartości sprzedaży o jedną jednostkę spowoduje wzrost kosztów średnio o 0,7734 [mln USD]. Koszty niezależne od wartości sprzedaży wynoszą 162,168 [mln USD].

3.5 Badanie autokorelacji składnika losowego

Najpopularniejszym testem wykorzystywanym do sprawdzania, czy wśród reszt modelu występuje autokorelacja jest statystyka Durбина-Watsona. Jej wartość empiryczną można otrzymać w programie STATISTICA. Porównuje się ją do wartości krytycznych odczytanych z tablic Durбина-Watsona dla określonego poziomu istotności, liczby badanych przypadków i liczby zmiennych niezależnych w równaniu linii regresji. Ze wspomnianych tablic odczytuje się dwie wielkości d_L i d_U . Po porównaniu ich z wartością empiryczną można otrzymać następujące nierówności (Koślacz i in. 2003; Luszczewicz i in. 2001):

- $DW < d_L$ – autokorelacja składnika losowego – zbudowanie modelu w błędny sposób;
- $d_L < DW < d_U$ – nie można podjąć decyzji dotyczącej odrzucenia lub przyjęcia hipotezy dotyczącej autokorelacji składnika losowego;
- $DW \geq d_U$ – brak autokorelacji składnika losowego – model został zbudowany w sposób poprawny.

Z tablic rozkładu Durбина-Watsona dla wielkości $n=20$ oraz $\alpha=0,05$ odczytano $d_L=1,20$, $d_U=1,41$. Empiryczna wartość statystyki wynosi $DW=1,82$. Zachodzi nierówność $DW > d_U$ oznaczająca brak autokorelacji w analizowanym modelu.

3.6 Badanie symetrii składnika losowego

Wartość empiryczna statystyki t-Studenta stanowi podstawę analizy składnika losowego. Wyrażana jest za pomocą wzoru (Koślacz i in. 2003):

$$t = \frac{\frac{n_1 - \frac{1}{2}}{n - 2}}{\sqrt{\frac{n_1(1 - \frac{n_1}{n})}{n - 1}}}$$

gdzie:

n – całkowita liczba reszt;

n_1 – liczba reszt dodatnich.

Model uważa się za poprawny, gdy reszty są symetryczne, a więc gdy zachodzi nierówność $t < t_{kr}$. Dla małej liczby przypadków ($n \leq 30$) wartość krytyczna wyznaczana jest z rozkładu t-Studenta. Po przeprowadzeniu obliczeń zmierzających do określenia, czy w analizowanym modelu istnieje symetria składnika losowego otrzymano $n=20$, $n_1=7$, a zatem: $t=1,371$. Odczytana wartość krytyczna z tablic t-Studenta wynosi $t_{kr}=2,101$. Zachodzi nierówność $t < t_{kr}$ oznaczająca symetryczność rozkładu reszt.

3.7 Badanie stacjonarności składnika losowego

W ostatnim kroku postanowiono zbadać stacjonarność składnika losowego, informującą o okolicznościach, w jakich przyjmuje on wartość stałą. Statystyka, która pozwala to zweryfikować wygląda następująco (Bartosiewicz 1978):

$$t = \frac{|r_{e,t}| \sqrt{n-2}}{\sqrt{1 - r_{e,t}^2}}, \text{ gdzie: } r_{e,t} = \frac{\sum_{t=1}^n (e_t - \bar{e})(t - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (e_t - \bar{e})^2 \sum_{t=1}^n (t - \bar{t})^2}}$$

Składnik losowy wykazuje stacjonarność, jeśli $t \leq t_{kr}$. Wartość krytyczną t_{kr} odczytuje się z tablic t-Studenta dla zadanych parametrów (α oraz $n-2$). W analizowanym przykładzie otrzymano liczbę $r_{e,t}=0,116$, z czego wynika, że $t=0,497$. Odczytana wartość krytyczna wynosi $t_{kr}=2,119$, a wyliczone $t=0,496$. Oznacza to, iż składnik losowy modelu wykazuje stacjonarność.

4. Podsumowanie i wnioski

Model ekonometryczny to narzędzie umożliwiające w uproszczony oraz przejrzysty sposób przedstawienie rzeczywistości. Zbudowanie modelu jest procesem wieloetapowym, który wymaga od analityka znajomości teorii ekonomii jak i wiedzy matematycznej. Nadrzędną cechą modelu powinna być jego wartość praktyczna, co oznacza iż winien w dokładny sposób opisywać

rzeczywistość, aby po jego wdrożeniu mógł zostać wykorzystany jako narzędzie do wspierania procesu decyzyjnego w przyszłości.

Praca przedstawia opracowany model ekonometryczny opisujący zależność występującą pomiędzy kosztami sprzedaży, a sprzedażą netto ogółem jednego z największych amerykańskich concernów motoryzacyjnych. W wyniku przeprowadzonych analiz otrzymano model w postaci $K=0,773*S+162,168$ [mln USD], który przeszedł pozytywnie wszystkie etapy weryfikacji jakim został poddany. Zbudowany model w dokładny sposób opisuje rzeczywiste zjawisko występujące w analizowanej organizacji i może zostać wykorzystany w praktyce, gdyż jest obarczony stosunkowo małym błędem. Świadczy o tym wysoki współczynnik determinacji R^2 , który wynosi 0,995. Oznacza to, iż zmienna objaśniana (K- koszty sprzedaży) wyjaśniana jest przez model w 99,5%, a jedynie 0,5% przez zmienne nieuwzględnione w modelu.

Wyznaczanie zależności występujących pomiędzy zmiennymi w praktyce gospodarczej umożliwia racjonalne zarządzanie organizacją, dzięki możliwości sprecyzowania, jakie są konsekwencje i ryzyko porażki i/lub powodzenia podejmowanych działań. Takie postępowanie może w znaczny sposób wspomóc procesy decyzyjne w danej organizacji. Warunkiem koniecznym, aby model ekonometryczny mógł zostać wykorzystany w praktyce, jest jego poprawność, która zostaje potwierdzona w czasie wieloetapowej weryfikacji. Tylko model, który pomyślnie przeszedł weryfikację może zostać wdrożony w organizacji.

Podziękowania: Praca finansowana z subwencji Pracowni Surowców Biogenicznych IGSMiE PAN.

5. Literatura

- Barczak A, Biolik J (1998) Podstawy ekonometrii, AE, Katowice.
- Bartosiewicz S (1978) Ekonometria, PWE, Warszawa.
- Borkowski B, Dudek H, Szczęsny W (2004) Ekonometria, wybrane zagadnienia, PWN, Warszawa.
- Bross I (1965) Jak podejmować decyzje?, PWN, Warszawa.
- Dziechciarz J, Błaszczkowska A, Czeakała M i in. (2002) Ekonometria, WAE, Wrocław.
- Ekonometria. Metody, przykłady, zadania (2002) Red. J. Dziechciarz. WAE, Wrocław.
- Gawlik A (2008) Budowa i weryfikacja modelu ekonometrycznego dla określenia liniowej zależności pomiędzy kosztami pozyskania węgla a wielkością wydobycia. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 24(1), 27-44.
- Gładysz B, Mercik J (2007) Modelowanie ekonometryczne, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- Goryl A, Jędrzejczyk Z, Kukuła K i in. (2009), Wprowadzenie do ekonometrii, PWN, Warszawa.
- Hastie T, Tibshirani R, Friedman J (2008) The Elements of Statistical Learning. Data Mining, Inference, and Prediction, Springer Science+Business Media B.V., New York
- Hellwig Z (1973) Zarys ekonometrii, PWE, Warszawa.
- Klimanek T, Witkowski M (2006) Prognozowanie gospodarcze i symulacje w przykładach i zadaniach, AE, Poznań.
- Koślacz P, Lipiec-Zajchowska M, Manikowski M i in. (2003) Wspomaganie procesów decyzyjnych, C.H. Beck, Warszawa.
- Kraszevska M, Pujer K (2017) Konkurencyjność przedsiębiorstw. Sposoby budowania przewagi konkurencyjnej, Exante, Wrocław.
- Luszniewicz A, Słaby T (2001) Statystyka z pakietem komputerowym STATISTICA PL, C.H. Beck, Warszawa.
- Marcinek P (2019) Wsparcie procesu decyzyjnego z wykorzystaniem modeli ekonometrycznych na wybranym przykładzie, Praca inżynierska.
- Nowak E (2002) Zarys metod ekonometrii, PWN, Warszawa.
- Penc J (1996) Decyzje w zarządzaniu, Wydawnictwo Profesjonalnej Szkoły Biznesu, Kraków.
- Welfe A (2009) Ekonometria, PWE, Warszawa.
- Żukowska H, Spoz A, Zasuwa G (2016) Sprawozdawczość w procesie zarządzania i oceny działalności przedsiębiorstwa, Wydawnictwo KUL, Lublin.

9. Wpływ czynnika ludzkiego na bezpieczeństwo w transporcie drogowym

The impact of the human factor of safety in road transport

Nazarewicz Sybilla⁽¹⁾, Kozłowicz Katarzyna⁽²⁾

⁽¹⁾Katedra Maszyn Rolniczych, Leśnych i Transportowych, Wydział Inżynierii Produkcji, Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

⁽²⁾Katedra Biologicznych Podstaw Technologii Żywności i Pasz, Wydział Inżynierii Produkcji, Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Kozłowicz Katarzyna prof. uczelni

Nazarewicz Sybilla: sybilla_klap.94@o2.pl

Słowa kluczowe: transport drogowy, pojazd, kierowca, jeźdnia

Streszczenie

Celem artykułu jest analiza bezpieczeństwa i istotności czynnika ludzkiego w transporcie drogowym, z uwzględnieniem realizacji procesu decyzyjnego człowieka w sytuacji zagrożenia. Cały proces został podzielony na trzy etapy: postrzeganie, podejmowanie decyzji oraz reakcja. Scharakteryzowano elementy determinujące skrócenie lub wydłużenie czasu potrzebnego na realizację danego etapu, jak również wzajemne relacje pomiędzy człowiekiem a otoczeniem i pojazdem. Dodatkowo przedstawiono teoretyczne obliczenia skrajnych czasów reakcji kierowcy podczas sytuacji zagrożenia wymagającej natychmiastowego zatrzymania pojazdu, gdzie predyspozycje psychofizyczne mają duże znaczenie (doświadczenie i zdolność podejmowania decyzji kierowcy). Całkowity czas reakcji kierowcy w skrajnych przypadkach może spowodować, że pojazd przebędzie blisko 50% drogi zanim rozpocznie wytracanie prędkości.

1. Wstęp

Transport jest to szereg działań związanych z przemieszczaniem w przestrzeni wszelkiego rodzaju dóbr oraz osób za pomocą odpowiednio przeznaczonych do tego środków transportu. Ponadto transport obejmuje również szereg czynności współtowarzyszących, koniecznych do zapewnienia ciągłości transportowej, w skład których wchodzi procesy oraz czynności dokumentacyjno-manipulacyjne umożliwiające transport pomiędzy płatnymi strefami lub wymagającymi potwierdzenia poprawności ładunku (Urbani-Popiołek 2013). Transport dzielimy na lądowy, morski i lotniczy. Najbardziej rozpowszechniony jest transport lądowy drogowy z uwagi na swobodę ruchu pojazdów oraz możliwość dotarcia w każde miejsce. Obecnie w procesie transportowym człowiek odgrywa bardzo istotną rolę będąc zarówno elementem procesu zarządzania w odniesieniu logistycznym, jak również elementem kierującym środkiem transportu. Po mimo bardzo dynamicznie rozwijającej się infrastruktury zapewniającej bezkolizyjny ruch pojazdów autonomicznych nadal człowiek w procesie przemieszczania jest niezastąpiony. Powodem tego jest sposób podejmowania decyzji na podstawie otrzymywanych informacji z otoczenia. Maszyna nawet najbardziej zaawansowana postępuje według zaprogramowanych schematów nie posiadając abstrakcyjnego myślenia do podejmowania decyzji niekiedy słusznych, ale nielogicznych (Kautsch 2018).

2. Opis zagadnienia

Każdy rodzaj transportu ma swoją specyfikę i charakteryzuje się innymi cechami. Cechą charakterystyczną transportu lądowego jest wykorzystanie pojazdów kołowych, zarówno poruszających się po ograniczonych torach (transport szynowy lub kolejowy), jak również w przypadku transportu za pośrednictwem infrastruktury drogowej, która nie ogranicza toru przemieszczania. W przypadku transportu morskiego medium umożliwiającym poruszanie jest woda. Natomiast szlak przemieszczania się statków jest umownie przyjęty tak, aby zapewnić bezkolizyjny ruch oraz wykorzystać wspomagające prądy morskie. Podobnie jest w przypadku transportu powietrznego, który wykorzystuje zjawiska fizyczne pozwalające się utrzymać w powietrzu.

W transporcie lotniczym określone są kanały powietrzne, mające na celu wyeliminowanie kolizji swobodnie poruszających się samolotów (Kautsch 2018; Woźniak i Kukielka 2011). Najwięcej wypadków odnotowuje się dla transportu kołowego - drogowego. Powodem takiej sytuacji jest współdzielenie infrastruktury drogowej przez wielu różnych uczestników ruchu, jak również konieczność prowadzenia infrastruktury drogowej przez aglomeracje. Według statystyk policyjnych, co roku odnotowywany jest spadek ilości zdarzeń drogowych i wypadków, jednak w dalszym ciągu wartość przekracza 30000 rocznie, natomiast śmiertelność uczestników zdarzeń drogowych to blisko 3000 osób rocznie (KRBRD 2014-2019).

3. Przegląd literatury

Na bezpieczeństwo w ruchu drogowym składają się trzy elementy: człowiek, pojazd oraz droga, a także wzajemne relacje człowiek-pojazd, pojazd-droga i droga-człowiek. Kolizje drogowe lub zderzenia drogowe z mechanicznego punktu widzenia polegają na kontakcie dwóch lub więcej pojazdów podczas ich przemieszczania. Na podstawie analizy krajowej rady bezpieczeństwa ruchu drogowego można zauważyć, że najczęściej 28,2% ÷ 31,8% kolizji ma charakter zderzenia bocznego oraz najechanie na pieszego 22,2% ÷ 25,3%. Przyczyn tego rodzaju kolizji jest wiele, ale wszystkie sprowadzają się do nie zatrzymania pojazdu przed nagle pojawiającą się przeszkodą. W każdej sytuacji, czy to przy zderzeniu bocznym, tylnym, czołowym lub z pieszym, kluczową rolę odgrywa dostępna droga do zatrzymania pojazdu. Odcinek potrzebny do zatrzymania pojazdu jest zależnością pomiędzy prędkością, z jaką on się porusza, a czasem dostępnym na zrealizowanie procesu hamowania (Bułka i in. 2006; KRBRD 2014-2019).

Z punktu widzenia człowieka, jako jednostki realizującej proces hamowania czynność ta jest określona predyspozycjami psychofizycznymi. Jest to szereg cech osobowości, charakteru oraz sprawności fizycznych, jak również zdolności manualnych umożliwiających wykonanie prawidłowo danych zadań lub obowiązków. Rozpatrując proces hamowania jako zdarzenie nagłe, należy brać pod uwagę obecny stan kierowcy, czyli jego zmęczenie, oddziaływanie na stres oraz zdolność do reakcji. Czas reakcji kierowcy na zaistniałą sytuację jest to czas liczony od momentu, kiedy to kierowca uświadomi sobie, że znalazł się w sytuacji zagrożenia do momentu rozpoczęcia działania układu hamulcowego w danym pojeździe (Guzek i in. 2006). Przesunięcie początku reakcji, a przez to i skrócenie czasu reakcji, może być związane z spostrzeganiem peryferyjnym czy dostrzeganiem ruchu i sytuacji dziejących się poza obszarem bezpośredniej koncentracji wzroku. Za przekazanie pozyskanych informacji jest odpowiedzialny ośrodkowy układ nerwowy, który składa się z mózgu, rdzenia kręgowego oraz układu nerwowego. Odebrany obraz o pojawiającej się przeszkodzie przetwarzany jest na impulsy nerwowe, a przekazywane przez ośrodek decyzyjny podejmujący reakcje w obrębie danego scenariusza do efektorów, którymi na ogół są tkanki mięśniowe realizujące akcje. Czas reagowania kierowcy jest uzależniony od danej sytuacji, w jakiej się znajduje, od ilości rozważanych decyzji oraz faktycznie podejmowanych czynności. Reakcja przebiega trzyetapowo.

Pierwszy etap to czas postrzegania pojawiającej się przeszkody do momentu, kiedy kierowca uświadomi sobie daną sytuację pod kątem wystąpienia zagrożenia. Czas postrzegania zawiera się w przedziale od 0 do 0,7 sekundy i w dużym stopniu zależy od lokalizacji obiektu w stosunku do obszaru koncentracji wzroku, kontrastu oraz ruchu pojawiającego się obiektu. Przytoczony czas dotyczy sytuacji, w których przeszkoda znajduje się na wprost kierowcy oraz jest kontrastowa na tle otoczenia. Przeszkoda, która jest w ruchu na tle otoczenia jest szybciej zauważalna niż pozostająca w bezruchu, a czas odnotowuje się w przedziale od 0 do 0,2 sekundy.

Drugi etap to czas potrzebny na identyfikację i podjęcie decyzji. Mieści się on w przedziale od 0,2 do 0,6 sekundy i zależy od stopnia skomplikowania sytuacji oraz doświadczenia kierowcy w podejmowaniu decyzji. Decyduje również ilość możliwych wariantów wykonania manewrów w obrębie zaistniałej sytuacji. Im większa liczba wariantów tym czas decyzji jest dłuższy, ponieważ umysł szuka najbardziej optymalnego rozwiązania, a z uwagi na istnienie ciągłego procesu myślowego podjęta decyzja może być na bieżąco korygowana.

Trzeci etap to czas mechanicznego działania organizmu. Stanowi on czas od momentu podjęcia decyzji kierowcy, czyli wybrania odpowiedniego rozwiązania do wykonania konkretnej

czynności, czyli ruch kończyny i zadziałania na odpowiedni mechanizm w pojeździe. Czas potrzebny na fizyczną reakcję organizmu zależy od tego, co musi zostać poruszone. W przypadku naciśnięcia na hamulec czas ten zawiera się w przedziale od 0,25 do 0,7 sekundy, natomiast czas potrzebny do wykonania ruchu kierownicy to ok. 0,2 sekundy. W tym czasie odbywa się zamiana decyzji na impulsy nerwowe i za pomocą układu nerwowego przekazanie sygnału do mięśni, które podejmują działanie. Przedstawione wartości czasów dla poszczególnych etapów obejmują dobrą kondycję psychofizyczną kierowcy (Brożyna 2017; Stańczyk i Jurecki 2006). W sytuacjach, kiedy organizm jest zmęczony lub osoba jest starsza, czas reakcji zmienia się. Badania przeprowadzone na grupie osób w różnym wieku wykazały, że dla kierowców w wieku 45-64 lat czas reakcji wydłuża się o ok. 11%, natomiast w przypadku reakcji złożonych czas wydłużał się ponad 27% (Stańczyk i Jurecki 2014; Guzek i Kobyłański 2013).

Proces hamowania z poziomu pojazdu jako elementu mechanicznego realizującego zadanie określone ruchem pedału hamulca sprowadza się do następowania po sobie kolejnych działań. Rolą układu hamulcowego jest zatrzymanie obracających się kół. W większości pojazdów układ hamulcowy jest zespołem hydraulicznym, w którym pedał hamulca oddziałuje na pompę hamulcową, a ta wywołując ciśnienie doprowadza do zaciśnięcia się klocków hamulcowych na tarczach lub rozwarcia się szczęk hamulcowych w bębnach. Z uwagi na to, że układ hamulcowy jest ściśle powiązany z układem jezdny to konstrukcja musi zapewniać swobodne obracanie się kół bez żadnych oporów podczas jazdy. Aby połączyć ze sobą te dwie cechy, pojazd musi posiadać pływający układ hamulcowy. Mikro nierówności oraz mikro bicie tarczy hamulcowej lub bębna powoduje odepchnięcie elementów ciernych. Sprawia to, że nie ocierają się one o siebie i nie generują oporów ruchu, ale powodują powstanie luzów. Te niewielkie luzy w mechanizmie układu hamulcowego mają istotne znaczenie w realizacji procesu zatrzymania. Kierowca wywierając siłę na pedał hamulca zaczyna kasować wszystkie luzy w układzie, a następnie oddziałuje na cierne elementy układu hamulcowego powodując wywołanie siły tarcia prowadzącej do zatrzymania się kół. Wspomniany luz w układzie hamulcowym wpływa na wykonanie jałowego ruchu pedału hamulca, a co za tym idzie utratę czasu zanim nastąpi efektywne działanie hamulca. Szacuje się, że czas liczony od momentu dotknięcia stopą pedału hamulca do momentu przesunięcia się elementów ciernych wynosi ok. 0,3 sekundy. W momencie, kiedy układ hamulcowy wywoła siłę tarcia powodującą zatrzymanie lub spowolnienie obracania się kół zaczyna się właściwe hamowanie pojazdu i zaczyna on zmniejszać swoją prędkość aż do całkowitego zatrzymania. W tym przypadku czas potrzebny na zatrzymanie pojazdu liczony jest w aspekcie opóźnienia hamowania z uwagi na rodzaj wykonywanego ruchu pojazdu. Opóźnienie hamowania jest zależne od rodzaju podłoża, po którym się porusza pojazd, czyli od współczynnika tarcia, jak również od masy pojazdu oraz prawidłowego jej rozmieszczenia. Generalna dyrekcja dróg publicznych klasyfikuje podłoże suche i czyste, po którym się poruszają pojazdy na cztery klasy według współczynnika tarcia. Klasa A to podłoże o stanie nawierzchni bardzo dobrym (współczynnik tarcia μ jest większy od 0,52). Klasa B to powierzchnia o stanie zadawalającym (współczynnik tarcia μ jest w przedziale $0,37 \div 0,51$). Klasa C to stan podłoża niezadawalający (współczynnik tarcia μ jest w przedziale $0,30 \div 0,36$). Klasa D to stan podłoża zły (współczynnik tarcia μ jest mniejszy od 0,29) (GDDP 2002). Opady deszczu obniżają wartość współczynnika tarcia. Pomimo tego, że podłoże jest wykonywane w technologii mikro i makro porowatej to intensywność opadów potrafi całkowicie je zakryć. W takim przypadku decydujące znaczenie ma rodzaj ogumienia i jego zdolność do odprowadzania wody za pomocą rowków bieżnika (Prajwowski i Gołębiowski 2014). Badania wykazały, że średnie opóźnienie hamowania dla samochodu osobowego na suchym asfalcie bez obciążenia to wartość $4,79 \text{ m s}^{-2}$, natomiast z obciążeniem $4,71 \text{ m s}^{-2}$. W przypadku powierzchni mokrej bez obciążenia wartość ta wynosiła $5,30 \text{ m s}^{-2}$, natomiast z obciążeniem $5,41 \text{ m s}^{-2}$ (Tarkowski i Mikus 2016).

Analizując poszczególne elementy podczas hamowania, czyli: człowiek, pojazd i podłoże musimy mieć jeszcze na uwadze ich wzajemne zależności, które przyczyniają się do wydłużenia drogi hamowania i doprowadzenia do kolizji.

Relacja człowiek - pojazd to najistotniejsza zależność. To, w jaki sposób człowiek oddziałuje na samochód przez naciskanie na pedał hamulca decyduje o efektywności hamowania. Największą intensywność hamowania uzyskuje się na granicy poślizgu. Niestety całkowite zblokowanie kół może

powodować nawet 50% wydłużenie drogi hamowania z uwagi na różnicę pomiędzy wartością współczynnika tarcia tocznego a ślizgowego ogumienia i podłoża. Biorąc pod uwagę, że granica wystąpienia poślizgu jest bardzo mała, dobrym efektem jest tak zwane hamowanie pulsacyjne, czyli osiągnięcie poślizgu oraz odpuszczanie nacisku. Umiejętność ta wymaga długotrwałego szkolenia. Rozwiązaniem eliminującym powstawanie poślizgu, a jednocześnie maksymalnie intensyfikującym proces hamowania jest ABS (Anti-lock Braking System). System ten umożliwia z dużą częstotliwością przekraczanie granicy poślizgu oraz natychmiastowy powrót do przyczepności kół (Filipiak i in. 2012).

Relacja człowiek - droga to nie tylko odczuwanie przez kierowcę kształtu drogi lub nierówności, ale szereg informacji, które docierają do niego. Do takich informacji zalicza się także sposób postrzegania innych uczestników ruchu, znakowy system informacji w tym znaki poziome i pionowe oraz infrastrukturę, która może ograniczać pełne widzenie otoczenia (Brożyna 2017). Mając na uwadze pełny obraz otoczenia oraz wystarczającą ilość informacji, kierowca nie zawsze potrafi podejmować poprawne decyzje. Natomiast w sytuacjach zagrożenia, kiedy do podjęcia są złożone decyzje kierowca potrafi odwlekać w czasie ich realizację.

Ostatnią relacją jest pojazd - droga. Pomimo tego, że są tylko elementy mechaniczne ze sobą współpracujące to niepowtarzalność ich zależności prowadzi do różnych wzajemnych zachowań. Aby proces hamowania przebiegał poprawnie musi być zachowany ciągły kontakt pojazdu z nawierzchnią za pomocą ogumienia kół, dlatego istotna jest trwałość i technologiczność wykonania podłoża. Obecnie stosowane materiały i technologie nie zapewniają odpowiedniej trwałości na długi czas. Ruch kołowy powoduje powstawanie kolein oraz wgnieceń w asfalcie w miejscach częstego zatrzymywania się pojazdów. Tego typu nierówności zarówno wzdłużne jak i poprzeczne ograniczają ciągłość kontaktu. W przypadku nierówności wzdłużnych, czyli kolein, koło nie toczy się po powierzchni płaskiej, gdzie kontakt odbywa się na całej szerokości bieżnika, a po części wglębnej lub wypukłej. Do tego dochodzi jeszcze sytuacja, w której rozstaw kolein rzadko odpowiada rozstawowi kół pojazdu, co powoduje, że kontakt koła w skrajnych przypadkach odbywa się też bokiem ogumienia. Sytuacja ta powoduje zmniejszenie wymaganej powierzchni styku koła z podłożem do przeprowadzenia właściwego procesu hamowania. W przypadku nierówności poprzecznych koło najjeżdżające na wzniesienie nierówności odrywa się i przemieszcza nad dołkiem. Taka sytuacja powoduje nagły spadek przyczepności do zera i zablokowanie kół, co przy kolejnym kontakcie z podłożem powoduje poślizg. Przemieszczenie się pojazdu bez kontaktu z podłożem wydłuża drogę hamowania.

Wymienione zależności oraz czynniki wpływają na czas poszczególnych zadań determinują proces hamowania i określają drogę hamowania. Zakładając uproszczenia, drogę hamowania pojazdu można zapisać w postaci równania (Chawiński i in. 2017; Stańczyk i Jurecki 2014):

$$S = v_p \cdot (t_c + t_z + 0,5 \cdot t_n) + \frac{v_p^2}{2 \cdot a_h}$$

gdzie:

S - droga hamowania [m],

v_p - prędkość samochodu, od której rozpoczyna się hamowanie [$m \cdot s^{-1}$],

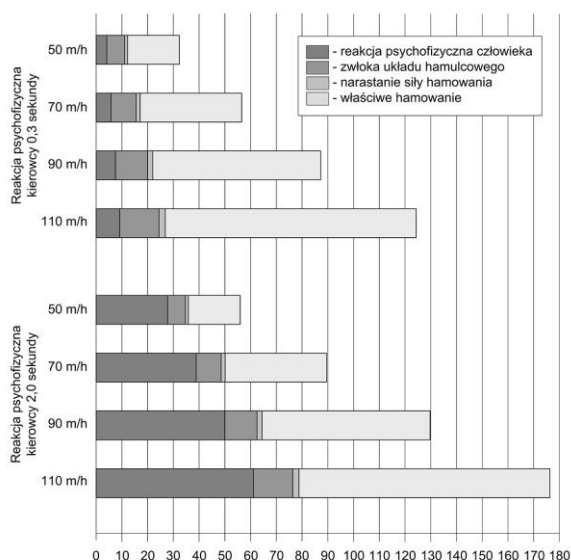
t_c - czas reakcji psychofizycznej człowieka [s],

t_z - czas zwłoki układu hamulcowego [s],

t_n - czas narastania siły hamowania [s],

a_h - opóźnienie hamowania pojazdu [$m \cdot s^{-2}$].

W celu przedstawienia jak istotne znaczenie ma wpływ czynnika ludzkiego na drogę hamowania przedstawiono kilka wariantów dla różnych prędkości, od których rozpoczęto hamowanie (50 km h^{-1} , 70 km h^{-1} , 90 km h^{-1} i 110 km h^{-1}), jak również dla skrajnych przypadków czasu reakcji człowieka (Rys.1). Do analizy przyjęto skrajne opisane wcześniej czasy reakcji psychofizycznej $0,3 \div 2,0$ sekundy, czas zwłoki układu hamulcowego $0,3$ sekundy, czas narastania siły hamowania $0,16$ sekundy (wartość ta zawiera się w granicach $0,14 \div 0,18$ sekundy), natomiast średnie opóźnienie hamowania przyjęto dla powierzchni suchej $4,79 \text{ m s}^{-2}$ (Stańczyk i in. 2011).



Rys. 6. Droga hamowania dla różnych czasów reakcji psychofizycznej kierowcy.

Tab. 1. Zestawienie drogi hamowania dla różnych prędkości początkowych hamowania i różnych czasów reakcji psychofizycznej kierowcy.

Prędkość początkowa [km h ⁻¹]	Droga hamowania od rozpoznania do zatrzymania [m]		Udział przebytej drogi dla reakcji psychofizycznej [%]	
	Reakcja psychofizyczna 0,3 s	Reakcja psychofizyczna 2,0 s	0,3 s	2,0 s
50	32	56	12,9	49,6
70	56	90	10,3	43,4
90	87	130	8,6	38,5
110	124	176	7,4	34,7

Wartości analizowanego przykładu dla wartości pośrednich prędkości 70 km h⁻¹ i 90 km h⁻¹ zostały zestawione w tabeli 1. Przedstawiona analiza pokazuje jak duży wpływ na drogę hamowania ma reakcja kierowcy. Niezależnie od czasu reakcji kierowcy droga hamowania jest uzależniona od prędkości początkowej oraz od opóźnienia hamowania wynikającego z warunków drogowych. Dla analizowanego przykładu, w którym reakcja kierowcy na wystąpienie konieczności nagłego zatrzymania pojazdu wynosi 0,3 sekundy, droga przebyta przez pojazd od momentu rozpoznania sytuacji do momentu zatrzymania wynosiła od 32 do 124 m. Natomiast udział procentowy przebytej drogi od momentu uświadomienia sobie sytuacji do zadziałania na pedał hamulca to 12,9% do 7,4% dla prędkości początkowej 50 km h⁻¹ i 110 km h⁻¹. Dla przykładu, w którym reakcja kierowcy wynosi 2,0 sekundy droga przebyta przez pojazd od momentu rozpoznania sytuacji do momentu zatrzymania wynosiła od 56 do 176 m. Natomiast udział procentowy przebytej drogi od momentu uświadomienia sobie sytuacji do zadziałania na pedał hamulca to 49,6% do 34,7% dla prędkości początkowej 50 km h⁻¹ i 110 km h⁻¹.

4. Podsumowanie

Na bezpieczeństwo w ruchu drogowym składają się trzy elementy: człowiek, pojazd, oraz droga, a także wzajemne relacje człowiek-pojazd, pojazd-droga i droga-człowiek. Pomijając sprawność techniczną pojazdu oraz jakość drogi, po której się on porusza, największa odpowiedzialność spoczywa na człowieku, jako jednostce, która podejmuje decyzje podczas

kierowania pojazdem. Reakcja człowieka na sytuacje zagrożenia poprzedzone są analizą otoczenia pod kątem otrzymania wszystkich informacji w dostatecznie krótkim czasie. Skupienie zmysłu wzroku pełniące najistotniejszą rolę w postrzeganiu otoczenia oraz zdolność do swobodnego myślenia i podejmowania niekiedy złożonych decyzji determinuje możliwość uniknięcia kolizji lub zderzenia. Przeprowadzona analiza różnych czasów reakcji związanych ze zdolnościami psychofizycznymi kierowcy pokazuje, że jest to bardzo istotny czynnik. Od kondycji oraz szybkości podejmowania decyzji zależy jak szybko rozpocznie się manewr. Można zauważyć, że w skrajnych przypadkach pojazd potrafi przebyć blisko 50% drogi dostępnej do zatrzymania zanim pojazd zacznie właściwie hamować wytracając prędkość do zera. Analiza pokazuje, że czynnik ludzki ma bardzo duży wpływ na bezpieczeństwo w ruchu drogowym. Obecnie w pojazdach wprowadzane są systemy, które na bieżąco analizują ruch uliczny i w ułamku sekundy mogą rozpoznać szybko zbliżającą się przeszkodę, natychmiast realizując proces hamowania. Jest to dobry kierunek rozwoju techniki transportu drogowego pod warunkiem, że systemy tego typu będą stanowiły jedynie dodatek wspomagający reagowanie w sytuacjach zagrożenia, aby nie zdejmować z kierowcy obowiązku myślenia i kontrolowania sytuacji na drodze.

5. Literatura

- Brożyna E (2017) Czynniki ludzkie a bezpieczeństwo w ruchu drogowym. *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe* 18(7-8): 49-52.
- Bułka D, Walczak S, Wolak S (2006) Proces hamowania – aspekt prawny i techniczny w ujęciu symulacyjnym i analitycznym. III Konferencja naukowo-szkoleniowa „Rozwój techniki samochodowej a ubezpieczenia komunikacyjne” 19-52.
- Chawiński D, Czech P, Gustof P, Turoń K, Kołdys K, Ziola A (2017) Droga hamowania wybranych samochodów osobowych. Cz. 1. *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe* 18(12): 51-57.
- Generalna Dyrekcja Dróg Publicznych (2002) Biuro Studiów Sieci Drogowej - Załącznik D, System Oceny Stanu Nawierzchni 1-34.
- Guzek M, Jurecki R, Lozia Z, Stańczyk T (2006) Badania zachowania kierowców w sytuacjach przedwypadkowych realizowane w symulatorze jazdy samochodem. *Konferencja Instytutu Ekspertyz Sądowych* 157-171.
- Guzek M, Kobylański K (2013) Badanie czasu reakcji kierowców z wykorzystaniem urządzenia MCR – 2001E. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport* 191-199.
- Filipiak M, Jajczyk J, Nawrowski R, Putz Ł, (2012) Systemy bezpieczeństwa czynnego i ich diagnostyka. *Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering* 69: 219-226.
- Kautsch A (2018) Organizacja transportu oraz obsługa klientów i kontrahentów cz. 1 *Wydawnictwa Komunikacji i Łączności* 16-33.
- Krajowa Rada Bezpieczeństwa Ruchu Drogowego, Stan Bezpieczeństwa Ruchu Drogowego oraz działania realizowane w tym zakresie w latach 2014 -2019.
- Prajwowski K, Gołębiewski W (2014) Wpływ warunków atmosferycznych na drogę hamowania. *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe* 15(6): 222-225.
- Stańczyk TL, Jurecki R (2014) Czas reakcji w złożonej sytuacji drogowej (hamowanie podczas omijania przeszkody). *The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji* 66(4): 69–82.
- Stańczyk TL, Jurecki R (2006) Czasy reakcji kierowców w stanach zagrożenia wypadkowego. *Materiały III Konferencji "Rozwój techniki samochodowej a ubezpieczenia komunikacyjne"* Wyd. WSB im. J. Chrapka 321- 348.
- Stańczyk TL, Jurecki RS, Walczak S, Pieniążek W (2011) Analiza czasów narastania siły na pedale hamulca oraz narastania opóźnienia hamowania uzyskiwanych podczas badań sytuacji zagrożenia wypadkowego, symulowanych na torze. *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe* 12(12): 349-359.
- Tarkowski S, Mikus D (2016) Opóźnienie hamowania pojazdów w różnych warunkach ruchu. *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe* 17(6): 438-441.

- Urbanyi-Popiołek I (2013) Ekonomiczne i organizacyjne aspekty transportu. Wydawnictwo Uczelniane Wyższej Szkoły Gospodarki w Bydgoszczy 7-8.
- Woźniak D, Kukielka L (2011) Niektóre aspekty logistyki transportu. Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe 12(5): 439-446.

10. Wpływ geometrii układu jezdnego na kontakt z podłożem kołowych środków transportu

Influence of geometry on running gear on contact with ground of wheeled means of transport

Nazarewicz Sybilla⁽¹⁾, Kozłowicz Katarzyna⁽²⁾

⁽¹⁾Katedra Maszyn Rolniczych, Leśnych i Transportowych, Wydział Inżynierii Produkcji, Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

⁽²⁾Katedra Biologicznych Podstaw Technologii Żywności i Pasz, Wydział Inżynierii Produkcji, Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Katarzyna Kozłowicz prof. uczelni

Sybilla Nazarewicz: sybilla_klap.94@o2.pl

Słowa kluczowe: transport drogowy, zawieszenie, bezpieczeństwo, przyczepność

Streszczenie

Transport drogowy jest jednym z najbardziej rozpowszechnionych rodzajów transportu. Ruch pojazdu po drogach jest procesem bardzo złożonym odbywającym się za pośrednictwem kołowych elementów tocznych, które muszą zapewnić właściwy wzajemny kontakt. Przemieszczanie pojazdu w przestrzeni to ruch zarówno prostoliniowy jak i po łuku. W każdym z tych stanów na pojazd działają odmienne siły, które za pomocą ogumienia kół w różny sposób oddziałują na powierzchnię powodując zmianę wartości nacisków na całej szerokości bieżnika. Taka zmiana ma duży wpływ na sterowność i stateczność pojazdu w dużym stopniu przekładając się na bezpieczeństwo ruchu drogowego. Celem artykułu była analiza istotności zapewnienia właściwej geometrii zawieszenia kołowych pojazdów drogowych oraz parametrów na stateczność pojazdu przez schematyczne wykazanie zmiany rozkładu nacisków bieżnika na podłoże. W artykule przedstawiono idee adaptacyjnego układu zawieszenia, które umożliwiłoby dostosowanie w czasie rzeczywistym geometrii zawieszenia do parametrów ruchu pojazdu.

1. Wstęp

Transport drogowy jest obecnie jedną z najważniejszych gałęzi transportu. Cechują go sposoby oraz środki jakie są wykorzystywane do przemieszczania zarówno ładunków stanowiących dobra wytwórcze jak i osób. Do środków transportu drogowego zalicza się wszelkiego rodzaju samobieżne pojazdy kołowe, jak również składy ciągnięte. Przemieszczanie środków transportu odbywa się na ogół po drogach asfaltowych specjalnie do tego celu przystosowanych z wyjątkiem odcinków, które nie zostały jeszcze w pełni zmodyfikowane lub dostosowane. Ruch pojazdów po drogach odbywa się za pośrednictwem kołowych elementów tocznych zapewniających odpowiedni kontakt pojazdu z podłożem. Według Głównego Urzędu Statystycznego transport samochodowy pod kątem przewozu ładunku jest najbardziej rozpowszechniony oraz najczęściej wykorzystywanym. Porównując ze sobą wszystkie rodzaje transportu w 2019 roku przewóz ładunku dla transportu samochodowego wynosił 395 311 mln. Tonokilometrów, co stanowi 82,8%, transport kolejowy 54 584 mln. Tonokilometrów, co stanowi 11,4%, transport rurociągowy 19 393 mln. Tonokilometrów, co stanowi 4,1%, transport morski i śródlądowy 7 486 mln. Tonokilometrów, co stanowi 1,6% oraz transport lotniczy 374 mln. Tonokilometrów, co stanowi 0,1% (Dmitrowicz-Życka 2020).

2. Opis zagadnienia

Specyfika transportu kołowego oraz jego realizacja odbywa się przez toczenie kół pojazdu po drodze. Z punktu widzenia mechanicznego oraz sił fizycznych, które przeciwdziałają utrudniając poruszanie się przedmiotów, ruch toczny jest procesem przemieszczania najbardziej efektywnym. Aby mogło następować przemieszczanie środka transportu musi być zachowana ciągłość kontaktu pojazdu z podłożem, a ruch toczny kół musi odbywać się bez poślizgu. W tym przypadku dużą rolę

odgrywa współczynnik tarcia pomiędzy ogumieniem koła a podłożem. Jeżeli koła pojazdu obracają się a pojazd nie przemieszcza się, wówczas jest to tarcie kinetyczne natomiast, jeżeli koła toczą się bez poślizgu jest to tarcie statyczne (Nosal 2016; Brodny 2010).

Rzeczywisty ruch pojazdu po podłożu to relacja bardzo złożona, w której główną rolę odgrywa układ jezdny i nośny w skład, którego wchodzi: koła i opony, zawieszenie koła, elementy sprężyste, amortyzatory tłumiące drgania, układ kierowniczy, rama nośna i hamulce. Relacje podłoża i pojazdu wynikają z geometrii, czyli wyprofilowania podłoża oraz jakości dróg wpływających na stateczność pojazdu (Lozia i Guzek 1995). Etap projektowy i wykonawczy dróg musi uwzględniać bezpieczeństwo ruchu drogowego. Parametry i warunki projektowe zdefiniowane są w Rozporządzeniu Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie (Dz. U. z dnia 14 maja 1999 roku, Nr 43, poz. 430) (Rozporządzenie Ministra Transportu). Warunki te określają: klasyfikację dróg, geometrię (szerokość drogi o odpowiednim przeznaczeniu), pochylenia poprzeczne, krzywizny, sposób łączenia węzłów, promienie na łukach drogi oraz rodzaje nawierzchni. Geometria oraz rodzaj nawierzchni są to dwa parametry, które ulegają zmianom w czasie eksploatacji wymuszając sukcesywnie dokonywanie napraw. Nie zawsze częstotliwość napraw dróg pokrywa się z potrzebą przywrócenia stanu pierwotnego. Powoduje to, że użytkownicy ruchu eksploatują drogę, której parametry odbiegają od założonych. Taki stan wpływa na stateczność pojazdu podczas ruchu. Aby przeciwdziałać tym oddziaływaniom konstruktorzy pojazdów wprowadzają rozwiązania zawieszenia, które eliminują do minimum utratę ciągłości kontaktu pojazdu z drogą (Reimpell i Betzer 1997).

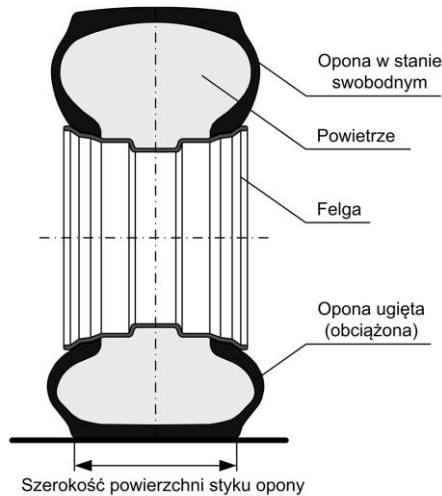
3. Przegląd literatury

Zawieszenie pojazdu powinno zapewnić odpowiednie przeniesienie wszelkiego rodzaju obciążeń dynamicznych, które podczas przemieszczania się oddziałują na koła, a pochodzą głównie od nierówności drogi oraz od sposobu poruszania. Na układ jezdny pojazdu oddziałują siły:

- pionowe, czyli siły ciężkości,
- dynamiczne: wzdłużne - siły hamowania i przyspieszania oraz poprzeczne - siły generowane podczas jazdy po łuku,
- generujące moment stabilizacyjny, które działają na skręcane koła.

Zawieszenie składa się z trzech istotnych elementów. Pierwsze to elementy sprężyste, których zadaniem jest przejmowanie sił pionowych, a ich parametry mają wpływ na drgania kadłuba pojazdu oraz kół. Drugie to elementy tłumiące, których celem jest przejmowanie energii zgromadzonej w elementach sprężystych oraz tłumienie drgań kadłuba pojazdu i kół oraz zamiana jej na energię cieplną i oddanie do otoczenia. Trzecie to elementy prowadzące, stanowiące połączenie kół jezdnych z kadłubem pojazdu. Zadaniem tych elementów jest prowadzenie koła po torze wynikającym z geometrii układu kadłub a element wodzący (Reimpell i Betzer 1997).

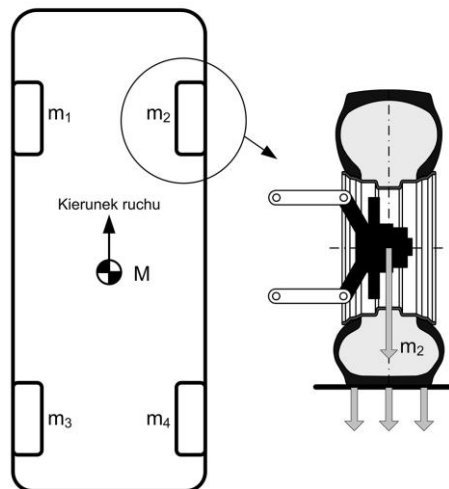
Z uwagi na to, że elementy sprężyste i tłumiące można zbudować w oparciu o zmiennej charakterystyce pracy w całym jego zakresie daje to możliwość eliminowania drgań dynamicznych o różnych częstotliwościach. Natomiast w przypadku, kiedy pojazd porusza się po drodze, która lokalnie nie jest przystosowana do zachowania ciągłości kontaktu koła z podłożem w wyniku jej zużycia, wówczas elementy wodzące powinny zapewnić zmianę położenia koła, aby nacisk był równomierny (Kamiński 1983). Najbardziej obrazowym przykładem pokazującym jak zmieniają się naciski koła podczas jazdy jest ruch samochodu po łuku w porównaniu do jazdy na wprost. Kontakt pojazdu z podłożem odbywa się za pomocą opony, która stanowi zewnętrzny element koła bezpośrednio przenoszący siły pomiędzy pojazdem a drogą. Opona jest elementem wykonanym z gumy w procesie wulkanizacji o przekroju otwartym nakładanym na felgę lub obręcz i wypełniona powietrzem pod odpowiednim ciśnieniem (Rys.1). Taka budowa zapewnia odpowiednie przyleganie opony do podłoża, zmniejsza maksymalnie wielkość masy wirującej oraz zapewnia tłumienie nierówności podłoża. Wadą takiego rozwiązania jest wiotkość opony umożliwiająca jej poprzeczne odkształcanie (Luty 2017; Pelc 2007).



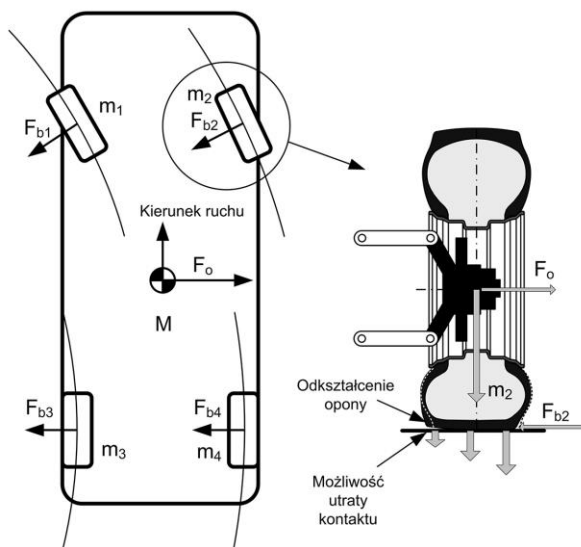
Rys. 7. Przekrój koła obciążonego masą pojazdu.

Pojazd, który porusza po drodze, a na który nie działają żadne siły boczne, równomiernie za pomocą elementów zawieszenia i kół przenosi obciążenie na podłoże. Rozkład nacisków bieżnika jest równomierny na całej jego szerokości pod warunkiem zachowania odpowiedniego ciśnienia, które określa producent (Rys.2) (Bęczkowska i in. 2018).

W przypadku, kiedy pojazd porusza się po łuku po drodze płaskiej bez uwzględnienia pochylenia konstrukcyjnego nawierzchni, wówczas na pojazd oddziałuje siła odśrodkowa (F_o) próbująca przesunąć pojazd na zewnątrz łuku. Siła odśrodkowa poprzez zawieszenie, czyli zespół elementów prowadzących, działa na koło wzdłuż osi obrotu. Z uwagi, że współczynnik tarcia pomiędzy oponą a podłożem zapewnia odpowiednią przyczepność, a ruch toczny koła wywołuje zjawisko adhezji, wówczas bieżnik ogumienia toczy się po zadanym łuku. Za przeciwdziałanie siły odśrodkowej odpowiedzialne są siły przyczepności opony (F_b). Wiotkość opony w takim przypadku powoduje jej odkształcenie (Rys.3). Takie odkształcenie opony powoduje, że naciski na podłoże na całej szerokości bieżnika zmieniają się, a najmniejsza wartość uzyskana jest po jej wewnętrznej stronie (Kulikowski i Szpica 2014). Opisana sytuacja powoduje, że obciążenie opony jest nierównomierne a przez to nie jest w pełni wykorzystana jej przyczepność.

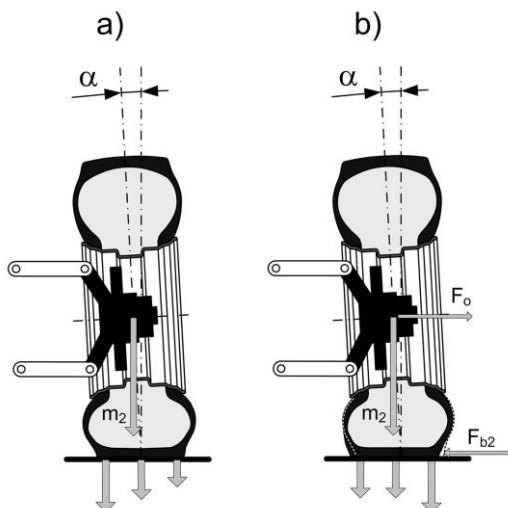


Rys. 8. Nacisk opony na podłoże podczas jazdy na wprost.



Rys. 9. Nacisk opony na podłoże podczas jazdy po łuku.

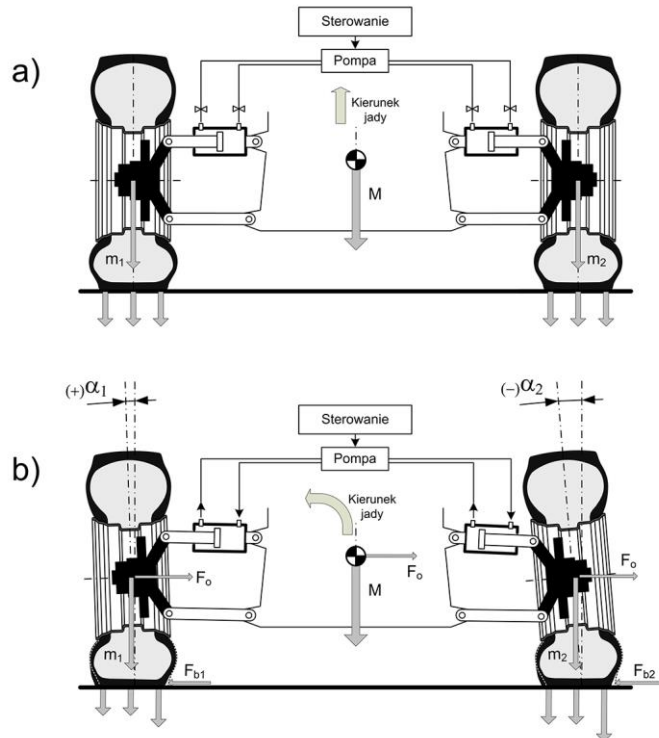
Prowadzenie pojazdu podczas zakrętu jest bardzo ważne, ponieważ każde odchylenie z założonego toru jazdy może powodować w konsekwencji wypadnięcie z drogi lub spowodowanie kolizji. Stąd producenci pojazdów rozwiązali problem maksymalnego równoważenia nacisków przez wprowadzenie pochylenia koła (α). Dzięki temu wypadkowa siły odśrodkowej (F_o) oraz siły ciężkości działające na pojedyncze koło (m) zbliża się do osi podłużnej koła (Rys.4b). Tęgo typu rozwiązanie zwiększa przyczepność pojazdu podczas ruchu po łuku. Jednak ma też swoje wady. Większość dróg, którymi poruszają się pojazdy stanowią odcinki proste, a co za tym idzie, przy stałym zadanym pochyleniu koła naciski na podłoże na całej szerokości są nierównomierne (Rys.4a).



Rys. 10. Nacisk opony na podłoże przy pochyleniu koła podczas jazdy po a) prostej, b) łuku.

Wada ta powoduje także zmniejszenie przyczepności podczas ruszania jak i hamowania pojazdu, co ma duży wpływ na bezpieczeństwo ruchu oraz niewłaściwe zużywanie się bieżnika opony. Dlatego też przy długotrwałej eksploatacji wymagana jest co jakiś czas zamiana opon miejscami w samochodzie (Wieczorek i Jackowski 2009). Producenci coraz częściej sięgają do

rozwiązań zawieszenia wielowahaczowego, którego konstrukcja zapewnia zmienną charakterystykę pochylenia koła (α) dla różnych wartości skrętu kół, jak również uzależnia wartość pochylenia koła od ugięcia zawieszenia wynikającego z siły odśrodkowej działającej na kadłub pojazdu. Takie rozwiązanie jest prawie idealne pod warunkiem, że pojazd porusza się według założonej przez producenta drogi z prędkością zależną od promienia łuku i jej pochylenia (Prochowski 2016). Natomiast rozwiązanie układów wielowahaczowych nie eliminuje do końca nierównomierności nacisku opony na podłoże (Góra 2008). Najbardziej efektywnym rozwiązaniem zawieszenia byłby układ całkowicie adaptacyjny. Umożliwiałby on w czasie rzeczywistym pomiar oraz analizowanie zachowania się pojazdu podczas ruchu i dostosowywanie geometrii zawieszenia do danej sytuacji. Układ adaptacyjny wymusza zastosowanie minimum jednego elementu wodzącego zawieszenia o zmiennej długości. Z uwagi na pewność układu oraz przeciwdziałanie samoczynnej zmianie geometrii realizacje procesu nastawiania parametrów długości może wykonywać element hydrauliczny w postaci siłownika. Pojazd, który poruszałby się po linii prostej, a na który nie działały żadne siły boczne posiadałby nastawiony zerowy kąt pochylenia kół (α) (Rys.5a). Takie ustawienie kół dawałoby równomierne rozłożenie nacisków bieżnika na podłoże oraz maksymalne wykorzystanie przyczepności zarówno przy ruszaniu jak i hamowaniu. Ponadto występowanie nierówności drogi w postaci ubytków lub wypukłości, na które najeżdża koło przy prostym jego usytuowaniu powoduje symetryczne dla ogumienia odkształcenie opony nie generując sił oraz momentów, które mogą niekorzystnie oddziaływać na pojazd.



Rys. 11. Nacisk opony na podłoże dla adaptacyjnego układu zawieszenia przy jeździe po: a) prostej, b) łuku.

W przypadku układu adaptacyjnego pojazd, który porusza się po łuku, a który określa przemieszczenie się kadłuba pojazdu względem zawieszenia oraz mierzy przeciążenie wynikające z działania siły odśrodkowej (F_o) umożliwia odpowiednie zadanie kąta pochylenia kół (α) (Rys.5b). Układ adaptacyjny w przeciwieństwie do rozwiązań o sztywnych parametrach umożliwia zmianę kąta pochylenia koła zarówno w zakresie dodatnim ($+\alpha$) jak i ujemnym ($-\alpha$). Dzięki temu koło zewnętrzne pojazdu oraz wewnętrzne może mieć nastawiany różny kąt tak, aby zawsze siła wypadkowa

pochodząca od siły ciężkości działające na pojedyncze koło (m) oraz siły odśrodkowej działała wzdłuż osi koła. Powoduje to maksymalizację równomierności nacisków kół po obydwu stronach pojazdu, czego nie zapewniają standardowe rozwiązania o sztywnych symetrycznych nastawach kątów pochylenia koła.

4. Podsumowanie

Geometria zawieszenia pojazdów kołowych definiuje położenie oraz ruch koła podczas przemieszczania pojazdu. Infrastruktura drogowa powoduje, że pojazd bardzo często zmienia sposób poruszania, co wymaga, aby za każdym razem parametry geometryczne zawieszenia były dopasowane do danych warunków. Większość pojazdów posiada nastawione stałe wartości, które są kompromisem pomiędzy wymaganymi wartościami dla ruchu pojazdu po łuku oraz prostoliniowym. Stałość tych wartości lub zastosowanie złożonych układów wielowahaczowych o zmiennej charakterystyce ruchu w całym jego zakresie nie zapewnia w pełni dopasowania położenia koła względem nawierzchni, aby zmaksymalizować oraz równomiernie rozłożyć naciski kół na podłoże. Najpewniejszym rozwiązaniem jest stosowanie układów adaptacyjnych, które w czasie rzeczywistym są w stanie określać oraz zmieniać wartości parametrów geometrycznych zawieszenia.

5. Literatura

- Bęczkowska S, Korzeb J, Koziak S, Opala M, Weyssenhoff A (2018) Niejednorodność i wady materiałowe opon samochodów osobowych – zagadnienia wybrane. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Transport 121: 9-20.
- Brodny J (2010) Modelowanie tarcia w układach mechanicznych. *Górnictwo i Geologia* 5(2): 7-17.
- Dmitrowicz-Życka K (2020) Przewozy ładunków i pasażerów w 2019 r., Główny Urząd Statystyczny
- Góra M (2008) Analiza kinematyczna wielowahaczowych mechanizmów zawieszonych samochodów, rozprawa doktorska, Wydział Mechaniczny Politechniki Krakowskiej 100-195.
- Wieczorek M, Jackowski J (2009) Analiza wpływu prędkości toczenia na współpracę z nawierzchnią drogi bieżnika opon niskoprofilowych, *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów/Politechnika Warszawska* 2/74: 39-51.
- Kamiński E (1983) Dynamika zawieszonych i układów napędowych pojazdów samochodowych. Wydawnictwo Komunikacji Łączności 114-205.
- Kulikowski K, Szpica D (2014) Determination of directional stiffnesses of vehicles' tires under a static load operation. *Eksploatacja i Niezawodność* 16(1): 66-72.
- Lozia Z, Guzek M (1995) Metody badań stateczności i kierowności pojazdów samochodowych. Analiza metod przydatnych podczas badań pojazdów o nietypowych parametrach. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport 34: 73-99.
- Luty W (2017) Nieustalone stany bocznego znoszenia ogumienia. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 11-122.
- Nosal S. (2016) Tribologia. Wprowadzenie do zagadnień tarcia, zużywania i smarowania, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 20-150.
- Pelc J (2007) Modelowanie skończonych deformacji opon pneumatycznych. *Rozprawy i Monografie. Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie* 134: 1-145.
- Prochowski L (2016) Mechanika ruchu. Pojazdy samochodowe. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności 121-234.
- Reimpell J, Betzer JW (1997) Podwozia samochodów. Podstawy konstrukcji. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności 35-68.
- Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie (Dz. U. z dnia 14 maja 1999 roku, Nr 43, poz. 430).

11. Koszty w projektowaniu procesów technologicznych

Costs in the development of technological process

Piórkowski Paweł, Fenc Rafał, Waszczuk Kamil

Katedra Obrabiarek i Technologii Mechanicznych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska

Paweł Piórkowski: pawel.piorkowski@pwr.edu.pl

Słowa kluczowe: analiza kosztów technologii, algorytmy kosztów, energochłonność obrabiarek, narzędzia skrawające

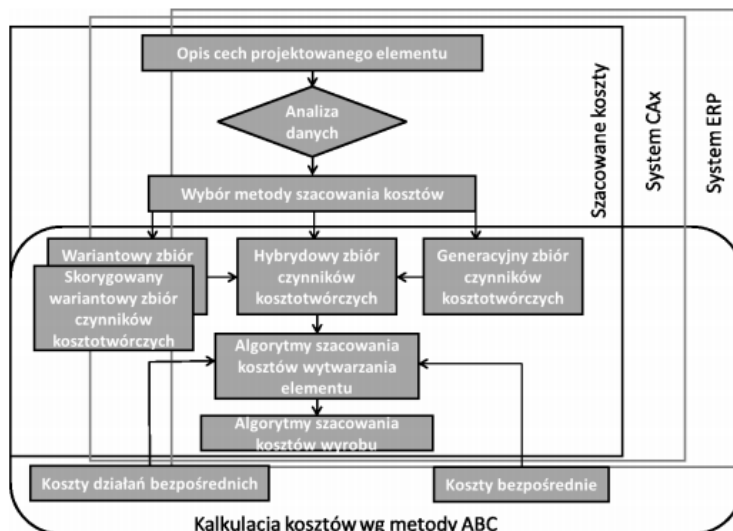
Streszczenie

Problematyka kosztów w projektowaniu procesów technologicznych jest niezwykle ważnym zagadnieniem, dotyczącym ekonomii obróbki skrawaniem. W literaturze istnieje niewiele konkretnych informacji na ten temat i chociaż główne czynniki wpływające na wartość kosztów technologii są znane, to przedsiębiorstwa zajmujące się tą tematyką, nie ujawniają danych dotyczących szczegółowych rozwiązań zawartych w opracowanych przez nie algorytmach. Istotność dokładnego wyznaczenia kosztów procesu technologicznego jest decydującą kwestią związaną z konkurencyjnością przedsiębiorstwa na rynku. Specyfiką branży obróbkowej jest produkcja seryjna w oparciu o obrabiarki sterowane numerycznie. Często kontrakty na dostarczanie poszczególnych elementów podpisywane są z kilkuletnim wyprzedzeniem, szczególnie w branży motoryzacyjnej. Zdobywanie takiego kontraktu pozwala firmie funkcjonować na wysokim poziomie przez wiele miesięcy, a bezpieczeństwo finansowe oparte na długoterminowych zleceniach jest podstawowym warunkiem działalności w branży obróbki skrawaniem. Konkurując z innymi podmiotami, o sukcesie decyduje także obliczenie kosztów koniecznych do poniesienia na realizację kontraktu, by z jednej strony, zaoferować kontrahentowi najniższą cenę, a z drugiej, nie zaproponować takiej wartości zlecenia, by nie było możliwe zrealizowanie zysków. Umiejętność dokładnego obliczania kosztów procesu technologicznego przekłada się bezpośrednio na sukces przedsiębiorstwa.

1. Wstęp

Projektowanie procesów technologicznych jest wymagającym tematem, który opiera się na znajomości konstrukcji, technologii, produkcji oraz montażu skomplikowanych wyrobów. W czasach kapitalizmu, w którym funkcjonujemy, często zapomina się o tym, że podstawowym zadaniem inżyniera jest zaprojektowanie technologii nie tylko zgodnie z zasadami sztuki inżynierskiej, ale także, a może przede wszystkim, zrealizowanie tego procesu, jak najmniejszym kosztem. Wiodące firmy na rynku technologii nie upubliczniają swoich metod szacowania kosztów, gdyż wiedza na ten temat pozwala na niezwykłą przewagę konkurencyjną na rynku technologicznym.

Przedsiębiorstwa korzystają z różnych metod kalkulacji kosztów, między innymi z metody ABC (Rys. 1), która omawia sposoby gromadzenia i analizy danych w celu uzyskania odpowiedniego zbioru czynników kosztotwórczych. W przypadku projektowania procesów technologicznych, istotnym problemem jest określenie źródeł tych kosztów i próba opisania ich odpowiednimi zależnościami z zależności od wykorzystanej technologii.



Rys. 1. Kalkulacja kosztów wg metody ABC (Więcek 2017).

W związku z tym, że określenie tych źródeł jest istotnym problemem w przedsiębiorstwach, w tej publikacji podjęto próbę opisanie czynników wpływających na całkowite koszty projektowania procesów technologicznych oraz wyjaśniono, dlaczego znajomość tych czynników jest tak istotna dla współczesnego inżyniera technologa.

2. Przegląd literatury

2.1 Główne składniki kosztów

Koszty materiałów podstawowych

Podstawowym kosztem związanym z projektowaniem procesów technologicznych jest koszt materiałów bezpośrednich (Feld 2018). Koszty te w podstawowej wersji obliczane są jako iloczyn objętości materiałów oraz ceny jednostkowej (1),

$$K = M * C \quad (1)$$

gdzie:

M – masa materiału,

C – koszt jednostki materiału.

W przypadku, gdy przedsiębiorstwo jest wyposażone w system odzyskiwania wiórów, możliwe jest uwzględnienie w algorytmie wyznaczania kosztów technologii potencjalnego zysku z wprowadzenia takiego systemu. W przypadku większości procesów technologicznych, kwestia uwzględniania kosztów materiałów bezpośrednich, jak również ich doboru jest jednak bardziej skomplikowana. Większość elementów wykonywanych jest z więcej niż jednego materiału, często w procesie technologicznym występują także liczne połączenia montażowe np. połączenia śrubowe oraz klejone. Dobór odpowiedniego materiału zależy zatem także od tego, w jakim charakterze będzie ten materiał pracował podczas eksploatacji wyrobu. W algorytmie wyznaczania kosztów materiałów bezpośrednich należy również uwzględnić kwestię odpadów. Niezależnie od powstawania wiórów w procesie obróbki skrawaniem, pojawiają się także odpady. Przykładem tego rodzaju odpadu może być odpad w procesie cięcia, gdy zamawiane półfabrykaty w postaci pręta o określonej długości są przecinane na pewną liczbę wałków. Po takim procesie zawsze pozostaje odpad w postaci złomu. Ostatnią kwestią istotną w procesie obliczania kosztów materiałów bezpośrednich jest dobór odpowiedniego półfabrykatu. Koszt materiału nie zależy bowiem wyłącznie od jego własności i ceny jednostkowej, ale także od formy w jakiej zostanie dostarczony do procesu produkcyjnego. W przypadku technologii maszyn, różne są koszty półfabrykatu o tej samej objętości, wykonanego jako pręt, a inne wykonanego jako odkuwka. Analogiczna kwestia ma miejsce w przypadku pręta

płaskiego oraz odlewu. Ze względu na wysoki udział kosztów materiałów bezpośrednich w całkowitej wartości kosztów procesu technologicznego, wszystkie wymienione wyżej czynniki powinny być brane pod uwagę w procesie określania kosztów całkowitych (Choroszy 2000).

Koszty robocizny bezpośrednio

Koszty robocizny bezpośrednio to grupa kosztów związana przede wszystkim z pracownikami zajmującymi się realizacją procesu technologicznego. W najprostszy sposób wielkość ta może zostać wyrażona następującym wzorem (2)

$$K = \sum (t * S) \quad (2)$$

gdzie:

t – czasy jednostkowe operacji oraz przygotowawczo – zakończeniowe,
S – stawka pracownika oraz operatora.

Określenie czasów jednostkowych operacji oraz czasu przygotowawczo-zakończeniowego jest niezwykle trudne z uwagi na szereg czynników zewnętrznych wpływających na tę wielkość. Rzadko występuje sytuacja, że dana fabryka zajmuje się realizacją procesu technologicznego tylko jednego rodzaju przedmiotów i wyłącznie na jednej i tej samej grupie maszyn, przy wykorzystaniu dedykowanego do tego celu personelu. Dużo częściej maszyny są wykorzystywane przy różnych procesach technologicznych, w efekcie czego pracownicy je obsługujący są przyporządkowani nie do określonego procesu technologicznego, a do określonej maszyny, która wykonuje pracę na rzecz realizacji różnych projektów. W efekcie tego przestoje, awarie, czy problemy na jednym ze stanowisk, wpływają zazwyczaj na opóźnienia i wzrosty czasów jednostkowych oraz przygotowawczo-zakończeniowych podczas realizacji innych procesów technologicznych. Można próbować oszacować te koszty na podstawie danych wynikających z częstotliwości awarii maszyn, jednak będą one zwykle niedokładne, gdyż awarie występują zwykle w sposób mało powtarzalny w czasie. Istotną niewiadomą jest również absencja pracowników wynikających z różnego rodzaju problemów zdrowotnych bądź niedyspozycji, które również w pewnym stopniu opóźniają realizację kolejnych etapów procesu technologicznego. W przypadku projektów realizowanych w dalekim horyzoncie czasowym, stawka pracownika oraz operatora może być istotną zmienną w algorytmie obliczania całkowitych kosztów realizacji procesu technologicznego. Wymuszane przez prawo podwyżki płacy minimalnej, czy reakcja na zmieniające się stawki godzinowe pracowników na wolnym rynku mogą w istotny sposób zmienić sumaryczny koszt realizacji projektu. Dobrym przykładem tego typu zmiennej są stawki operatorów obrabiarek sterowanych numerycznie, których wynagrodzenia w ciągu kilku ostatnich lat wzrosły o ponad 50%. Należy także pamiętać, że operatorzy maszyn to tylko niewielka część personelu zaangażowana w realizację procesu technologicznego, a do grupy pracowników, którzy wpływają na ten proces należy także wliczyć pracowników zajmujących się transportem, przygotowaniem technologii, przygotowaniem produkcji, czy też kontrolą jakości.

Koszty spowodowane brakami

Koszty spowodowane brakami to grupa kosztów, która uwzględnia wszelkie dodatkowe opłaty związane z wyprodukowaniem większej liczby sztuk niż wymaga tego zamówienie, które dotyczy realizacji procesu technologicznego. Koszty te można wyrazić następującym wzorem (3):

$$K = B * W * L \quad (3)$$

gdzie:

W – procentowy wskaźnik braków,
B – koszt wytworzenia jednego wyrobu,
L – liczebność serii.

Procentowy wskaźnik braków jest wielkością, którą wyznacza się w oparciu o dane dotyczące realizacji innych, wcześniejszych procesów technologicznych w danym zakładzie produkcyjnym. Współczynnik ten, w celu uzyskania większej dokładności, powinien być określany dla każdej z operacji w ramach danego procesu osobno. Zmiennymi, które mają istotny wpływ na wartość tego wskaźnika są przede wszystkim dane o maszynie, w tym w szczególności jej awaryjność, aktualny stan techniczny oraz przeprowadzone i zaplanowane remonty, jak również typ procesu technologicznego wykonywanego na danej maszynie, ze szczególnym uwzględnieniem

wymagań odnośnie dokładności wymiarowo-kształtowej oraz uzyskania odpowiednich tolerancji wymiarowych. Konieczne jest także, aby, podczas planowania procesu technologicznego, uwzględnić możliwości produkcyjne maszyny w odniesieniu do zaplanowanych na tej maszynie procesów. Bezpiecznie jest, jeżeli obrabiarka jest w stanie wykonywać elementy z dokładnością przynajmniej o jedną klasę tolerancji ISO niższą niż jest to wymagane w procesie technologicznym. Dzięki temu, znacząco zmniejszy się liczba braków wynikających z niewielkich błędów podczas pracy maszyny. Uwzględniając koszty wytworzenia jednego wyrobu powinno się także uwzględnić etap procesu technologicznego, na którym prawdopodobnie będą występowały niedokładności wykonania. Niektóre błędy są możliwe do określenia jeszcze na etapie początkowych operacji, dzięki czemu, nie będą wykonywane dalsze operacje na elemencie, który nie spełnia wymagań jakościowych procesu technologicznego. Rozsądne jest przyjęcie odsetka braków na każdym z etapów procesu technologicznego i określenie proporcjonalnego do etapu, na którym wykryto usterkę, kosztu wytworzenia wyrobu do momentu wystąpienia usterki. Koszty wynikające z braków to koszty, które często uwzględnia się już na etapie projektowania procesu technologicznego z pewnym, niewielkim zapasem, w taki sposób, aby w razie ich wystąpienia, uniknąć przestojów wynikających z uzupełnienia zapasów materiału bezpośredniego. W związku z powyższym częstą praktyką jest uwzględniania na etapie projektowania procesu technologicznego, większej niż zalecana liczebności serii, wewnątrz której znajdują się zarówno elementy wykonane poprawnie, jak również braki. Jeżeli liczba braków nie przekroczy początkowo założonej wielkości, koszty wynikające z braków pozostaną niezmiennie od etapu przygotowania technologii aż do rozliczenia zamówienia.

Koszt pracy narzędzi

Koszt pracy narzędzi w procesach technologicznych dotyczących obróbki skrawaniem jest niezwykle istotną zmienną, która może zmieniać się w dość dużym zakresie w zależności od wybranej technologii. W ogólnym przypadku można wyznaczyć ten koszt z następującego wzoru (4):

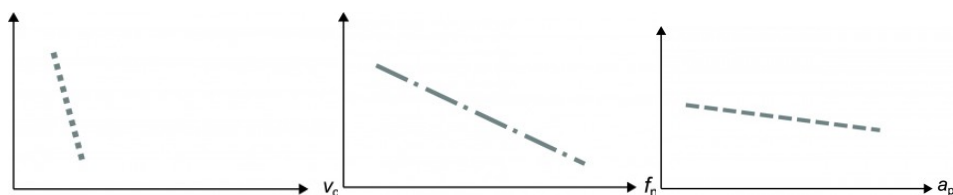
$$K = \sum_{i=1}^n W * C \quad (4)$$

gdzie:

W – wskaźnik zużycia i-tego narzędzia,

C – cena i-tego narzędzia.

W typowych warunkach pracy, jedno ostrze skrawające wystarcza na około 15 minut. Możliwe jest, że jedno ostrze skrawające wykorzystuje więcej niż jedną krawędź skrawającą, dzięki czemu po obróceniu ostrza skrawającego, możliwe jest wykorzystanie tej samej płytki skrawającej więcej niż jeden raz. Ostrza skrawające mogą też posiadać krawędzie skrawające po obu stronach płytki. Koszt takich płytek skrawających jest jednak większy. Dużo istotniejszą zmienną w kontekście trwałości płytek jest jednak możliwość stosowania różnych parametrów skrawania. W ten sposób można zmienić czas obróbki, pobór energii elektrycznej przez maszynę, jak również częstotliwość wymiany płytek skrawających.



Rys. 2. Wpływ prędkości skrawania, posuwu oraz głębokości skrawania na trwałość narzędzia skrawającego (<https://www.sandvik.coromant.com/pl>).

Wyróżnia się dwie podstawowe strategie określania parametrów skrawania w procesie technologicznym: z uwzględnieniem zmiany parametrów skrawania oraz bez uwzględnienia zmiany parametrów skrawania. W tej pierwszej strategii wyróżnić można zmniejszanie lub zwiększanie parametrów skrawania. Parametrami, które można regulować w procesie obróbki są prędkość

skrawania, posuw oraz głębokość skrawania, których wpływ na trwałość narzędzia jest różny (Rys. 2). Realizując strategię zwiększenia parametrów skrawania istnieje ryzyko wyłamania się płytki, przegrzewania się wiórow oraz złą jakość powierzchni skrawanej, natomiast sama obróbka realizowana jest szybciej, dzięki czemu maleją koszty robocizny. W przypadku strategii zmniejszania parametrów skrawania istnieje ryzyko pojawiania się drgań, narostu oraz stopienia krawędzi skrawającej, natomiast samo narzędzie zwiększa swoją trwałość, dzięki czemu maleją koszty pracy narzędzi. W przypadku realizacji strategii bez uwzględniania zmiany parametrów skrawania, czas pracy i trwałość narzędzia są stabilne i zgodne z zaleceniami producenta płytek, natomiast nie ma możliwości przyspieszenia lub opóźnienia procesu obróbki w razie wystąpienia nieprzewidzianych okoliczności związanych z awariami lub brakami. Jest to jednak strategia, która pozwala w najłatwiejszy sposób kontrolować koszty procesu technologicznego.

Koszt napędu obrabiarek

Koszt napędu obrabiarek można oszacować z następującego wzoru:

$$K = \sum_{i=1}^n W * N * S * h \quad (5)$$

gdzie:

W – współczynnik średniego wykorzystania mocy i-tej obrabiarki,

N – moc nominalna i-tej obrabiarki,

S – stawka za godzinę prac obrabiarki,

h – liczba godzin pracy obrabiarki,

n – numer obrabiarki.

Koszt napędu obrabiarek jest kosztem, który dość trudno oszacować w praktyce przemysłowej. Wartość poboru mocy przez obrabiarkę zmienia się w zależności od wielu czynników, wśród których można wymienić przede wszystkim nominalną moc obrabiarki, stopień wykorzystania tej mocy oraz liczbę godzin pracy obrabiarki. Na wynik wpływają jednak również takie zmienne, jak rodzaj materiału, jaki jest obrabiany na maszynie oraz stopień zużycia narzędzia skrawającego. Różnice w poborze mocy maszyny pracującej za pomocą narzędzi nowych oraz takich, które oczekują już na wymianę może sięgać nawet 20% (Roszkowski i in. 2020). Obrabiarki pobierają energię elektryczną również wtedy, kiedy nie wykonują obróbki, a pracują na biegu jałowym lub w trybie czuwania.

Energię elektryczną pobieraną przez obrabiarkę można szacować również na inne sposoby. Jedną z takich metod jest wykorzystanie podziału energii elektrycznej pobieranej przez obrabiarkę na moc związaną z działaniem samej obrabiarki oraz moc związaną ściśle z procesem skrawania. Energia skrawania pobierana na wykonanie obróbki danej jednostki objętości materiału jest względnie stała dla danego zestawu narzędzi i materiałów (Borkowski i in. 2019), w związku z czym koszty napędów obrabiarek można również opisać za pomocą następującej zależności (6):

$$K = N * t + E * V \quad (6)$$

gdzie:

t – czas pracy obrabiarki,

N – moc nominalna obrabiarki bez skrawania,

E – energia elektryczna potrzebna na skrawanie danej objętości materiału,

V – objętość skrawanego materiału.

Zależność ta pozwala w sposób łatwiejszy dokonać oszacowania zapotrzebowania na energię elektryczną obrabiarki, a podczas wstępnych testów tej metody, możliwe jest uzyskanie dokładniejszych wyników oszacowania energii elektrycznej niż w przypadku aplikacji popularnych firm narzędziowych (np. Seco, Garant), które udostępniają narzędzia do szacowania poboru energii elektrycznej obrabiarek.

Inne koszty

Do wyznaczenia całkowitych kosztów w projektowaniu procesów technologicznych należy uwzględnić także inne, pomniejsze koszty. Do głównych takich kosztów można zaliczyć:

- Koszty amortyzacji obrabiarki i budynków – które powinny być uwzględniane szczególnie wtedy, kiedy konieczne jest zakupienie nowej maszyny lub rozbudowanie infrastruktury firmy, w celu realizacji nowego zamówienia
- Koszty remontów – związane w szczególności z koniecznymi przestojami maszyny i stratami z tego tytułu. Przeglądy oraz remonty należy przeprowadzać zgodnie z posiadaną dokumentacją techniczno-roboczą obrabiarki. Przeglądy powinny być zaplanowane odpowiednio wcześniej, by można było zaplanować prace na innych maszynach. Remonty, o ile nie są przewidziane w dokumentacji, są dość istotnym kosztem, który może być trudny do przewidzenia. W przypadku droższych maszyn warto uwzględnić dodatkowe koszty ubezpieczenia od nieprzewidzianych awarii.
- Koszty oświetlenia – związane w szczególności ze zmianowością pracy, liczbą godzin, podczas których zakład funkcjonuje oraz godzinami pracy pracowników.
- Koszty ogrzewania – związane w szczególności z ociepleniem hali produkcyjnej oraz pośrednio związane ze zmianowością pracy i sezonowością zamówień.
- Koszty ogólnozakładowe – w ramach tej grupy kosztów wyróżniamy koszty socjalne, koszty związane z funkcjonowaniem związków zawodowych oraz koszty różnego rodzaju spotkań okolicznościowych, które mają na celu poprawić produktywność i samopoczucie pracowników i przełożyć się na dodatkowe oszczędności.

2.2 Główne cele szacowania kosztów

Znajomość kosztów w projektowaniu procesów technologicznych służy trzem podstawowym celom:

- Konkurencyjność – Posiadając model obliczania kosztów można dobrać najtańszą technologię i konkurować ceną z innymi zakładami na rynku. Ekonomia jest nierozdzielnie związana z działalnością inżynierską, a w tym przypadku znajomość kosztów poszczególnych etapów procesu technologicznego pozwala na dostosowanie proponowanej przez siebie ceny do potencjalnych zysków, które może uzyskać przedsiębiorstwo oraz skorelowanie z ofertami innych kontrahentów. Im dokładniej zostaną określone koszty technologii, tym większą szansę będzie miała firma na wygranie przetargu.
- Świadomość możliwości produkcyjnych zakładu – Gdy przedsiębiorstwo jest w stanie dokładnie oszacować koszty technologii dla danego zamówienia, jest w stanie szybko i sprawnie z minimalnym ryzykiem określić zamawiającemu koszty produkcji. Poprawnie skonfigurowany model kosztów umożliwia szybkie reagowanie na zapotrzebowanie rynku i możliwość złożenia oferty przetargowej w odpowiednim terminie. Im dokładniejszymi algorytmami dysponuje firma, tym mniejsze ryzyko podejmuje, starając się o realizację projektu. Dysponowanie powtarzalnym modelem obliczania kosztów technologii znacząco zwiększa świadomość możliwości produkcyjnych zakładu.
- Kontrola procesu – Znajomość wielkości generowanych kosztów poprzez poszczególne składniki procesu technologicznego pozwala na uzyskanie ogromnej liczby informacji na temat samego procesu. Dzięki temu możliwe jest określenie miejsc w procesie technologicznym, który odpowiada za największe marnotrawstwo środków finansowych. Możliwe jest wykorzystanie do tego celu różnych metod zarządzania jakością, takich jak diagram Ishikawy, czy też mapowanie strumienia wartości, realizowanych w duchu filozofii Kaizen (Topalović 2015). W ten sposób można uzyskać ostatni, a jednocześnie najchętniej widziany spośród wszystkich składników kosztów, a mianowicie obniżenie całkowitych kosztów realizacji procesu technologicznego ze względu na usprawnienia działania przedsiębiorstwa.

3. Podsumowanie

Przedstawione w artykule propozycje obliczania kosztów w projektowaniu procesów technologicznych z pewnością nie wyczerpują tego tematu. Każda forma podchodzi do tego problemu w inny sposób, a dane literaturowe na ten temat są trudno dostępne. Nieliczne próby porównania jakości oceny efektywności ekonomicznej podczas szacowania kosztów technologii wskazują na

ogromne różnice w wynikach pomiędzy algorytmami różnych firm. (Danis 2014) Wynikają one zarówno z różnego podejścia do tworzenia algorytmów obliczania kosztów, niedokładności w działaniu aktualnie używanych algorytmów, jak i pomijaniu pewnych ważnych czynników kosztotwórczych podczas szacowania kosztów.

Wskazane w publikacji składniki kosztów, takie jak koszty materiałów podstawowych, koszty robocizny bezpośredniej, koszty spowodowane brakami, koszty pracy narzędzi oraz koszty napędu obrabiarek są z pewnością głównymi czynnikami wpływającymi na całkowitą wartość kosztów procesu technologicznego, a wykorzystanie zaproponowanych zależności powinno umożliwić oszacowanie prognozowanego stopnia kosztów na zadowalającym poziomie dokładności. W celu weryfikacji takiego podejścia konieczne może być wykonanie testów w oparciu o kilka procesów technologicznych i porównanie ich z wartościami uzyskanymi w przemyśle.

Umiejętne opracowania algorytmu wyznaczania kosztów w projektowaniu procesów technologicznych pozwala przedsiębiorstwom na uzyskanie przewagi konkurencyjnej nad firmami, które nie są w stanie określać ich na zbliżonym poziomie dokładności. Pozwala to na zwiększenie świadomości możliwości produkcyjnych zakładu i rozsądniejsze określanie celów długoterminowych oraz wybieranie odpowiednich przetargów oraz zamówień. W konsekwencji przedsiębiorstwo zwiększa swoją kontrolę nad procesem i jest go w stanie sukcesywnie poprawiać zgodnie z filozofią ciągłego doskonalenia się.

4. Literatura

- Danis M (2014) Metodyka oceny efektywności ekonomicznej zastosowania narzędzi skrawających. Raporty Wydziału Mechanicznego Politechniki Wrocławskiej. Ser. PRE Nr 22.
- Więcek D (2017) Wpływ czynników kosztotwórczych na szacowanie kosztów produkcji elementów maszyn. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria: Organizacja i Zarządzanie 101: 533-544. <https://www.sandvik.coromant.com/pl-pl/knowledge/general-turning/pages/how-to-improve-tool-life-in-turning.aspx> - dostęp 8.12.2020r.
- Feld M (2018) Podstawy projektowania procesów technologicznych typowych części maszyn. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Choroszy B (2000) Technologia maszyn. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- Borkowski W, Piórkowski P, Skoczyński W i in. (2019) Ocena energochłonności obrabiarki skrawającej na przykładzie pionowego centrum frezarskiego VF-7/50 10: 620-622.
- Roszkowski A, Piórkowski P, Skoczyński W et al. (2020) Study on the impact of cutting tool wear on machine tool energy consumption. *Advances in Science and Technology Research Journal* 14(3): 158–164.
- Topalović S (2015) The Implementation of Total Quality Management in Order to Improve Production Performance and Enhancing the Level of Customer Satisfaction. *Procedia Technology* 19: 1016-1022.

12. Badania obrabiarek w stanie spoczynku

Tests on machine tool at a standstill

Piórkowski Paweł, Fenc Rafał, Waszczuk Kamil

Katedra Obrabiarek i Technologii Mechanicznych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska

Paweł Piórkowski: pawel.piorkowski@pwr.edu.pl

Słowa kluczowe: badania dokładności geometrycznej, badania własności statycznych, badania własności dynamicznych

Streszczenie

W artykule została opisana tematyka badań obrabiarek w stanie spoczynku. Przeprowadzono analizę literatury dotyczącej badań dokładności geometrycznej, badań własności statycznej oraz badań własności dynamicznych. W świetle przeprowadzonej analizy zaproponowano opracowanie nowych procedur badawczych, wolnych od niedoskonałości związanych z aktualnie stosowanymi badaniami obrabiarek w stanie spoczynku

1. Wstęp

Istnieje wiele kryteriów podziału badań obrabiarek. Można je usystematyzować na kilka różnych sposobów. Ze względu na charakter badań, można je podzielić na trzy następujące grupy:

- badania obrabiarki w stanie spoczynku, wśród których można wyróżnić badania dokładności geometrycznej,
- badania własności statycznych oraz badania własności dynamicznych,
- badania obrabiarki na biegu jałowym, wśród których można wyróżnić badania własności cieplnych, badania błędów kinematycznych obrabiarki oraz badania powtarzalności pozycjonowania,
- badania obrabiarki pod obciążeniem roboczym, wśród których można wyróżnić badania stabilności oraz badania pracą.

W tej pracy zostanie omówiona pierwsza z wymienionych powyżej grup, dotycząca badań obrabiarek w stanie spoczynku.

2. Przegląd literatury

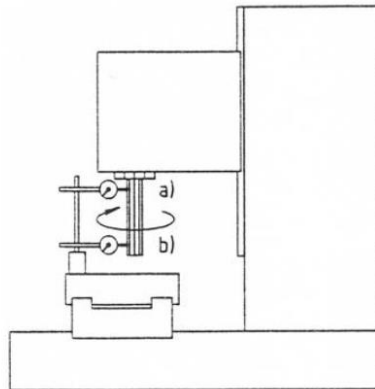
2.1 Badania dokładności geometrycznej

Badania dokładności geometrycznej obrabiarek skrawających to jedno z najbardziej podstawowych badań, jakie można wykonać w celu określenia przydatności maszyny technologicznej do realizacji powierzonych jej zadań obróbkowych. Badania te są również bardzo dokładnie opisane w normach, gdzie są prezentowane podstawowe testy, jakie można wykonywać w celu określenia dokładności geometrycznej obrabiarki. Podczas realizacji tych testów można określić następujące wielkości (Wasiak i Wojciechowski 2005):

- odchyłki kształtu
 - prostoliniowości
 - płaskości
- odchyłki położenia
 - równoległości
 - prostopadłości
- odchyłki przemieszczenia
 - bicia
 - równoległości
 - prostopadłości.

Podczas badań dokładności geometrycznej obrabiarki są sprawdzane głównie błędy związane z nieprawidłowym wzajemnym położeniem poszczególnych elementów obrabiarki, a także błędy związane z nieprawidłowym ich wykonaniem, dotyczące odchyłek wymiarowych oraz kształtowych. Na tej podstawie można stwierdzić, że błędy geometryczne obrabiarek mają dwie główne przyczyny, do których zaliczają się: nieprawidłowe wykonanie elementów składowych maszyny (głównie prowadnic) oraz nieprawidłowe wykonanie procesów montażowych, w tym złe fundamentowanie maszyny. Podczas eksploatacji obrabiarek skrawających, w wyniku działających na nią sił, odkształceń cieplnych oraz procesów zużycia pojawiają się kolejne błędy geometryczne. Nawet po kilku miesiącach pracy maszyny mogą wystąpić istotne różnice w jej dokładności geometrycznej.

Badania dokładności geometrycznej polegają na wykonaniu pewnego zestawu testów opisanych w normie oraz zaleceniach normalizacyjnych. Aktualny stan wiedzy na ten temat jest powszechnie znany (Majda i Marchelek 2013) i nie ma trudności z dotarciem do odpowiednich materiałów, które służą do wykonania takiej oceny. Pomimo tego, że najczęściej takimi badaniami zajmują się specjalne jednostki, są one możliwe do wykonania również przez użytkowników maszyn, w celu szybkiego określenia potencjalnej przyczyny usterki obrabiarki. Odpowiednie informacje powinny znajdować się również w dokumentacji techniczno-ruchowej obrabiarki. Procedury przeprowadzenia testów są zwykle odpowiednio zilustrowane (Rys. 1) oraz zawierają informacje o dopuszczalnych odchyłkach.

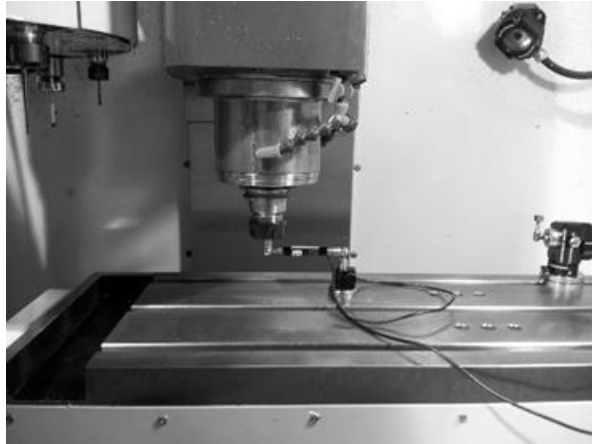


Rys. 1. Schemat przeprowadzenia testu sprawdzającego dokładność geometryczną frezarki (pomiar bicia promieniowego wewnętrznej powierzchni otworu wrzeciona) (Janasek i in. 2012).

Efektom badań dokładności geometrycznej jest informacja na temat tego, czy zmierzona odchyłka mieści się w zakresie wartości dopuszczalnych. Jeżeli odchyłki nie przekraczają dopuszczalnego poziomu, uznaje się, że obrabiarka może w dalszym ciągu pracować i wykonywać zadania obróbkowe. Jeżeli któraś z odchyłek jest przekroczona, w przypadku obrabiarek CNC, należy dokonać procesu kompensacji błędów, a następnie ponownego pomiaru. Badania dokładności geometrycznej powinno wykonywać się podczas badań prototypu oraz badań odbiorczych, a także po wykonaniu remontu maszyny. W przypadku, gdy maszyna technologiczna nie wykonuje przypisanych jej zadań obróbkowych z odpowiednią dokładnością, jednym ze sposobów na odnalezienie przyczyny takiego stanu jest również badanie dokładności geometrycznej obrabiarki, choć wykonanie niektórych pomiarów może być czasochłonne i wyłączyć obrabiarkę z pracy w zakładzie produkcyjnym na dłuższy czas.

W związku z tym, że badania dokładności geometrycznej obrabiarek zajmują sporo czasu, w odniesieniu do obrabiarek CNC, w przemyśle stosuje się pewne rozwiązania, które mają na celu przyspieszyć proces diagnostyki, a także umożliwić częstsze wykonywanie pomiarów w celu monitorowania stanu maszyny. Jednym z najpopularniejszych rozwiązań tego typu jest system ballbar firmy Renishaw, którego działanie jest przedmiotem publikacji (Zhong i in. 2017). Zasada działania pomiaru polega na obrocie pręta kinematycznego z dwoma przegubami kulistymi wokół podstawki (Rys. 2) zamocowanej w przestrzeni roboczej obrabiarki. Podczas ruchu wrzeciona mierzone są różne

odchyłki, w tym te odnoszące się do geometrycznej dokładności obrabiarki. Do innych popularnych systemów, służących do oceny dokładności geometrycznej obrabiarek sterowanych numerycznie zaliczyć można także Cross Grid (Du i in. 2006) oraz R-Test (Weikert 2004). W ostatnich latach pojawiły się również inne nowoczesne przyrządy pomiarowe np. interferometry do oceny stanu technicznego obrabiarek, systemy do pomiarów wieloosiowych.



Rys. 2. System QC10 Ballbar zamontowany na pionowym centrum CNC Haas Mini Mill (Jankowski i in. 2016).

Wyniki badań dokładności geometrycznej obrabiarek sterowanych numerycznie z użyciem specjalnych, dedykowanych systemów mogą być podstawą do przeprowadzenia działań kompensacyjnych np. poprzez poziomowanie obrabiarki (Kaczmarek i in. 2015). Obecnie rozważa się także wykorzystanie metod symulacyjnych (Majda 2010), które mają pozwolić na ułatwienie kompensacji błędów geometrycznych maszyn. Tego rodzaju metody wykorzystujące zaawansowany aparat matematyczny mogą posłużyć także do kompensowania innych błędów obrabiarek (Raksiri i Parnichkun 2004).

2.2 Badania własności statycznych

Opisane w poprzednim podrozdziale badania dokładności geometrycznej, mimo tego, że pełnią istotną rolę w ocenie stanu obrabiarki, nie dają pełnej odpowiedzi, jaka będzie dokładność obróbki. Wpływ na nią ma jeszcze szereg różnych czynników, wśród których istotną rolę odgrywają własności statyczne. Podczas gdy badania dokładności geometrycznej sprowadzają się właściwie do sprawdzenia, czy poszczególne podzespoły obrabiarki (a zwłaszcza prowadnice) zostały wykonane z odpowiednią dokładnością oraz, czy montaż przeprowadzono w sposób poprawny, badania własności statycznych pozwalają na określenie, w jaki sposób obrabiarka będzie reagować na pojawiające się obciążenia. Własności statyczne są ściśle powiązane z dokładnością wymiarowo – kształtową przedmiotów obrabianych i w bezpośredni sposób wpływają na jakość pracy obrabiarki. Z uwagi na fakt, że modelowanie odpowiedzi obrabiarki na zadawane obciążenie stwarza trudności ze względu na problemy z odpowiednią dyskretyzacją sztywności stykowych, najczęściej tego rodzaju badania przeprowadza się na obiektach rzeczywistych (Śliwka i Kaźmierczak 2012).

Badania własności statycznych obrabiarek zostały opisane w kilku normach branżowych, nie były natomiast w pełni znormalizowane. Pomiar polegał zwykle na wywoływaniu obciążenia zastępczego na układ nośny obrabiarki, który odpowiadał obciążeniom występującym podczas pracy obrabiarki. Do głównych zadań badań statycznych należą:

- określenie sztywności statycznej,
- wyznaczenie względnych wartości przemieszczeń pomiędzy przedmiotem obrabianym, a narzędziem.

Badania sztywności statycznej mają na celu określenie pojawiających się względnych przemieszczeń translacyjnych podczas obciążania obrabiarki lub jej poszczególnych zespołów. Źródłem takich przemieszczeń mogą być siły pochodzące z układu OUPN. Badania sztywności

statycznej zwykle odbywają się dla takich stanów obciążenia obrabiarki, które można określić, jako najcięższe warunki pracy. Bardzo często warunki takie nie występują podczas eksploatacji obrabiarki. W badaniach tych nie uwzględnia się sił od napędu oraz od składowej posuwowej siły skrawania ze względu na ich pomijalnie mały wpływ na wartość wskaźnika sztywności statycznej (Śliwka 2016). W badaniach obrabiarek konwencjonalnych, charakter odkształceń wynika bezpośrednio z właściwości mechanicznych maszyny, natomiast w przypadku obrabiarek sterowanych numerycznie, dodatkowym czynnikiem na to wpływającym jest także sztywność statyczna serwonapędów obrabiarek (Śliwka 2014).

Pomimo braku normalizacji badań sztywności statycznej istnieją różne metody, pozwalające na jej określenie, wśród których można wymienić między innymi metodę konwencjonalną z obciążeniem układu OUPN siłą statyczną (Majda i Pajor 2015), metodę wyznaczania sztywności statycznej z wymuszeniem quasistatycznym oraz metodę Dynamicznego Wyznaczania Sztywności Statycznej (DWSS) (Każmierczak i in. 2004).

Pomimo trudności w określaniu sztywności statycznej obrabiarek z wykorzystaniem narzędzi metody elementów skończonych, metody numeryczne są coraz częściej wykorzystywane jako pomoc, przy określaniu własności statycznej poszczególnych zespołów obrabiarki. Przykładem takiej metody może być hybrydowa metoda elementów skończonych, polegająca na uwzględnianiu w obliczeniach zarówno zespołów sztywnych, jak i zespołów podatnych modelowanych sztywnymi elementami skończonymi. Powszechnie jest wykorzystywanie narzędzi matematycznych przy tworzeniu nowych struktur kinematycznych, mogących znaleźć zastosowanie w maszynach technologicznych. Badania sztywności statycznej znajdują również zastosowanie w działaniach optymalizacyjnych, mających na celu zwiększenie dokładności pracy obrabiarki (Prakosa i in. 2013).

2.3 Badania własności dynamicznych

Podczas pracy obrabiarki pojawiają się również różne obciążenia dynamiczne, które wpływają na jej zachowanie się podczas obróbki skrawaniem. Głównym skutkiem tych obciążeń są drgania, które możemy podzielić na cztery podstawowe grupy:

- swobodne,
- wymuszone,
- parametryczne,
- samowzbudne.

Drgania te są spowodowane wieloma różnymi czynnikami, pojawiającymi się w trakcie pracy obrabiarki oraz takimi, które wynikają z jakości wykonania jej elementów składowych oraz montażu. Kinematyka obrabiarki, proces skrawania, geometria przedmiotu obrabianego lub oddziaływania zewnętrzne mogą spowodować pojawienie się różnych typów drgań.

Drgania parametryczne pojawiają się najczęściej wtedy, gdy mamy do czynienia z okresową zmiennością parametrów układu dynamicznego obrabiarki. Zazwyczaj ta zmienność dotyczy parametru sztywności. Przykładem przyczyny pojawiania się drgań parametrycznych może być zmienna sztywność przedmiotu obrabianego, na przykład wałka z rowkiem wpustowym, zmienna sztywność łożysk lub zmiana sztywności zazębienia, wynikająca ze zmieniającej się liczby przyporu. Drgania parametryczne charakteryzują się stałą amplitudą.

Drgania samowzbudne występują, gdy mamy do czynienia z istnieniem zmiennej siły, która będzie pojawiała się wraz z drganiem układu i zanikała wtedy, gdy układ przestanie drgać oraz musi pojawić się sprzężenie zwrotne między źródłem energii, a układem drgającym, w którym to energia dostarczana do układu będzie większa od energii rozpraszanej tłumieniem. Jedną z przyczyn powstawania drgań samowzbudnych w obrabiarkach jest zjawisko stick-slipu, które jest spowodowane przez nieliniową charakterystykę tarcia. Pojawia się ono zazwyczaj podczas przemieszczania po prowadnicach ślizgowych ciężkich zespołów ruchowych obrabiarek z niewielkimi prędkościami. Drgania samowzbudne przy pewnych parametrach mogą się pojawić również w czasie procesu skrawania. Jedną z głównych przyczyn powstawania drgań samowzbudnych podczas obróbki jest tzw. zjawisko regeneracji śladu.

Drgania swobodne pojawiają się zazwyczaj po krótkim dostarczeniu energii do układu np. podczas wejścia lub wyjścia narzędzia z przedmiotu obrabianego, zmiennego kierunku ruchu, a także podczas rozruchu lub hamowania maszyny. Mogą być również przenoszone z otoczenia obrabiarki.

Cechą charakterystyczną tych drgań jest malejąca amplituda, co oznacza, że drgania swobodne mają zwykle charakter krótkotrwały.

Drgania wymuszone cechuje stała amplituda, gdyż źródło tych drgań ma zazwyczaj związek z powtarzającym się w czasie wymuszeniem, a drgania zwykle są proporcjonalne do siły, która je wymusza. Ich przyczyną może być na przykład mimośrodowość wirujących elementów maszyny lub stosowanie narzędzi wieloostrzowych. Przyczyną powstawania drgań wymuszonych może być również wymuszenie kinematyczne, które wynika zwykle z drgań, które przenoszą się na maszynę z obrabiarek pracujących w jej bezpośrednim otoczeniu. Drgania wymuszone występują w całym procesie skrawania.

Biorąc pod uwagę stawiane obrabiarkom wymagania dotyczące dokładności wykonania, konieczne jest stosowanie działań, które będą miały na celu ograniczenie drgań w obrabiarence. Aby zrealizować ten cel, należy wykonać odpowiednie badania i zidentyfikować, jakie typy drgań i w jakim stopniu będą pojawiały się podczas pracy maszyny. Badania własności dynamicznych obrabiarek w stanie spoczynku możemy podzielić następująco (Raksiri i Parnichkun 2004):

- wyznaczenie funkcji przejścia poszczególnych członów układu dynamicznego obrabiarki,
- analizę widmową sygnału otrzymanego z rejestracji drgań układu,
- określenie postaci drgań,
- analizę modalną drgań.

Wraz z rozwojem metod modelowania inżynierskiego, największą popularnością wśród wymienionych wyżej rodzajów badań własności dynamicznych obrabiarek uzyskała analiza modalna drgań układu, jest ona wykorzystywana nie tylko w procesie projektowania nowych obrabiarek, lecz również w badaniach prototypów. Jest to metoda polegająca na badaniu własności dynamicznych, takich jak częstości drgań własnych, postaci drgań, czy współczynniki tłumienia modalnego dla elementów korpusowych. Dużą popularnością cieszy się także eksperymentalna analiza modalna drgań (Kępczak i Pawłowski 2015), w której są wykorzystywane wymuszenia wzbudnikiem drgań lub procesem roboczym.

Konieczność stosowania zarówno analiz numerycznych, jak i eksperymentalnych badań własności dynamicznych obrabiarek jest spowodowana tym, że w przypadku analizy teoretycznej wyniki mogą znacząco się różnić od rzeczywistych parametrów drgań. Biorąc pod uwagę fakt, że badania dynamiczne mają na celu prognozowanie nie tylko informacji na temat drgań, ale również przewidywanych i związanych z nimi wielkości takich, jak chropowatość powierzchni, czy hałas maszyny, zalecane jest stosowanie badań eksperymentalnych na rzeczywistych obiektach. Z uwagi na to, że nie zawsze jest możliwe i ekonomicznie opłacalne zbudowanie rzeczywistego modelu prototypu, korzysta się z symulacji numerycznych. Są one mniej dokładne z uwagi na trudności w modelowaniu połączeń stykowych, ale często jest to dokładność wystarczająca do tego, by odwzorować własności dynamiczne poszczególnych zespołów obrabiarki.

Obecnie w Polsce nie istnieją normy dotyczące badań własności dynamicznych obrabiarek wraz z określonymi wytycznymi. Niektóre badania opierały się częściowo na wycofanej w 2018 roku polskiej ogólnej normie dotyczącej oceny drgań maszyn, obecnie najczęściej stosuje się informacje zawarte w normie międzynarodowej. Mimo braku ściśle określonej normy badań własności dynamicznych obrabiarek w literaturze pojawiają się różnego rodzaju zalecenia i wskazówki, dotyczące sposobu przeprowadzania analizy modalnej drgań maszyn. Zaleca się, aby podczas takich badań (Oryński i in. 2010):

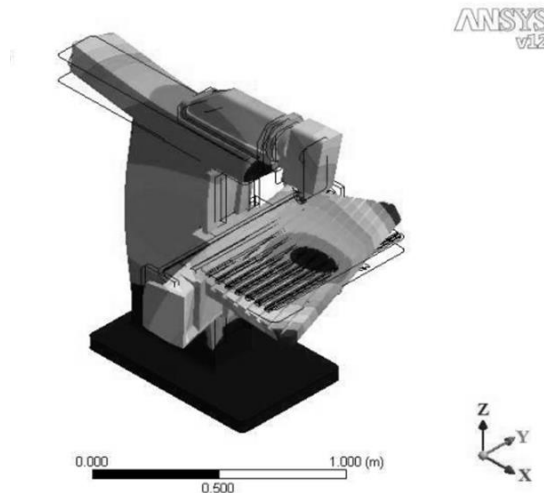
- obrabiarka była ustabilizowana cieplnie,
- aparatura pomiarowa znajdowała się w stanie równowagi cieplnej,
- obrabiarka była odizolowana od zewnętrznego promieniowania cieplnego i słonecznego,
- maszyna była kompletna i w pełni sprawna.

Istotnym czynnikiem w eksperymentalnej analizie modalnej drgań obrabiarek jest dobór odpowiedniego sposobu wymuszenia drgań struktury masowo – dyssypacyjno – sprężystej obrabiarki. Do głównych sposobów zalicza się (Chodźko i Marchelek 2011):

- test impulsowy z użyciem młotka modalnego, zawierającego przetwornik siły,

- testy MIMO (*ang. Multiple-Input-Multiple-Output*) z wykorzystaniem wielu wzbudników drgań,
- wymuszenie procesem roboczym.

Pojawiają się także próby automatyzacji czynności związanych z analizą modalną, tak aby mogła być przeprowadzona przez niewykwalifikowanego pracownika. Wraz z rozwojem metod obliczeniowych pojawiają się kolejne, nowe metody mające na celu lepsze i dokładniejsze opisywanie zjawiska drgań w obrabiarkach, wśród których można wymienić między innymi metodę wykorzystującą model belki Timoshenki stosowaną do analizy drgań wrzeciona, metodę receptancji liniowej, czy też algorytm PolyMAX.



Rys. 3. Wizualizacja jednej z postaci drgań frezarki wykonana w programie ANSYS (Pedrammehr i in. 2012).

Numeryczna analiza modalna może być z powodzeniem stosowana do obliczeń własności dynamicznych poszczególnych elementów oraz podzespołów maszyn (Rys. 3). Analizy takie wykonuje się głównie wtedy, gdy w danej maszynie planuje się zmienić jedną z jej części. Zasadne jest wtedy sprawdzenie, w jaki sposób dynamiczne obciążenie nowego elementu wpłynie na częstotliwości i postacie drgań tej maszyny i jaka będzie różnica w porównaniu z poprzednimi charakterystykami dynamicznymi obrabiarki. Badania takie są również wskazane, gdy tworzy się jeden typ obrabiarki w kilku wariantach, bądź z różnym dodatkowym wyposażeniem. Za pomocą numerycznej analizy modalnej można badać między innymi własności dynamiczne wrzeciona, stojaka frezarki oraz łoża obrabiarki. Niemniej, najbardziej interesujące z punktu widzenia konstruktora obrabiarki jest przeprowadzenie analizy modalnej dla całej, kompletnie zmontowanej obrabiarki skrawającej.

3. Podsumowanie

Istniejące aktualnie normy, służące do oceny własności obrabiarek skrawających zawierają liczne i szczegółowe zalecenia, które należy brać pod uwagę podczas planowania wykonywania badań obrabiarek. Normy te jednak często zawierają jedynie ogólne zalecenia. Brak jest w nich również odniesień do konkretnych rodzajów obrabiarek. Bardzo często wymagają również dodatkowych warunków ustalanych indywidualnie pomiędzy konstruktorem, producentem i użytkownikiem obrabiarki. Ponadto firmy produkujące obrabiarki realizują również własne metody badań obrabiarek, w celu przeprowadzenia oceny ich własności, jednak zarówno sam sposób wykonywania tych badań, jak i ich wyniki zazwyczaj nie są udostępniane użytkownikom obrabiarek.

Normy obejmujące zalecenia odnośnie do badań obrabiarek, dotyczą w dużej mierze badań bezpośrednich, polegających na pomiarze konkretnych wielkości, takich, jak płaskość, bicie, odchyłka pozycjonowania itp. Z jednej strony pozwala to uzyskać konkretne informacje na temat

jakości wykonania poszczególnych podzespołów maszyny, ułatwia znalezienie źródła błędów, dzięki czemu w łatwy sposób można dokonać poprawy jakości istniejącego obiektu. Z drugiej strony trudno jest na podstawie takich badań uzyskać praktyczne informacje o możliwościach obróbkowych danej maszyny i powiązać je z dokładnością uzyskiwanej na niej obróbki. Przeprowadzona analiza wskazuje na to, że konieczna jest próba określenia odpowiednich kryteriów oceny własności trójosiowych frezarek sterowanych numerycznie, które pozwolą uniezależnić wyniki badań od producentów obrabiarek oraz pozwolą na porównanie ze sobą różnych obrabiarek sterowanych numerycznie.

4. Literatura

- Wasiak Z, Wojciechowski T (2005) Sprawdzanie geometrycznej dokładności obrabiarki na przykładzie tokarki, instrukcja do zajęć laboratoryjnych z Maszyn Technologicznych.
- Majda P, Marchelek K (2013) Dokładność geometryczna obrabiarek sterowanych numerycznie, *Mechanik* 2:77-80.
- Janasek A, Čep R, Brychta J (2012) Checking the geometric accuracy of machine tool for selected geometry parameters, *Acta Polytechnica* 52(4): 68-73.
- Zhong L, Bi Q, Wang Y (2017) Volumetric accuracy evaluation for five-axis machine tools by modeling spherical deviation based on double ball-bar kinematic test, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 122:106-119.
- Du ZC, Lv CF, Hong MS (2006), Research on error modelling and identification of 3 axis NC machine tools based on cross grid encoder measurement, *Journal of Physics, Conference*, 91–100.
- Weikert S (2004) R-Test, a new device for accuracy measurements on five axis machine tools *CIRP Annals* 53(1): 429-432.
- Jankowski T, Piórkowski P, Skoczyński W (2016) Pomiar odchyłki okrągłości pionowego centrum CNC Haas Mini Mill, *Mechanik* 10: 1310-1311.
- Kaczmarek J, Lange S, Świątek R i in. (2015) Identyfikacja błędów pionowego centrum frezarskiego za pomocą systemu ballbar oraz ich korekcja poprzez poziomowanie obrabiarki, *Mechanik* 8-9: 479-487.
- Majda P (2010) Symulacyjne badania dokładności geometrycznej trójosiowej obrabiarki skrawającej, *PAK* 1: 52-53.
- Raksiri Ch, Parnichkun M. (2004) Geometric and force errors compensation in a 3-axis CNC milling machine, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 44(12-13): 1283–1291.
- Śliwka J, Kaźmierczak M (2012) Metoda wyznaczania sztywności statycznej obrabiarek ciężkich w warunkach przemieszlowych, *Inżynieria Maszyn* 17(3): 21-34.
- Śliwka J (2016) Metoda wyznaczania zalecanego wskaźnika sztywności statycznej tokarek karuzelowych, *Inżynieria Maszyn* 21(1): 69-79.
- Śliwka J (2014) Sztywność statyczna serwonapędów obrabiarek, *Inżynieria Maszyn* 19(1): 34-47.
- Majda P, Pajor M (2015) Niepewność wyznaczania sztywności statycznej obrabiarek z użyciem akcelerometrów, *Modelowanie inżynierskie* 55: 69-73.
- Kaźmierczak M, Śliwka J, Kosmol J i in. (2004) Monitor sztywności -narzędzie do wspomaganie wyznaczania sztywności obrabiarek. *Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn* 1: 53-70.
- Prakosa T, Wibowo A, Ilhamsyah R (2013) Optimizing static and dynamic stiffness of machine tools spindle shaft, for improving machining product quality, *Journal of KONES* 20(4): 363-370.
- Pedrammehr S, Farrokhi H, Khani Sheykh Rajab A et al. (2012) Modal analysis of the milling machine structure through FEM and experimental test, *Advanced Materials Research* 383-390: 5717-5721.
- Oryński F, Pawłowski, W, Bechciński G i in. (2010) Określenie dynamicznych właściwości zespołów karuzelowej tokarki do wykorbień wałów za pomocą badań modalnych 4: 30-41.
- Chodźko M, Marchelek K (2011) Doświadczalne badania właściwości dynamicznych układów korpusowych obrabiarek. *Wybrane zagadnienia, Inżynieria Maszyn* 1-2: 67-81.
- Kępczak N, Pawłowski W (2015) Teoretyczna i eksperymentalna analiza modalna korpusu obrabiarki, *Mechanik* 8-9: 194-198.

13. Analiza architektury budynku szkolnego typu ‘tysiąclatka’ z drugiej połowy XX wieku

Analysis of the architecture of the 'millennial' school building from the 20th century.

Weronika Skowronek

Katedra Projektowania i Badań Jakościowych W Architekturze, Wydział Architektury, Politechnika Śląska, Gliwice

Opiekun naukowy: dr hab. inż. arch. Dorota Winnicka-Jasłowska, Prof. PŚ.

Weronika Skowronek: weronika.cinal@polsl.pl

Słowa kluczowe: architektura i urbanistyka, budynek szkolny, szkoła Tysiąclecia, przestrzeń edukacyjna, projektowanie

Streszczenie

Szkoła podstawowa kształci młodego człowieka, będąc dla niego pierwszym etapem obowiązkowej, zorganizowanej edukacji. Uczniowie spędzają tu znaczną część swojego dnia, stąd przestrzeń, która ich otacza jest tak ważna, mając wpływ na kształtowanie ich osobistego rozwoju czy samopoczucia. Niewątpliwie aspekt kształcenia w szkole jest nadrzędny, niemniej sam budynek szkolny pozostaje równie ważny, będąc kreatywną przestrzenią i tłem do nauki.

Przełomowym okresem dla powstawania obiektów szkolnych stał się czas odbudowy Państwa Polskiego, gdzie wówczas masowo wznoszono budynki oświatowe w myśl hasła budowy ‘tysiąca szkół na Tysiąclecie Państwa Polskiego’. W tym znaczącym okresie powstało niemal 1500 typowych obiektów, zwanych potocznie ‘tysiąclatkami’. Obiekty te z powodzeniem przetrwały do czasów współczesnych, zachowując swoją pierwotną funkcję i dominują w świadomości wielu odbiorców jako typowy, tradycyjny budynek szkolny.

W artykule przedstawiono budynek szkolny z drugiej połowy XX wieku, będący typowym przedstawicielem nurtu ‘tysiąclatek’. Przeanalizowano rozwiązania architektoniczno-budowlane przy wznoszeniu tego typu obiektów, w oparciu o posiadaną wiedzę oraz źródła literaturowe. Analiza wybranego budynku szkolnego pozwoliła na wskazanie ogólnych kierunków projektowych, przyświecających kształtowaniu przestrzeni edukacyjnych w omawianym czasookresie. Podjęto również próbę oceny przyjętych rozwiązań projektowych we współczesnym użytkowaniu budynku. Za cel artykułu postawiono uzyskanie odpowiedzi na pytania: Jak wygląda typowy budynek szkolny z drugiej połowy XX wieku? Jakie zasady projektowe przyświecały w okresie jego powstawania?

1. Wstęp

Szkoła podstawowa stoi przed wyzwaniem kształcenia młodego człowieka, będąc dla niego pierwszym etapem obowiązkowej, zorganizowanej edukacji. Na niemal dekadę, mury szkoły stają się drugim domem, w którym uczniowie spędzają znaczną część swojego dnia, stąd przestrzeń, która ich otacza jest tak ważna, mając bezpośredni wpływ na kształtowanie ich osobistego rozwoju czy nawet zdrowia. Niewątpliwie aspekt kształcenia w szkole jest nadrzędny, niemniej sam budynek szkolny pozostaje równie ważny, pełniąc funkcję kreatywnej przestrzeni i tła do nauki. Istotę roli architektury szkolnej trafnie oddają słowa Janusza Włodarczyka, wybitnego architekta, autora monografii poświęconej zagadnieniom projektowania przestrzeni szkolnych: „*Architektura szkolna oddziałuje na dziecko jako istotna część całej przestrzeni, w której ono żyje. Na przykładzie własnej szkoły uczy się ono kultury zachowań w ogólnodostępnej przestrzeni społecznej, istotnego elementu kultury narodowej. Ranga szkoły jest więc niezwykle ważna dla kształtowania psychiki dziecka*”.¹

¹ Janusz Andrzej Włodarczyk (ur. 1932, zm. 2015) – polski architekt, praktyk i teoretyk, specjalista w dziedzinie architektury mieszkaniowej i użyteczności publicznej, architektury szkoły.

2. Opis zagadnienia

2.1 Historia i geneza powstania szkół ‘tysiąclatek’

XX wiek to nieustanny rozwój i poszukiwania optymalnych rozwiązań szkolnej przestrzeni. Konsekwencją upowszechnienia podstawowej edukacji i następujących przemian społecznych jest widoczny wzrost zainteresowania samym budynkiem i instytucją szkoły. Systematycznie poszerzany jest program funkcjonalny, budynek oświaty zmienia się w duchu obowiązujących tendencji stylowych. Na przestrzeni ubiegłego wieku niewątpliwie nastąpił olbrzymi postęp zarówno w myśleniu o przestrzeni szkolnej jak i o samym szkolnym budynku. Największy rozwój architektury oświatowej przypadł na drugą połowę XX wieku, podyktowany potrzebami związanymi z wchodzeniem wyżu demograficznego lat 50. w wiek szkolny.

Historia szkół typowych sięga 1958 roku, w którym to Władysław Gomułka, ówczesny I sekretarz KC PZPR zainicjował akcję budowy tysiąca szkół - pomników, związanej z obchodami Tysiąclecia Państwa Polskiego. Na terenach wiejskich powstawały zazwyczaj szkoły parterowe lub 1-piętrowe, które lepiej wpisywały się w otaczającą je architekturę i wiejski krajobraz, w miastach natomiast dominowały budynki wyższe (Kuc 2017). Przeważnie przyjmowały sześcienny, bryłowy układ. Nowe gmachy cechowała symetria układów, rzutów a także elewacji. Płaskie dachy oraz akcentowanie przestrzeni rekreacyjnej było nowością w dotychczasowym postrzeganiu architektury szkolnej (Wałaszewski 2018). Unormowano również zbyt dużą liczbę uczniów w klasie. Jedna sala w typowej szkole mieściła ok. 40 uczniów. Budynki powstawały w myśl architektury modernistycznej. Punktem wyjściowym architektonicznych zmian były innowacje i trendy Europy Zachodniej. Na przestrzeni lat 60. i 70. wybudowano niemal 1500 typowych obiektów szkolnych, zwanych potocznie po dziś dzień ‘tysiąclatkami’ Okres typizacji, obfitujący w wiele, funkcjonujących do dziś budynków trwał niemal dwadzieścia lat, aż do 1981 roku, kiedy normatyw szkół typowych został uchylony. Z wymiernych dóbr, pomyślnie przeprowadzonej inicjatywy oświatowej lat 60. i 70. w Polsce, stale korzystamy a szkoły z ówczesnego okresu typizacji dla wielu stanowią synonim klasycznego, praktycznego budynku szkolnego.

3. Przegląd literatury

Polska literatura dotycząca zagadnienia projektowania budynków szkolnych rozwinęła się dopiero w latach 60. i 70. ubiegłego wieku., choć ważnym opracowaniem z początku XX wieku była publikacja z zakresu projektowania budynków szkolnych *O budowie szkół i urządzaniu szkół. Podręcznik praktyczny* autorstwa inżyniera Józefa Holewińskiego z 1908 roku (Holewiński 1908), dotycząca przede wszystkim projektowania szkół podstawowych i próby zwrócenia uwagi na wymagania higieny. Następną ważną publikacją *Architektura szkół* autorstwa Stanisława Łukasiewicza pojawiła się dopiero niespełna pół wieku później, w 1954 roku (Łukasiewicz 1954). Kolejne interesujące pozycje bibliograficzne pochodzące już z lat 60. to: *Budownictwo szkół i przedszkoli* Janiny Jankowskiej, Tadeusza Uniejewskiego i Andrzeja Uniejewskiego (Jankowska i in. 1962) i *Budynki szkół podstawowych* Danuty Mieszkowskiej i Ryszarda Wachowiaka (Mieszkowska i Wachowiak 1968). Opracowania te przybliżają problematykę projektowania budynków szkolnych i ich pomieszczeń, prezentując przy okazji gotowe typizowane rozwiązania, charakterystyczne dla ówczesnego trendu. Następną publikacją, wydaną w 1992 roku była *Architektura szkoły* autorstwa Janusza Włodarczyka, czynnie działającego architekta, zawierająca rozwiązania funkcjonalne i techniczne w polskim jak i europejskim budownictwie szkolnym II połowy XX wieku (Włodarczyk 1992). Kolejną publikacją była rozprawa doktorska autorstwa Małgorzaty Balcer-Zgraj z Politechniki Śląskiej pt. *Architektura budynku szkolnego lat najnowszych w aspekcie wpływów techniki i wymagań społecznych*, opublikowana w 2008 roku, zawierająca przykłady koncepcyjnych jak i zrealizowanych budynków szkolnych (Balcer-Zgraj 2008). Równie ciekawa tematycznie jest niepublikowana rozprawa doktorska pt. *Architektura i rozwiązania przestrzenne budynków szkolnych wybudowanych w Polsce po 1999 roku na tle uwarunkowań reformy systemu oświaty, uwarunkowań historycznych i wieloaspektowych wytycznych projektowania przestrzeni szkolnych* autorstwa Marii Kuc z 2017 roku, odnosząca się do ówczesnie obowiązujących idei i założeń poprzedniej reformy oświatowej (Kuc 2017). W 2018 roku pojawiła się również pozycja

literaturowa, dotycząca całościowego zagadnienia skomplikowanego przedsięwzięcia, jakim była budowa szkół ‘tysiąclatek’ pn. Tysiąc szkół na Tysiąclecie (Wałaszewski 2018). Książka porusza aspekt zarówno architektoniczny jak i polityczny ówczesnego okresu, zawiera również wartościową listę wszystkich szkół, wybudowanych pod hasłem ‘szkoły tysiąclecia’.

Znacznie więcej opracowań, dotyczących całościowego spojrzenia na projektowanie budynków szkolnych, można znaleźć w dziale zagranicznym, zwłaszcza w języku angielskim, powszechnie uważanym za obowiązujący język naukowy. Są to głównie publikacje pochodzące z XXI wieku, opisujące zagadnienia projektowania przestrzeni szkolnej. Spośród ciekawych pozycji warto tu wymienić: *Architecture of Schools: The New Learning Environments* pod redakcją Marka Dudka (Dudek 2009) czy też *Children’s Spaces* tego samego autora (Dudek 2005).

4. Opis przypadku

4.1 Szkoła Podstawowa nr 64 w Katowicach

Przedmiotowym budynkiem, poddanym analizie w niniejszym artykule jest Szkoła Podstawowa nr 64 w Katowicach, wzniesiona jako jedna ze szkół-pomników, związanych z obchodami Tysiąclecia Państwa Polskiego. Budynek powstał w latach 60. XX wieku. Z początkiem XXI wieku, szkoła została zmodernizowana w zakresie dostosowania do osób niepełnosprawnych, zyskując pochylnię, windę oraz toalety dla osób niepełnosprawnych. Obiekt od początku istnienia pełni funkcję oświatową. W ramach artykułu przeprowadzono analizę budynku pod kątem układów funkcjonalnych, architektury, materiałów oraz rozwiązań projektowych, charakterystycznych dla obiektów typu ‘tysiąclatka’. Wykonano ją w oparciu o wizję lokalną i inwentaryzację budynku, materiały archiwalne oraz przegląd literaturowy, dotyczący szkół tego okresu. Podjęto również próbę oceny ówczesnych założeń w odniesieniu do czasów współczesnych.

Przedmiotowy budynek stanowi rozłożysta bryła na planie zbliżonym do litery H, będącym jednym z typowych układów przestrzennych budynków szkolnych ówczesnych lat. Bryła główna szkoły trzykondygnacyjna, częściowo podpiwniczona. Część prostopadła parterowa. Równoległe do bryły głównej budynku usytuowano kolejną część parterową, mieszczącą strefę kuchenną oraz halę sportową. Obiekt zaprojektowano jako wolnostojący, centralnie usytuowany na działce.



Rys. 1. Budynek w stanie istniejącym.

4.2 Materiały i technologie

Budynek wzniesiono metodą uprzemysłowioną z prefabrykowanych elementów w konstrukcji ramowej. Budynek posadowiony został na żelbetowej konstrukcji monolitycznej. Stropy między-kondygnacyjne wykonano z płyt kanałowych. Stropodachy płaskie, wykończone pokryciem papowym. Ściany działowe murowane. Elewacje wykończone płytami prefabrykowanymi falistymi lub tynkiem. Bryła główna od frontu częściowo ocieplona warstwą wełny mineralnej, pokrytej arkuszami blachy falistej.

Układ funkcjonalny

Budynek zaprojektowano jako rozłożystą bryłę o układzie korytarzowo-salowym. Do budynku prowadzą 4 wejścia, w tym 1 wejście główne od strony frontowej, równoległej do drogi. Komunikację poziomą stanowi korytarz, poprowadzony przez całą długość budynku. Wokół niego zabudowano sale lekcyjne. W lewym skrzydle budynku dominuje układ lokalizacji sal zajęciowych z obu stron głównego korytarza, w skrzydle przeciwnym natomiast, sale lekcyjne występują wyłącznie z jednej strony, zwrócone oknami w stronę zachodnią. Komunikację pionową stanowią 2 główne klatki schodowe, znajdujące się odpowiednio w strefie wejściowej do budynku oraz w jego prawym skrzydle dydaktycznym.

W budynku znajduje się również winda, dobudowana do bryły głównej z początkiem XXI wieku i zwrócona we wnętrzu w stronę otwartej strefy wejściowej. Z uwagi na wyraźnie rozczłonkowaną bryłę i prostokątne założenia, układ funkcjonalny jest czytelny, wyraźnie Wejście główne naprowadza użytkownika na strefę komunikacyjną, rozchodzącą się na trzy strony budynku.

4.3 Strefowanie

Z uwagi na rozczłonkowany kształt bryły oraz układ korytarzowo-salowy w budynku czytelnie zostały wydzielone strefy z odpowiednio przypisaną im funkcją. W parterze budynku zlokalizowano większość niezbędnych stref szkolnych, wyższe kondygnacje przeznaczono wyłącznie na sale lekcyjne. Strefa wejściowa, umiejscowiona od strony zachodniej prowadzi do przestronnego holu, z którego w trzech kierunkach rozchodzi się szkolny korytarz. W bryle głównej szkoły, powtórzonej na kolejnych 2 kondygnacjach

zlokalizowano strefy dydaktyczne, odpowiednio dla dzieci młodszych i starszych.

Parterowy 'łącznik' między głównymi bryłami stanowi korytarz łączący strefę dydaktyczną ze strefą kuchenną i sportową. Umieszczono w nim strefę administracyjną, zawierającą pomieszczenia sekretariatu, kadr, dyrekcji. Po prawej stronie łącznika od strony wschodniej zlokalizowano halę sportową wraz z całym zapleczem szatniowym. Strona przeciwna poświęcona została na zaplecze kuchenne oraz jadalnię. W ich sąsiedztwie zlokalizowano także bryłę z częścią sportową, mieszczącą salę gimnastyczną wraz z szatniami i zapleczem. Do powyższych części prowadzi również drugie wejście do budynku, umiejscowione na osi z wejściem głównym do budynku po przeciwnej stronie, jasno wyznaczając ciąg komunikacyjny w parterze. Drugie wejście stanowi również drogę zaopatrywania zaplecza kuchennego.

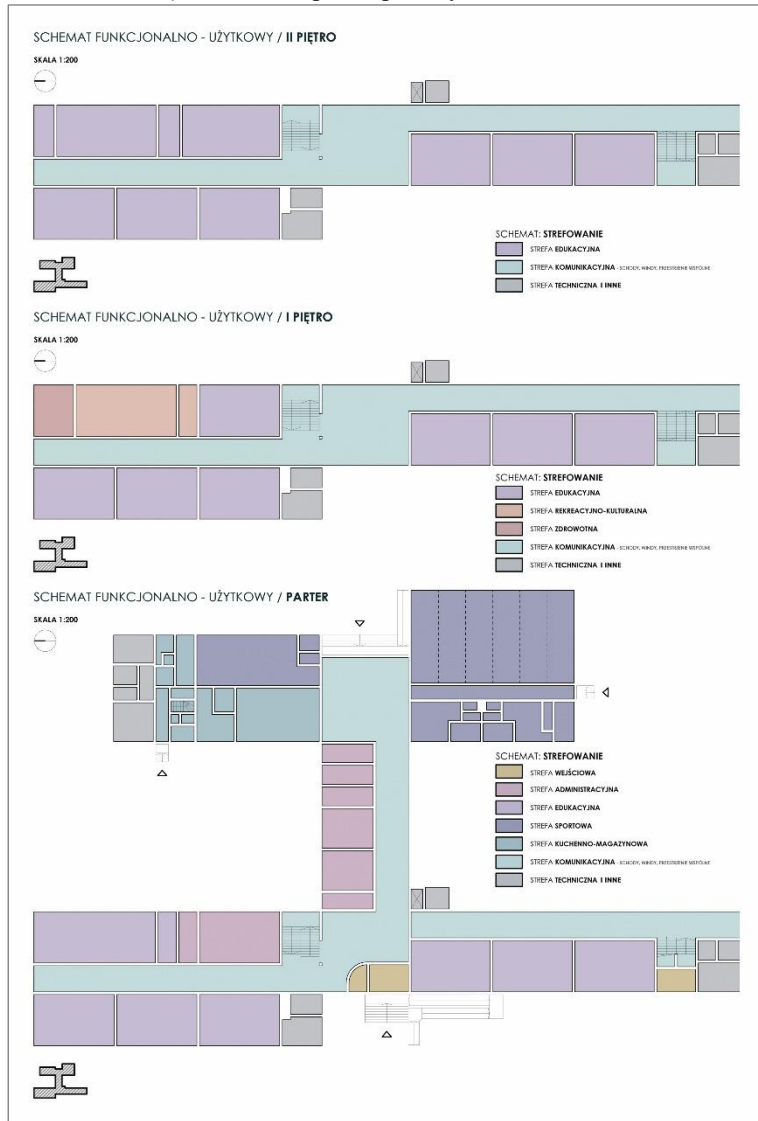
4.4 Przestrzenie wspólne

Ważne miejsce w budynku szkolnym pełni przestrzenie wspólne, wspomagające interakcje między użytkownikami obiektu. Przestrzeń wspólna w przedmiotowym obiekcie sprowadza się głównie do szerokich szkolnych korytarzy. Korytarz został zaprojektowany jako szeroki trakt, będący przestrzenią wspólną i miejscem spędzania przerw międzylekcyjnych. Od strony wschodniego wejścia do budynku korytarz został poszerzony, tworząc swobodną przestrzeń, gdzie obecnie znajduje się m.in. stół do ping-ponga. W jej sąsiedztwie znajduje się jadalnia, będąca miejscem spotkań większej liczby dzieci. Na piętrze budynku zlokalizowana została także biblioteka, stanowiąca odrębne pomieszczenie.

4.5 Dostępność

Budynek szkolny dostosowany jest do osób niepełnosprawnych. Możliwe stało się to dzięki modernizacji przeprowadzonej na początku XX wieku, mającej za cel dostosowanie budynku do współczesnych wymagań dostępności. Do budynku prowadzą dwie pochylnie zewnętrzne,

komunikacja pionowa odbywa się przy pomocy dobudowanego szybu windowego, na każdym piętrze dobudowano również 1 toaletę dla osób niepełnosprawnych.



Rys. 2. Schemat funkcjonalno-użytkowy budynku.

5. Wnioski

Szkoły tysiąclecia powstały w duchu modernizmu, inspirowanego innowacjami zachodniej Europy. Budynki w dużej mierze powstawały na bazie kilkudziesięciu projektów typowych. Gmachy budynków wznoszono szybko i ekonomicznie, dzięki czemu akcja powiodła się z sukcesem. Niewątpliwymi atutami architektury i układów funkcjonalnych 'tysiąclatek' jest prostota budynku, czytelna organizacja funkcji, strefowanie czy ekonomika budowy. Niemniej obiekty te nierzadko były krytykowane m.in. za niedoprecyzowane kształtowanie przestrzeni wspólnych. Jak pisze Cezary Szpytma: „Układ korytarzowo-salowy dyskredytuje się jednak najczęściej za jego ubóstwo, wyrażające się wydzieleniem jedynie najbardziej podstawowych rodzajów przestrzeni. Bardzo często wyraźnie widoczny jest brak dbałości o przestrzeń sprzyjającą kształceniu społecznemu, emocjonalnemu” (Szpytma 2016).

Kryteria i wytyczne w podejściu do kształtowania budynku szkolnego mocno zmieniały się na przestrzeni lat. Podyktowane były najczęściej sytuacją polityczną oraz społeczną w państwie, które były katalizatorem kolejnych oświatowych reform. Owe reformy systematycznie kładły nacisk na zainteresowanie dzieckiem oraz jego indywidualnymi potrzebami. Zaczęto poszukiwać idealnej formy budynku oraz elastycznych i funkcjonalnych przestrzeni szkolnych, dopasowanych do skali najmłodszych odbiorców. Nastąpił wzrost znaczenia lokalizacji oraz zagospodarowania terenów wokół budynku a także estetyki wewnątrz i na zewnątrz obiektu. Sala lekcyjna, stanowiąca niegdyś jedyny warunek funkcjonowania szkoły okazała się niewystarczająca. Rezultatem okazały się nowe standardy budynków oświatowych, uwzględniające wieloaspektowe zadania szkoły, programy funkcjonalno-użytkowe, warunki higieniczno-sanitarne oraz wymogi wielkościowe. Ewolucja programów funkcjonalnych szkoły na przestrzeni ubiegłego wieku dała podstawę wypracowanych współczesnych układów przestrzennych oraz szansę realizacji różnorodnych metodologii i założeń pedagogicznych.

XX wiek to nieustanny rozwój i poszukiwania optymalnych rozwiązań szkolnej przestrzeni. Konsekwencją upowszechnienia podstawowej edukacji i następujących przemian społecznych jest widoczny wzrost zainteresowania samym budynkiem i instytucją szkoły. Systematycznie poszerzany jest program funkcjonalny, budynek oświaty zmienia się w duchu obowiązujących tendencji stylowych. Przełomowym okresem wznoszenia budynków szkolnych jest druga połowa XX wieku, związana z typizacją obiektów oświatowych. Choć budynki te spotykały się nierzadko z krytyką powtarzalnych rozwiązań, standaryzowania potrzeb oraz typową architekturą, przetrwały do czasów współczesnych w swojej pierwotnej funkcji i z powodzeniem stanowią przestrzeń nauki dla kolejnych odbiorców. Cechuje je czytelność układu, strefowanie przestrzeni, klarowny i przejrzysty układ. Ponadto budynki były wznoszone w czasach wyżu demograficznego z myślą o licznych klasach, stąd przy obecnym powrocie do 8-klasowej organizacji szkół podstawowych sprostają potrzebom ilościowym. Niewątpliwie z biegiem czasu, budynki wymagają pewnych modernizacji w zakresie niezbędnych remontów oraz dostosowania przestrzeni do osób niepełnosprawnych. Akcja budowy jednak w pełni się powiodła a efekty pozostały do czasów współczesnych w postaci wielu budynków szkolnych.

Analizowany w artykule budynek szkolny, mimo iż powstał w latach 60. XX wieku a budynki z tego okresu spotykały się nierzadko z krytyką ich architektury i rozwiązań, spełnia powierzoną mu funkcję, wciąż zapewniając przestrzeń edukacyjną wielu uczniom. W ocenie autorki, przyjęte rozwiązania na etapie powstawania budynku, współcześnie spełniają powierzone im zadanie. Budynek oparty został na klasycznym układzie korytarzowo-klasowym, który nadal dominuje w podejściu do projektowania budynków szkolnych w Polsce. Pomimo szerokiego układu korytarzowego, w ocenie autorki, pozytywnym aspektem w budynku szkolnym byłaby wspólna przestrzeń, sprzyjająca kreatywnym działaniom i interakcjom między użytkownikami, której brak zauważalny jest w klasycznych układach 'tysiąclatek'. Ważnym atutem budynku jest jednak jego modernizacja, ukierunkowana na dostosowanie do osób z niepełnosprawnościami, likwidująca bariery architektoniczne i zapewniająca dostępność budynku dla wszystkich użytkowników. Niewątpliwie, na przestrzeni lat, estetyka budynku uległa pogorszeniu, przez co wygląd zewnętrzny budynku nie budzi pożądanych emocji, niemniej przy niewielkiej ingerencji zewnętrznej, zachowującej poszanowanie dla idei i okresu powstawania budynku, elewacja ma szansę zyskać nowy, przyjazny wygląd, a przestrzeń budynku z powodzeniem posłuży kolejnym pokoleniom.

6. Podsumowanie

Wiek XX wypracował plan funkcjonalno-użytkowy stanowiący podstawę współczesnego projektu budynku szkolnego, modyfikowanego w zależności od potrzeb i wielkości poszczególnych placówek. Katalizatorem zmian na przestrzeni wieku była sytuacja polityczna oraz coraz to nowsze reformy oświatowe, mające na celu przybliżenie polskiego systemu do standardów zachodnich.

Ogromna liczba budynków szkolnych powstałych w drugiej połowie ubiegłego wieku zachowała się do czasów współczesnych w swojej pierwotnej funkcji i formie. Potocznie zwane 'tysiąclatki' stanowią do dziś synonim klasycznej, wzorcowej szkoły dla wielu jej odbiorców. Projektowane ówczesne szkoły, pomimo spotykanej krytyki typowych i powtarzalnych rozwiązań

(Szpytma 2016), prezentowały nowoczesne podejście. Użyte wówczas materiały, mimo iż na przestrzeni kilkudziesięciu lat spowszechniały i zyskały zamienniki, z powodzeniem przetrwały do czasów współczesnych. Architektura modernistyczna, będąca głównym nurtem dla tego okresu, okazała się na tyle zachowawcza i wyważona, że z powodzeniem w czasach współczesnych wpisuje się w otaczającą, nową tkankę.

Współcześnie w Polsce w uproszczeniu zauważyć można dwie tendencje dotyczące architektury budynków szkolnych – budynki typowe, pozostałości przełomowych lat 60. i 70. ubiegłego wieku oraz sukcesywnie nowoprojektowane obiekty, będące nowoczesnym spojrzeniem na wypracowane układy i rozwiązania ubiegłego wieku. Pomimo większej uwagi architektów i indywidualności w podchodzeniu do projektowania budynków szkolnych, istniejące obiekty z pomocą niewielkiej modernizacji spełniają współczesne wymagania, gdyż pomimo powtarzalności i typowości swojej epoki, zostały zaprojektowane nowatorsko w odniesieniu do ówczesnych czasów i z pewnością posłużą kolejnym młodym odbiorcom. Na przestrzeni dekad zmieniały się przepisy, reformy i inne wiążące ustawy, niemniej sam budynek wciąż spełnia powierzoną mu rolę.

7. Literatura

- Balcer-Zgraja M (2008) Architektura budynku szkolnego lat najnowszych w aspekcie wpływów współczesnej techniki i wymagań społecznych, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- Dudek M (2009) Architecture of Schools: The New Learning Environments, Nowy Jork.
- Dudek M (2005) Children's Spaces, Wielka Brytania.
- Holewiński J (1908) O budowie szkół i urządzaniu szkół. Podręcznik praktyczny, Warszawa.
- Jankowska J, Uniejewski T, Uniejewski A (1962) Budownictwo szkół i przedszkoli, Warszawa.
- Kuc M (2017) Architektura i rozwiązania przestrzenne budynków szkolnych wybudowanych w Polsce po 1999 roku na tle uwarunkowań reformy systemu oświaty, uwarunkowań historycznych i wieloaspektowych wytycznych projektowania przestrzeni szkolnych, Wydział Architektury Politechniki Wrocławskiej. (rozprawa doktorska)
- Łukasiewicz S (1954) Architektura szkół, Warszawa.
- Mieszkowska D, Wachowiak R (1968) Budynki szkół podstawowych, Warszawa.
- Nalaskowski A (2002) Przestrzeń i miejsca szkoły, Wydawnictwo Impuls.
- Szpytma C (2016) Rola architektury w tworzeniu aktywnego środowiska edukacji, *Teraźniejszość-Człowiek-Edukacja*, tom 19.
- Wałaszewski K (2018) Tysiąc szkół na Tysiąclecie. Szkoły Tysiąclecia – architektura, propaganda, polityka, Księży Młyn Dom Wydawniczy.
- Włodarczyk J (1992) Architektura szkoły, Wydawnictwo Arkady.

14. Predykcja sił reakcji w płycie rozciąganej przy użyciu sieci neuronowej i metody elementów skończonych

Prediction of reaction forces in plate under tensile loading using neural network and finite element method

Smolnicki Michał

Katedra Mechaniki, Inżynierii Materiałowej i Biomechaniki, Wydział Mechaniczny,
Politechnika Wrocławska

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Grzegorz Lesiuk

Smolnicki Michał: michal.smolnicki@pwr.edu.pl

Słowa kluczowe: uczenie maszynowe, Abaqus, plug-in

Streszczenie

W niniejszym artykule przedstawiono przykład wykorzystania sieci neuronowej do predykcji wielkości mechanicznych – tu sił reakcji powstających przy rozciąganiu płyty. Stworzono skrypt w języku Python, który umożliwił wygenerowanie modelu numerycznego do metody elementów skończonych, wykorzystanie silnika Abaqus i następnie przetworzenie danych. Powtórzenie tego procesu dla różnych zestawów danych wejściowych doprowadziło do powstania zbioru treningowego dla sieci neuronowej, która po wytrenowaniu była w stanie poprawnie przewidywać wielkość sił reakcji dla nieznanego sobie zbioru danych wejściowych. Proponowane podejście może być rozszerzane na inne problemy inżynierskie.

1. Wstęp

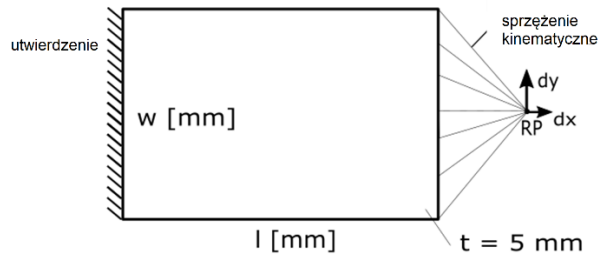
Uczenie maszynowe staje się coraz bardziej rozwijającą dziedziną nauki. Wykorzystanie metod i algorytmów uczenia maszynowego tyczy się też innych dziedzin jak przykładowo Mechanika. W przypadku sieci neuronowych – konieczne jest posiadanie dużego zbioru treningowego (ang. dataset). Często liczebność zbiorów danych pochodzących z eksperymentów może być zbyt mała, żeby stanowić skuteczny zbiór uczący – dlatego możliwe jest wykorzystanie metody elementów skończonych do wygenerowania takiego zbioru danych. To podejście nie jest jeszcze zbyt popularne, ale przykłady można znaleźć w pracach na temat: oscylatora harmonicznego (Kononenko i Kononenko 2018), powłok w budownictwie (Ćojbašić i in. 2014), predykcji wielkości (Javadi i in. 2003), elementy grubościonne (Golewski i in. 2017) czy medycynie (Sun i in. 2019). W niniejszej pracy zaprezentowane zostanie praktyczne podejście do takiego zagadnienia w połączeniu z zautomatyzowanym programem do generowania modelu, obliczania go i przekształcania wyników. Taka automatyzacja umożliwi wygenerowanie dostatecznie dużego zbioru treningowego.

2. Materiał i metody

Analizowany przykład dotyczy płyty wykonanej z materiału izotropowego i poddanej następującym warunkom brzegowym. Jedna krawędź płyty została utwierdzona natomiast przeciwległa krawędź płyty jest przemieszczana w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach x , y , z o pewną odległość odpowiednio dx , dy i dz . Oprócz wielkości przemieszczenia, wielkościami regulowanymi są również wymiary płyty – szerokość (w) oraz długość (l). Wszystkie te wymiary są wyrażone w milimetrach. Grubość płyty została ustalona na 5 milimetrów, ale również mogłaby być wielkością wejściową. Schematyczny rysunek przedstawiający płytę został ukazany poniżej (Rys.1).

Płyta została zamodelowana przy użyciu tak zwanej powłoki (ang. shell). Jako materiał założono taki o charakterze izotropowym to znaczy o takich samych własnościach niezależnie od obranego kierunku. Materiały takie są charakteryzowane przez trzy wielkości materiałowe – Moduł Younga, współczynnik Poissona oraz Moduł Kirchoffa. Do zdefiniowania takiego materiału wystarczą dwie z trzech wymienionych wielkości. W niniejszych badaniach przyjęto jako niezależne

moduł Younga oraz współczynnik Poissona. Ich wartości również były regulowane i stanowiły parametry wejściowe do modeli. Wszystkie wielkości stanowiące parametry wejściowe do analizy zostały podsumowane w (Tab.1)



Rys. 1. Schemat geometrii i warunków brzegowych analizowanej płyty.

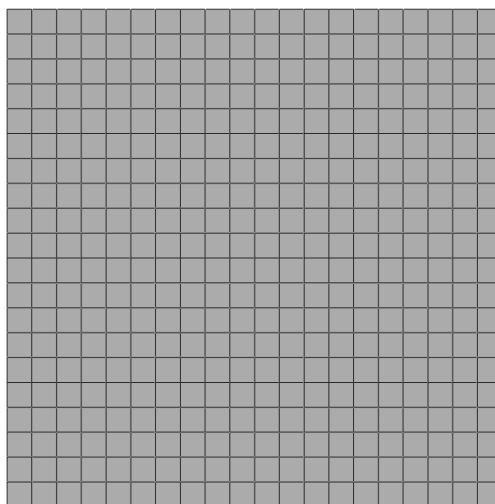
Tab. 1. Parametry wejściowe do analizy i ich zakresy.

Parametr [jednostka]	zakres
W [mm]	10 – 60
L [mm]	50 – 100
E [GPa]	100 - 200
ν [-]	0.2 – 0.4
dx [mm]	1 – 10
dy [mm]	1 – 10
dz [mm]	1 – 10

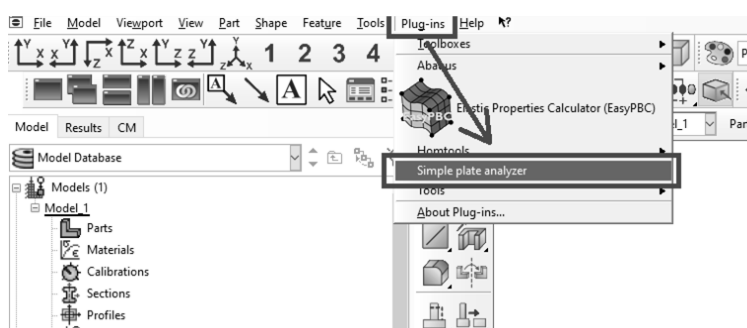
Kolejnym krokiem podczas tworzenia modelu numerycznego po definicji geometrii i materiału jest tak zwana dyskretyzacja, a więc proces nakładania siatki. W procesie tym model geometryczny jest dzielony na małe fragmenty zwane elementami skończonymi. W przypadku prostej geometrii jak prostokątna płyta, nie jest to skomplikowane i przykładowa siatka elementów skończonych wygląda jak na (Rys.2). Zostały wykorzystane standardowe elementy powłokowe to znaczy 4-węzłowe powłokowe (do grubych i cienkich powłok) z zredukowaną integracją (ang. *reduced integration*), kontrolą efektu klepsydry (ang. *hourglass control*) z skończonymi odkształceniami membranowymi – oznaczane symbolem S4R.

Następny etap tworzenia modelu numerycznego to definicja warunków brzegowych. Zostały one nadane według schematu przedstawionego na (Rys.1) to znaczy utwierdzono jedną z krawędzi (ang. *encastre*) poprzez odebranie wszystkich stopni swobody (3 translacji i 3 rotacji). Przesunięcia zostały zrealizowane poprzez użycie punktu referencyjnego (ang. *reference point*), któremu wymuszono ruch o przyjęte wartości dx, dy i dz (odpowiednio na stopniach swobody U1, U2, U3). Sam punkt referencyjny połączono z odpowiednią krawędzią poprzez połączenie kinematyczne (ang. *kinematic coupling*) z uwzględnieniem wszystkich 6 stopni swobody. Takie rozwiązanie pozwala na późniejszy łatwy odczyt sił reakcji, bo skupione są one w zdefiniowanym punkcie referencyjnym. Ze względu na prostotę modelu nie było konieczne definiowanie dodatkowych interakcji. Tak stworzony model numeryczny pozwala znaleźć siły reakcji odpowiadające de facto sile potrzebnej do rozciągnięcia płyty o zdefiniowane przemieszczenia dx, dy i dz. Przedstawione powyżej kroki umożliwiają zanalizowanie jednego przypadku (jeden zbiór danych wejściowych) jednak konieczna jest automatyzacja procesu. Taką automatyzację w środowisku Simulia Abaqus można uzyskać poprzez wykorzystanie skryptów napisanych w Pythonie. Skrypty te umożliwiają kontrolę nad działaniami, które użytkownik normalnie wykonuje poprzez graficzny interfejs użytkownika. Stworzony został więc zestaw skryptów odpowiedzialnych za generowanie modelu numerycznego (geometria, przypisanie materiału, stworzenie złożenia,

dobranie warunków brzegowych). Wykonywanie tej części oprogramowanie prowadziło do wytworzenia plików wejściowych do silnika Abaqus – w formacie inp. pliki te zawierają wszystkie informacje o modelu geometrycznym, materiałowym, dyskretnym, warunkach brzegowych etc. Drugim krokiem było wykrozystanie wszystkich wygeberowanych plików wejściowych i silnika obliczeniowego tak aby stworzyć bazy wynikowe w formacie odb. Następnie pliki odb były automatycznie analizowane w postprocessingu tak aby wydobyć z nich dane które są niezbędne do dalszego działania. Skrypty te zostały zebrane w całość jako plug-in do środowiska Abaqus. Dzięki temu dostęp do działania jest możliwy również przez graficzny interfejs użytkownika. Poniżej na (Rys.3) przedstawiono sposób użycia plug-inu w programie. Tego typu plug-in musi być wcześniej zainstalowany przez użytkownika poprzez przeniesienie odpowiednich plików do folderu z plug-inami. Plug-in umożliwia zdefiniowanie wartości parametrów wejściowych takich jak szerokość, długość, moduł Younga etc. poprzez graficzny interfejs użytkownika.



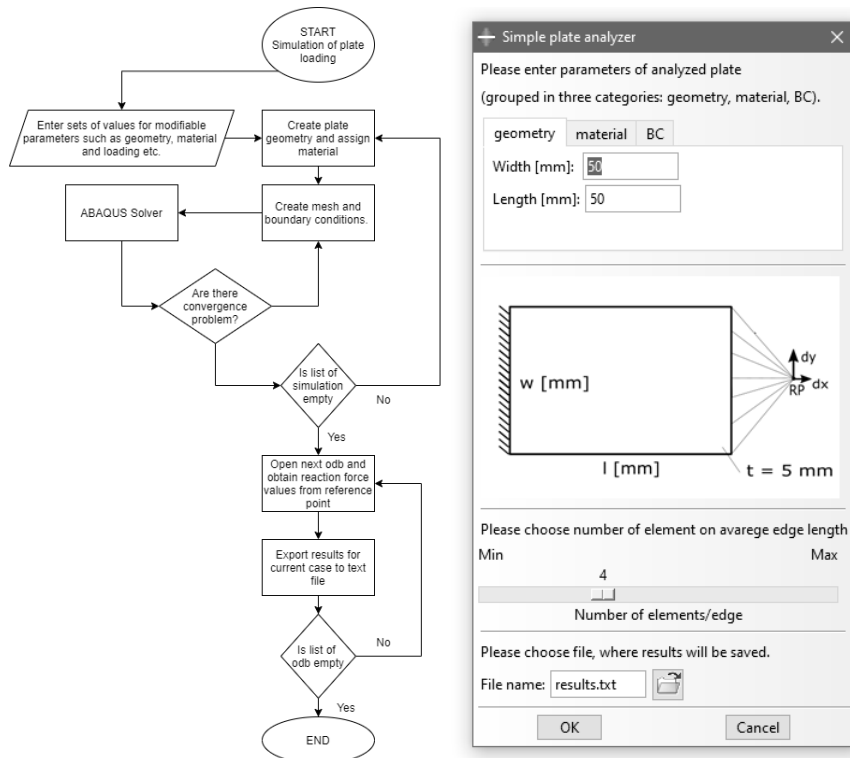
Rys. 2. Dyskretyzacja modelu płyty.



Rys. 3. Plug-in stworzony w ramach badań – dostęp poprzez graficzny interfejs użytkownika w środowisku Simulia Abaqus.

W celu stworzenia zbioru treningowego dla sieci neuronowej wykorzystano opisane powyżej skrypty i wygenerowano 20000 modeli numerycznych dla różnych zbiorów danych wejściowych, a następnie pozyskano wartości parametrów wyjściowych (sił reakcji) dla każdego z nich. Schemat algorytmu przedstawiono poniżej na (Rys.4).

Przeprowadzone działania w zakresie generowania danych pozwoliły zebrać je w postaci rekordów zapisanych w pliku txt. Zawiera on numeracje (pierwsza kolumna) a następnie kolejno parametry wejściowe i wyjściowe. Przykładowy plik dla problemu dwuwymiarowego przedstawiono poniżej na (Rys.5).



Rys. 4. Schemat algorytmu zastosowanego do wygenerowania danych treningowych (po lewej) i fragment graficznego interfejsu użytkownika plug-inu po prawej.

```

171 40 100 3 10 0 200000 0.3 1291335 161912
172 40 100 5 1 0 100000 0.3 939401 10141 0
173 40 100 5 1 0 200000 0.3 1878803 20282 0
174 40 100 5 3 0 100000 0.3 944161 30524 0
    
```

Rys. 5. Fragment surowego pliku z danymi uzyskanymi z przeprowadzonych symulacji.

W (Tab.2) przedstawiono statystyczny rozkład danych (parametry wejściowe i wyjściowe) dla przypadku dwuwymiarowego ($d_z = 0$). Warto zauważyć, że tak uzyskane dane mają bardzo zróżnicowany zakres zmienności poszczególnych parametrów, co jest niekorzystne przy użyciu sieci neuronowej. Wyniki osiągane w takich sytuacjach są dużo gorsze (Sola i Sevilla 1997). Dlatego przeprowadzono normalizację (to jest sprowadzenie do zakresu 0 – 1 poprzez użycie odpowiednich mnożników). Efekt tych działań jest przedstawiony w (Tab.3).

Tab. 3. Surowe dane otrzymane z modeli numerycznych w wyniku działania algorytmu.

	w	l	dx	dy	E	RF1	RF2
count	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000
mean	27.14	78.71	5.13	5.16	150044.9	1.21E+06	70163.30
std	14.50	14.88	3.12	3.13	50022.46	1.10E+06	81620.01
min	10	50	1	1	100000	4.96E+04	466
25%	10	70	3	3	100000	4.12E+05	15839
50%	20	80	5	5	200000	8.72E+05	40672
75%	40	90	7	7	200000	1.65E+06	93692
max	50	100	10	10	200000	6.09E+06	606964

Tab. 3. Dane po normalizacji.

	w	l	dx	dy	E	RF1	RF2
count	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000
mean	0.54	0.79	0.51	0.52	0.750225	1.99E-01	0.12
std	0.29	0.15	0.31	0.31	0.250112	1.80E-01	0.134473
min	0.2	0.5	0.1	0.1	0.5	8.14E-03	0.000768
25%	0.2	0.7	0.3	0.3	0.5	6.76E-02	0
50%	0.4	0.8	0.5	0.5	1	1.43E-01	0.067009
75%	0.8	0.9	0.7	0.7	1	2.71E-01	0.154362
max	1	1	1	1	1	1.00E+00	1

Dane po normalizacji zostały wykorzystane do zasilenia sieci neuronowej. Do budowy sieci wykorzystano framework Keras dostępny jako biblioteka do Pythona. Ze względu na spodziewany stosunkowo prosty związek między parametrami wejściowymi a wyjściowymi zdecydowano się na niewielką sieć z 5 warstwami – wejściową – 3 warstwami gęstymi i wyjściową. Warstwy miały kolejno 7, 200, 50, 10 i 2 neurony. Schemat sieci wraz z liczbą parametrów ukazano na (Rys.6).

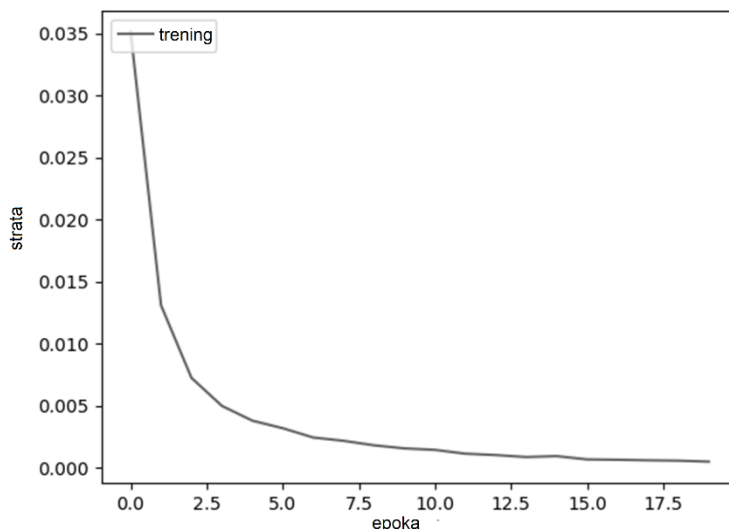
```

Model: "sequential"
Layer (type)                Output Shape                Param #
-----
dense (Dense)                (None, 200)                1400
dense_1 (Dense)              (None, 50)                 10050
dense_2 (Dense)              (None, 10)                 510
dense_3 (Dense)              (None, 2)                  22
-----
Total params: 11,982
Trainable params: 11,982
Non-trainable params: 0
    
```

Rys. 6. Schemat wykorzystanej sieci neuronowej.

3. Wyniki i dyskusja

Proces uczenia się sieci neuronowej obrazują wielkości (statystyki) w funkcji liczby epok nauki. Tutaj wykorzystano statystykę zwaną stratą (ang. loss). Przebieg takiej funkcji dla omawianej sieci ukazano na (Rys.7). Przebieg zmierzający do 0 wskazuje na udaną naukę sieci. Liczba epok została ograniczona do 20 tak aby uniknąć zjawiska zbytniego dopasowania sieci (ang. overfitting).



Rys. 7. Schemat wykorzystanej sieci neuronowej dla zbioru treningowego.

Zbiór danych wygenerowany z symulacji został podzielony na osobne podzbiory – tak aby uniknąć błędu dopasowania ze względu na uczenie się na danych, na których sprawdzana będzie dokładność sieci. Zbiór danych podzielono na zbiór danych uczących, zbiór danych do weryfikacji sieci podczas uczenia oraz zupełnie oddzielny zbiór testowy do ostatecznego wyniku sieci – zbiór którego nigdy sieć nie „widziała” podczas nauki. Jako miary błędu przyjęto pierwiastek błędu średniokwadratowego (ang. root mean squared error RMSE) oraz średni błąd całkowity (ang. main squared error – MAE). Wyniki dla tych miar przedstawiono w (Tab.4). Uzyskane w ten sposób wyniki należy oczywiście rozpatrywać w przedziale 0-1 tak jak znormalizowano dane. Żeby przełożyć je na początkowy zakres wartości należy je przemnożyć. Uzyskane rezultaty są bardzo dobre – zważywszy na fakt, że sama metoda generowania danych do zbioru testowego jest obciążona pewnym błędem. Uzyskane wyniki z natury nie mogą być bardziej dokładne niż dane wejściowe.

Tab. 3. Dokładność predykcji siecią neuronową.

Pierwiastek błędu średniokwadratowego - zbiór treningowy	0.00384
Pierwiastek błędu średniokwadratowego - zbiór testowy	0.00483
Średni błąd całkowity - zbiór testowy	0.00332

4. Wnioski

Przeprowadzone prace wskazują na to, że poprzez wykorzystanie języka programowania Python możliwe jest zautomatyzowanie wykonywania prostych symulacji numerycznych. Parametrami wejściowymi do takiej automatyzacji są późniejsze parametry wejściowe do sieci neuronowej. Podobnie z wynikami uzyskiwanymi w ten sposób. Dane muszą zostać poddane normalizacji i mogą posłużyć jako źródło zbioru uczącego sieć neuronową. Podejście to na ograniczoną skalę prowadzone przez innych badaczy zostało zastosowane z powodzeniem również w tej pracy. Zanalizowany z sukcesem prosty problem pozwala na rozszerzenie w przyszłości prezentowanego podejścia na bardziej złożone problemy badawcze. Naturalną przeszkodą jest tu czas generowania modeli numerycznych przy uwzględnieniu faktu, iż do złożonych zależności należy wykorzystać bardziej rozbudowane sieci. Należy zauważyć, że główny zysk z zastosowania omawianej metody leży w niemal natychmiastowej odpowiedzi na zadany zbiór danych wejściowych nawet jeżeli wymagało to wcześniej dużych nakładów. Dlatego prawdopodobne miejsca stosowania to monitoring konstrukcji w trybie rzeczywistym, budownictwo czy medycyna.

5. Literatura

- Kononenko O, Kononenko I (2018) Machine Learning and Finite Element Method for Physical Systems Modeling
- Ćojbašić Ž et al. (2014) A real time neural network based finite element analysis of shell structure. Facta Universitatis Series: Mechanical Engineering 12(2): 149-155
- Javadi AA, Tan TP, Zhang M (2003) Neural network for constitutive modelling in finite element analysis. Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences 10(4): 523–529.
- Golewski P, Gajewski J, Sadowski T (2017) Optimization of a thin-walled element geometry using a system integrating neural networks and finite element method, Arch. Metall. Mater 62(1): 435–442
- Sun W, Liang L, Liu M et al. (2018) A deep learning approach to estimate stress distribution: a fast and accurate surrogate of finite-element analysis 15(138): 20170844
- Gulikers THE (2018) ‘An Integrated Machine Learning and Finite Element Analysis Framework, applied to Composite Substructures including Damage’ Master Thesis
- Sola J, Sevilla J (1997) Importance of input data normalization for the application of neural networks to complex industrial problems. IEEE Transactions on Nuclear Science 44(3): 1464-1468

15. Wykorzystanie sieci neuronowych we wspomaganii analiz metodą elementów skończonych

Application of artificial neural network as a support to Finite Element Method

Smolnicki Michał

Katedra Mechaniki, Inżynierii Materiałowej i Biomechaniki, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska

Opiekun naukowy: dr hab. inż. Grzegorz Lesiuk

Smolnicki Michał: michal.smolnicki@pwr.edu.pl

Słowa kluczowe: uczenie maszynowe, Abaqus

Streszczenie

W niniejszym przeglądowym artykule przeanalizowano możliwość wykorzystania symulacji numerycznych metodą elementów skończonych do wytworzenia zbioru treningowego dla sztucznych sieci neuronowych a także wspomaganii analiz MES metodami uczenia maszynowego. Przedstawiono zarys metody elementów skończonych. Omówiono podstawy działania sieci neuronowych. Następnie dokonano przeglądu literatury w tym zakresie. Na koniec omówiono dalsze możliwości rozwoju w tym temacie ze wskazaniem dziedzin, w których może ona znaleźć szczególne zastosowanie. Przedstawiono również zalety i wady tej metody.

1. Wstęp

Jednym z trendów rozwojowych w naukach inżynierskich staje się wykorzystanie współczesnych zdobyczy informatyki – między innymi w zakresie uczenia maszynowego. Obserwuje się próby łączenia technik charakterystycznych dla jednych dziedzin nauki takich jak Metoda Elementów Skończonych powszechnie stosowana w Budownictwie czy Inżynierii Mechanicznej oraz sztucznych sieci neuronowych. Zagadnienie to jest jeszcze niedostatecznie zgłębione. Poprzez analizę literatury przedmiotu można wnioskować, że podejmowane są próby w tym zakresie, jednak jest jeszcze wiele kwestii, które można rozwinąć w celu poprawy skuteczności stosowanych technik. Niniejszy artykuł stara się uporządkować dotychczas opublikowane prace z tematu wspólnego wykorzystania sieci neuronowych i metody elementów skończonych oraz wskazać dalsze możliwości rozwoju.

2. Opis zagadnienia

Sieci neuronowe są pojęciem z dziedziny uczenia maszynowego i są coraz bardziej obecne w szerokim spektrum zagadnień z innych dyscyplin. Sztuczne neurony mają odzwierciedlać te naturalnie obecne w układzie nerwowym człowieka i zwierząt. Neurony to komórki nerwowe, które stanowią najmniejszą jednostkę funkcjonalną tego układu. Ich rolą jest przenoszenie sygnałów z części ciała zawierających receptory do bardziej centralnych elementów układu takich jak ośrodkowy układ nerwowy i obwodowy układ nerwowy. Podstawowe elementy budujące biologiczny neuron to dendryt odpowiadający za odbieranie sygnału trafiającego do neuronu, akson stanowiący element centralny neuronu oraz synapsa, która przekazuje odebrany przez neuron sygnał do kolejnej komórki. Dzięki takiej budowie możliwe jest przenoszenie informacji odebranych przez receptory i łączenie ich w większą całość, a finalnie interpretowanie. Prostota tej budowy jest godna podkreślenia przy możliwościach jakie osiągają ludzie w analizie i przetwarzaniu zbieranych informacji. Dlatego już od wielu lat rozwija się sztuczne sieci neuronowe konstruowane na podobieństwo naturalnych struktur. Pierwsza sieć neuronowa została utworzona przez McCullocha i Pitts'a już w roku 1943 (McCulloch i Pitts 1943). Główna zasada przyświecająca sztucznym sieciom neuronowym (*ang. artificial neural network*) to aproksymacja nieznanej funkcji ze zbioru parametrów wejściowych na zbiór danych wyjściowych przy użyciu zebranych informacji zwanych zbiorem uczącym albo treningowym (*ang. training dataset*). Sztuczne sieci neuronowe składają się

z warstw (*ang. layers*) zawierających neurony. Neurony te dostają informacje z poprzednich warstw (odpowiednik dendrytu), wykonują pewne operacje typu blok sumujący (analogicznie do jądra neuronu) oraz przekazują je dalej poprzez wyjście (odpowiednik synapsy). Taka struktura ma mniejsze możliwości niż jej biologiczne odpowiedniki, ale nadal pozwala rozwiązywać wiele skomplikowanych problemów. Wartości przekazywane do pojedynczego neuronu są mnożone przez tak zwane wagi (*ang. weights*). Następnie blok sumujący łączy wartości uzyskane z wielu neuronów poprzedniej warstwy i przekazuje je do funkcji aktywacji. Rolą funkcji aktywacji jest zapewnienie nieliniowości sieci neuronowej. Jej nieobecność spowodowałaby, że całe działanie sieci neuronowej można by sprowadzić do pewnej kombinacji liniowej wielu zmiennych (parametrów wejściowych) co znacząco obniżyłoby jej potencjał. Podsumowując przedstawione powyżej informacje – matematycznie działanie pojedynczego neuronu sztucznej sieci neuronowej można zapisać równaniem:

$$y = f\left(\sum_{i=0}^k x_i w_i + b\right)$$

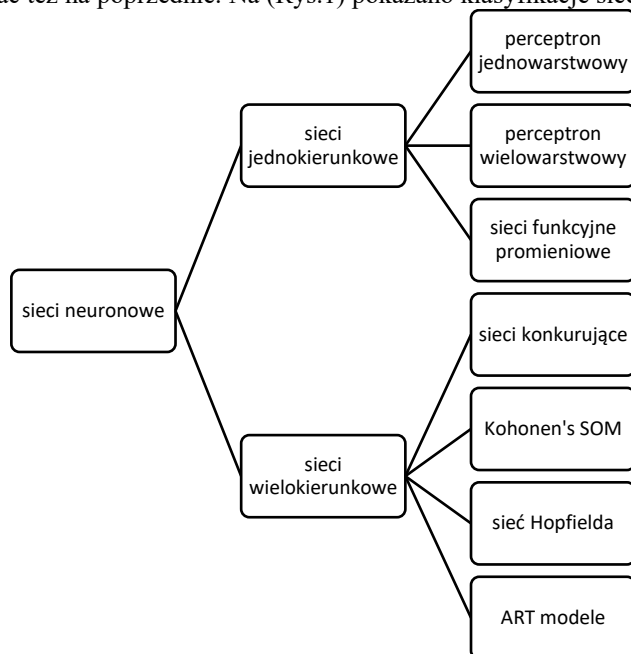
gdzie b oznacza bias (czasami tłumaczony jako próg – jednak zazwyczaj używa się odmiennego spolszczenia właśnie w formie bias), y – wartość wyjściowa, f – funkcja aktywacji, k – liczba danych wejściowych do neuronu, x_i – wartość i -tego parametru wejściowego, w_i – wartość i -tej wagi.

Jak podkreślono powyżej, funkcja aktywacji pełni niezwykle istotną rolę w działaniu sieci neuronowej. Jej wybór wpływa na jej funkcjonowanie. Poniżej zestawiono najczęściej wykorzystywane funkcje aktywacji wraz z ich wadami i zaletami:

- Sigmoidalna albo logistyczna - $f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}$ (Karlik i Olgac 2010)
 - Zalety – płynny, gładki przebieg gradientu, wartości wyjściowe z zakresu od 0 do 1 (po normalizacji), dobra jakość uzyskanych wyników.
 - Wady – zanikający gradient (to znaczy małe różnice w wartościach wyjściowych przy dużych wartościach parametrów wejściowych – może spowodować niewykrzycie pewnych cech), średnia wartość jest niezerowa (wynosi 0.5). Dodatkowo ta funkcja jest dość kosztowna z punktu widzenia liczby operacji do wykonania przez jednostkę arytmetyczno-logiczną procesora.
- Tangens hiperboliczny (TanH) - $f(x) = \frac{1-e^{-2x}}{1+e^{-2x}}$ (Karlik i Olgac 2010)
 - Zalety – średnia wartość jest zerowa, gradient jest gładki, płynny. Wartości uzyskiwane na wyjściu po znormalizowaniu są z przedziału od 0 do 1, również uzyskiwane wyniki są dobrej jakości.
 - Wady – zanikający gradient (to znaczy małe różnice w wartościach wyjściowych przy dużych wartościach parametrów wejściowych – może spowodować niewykrzycie pewnych cech). Dodatkowo ta funkcja jest dość kosztowna z punktu widzenia liczby operacji do wykonania przez jednostkę arytmetyczno-logiczną procesora.
- Prostownik linowy (*ang. Rectified Linear Unit*) ReLu - $f(x) = \max(0, x)$ (Karlik i Olgac 2010)
 - Zalety – mała kosztowność obliczeniowa, przyczynia się do lepszej zbieżności sieci neuronowej, jest funkcją nieliniową chociaż wygląda do nich podobnie
 - Wady – zjawisko określane mianem problemu ginących neuronów – dla negatywnych wartości podawanych do funkcji gradient ma wartość 0 wobec czego wszelkie informacje z takich neuronów są tracone.
- Leaky ReLu - $f(x) = \max(0.1x, x)$ – podobna do standardowego prostownika liniowego, ale różniąc się tym, że dla negatywnych wartości gradient jest niezerowy, a bazowany na funkcji liniowej o małym nachyleniu. Pozwala to zapobiec problemowi ginących neuronów. Nie jest to jednak rozwiązanie idealne – w dalszym ciągu takie neurony mają mniejszy udział w procesie uczenia się sieci. (Clevert i in. 2015)
- Parametric ReLu - $f(x) = \max(kx, x)$ podobna do prostownika liniowego, ale nachylenie funkcji w obszarze argumentów ujemnych jest kolejnym parametrem do wyuczenia się sieci (hiperparametrem). (Clevert i in. 2015)

- *SoftMax* – funkcja aktywacji często wykorzystywana w problemach klasyfikacji wielozbiorowej tak, aby suma wyjściowych neuronów z sieci była równa 1. Zazwyczaj stosowana tylko na ostatniej warstwie.
- Swish - $f(x) = \frac{x}{1+e^{-x}}$ – podobna do prostownika liniowego w kwestii zapotrzebowania na czas obliczeniowy, ale zazwyczaj daje od niej lepsze rezultaty. (Ramachandran i in. 2017)

Sieci neuronowe mogą być konstruowane na wiele różnych sposobów zarówno jeżeli chodzi o strukturę, użyte neurony, funkcje aktywacji, sposób uczenia etc. W sieciach jednokierunkowych (ang. *feed-forward*) dane przekazywane są tylko w jednym kierunku. Inaczej sprawa się ma w sieciach wielokierunkowych (ang. *feed-back*) zwanych też rekurencyjnymi, gdzie dane z kolejnych warstw mogą wpływać też na poprzednie. Na (Rys.1) pokazano klasyfikacje sieci neuronowych.

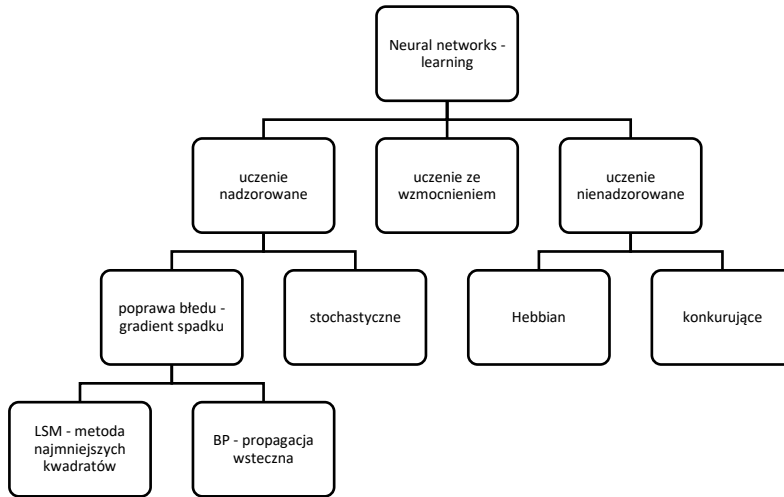


Rys. 1. Klasyfikacja sieci neuronowych.

Innym istotnym zagadnieniem jest sposób uczenia. Uczenie sieci neuronowych jest procesem znajdowania najlepszego zbioru wag, bazując na zbiorze treningowym dla którego błąd uzyskany dla niezależnych danych jest jak najmniejszy. Takie uczenie może być przeprowadzane na różne sposoby:

- Uczenie z nadzorem (ang. *supervised learning*), zwane też uczeniem z nauczycielem – tego typu uczenie opiera się na tym, że nadzorca dla każdego zestawu danych wejściowych zna poprawną wartość wyjścia. Dzięki temu po każdym kroku treningu nadzorca przekazuje informacje do sieci o błędzie pomiędzy jej wynikiem a wynikiem prawidłowym. Bazując na tych informacjach zmieniają się wagi sieci neuronowej w taki sposób, aby w przyszłości zmniejszyć błąd (wykorzystując np. gradient stochastyczny). Ten proces jest powtarzany aż do momentu, w którym zmiana wag nie przynosi już korzyści w postaci zwiększenia dokładności sieci. De facto w uczeniu z nadzorem wiedza nadzorcy jest przekazywana do sieci neuronowej i przechowywana w postaci tablicy wag.
- Uczenie ze wzmocnieniem (ang. *reinforcement learning*) – stanowi właściwie podtyp uczenia z nadzorem. Charakterystyczną cechą jest to, że nadzorca informuje tylko o tym, czy zmiana waga z poprzedniego kroku przyniosła efekt pozytywny czy negatywny. Nigdy nie podaje sieci dokładnej różnicy między uzyskaną wartością a pożądaną.

- **Uczenie bez nadzoru** – charakterystyczne dla problemów, w których nie jest wymagany żaden ustalony zbiór danych treningowych. Podczas uczenia sieć zdobywa wiedzę samodzielnie. Takie podejście pozwala sieci wykrywać zależności (*ang. patterns*) w danych dostarczanych do sieci. Sieć uczy się reagować na te zależności – konkretny typ danych wejściowych. Tego typu sieci używa się w wykrywaniu fałszerstw, rozpoznawaniu obrazu i innych. Wadą takiego uczenia się jest jego tempo (wolne) i zachłanność na dane. Poniżej na (Rys.2) przedstawiono podział sieci ze względu na typ uczenia.



Rys. 2. Klasyfikacja sieci neuronowych

Metoda elementów skończonych (*ang. Finite Element Method, FEM*) jest jedną z kluczowych technik stosowanych do projektowania wspomaganego komputerowo (*ang. computer aided engineering, CAD*). Oparta jest ona o podział obiektu na małe podprzestrzenie zwane elementami skończonymi, a następnie rozwiązywanie równań różniczkowych opisujących stan obiektu tylko w specjalnie wybranych punktach będącymi wierzchołkami elementów nazywanych węzłami. W pozostałych punktach modelu wyniki uzyskuje się poprzez interpolację przy użyciu funkcji kształtu. Elementy skończone mogą różnić się przestrzennością, liczbą wierzchołków, rzędem, funkcjami kształtu etc. Pierwszy raz podzielenie obiektu na elementy skończone zaproponował Kirsch, a samego terminu użyto w pracy Turnera i Clougha (Turner i in. 1956). Praktyczna realizacja była możliwa po zwiększeniu możliwości obliczeniowych poprzez użycie wydajnych komputerów. Ojcowie współczesnej metody to Zienkiewicz i Przemieniecki, którzy rozwiązywali problemy z matematycznym sformułowaniem metody (Zienkiewicz i Taylor 1981).

Metoda elementów skończonych jest stosowana przede wszystkim w zagadnieniach wytrzymałościowych, termicznych, magnetycznych i mechaniki płynów. W mechanice metoda jest oparta o równanie statyki:

$$[K]\{u\} = [F]$$

K – macierz sztywności, u – wektor kolumnowy przemieszczeń, F – macierz sił; albo o równanie dynamiki:

$$[M]\{u''\} + [C]\{u'\} + [K]\{u\} = [F]$$

M – macierz bezwładności, u'' – kolumnowy wektor przyspieszeń, C – macierz tłumienia, u' – kolumnowy wektor prędkości, K – macierz sztywności, u – kolumnowy wektor przemieszczeń, F – macierz obciążeń.

Równania te opisują zależność między warunkami brzegowymi a zachowaniem obiektu. Typowe wykorzystanie metody elementów skończonych składa się z kilku kroków prowadzących do

powstania modelu numerycznego. Kroki te obejmują modelowanie, nadawanie własności materiałowych poszczególnym sekcjom, opisywanie złożenia, dyskretyzację (podział na elementy skończone) oraz nadawanie warunków brzegowych (siły i utwierdzenia).

Metoda elementów skończonych wymaga zastosowania pewnych uproszczeń (choćby przy modelowaniu), dlatego nie jest metodą dokładną, a jedynie przybliżoną, jednak jej dokładność jest wystarczająca dla większości zastosowań. Do głównych wad metody należą pracochłonność w przygotowywaniu modelu numerycznego, zwłaszcza dla bardziej wymagających obiektów lub sposobów obciążenia. Dla dużych modeli zawierających setki tysięcy elementów skończonych albo skomplikowane zagadnienia kontaktowe i pęknięcia również czas obliczeń w silniku numerycznym może być znaczący.

3. Przegląd literatury

Przeprowadzony przez autora przegląd literatury wskazuje, że wykorzystanie uczenia maszynowego w oparciu o metodę elementów skończonych jest względnie nowym zagadnieniem, jeszcze niedostatecznie zbadanym. W tym rozdziale zostaną przedstawione prace wykorzystujące taki mariaż stosowanych technik z uwzględnieniem wad i zalet oraz rokowań dalszego rozwoju w przyszłości.

Autorzy pracy *Machine Learning and Finite Element Method for Physical Systems Modeling* – Kononenko i Kononenko prezentują dwa proste problemy rozwiązane przy użyciu uczenia maszynowego sieci neuronowej na bazie zbioru wiedzy uzyskanego przy użyciu metody elementów skończonych (Kononenko i Kononenko 2018). Pierwszy zaprezentowany przez nich przykład dotyczy jednowymiarowego oscylatora harmonicznego. Dla różnych wartości częstotliwości kołowej między 0 a 10 Hz wyznaczali oni amplitudę drgań korzystając z metody elementów skończonych. Następnie wykorzystali zbiór wartości częstotliwość – amplitudę, żeby wyuczyć sieć neuronową złożoną z dwóch ukrytych warstw (*ang. hidden layers*). Taka sieć neuronowa jest zdolna przewidywać amplitudy dla zadanej częstotliwości właściwie bezbłędnie. Drugi przykład pokazany przez autorów pracy dotyczył obciążania siłą harmoniczną jednostronnie utwierdzonej belki. Belka wykonana ze stali była obciążana z częstotliwością dochodzącą do 200 Hz. Parametrami wyjściowymi były przemieszczenia belki, parametrem wejściowym częstotliwość. Sieć neuronowa składała się z dwóch warstw ukrytych o 200 neuronach. Do optymalizacji wykorzystano algorytm Adam. Autorzy pracy podkreślili, że przykłady przez nich pokazane są proste (wręcz do wyznaczenia w sposób analityczny), ale pokazują możliwość zastosowania techniki do bardziej złożonych problemów inżynierskich.

Praca autorstwa Cójbaśi i Nikolić zatytułowana „A real time neural network based finite element analysis of shell structure” skupia się na aplikacji omawianej techniki do problemu monitorowania powłok w czasie rzeczywistym (Cójbaśi i Nikolić 2014). Autorzy podkreślają, że w pewnym zastosowaniu metoda elementów skończonych nie jest wystarczająco szybka, zwłaszcza w zagadnieniach rozpatrywanych właśnie w czasie rzeczywistym. Jednakże, poprzez wprowadzenie do użycia sztucznych sieci neuronowych wyuczonych na wcześniejszych modelach, możliwe jest znaczne skrócenie czasu od wprowadzenia parametrów wejściowych do uzyskania wyjścia. Autorzy zaprezentowali w praktyce takie podejście na łukach – wycinkach walca – modelowanych jako powłoki (*ang. shell*). Model zastosowany przez autorów posiada prostą siatkę elementów skończonych (model dyskretny). Zastosowana sieć neuronowa ma 2 parametry wejściowe, 1 ukrytą warstwę z 10 neuronami oraz 3 parametry wyjściowe. Ze względu na prostotę modelu uzyskane wyniki są w świetnej zgodności z wynikami z metody elementów skończonych – autorzy podają różnicę na poziomie 0,00001%. Należy jednak pamiętać, że jest to jedynie błąd sieci neuronowej względem zbioru wiedzy. Natomiast sama metoda elementów skończonych jest obciążona swoim własnym błędem. Autorzy również podkreślają dalsze możliwości rozwoju takiego podejścia.

W pracy „Neural network for constitutive modelling in finite element analysis” zaprezentowano nieco inne podejście do wykorzystania sieci neuronowych w analizach z użyciem metody elementów skończonych. Jednym z istotnych elementów analiz MES jest tak zwana definicja modelu materiału – równań konstytutywnych wiążących ze sobą naprężenia, odkształcenia i ewentualnie inne wielkości takie jak prędkość odkształcania. Dla prostych materiałów takich jak stal

często nawet dwuparametryczny model zawierający dane o Module Younga i współczynniku Poissona może być wystarczający, dla innych materiałów modele te mogą być dużo bardziej złożone. Autorzy pokazali użycie sieci neuronowych do określenia modelu konstytutywnego gleby. Sieć neuronowa została zaimplementowana do procesu analiz wytrzymałościowych z sukcesem.

Kolejna praca zatytułowana "Optimization of a thin-walled element geometry using a system integrating neural networks and finite element method" (Golewski i in. 2017) skupia się na wykorzystaniu sztucznych sieci neuronowych do optymalizacji podczas procesu projektowania wspomaganego komputerowo. Optymalizacja często jest dostępna jako dodatkowy moduł w komercyjnych programach do Metody Elementów Skończonych takich jak Abaqus czy Ansys, ale zazwyczaj jest ona bardzo czasochłonna i kosztowna, zwłaszcza, jeżeli chcielibyśmy optymalizować ze względu na cały zbiór parametrów. Ma też ona ograniczenia wynikające z implementacji do tych środowisk. Tego typu optymalizację można realizować także poprzez optymalizację topologiczną czy algorytmy genetyczne. Autorzy proponują kolejną możliwość w postaci sieci neuronowych. Wykorzystując je, autorzy byli w stanie określić jakie są najbardziej istotne zmienne (jakie zaś mało istotne) i jak dobrać ich wartości.

Tom Guilkers z Technische Universitat w Delft obronił pracę zatytułowaną "An Integrated Machine Learning and Finite Element Analysis Framework, Applied to Composite Substructures including Damage". W tej dysertacji zaprezentował wykorzystanie sieci neuronowych do definiowania modelu konstytutywnego materiału. Co warto podkreślić, autor wykorzystał tę metodę do symulacji zniszczenia w materiałach kompozytowych, co jest problemem dużej wagi. Autor zauważa, że częstym sposobem radzenia sobie z dużymi konstrukcjami jest podział na mniejsze części zwane *substructures*. Jednakże to podejście jest problematyczne ze względu na fakt, że nawet mała zmiana w warunkach brzegowych modelu pociąga za sobą konieczność ponownego przeliczenia wszystkich *substructures*. Może to prowadzić do ogromnego zapotrzebowania na czas przy analizach wytrzymałościowych. Wykorzystując sztuczne sieci neuronowe można skrócić ten czas. Autor zaprezentował wykorzystanie swojej implementacji do analizy płyty z owalną szczeliną oraz z wykorzystaniem modelu Hashina zniszczeń w kompozycie. Użyta sieć neuronowa posiadała dwie ukryte warstwy z odpowiednio 40 i 60 neuronami. Ważnym spostrzeżeniem jest to, że najlepsze rezultaty osiągnięto, gdy parametry wejściowe zawierały informacje o obecnym i poprzednim stanie naprężeń, podobnie jak przyrost odkształceń, natomiast parametry wyjściowe tylko przyrost odkształceń.

Praca autorstwa Sun i in. (Sun i in. 2018) skupia się na zastosowaniu opisywanego podejścia w medycynie. Zespół autorów zajmował się leczeniem aorty. W trakcie leczenia wykonywano skan trójwymiarowy aorty, następnie wykonywano model numeryczny metodą elementów skończonych, a na tej podstawie podejmowano dalsze decyzje. Podejście to, chociaż skuteczne, ma poważną wadę, albowiem wykonanie modelu MES wymaga wykwalifikowanego pracownika oraz czasu ze względu na fakt, iż każdy pacjent posiada inną aortę. Autorzy wykorzystali fakt posiadania dość dużego zbioru gotowych zestawów – skan – wynik analizy wytrzymałościowej do stworzenia i wytrenowania sztucznej sieci neuronowej. Cały proces obejmuje skan, który następnie z trzech wymiarów jest sporządzany do dwóch poprzez ściśle zdefiniowany algorytm (odwracalny). Aorta jest dzielona na 25 podregionów, a dla każdego z nich stworzona jest sieć neuronowa. Każdy region składa się z 500 komórek dla których wyznaczane jest naprężenie. Autorzy wykorzystywali 256 neuronów na warstwę sieci neuronowej. Autorzy podkreślają że takie podejście może być zastosowane w licznych problemach klinicznych.

4. Podsumowanie

Zarówno sieci neuronowe jak i metoda elementów skończonych stanowią kluczowe techniki w swoim zakresie zastosowań. Prowadzi to do naturalnych pytań czy można skorzystać z zalet obu tych podejść i wykorzystać je razem w celu rozwiązywania problemów inżynierskich czy medycznych. Przeprowadzony przegląd literatury pokazuje, że może nie być to proste zadanie, które obarczone jest przede wszystkim problemem wygenerowania dostatecznej ilości danych dla zasilenia sieci neuronowej. Jednak znalezione prace pokazują, że takie podejście może być skuteczne na różnych polach - od mechaniki maszyn poprzez konstrukcję po medycynę. Poprawnie zastosowane

może przynieść znaczne korzyści w sytuacjach, w których czas przeprowadzenia analizy jest kluczowy. Dobrym przykładem są tu aplikacje w medycynie podczas operacji albo wykorzystanie takiego mariażu do monitorowania maszyn czy konstrukcji w czasie rzeczywistym. Niewielka liczba prac w analizowanym zagadnieniu wskazuje na duże możliwości dalszego rozwoju i usprawnienia stosowanych do tej pory podejść.

5. Literatura

- McCulloch WS, Pitts W (1943) A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity', *Bull. Math. Biophys* 5: 115-133
- Turner MJ, Clough RW, Martin HC et. al (1956) Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures. *J. Aeronaut. Sci.*
- Zienkiewicz, Taylor (1981) *Finite Element Method - The Basis (Volume 1)*', *Acad. Eng. Polish Acad. Sci. Chinese Acad. Sci. Natl. Acad. Sci. Italy*
- Kononenko O, Kononenko I (2018) *Machine Learning and Finite Element Method for Physical Systems Modeling*
- Karlik B, Olgac A (2010) Performance analysis of various activation functions in generalized MLP architectures of neural networks. *Int. J. Artif. Intell. Expert Syst* 1(4): 111-122
- Clevert DA, Unterthinter T, Hochreiter S (2015) Fast and Accurate Deep Network Learning by Exponential Linear Units (ELUs). *4th Int. Conf. Learn. Represent. ICLR 2016 - Conf. Track Proc*
- Ramachandran P, Zoph B, Le QV (2017) Searching for Activation Functions', *6th Int. Conf. Learn. Represent. ICLR 2018 - Work. Track Proc*
- Ćojbašić Ž et al. (2014) A real time neural network based finite element analysis of shell structure. *Facta Universitatis Series: Mechanical Engineering* 12(2): 149-155
- Javadi AA, Tan TP, Zhang M (2003) Neural network for constitutive modelling in finite element analysis. *Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences* 10(4): 523–529.
- Golewski P, Gajewski J, Sadowski T (2017) Optimization of a thin-walled element geometry using a system integrating neural networks and finite element method, *Arch. Metall. Mater* 62(1): 435–442
- Sun W, Liang L, Liu M et al. (2018) A deep learning approach to estimate stress distribution: a fast and accurate surrogate of finite-element analysis *15(138): 20170844*
- Gulikers THE (2018) 'An Integrated Machine Learning and Finite Element Analysis Framework, applied to Composite Substructures including Damage' Master Thesis
- Sola J, Sevilla J (1997) Importance of input data normalization for the application of neural networks to complex industrial problems. *IEEE Transactions on Nuclear Science* 44(3): 1464-1468

16. Systemy informatyczne w systemie ochrony zdrowia

Information Technology and Systems in the health care system

Katarzyna Tomaszewicz, Anna Grajewska, Karolina Borkowska, Adrian Świąćki,
Agnieszka Polecka, Edyta Rysiak, Izabela Prokop

Zakład Chemii Leków, Wydział Farmaceutyczny z Oddziałem Medycyny Laboratoryjnej,
Uniwersytet Medyczny w Białymstoku
Opiekun naukowy: dr hab. Edyta Rysiak

Katarzyna Tomaszewicz: tomaszewiczkataryzna@gmail.com

Słowa kluczowe: Elektroniczna Dokumentacja Medyczna, dane i informacje medyczne, Technologie Informacyjno-Komunikacyjne

Streszczenie

Systemy informatyczne wykorzystywane w systemie ochrony zdrowia muszą mierzyć się z wieloma trudnościami jakie narzuca ustawodawca, z brakiem zaufania społecznego i z ogromną odpowiedzialnością.

Celem artykułu jest przedstawienie wybranych aspektów i trudności z jakimi zmagają się system ochrony zdrowia w celu zapewnienia wysokiej jakości usług medycznych świadczonych przy wykorzystaniu technologii informacyjno-komunikacyjnych.

Problemy związane z systemami teleinformatycznymi wykorzystywanymi w systemie ochrony zdrowia można rozpatrywać bardzo szeroko, jednak ze względu na obszerny zakres zagadnienia, temat ten nie mógł być w pełni podjęty na łamach niniejszego artykułu, a możliwe było jedynie przyjrzenie się w jak sposób niektóre z tych problemów zostały opisane przez poszczególnych badaczy. Podkreślono zagrożenia związane z kwestią ochrony danych medycznych. Przedstawiono stan informatyzacji ochrony zdrowia w Polsce w momencie wprowadzenia obowiązku prowadzenia elektronicznej dokumentacji medycznej. Poruszone zostały kwestie problematyczne związane z integracją systemów, agregacją danych medycznych przetwarzanych oraz przesyłanych przez systemy teleinformatyczne wykorzystywane w systemie ochrony zdrowia, a także założenia, na których opierało się wprowadzenie jednolitych zasad zbierania i gromadzenia danych o zdarzeniach medycznych. Przedstawiono najważniejsze elementy odpowiedzialne za prawidłowe działanie systemów informatycznych wykorzystywanych w systemie zdrowia, scharakteryzowano elementy w tzw. ochronie zdrowia oraz przytoczono podstawowe zagadnienia stosowane w odniesieniu do aspektów prawnych.

1. Wstęp

Wysoka jakość usług ochrony zdrowia jest jednym z najważniejszych oczekiwań współczesnego społeczeństwa, a działania związane z ochroną zdrowia są uważane przez obywateli Unii Europejskiej za kwestię kluczową oraz wymagającą szczególnej uwagi. Jednocześnie, w opinii obywateli UE, wskazuje się, że ochrona zdrowia stanowi jeden z kluczowych problemów i wyzwań większości państw, tym samym uznając je za zagadnienia wymagające większej uwagi i troski niż kwestie związane np. z podatkami, mieszkalnictwem czy edukacją. Oczywiście jest zatem, iż placówki ochrony zdrowia muszą stale rozwijać zakres i dostępność świadczonych przez siebie usług, a także podnosić ich jakość. Niezwykle ważnym wyzwaniem, które nadal stoi przed system ochrony zdrowia w Polsce jest wdrożenie zmian przesuwających środek ciężkości w kierunku pacjenta, jednocześnie zdejmując go częściowo z lekarza. O randze ochrony zdrowia w Unii Europejskiej świadczy także fakt, iż ochrona zdrowia znalazła się w Karcie Praw Podstawowych Unii Europejskiej (Frączkowski 2010).

2. Opis zagadnienia

Rosnące zapotrzebowanie społeczeństwa na wysokiej jakości usługi medyczne wiąże się z kilkoma ważnymi aspektami ochrony zdrowia wśród, których do najważniejszych zaliczyć należy:

dostępność, ciągłość, usamodzielnienie oraz bezpieczeństwo pacjentów. Wszystkie wymienione aspekty należy traktować jako cele, które stawia się do realizacji poprzez nowoczesne technologie informatyczne, wykorzystywane w systemie ochrony zdrowia. Do najważniejszych z nich należy zaliczyć: elektroniczną kartotekę medyczną, elektroniczną historię choroby, elektroniczną rezerwację wizyt, skomputeryzowane wprowadzanie zleceń medycznych, elektroniczny transfer recept, system archiwizacji i przechowywania obrazów, indywidualny zapis choroby i stanu zdrowia, portale pacjentów, telemedycynę, analitykę biznesową – BI (Business Intelligence) – wykrywanie zakażeń szpitalnych w czasie rzeczywistym, identyfikację radiową i kodowanie kreskowe. Za sprawą kształtowania się tzw. społeczeństwa informacyjnego (społeczeństwa wysokorozwiniętego) rola i znaczenie rozwiązań informatyczny rosła i ewoluowała w bardzo szybkim tempie na przestrzeni ostatnich lat. Społeczeństwo wysokorozwinięte wymagało zapewnienia pełnego dostępu do usług i informacji medycznych przy użyciu technologii informacyjno-komunikacyjnych (ICT). W wyniku rozwoju technologicznego, dynamicznego rozwoju Internetu, urządzeń mobilnych oraz sieci przesyłania danych, systemy informatyczne wykorzystywane w systemie ochrony zdrowia stały się technologiami ICT (Frączkowski 2010).

Celem artykułu jest przedstawienie wybranych aspektów i trudności z jakimi zmagają się system ochrony zdrowia w celu zapewnienia wysokiej jakości usług medycznych świadczonych przy wykorzystaniu technologii informacyjno-komunikacyjnych.

3. Przegląd literatury

Wprowadzone oraz wykorzystywane w ochronie zdrowia systemy informatyczne, aplikacje oraz infrastruktura stawały się bazą do udostępniania innowacyjnych usług, a usługi te zaczęły zmieniać modele systemów ochrony zdrowia, tak aby były one dostosowane jak najbardziej do oczekiwań i potrzeb coraz bardziej wymagających pacjentów. Ważnym wyzwaniem, jakie stanęło przed systemem ochrony zdrowia, stało się zapewnienie rozwiązań, które będą mogły zapewnić integrację oraz agregację danych pozyskiwanych z wielu źródeł, w tym wykorzystywanych technologii informatycznych. Jednym z istotniejszych przedsięwzięć, w kierunku zaspakajania oczekiwań i potrzeb pacjentów, a co za tym idzie, podnoszenia jakości usług medycznych w Polsce, było wdrożenie Elektronicznej Platformy Gromadzenia Analizy i Udostępniania Zasobów Cyfrowych o Zdarzeniach Medycznych. Pozwoliło to na realizację wielu projektów, dzięki którym możliwe stało się stworzenie odpowiednich warunków usługodawcom działającym na rynku ochrony zdrowia w Polsce oraz podniosło stopień dostępności do usług medycznych (Frączkowski 2010). Jednym z najważniejszych założeń, na którym opierało się to wyzwanie, było wprowadzenie jednolitych zasad zbierania i gromadzenia danych o zdarzeniach medycznych. Miało to na celu również zapewnienie bieżącego monitorowania oraz szybkiej reakcji na pojawiające się zagrożenia typu epidemiologicznego, a co za tym idzie stworzenie szansy podjęcia właściwych środków zaradczych w odpowiednim momencie. Dzięki temu rozwiązaniu, a także takim usługom jak: możliwość rejestracji wizyty online, dostępu do historii choroby zapisanej w systemie informatycznym czy gromadzeniu informacji o zwolnieniach lekarskich, skierowaniach do specjalistów, wykonanych badaniach czy zabiegach, jakość usług medycznych została wprowadzona na zupełnie nowy poziom. Niezwykłej transformacji dzięki temu uległa także świadomość pacjenta na temat zdrowia oraz zapewnianej mu opieki zdrowotnej (Michalak 2013). Otworzyło to wiele nowych możliwości oraz podniosło jakość oraz efektywność systemu ochrony zdrowia, jednak stworzyło także wiele zagrożeń i niebezpieczeństw, spośród których jednym z istotniejszych jest ryzyko niepożądanego ujawnienia informacji i danych medycznych zbieranych w Elektronicznej Dokumentacji Medycznej, przesyłanej i przetwarzanej przez systemy informatyczne. Dlatego tak niezwykle istotne są regulacje prawne w tym zakresie oraz bezpieczne – chroniące dane medyczne pacjentów rozwiązania oferowane przez technologie informatyczne wykorzystywane w systemie ochrony zdrowia.

W celu dokładnego zrozumienia omawianych problemów związanych z systemami informatycznymi istotne jest przyjrzenie się definicjom najważniejszych pojęć, tj. „system”, „system teleinformatyczny”, „ochrona zdrowia”, „technologie informacyjno-komunikacyjne” czy

„cyberprzestrzeń”, stosowanych w odniesieniu do aspektów prawnych (Kwiatkowska i Skórzewska - Amberg 2017).

System – jak podaje Encyklopedia PWN, jest to zespół wzajemnie sprzężonych elementów, spełniający określoną funkcję i traktowany jako wyodrębniony z otoczenia w określonym celu, np. opisowym, badawczym czy do innego zastosowania, jak np. System w rozumieniu procesu technologicznego.

System teleinformatyczny – jak podaje art. 3 ust. 3 ustawy z dnia 17 lutego 2005 r. o informatyzacji działalności podmiotów realizujących zadania publiczne (t.j. Dz.U. 2017, poz. 570) oraz art. 2 ust. 3 ustawy z dnia 18 lipca 2002 r. o świadczeniu usług drogą elektroniczną (t.j. Dz.U. 2017, poz. 1219) jest to zespół urządzeń i oprogramowania współdziałających w celu przetwarzania obejmującego przechowywanie, wysyłanie i odbieranie danych.

Ochrona zdrowia – pod tym pojęciem należy rozumieć politykę społeczną oraz wszelką społeczną działalność, której celem jest zapobieganie chorobom i ich leczenie, utrzymanie rozwoju psychicznego, fizycznego i społecznego człowieka, przedłużanie życia, zapewnienie zdrowego rozwoju następnym pokoleniom (Kwiatkowska i Skórzewska - Amberg 2017). Istotne jest, iż w tzw. ochronie zdrowia można wyróżnić następujące elementy:

- opiekę zdrowotną, czyli medycynę leczniczą,
- ochronę zdrowia, czyli wszelkie działania na rzecz zdrowia publicznego realizowane przez różne sektory życia społeczno-gospodarczego,
- struktury zarządzania opieką zdrowotną i ochroną zdrowia,
- źródła i drogi finansowania całokształtu działań na rzecz zdrowia (Michalak 2013).

To właśnie dla prawidłowego funkcjonowania tych elementów niezwykle ważne są wspomniane uwarunkowania prawne, które w istotny sposób, określają ramy działania i możliwości systemów informatycznych wykorzystywanych na potrzeby systemu ochrony zdrowia.

Technologie Informacyjno-Komunikacyjne (ICT) - jak podaje Słownik Pojęć Strategii Rozwoju Transportu (Słownik Pojęć Strategii Rozwoju Transportu do 2020 roku (z perspektywą do 2030 roku), pod tym pojęciem należy rozumieć szeroko rozpatrywane media, służące komunikacji tj.: Internet, przewodowe oraz bezprzewodowe sieci, telefonię, technologie przesyłu dźwięku i obrazu, a także radio, telewizję itp. Zaliczamy tu również narzędzia umożliwiające zapis informacji czyli wszelkiego rodzaju nośniki, pamięci przenośne, dyski CD/DVD, dyski twarde. Pojęcie ICT obejmuje także, sprzęt służący przetwarzaniu informacji czyli komputery, serwery, sieci komputerowe wraz z oprogramowaniem.

Cyberprzestrzeń – pod tym pojęciem kryje się przestrzeń, w której ma miejsce wspomniane przesyłanie danych między zdefiniowanymi powyżej systemami teleinformatycznymi (Maurer 2011). Prawną definicję cyberprzestrzeni odnaleźć można w art. 1b ustawy z dnia 29 sierpnia 2002 r. o stanie wojennym oraz o kompetencjach Naczelnego Dowódcy Sił Zbrojnych i zasadach jego podległości konstytucyjnym organom Rzeczypospolitej Polskiej (t.j. Dz.U. 2016, poz. 851 ze zm.), która do powyższego pojęcia dodaje także ważny aspekt przesyłania oraz przetwarzania i wymiany informacji w kontekście tworzenia relacji z użytkownikami (Kwiatkowska i Skórzewska - Amberg 2017).

W odniesieniu do powyższych pojęć, rozpatrując kontekst prawny, należy zwrócić szczególną uwagę na prywatność jednostki, a także jej ochronę. Prywatność jest rozumiana jako sprawy osobiste, własne, natomiast prawo do jej ochrony, czyli prawo zapewniające brak ingerencji w prywatność określone jest w art. 8 Europejskiej Konwencji Praw Człowieka. Artykuł ten zapewnia ochronę życia prywatnego (rodzinnego, mieszkania), a także ochronę korespondencji (przesyłania informacji) (Kwiatkowska i Skórzewska - Amberg 2017). Ochronę prywatności należy zatem rozumieć również jako możliwość decydowania przez jednostkę o zakresie ujawniania informacji jej dotyczących (Hofmański 1997).

Ochronę życia prywatnego gwarantuje Konstytucja Rzeczypospolitej Polskiej. W art. 47 ujęta jest ochrona życia prywatnego, obejmująca autonomię informacyjną rozumianą jako prawo do samodzielnego decydowania przez jednostkę o ujawnieniu innym podmiotom i jednostkom informacji jej dotyczących (art. 51 Konstytucji). Ponadto, w Konstytucji Rzeczypospolitej Polskiej zagwarantowane jest także prawo do sprawowania kontroli nad informacjami dotyczącymi życia prywatnego, w sytuacji gdy ma miejsce dostęp do nich innych podmiotów czy jednostek. Należy

podkreślić, iż zawsze to jednostka, której dane i informacje dotyczą ma prawo do decydowania o zakresie przetwarzania informacji jej dotyczących, a także o dostępie do nich określonych podmiotów (Kwiatkowska i Skórzewska - Amberg 2017). Jest to niezwykle istotne i stanowi kluczowy aspekt sprawnego i efektywnego rezultatu korzystania z elektronicznej dokumentacji medycznej, przesyłanej i przetwarzanej przez systemy informatyczne wykorzystywane w ochronie zdrowia.

W celu przybliżenia zagadnienia niezbędne jest określenie, czym jest Elektroniczna Dokumentacja Medyczna w kontekście zapewnienia ochrony prywatności jednostki rozumianej jako pacjenta. Zgodnie z definicją, zawartą w art. 2 pkt 6 ustawy z dnia 28 kwietnia 2011 r. o systemie informacji w ochronie zdrowia (t.j. Dz.U. 2016, poz. 1535), Elektroniczną Dokumentację Medyczną należy rozumieć jako dokument w postaci elektronicznej niezbędny do uzyskania świadczeń opieki zdrowotnej przez daną jednostkę od świadczeniodawcy, który został określony przez art. 5 pkt 41 ustawy z dnia 27 sierpnia 2004 r. o świadczeniach opieki zdrowotnej finansowanych ze środków publicznych⁵ (t.j. Dz.U. 2016, poz. 1793 ze zm.). Jako świadczeniodawcę należy natomiast rozumieć podmiot zajmujący się działalnością leczniczą, określoną w przepisach o działalności leczniczej (Kwiatkowska i Skórzewska - Amberg 2017). W celu zapewnienia ochrony prywatności jednostki – pacjenta, szczegółowo i precyzyjnie określony został, za pomocą ustawy o systemie informacji w ochronie zdrowia oraz ustawy z dnia 6 listopada 2008 r. o prawach pacjenta i Rzeczniku Praw Pacjenta (t.j. Dz.U. 2017, poz. 1318), sposób prowadzenia i udostępniania dokumentacji medycznej. Jest to szczególnie ważne z perspektywy systemów informatycznych wykorzystywanych w systemie ochrony zdrowia, ponieważ od 1 stycznia 2018 r. prowadzenie dokumentacji medycznej w formie elektronicznej nie jest w Polsce alternatywą do tradycyjnej papierowej wersji, a obowiązkiem. Z datą tą forma elektroniczna dokumentacji medycznej stała się jedyną, właściwą formą prowadzenia dokumentacji medycznej i stanowi jedyne źródło informacji medycznych, często mających decydujący wpływ na leczenie, a zatem zdrowie i życie pacjenta co zgodnie jest z art. 56 ustawy o systemie informacji w ochronie zdrowia (Kwiatkowska i Skórzewska - Amberg 2017). Systemy informacji medycznej stanowią zatem szczególnie rodzaj systemów teleinformatycznych, gdyż ranga ich roli oraz odpowiedzialności jest bardzo wysoka. Definicja zawarta w art. 10 ustawy o systemie informacji w ochronie zdrowia określa System Informacji Medycznej jako system teleinformatyczny, umożliwiający przetwarzanie informacji i danych, dotyczących świadczeń zdrowotnych, które udostępniają systemy teleinformatyczne usługodawców świadczeń zdrowotnych. Dla prawidłowego działania Systemów Informacji Medycznej niezbędne jest właściwe i spójne działanie podstawowych elementów:

- a) Zachowanie poufności – polegające na zagwarantowaniu dostępu do danych jedynie upoważnionym do tego podmiotom i jednostkom.
- b) Zapewnienie integralności – rozumiane jako nienaruszalność informacji i danych medycznych podlegających procesowi przetwarzania i przesyłania pomiędzy systemami teleinformatycznymi uprawnionych usługodawców. Zapewnienie integralności obejmuje także odnotowanie każdorazowego faktu zaprzeczenia, iż miała miejsca próba naruszenia integralności danych medycznych przetwarzanych oraz przesyłanych w systemach informacji medycznych, w sytuacji ich wystąpienia.
- c) Uwierzytelnienie – polega na zagwarantowaniu, iż tożsamość jednostek i podmiotów, uzyskujących dostęp do systemów informacji medycznych oraz dokonujących w nim jakichkolwiek czynności jest sprawdzona i potwierdzona.
- d) Niezaprzeczalność – rozumiana jako brak możliwości przez kogokolwiek kto dokonał jakiegokolwiek czynności w systemie zaprzeczenia tym faktem (Kwiatkowska i Skórzewska - Amberg 2017).

Są to elementy niezbędne, aby móc zapewnić nie tylko prawidłowe działanie tych systemów, ale także efektywności i wysoką jakość ich działań.

Działanie systemów informacji medycznych - systemów teleinformatycznych służących do prowadzenia dokumentacji medycznej obwarowane jest wieloma wytycznymi zawartymi w rozporządzeniu Ministra Zdrowia z dnia 9 listopada 2015 r. w sprawie rodzajów, zakresu i wzorów dokumentacji medycznej oraz sposobu jej przetwarzania (Dz.U. 2015, poz. 2069). Rozporządzenie to

nakłada na systemy informacji medycznych wiele wymogów, a jednym z nich jest wymóg zagwarantowania zabezpieczenia dokumentacji medycznej przed uszkodzeniem, utratą, bakiem integralności, a także konieczność zapewnienia stałego oraz autoryzowanego dostępu do jej treści wyłącznie osobom uprawnionym. Ponadto, rozporządzenie to precyzuje sposoby oraz warunki udostępniania, utrwalania i zabezpieczania dokumentacji medycznej, składające się na zapewnienie powyżej wspomnianych elementów odpowiedzialnych za prawidłowe działanie systemów informacji medycznych czyli: poufności, integralności, uwierzytelnianie oraz niezaprzeczalności. Regulacjami prawnymi określonymi w rozporządzeniu Ministra Zdrowia z dnia 28 marca 2013 r. w sprawie wymagań dla Systemu Informacji Medycznej (Dz.U. 2013, poz. 463) objęty jest także format dokumentacji medycznej przetwarzanej i przesyłanej przez systemy informatyczne wykorzystywane w systemie ochrony zdrowia (Kwiatkowska i Skórzewska - Amberg 2017). Niestety brak standardów elektronicznej wymiany informacji i danych medycznych w podmiotach leczniczych był przyczyną dużych trudności, jakie stanęły na drodze do sprawnego i efektywnego działania tych systemów. Efektem tego był początkowy brak współpracy pomiędzy lokalnymi systemami informatycznymi jednostek opieki zdrowotnej oraz bazami danych medycznych. Jedynie istnienie jasno sprecyzowanych i adekwatnych standardów elektronicznej wymiany danych (EDI ang. Electronic Data Interchange) jest w stanie zapewnić świadczenie usług zdrowotnych za pomocą wykorzystania systemów teleinformatycznych na odpowiednio wysokim poziomie i z zapewnieniem właściwego bezpieczeństwa (Strzelecka 2018). Stworzenie Elektronicznej Dokumentacji Medycznej, opartej na precyzyjnych standardach przesyłania i prezentacji danych medycznych, stało się narzędziem zapewniającym pełne możliwości wykorzystania technologii informacyjno-komunikacyjnych w ochronie zdrowia (Karkowski i Korczak 2016).

Wytyczne zarządzania podmiotami medycznymi, w kontekście integracji systemów informatycznych funkcjonujących w różnych jednostkach medycznych, zawarte zostały w dokumencie „e-Zdrowie Polska na lata 2011-2015 Kierunki informatyzacji” (Strzelecka 2018). Zapewnienie właściwej integracji umożliwiającej spójność i ciągłość komunikacji między systemami jest niepodważalnym wymogiem, gdyż wpływa to zarówno na bieżącą, jak i przyszłą relację na linii pacjent-lekarz (Anderson i in. 2003). Wymiana danych i informacji medycznych dotyczy m.in. elektronicznych kartotek czy telemedycyny (Czerwińska 2015). Wspomniany powyżej brak standardów elektronicznej wymiany informacji medycznych między placówkami zdrowotnymi, związany był z sytuacją, iż każda z nich posiadała inne wymagania odnośnie interakcji z pacjentem oraz wytycznych, dotyczących przetwarzanych danych i informacji medycznych. Pomimo faktu, iż często występują podobne, ogólne potrzeby funkcjonowania podmiotów opieki zdrowia, to już same potrzeby w zakresie wymiany danych i informacji medycznych są odmienne. W celu zapewnienia podobnych standardów wymiany danych medycznych podjęto próbę zaprojektowania spójnego wzorca. Było to niezbędne w obliczu funkcjonujących na własnych zasadach, wykorzystywanych przez podmioty medyczne systemów informatycznych, tj. system danych radiologicznych, system laboratoryjny, system informacji szpitalnej czy elektroniczny rejestr medyczny. W celu zapewnienia sprawnej wymiany informacji między tymi systemami stworzono standard HL7, którego jako główne zadanie zdefiniowano efektywną komunikację, integrację i zarządzanie elektronicznymi danymi medycznymi. Istotnym założeniem przy określeniu tego standardu było zapewnienie niewymuszania na jednostkach służby zdrowia używania konkretnego oprogramowania, co miało zapewniać niegenerowanie kosztów, często niemożliwych do poniesienia przez dane podmioty medyczne (Strzelecka 2018).

Niezwykle ważnym aspektem przy próbie analizowania zagadnienia standardów wymiany informacji medycznych jest nie tylko ich efektywność, ale także zapewnienie integracji danych medycznych oraz informacji administracyjnych odnoszących się do danych podmiotów medycznych (Karkowski i Korczak 2016). Na każdej jednostce służby zdrowia spoczywa obowiązek przechowywania danych medycznych każdego pacjenta, który się do niej zgłosił. Świadczeniobiorca jest odpowiedzialny za dostarczenie informacji medycznej podczas pierwszej wizyty u lekarza. Z powodu braku jednolitego wzorca tworzenia dokumentacji medycznej obowiązującego wszystkie placówki medyczne analiza historii choroby, a tym samym kontynuacja leczenia w innej placówce byłaby utrudniona lub wręcz niemożliwa (Viangteeravat i in. 2011). Dostrzegając problemy z tym

związane podjęto decyzję o stworzeniu wzorca standardów wymiany oraz zapisu elektronicznych danych medycznych przesyłanych przez systemy informatyczne wykorzystywane w służbie zdrowia. Takie podejście jest zgodne z wytycznymi Unii Europejskiej, zawartymi w Ustawie z dnia 28 kwietnia 2011 r. o systemie informacji w ochronie zdrowia (Ustawa z 28 grudnia 2011 r) (Strzelecka 2018). Wzorzec ten opisuje parametry i format komunikacji w zakresie znaków tekstowych przedstawiających dane i informacje. Warto wspomnieć, iż idei tej przyświecało założenie, że innowacje wprowadzane w opiece zdrowotnej nie tylko mają wpłynąć na jakość jej usług za pomocą zastosowania nowoczesnych technologii i narzędzi informatycznych, ale także mają zwiększyć bezpieczeństwo tych usług (Wdowiak i in. 2009; Cutler 2011). Wśród najważniejszych standardów elektronicznej wymiany informacji i danych medycznych w podmiotach leczniczych należy wymienić:

- a) Standard Health Level 7 - HL7 (Health Level Seven) – protokół komunikacyjny służący do wymiany tekstowych danych medycznych w szpitalach. Standard ten odpowiedzialny jest za komunikację między szpitalnymi systemami informatycznymi a systemami diagnostycznymi. Istotne jest, iż protokół ten działa niezależnie od używanego systemu informatycznego oraz protokołu komunikacji stosowanego do elektronicznej wymiany danych (Wdowiak i in. 2004). Jego główny cel to uproszczenie przystosowania interfejsów między aplikacjami medycznymi oraz różnymi dostawcami (Gulraiz i in. 2018). Zastosowanie tego standardu pozwala na łączenie danych oraz nośników informacji, a także gwarantuje kontrolę komunikacji.
- b) Standard Health Level 7 (HL7) Wersja 2.0 – kolejna wersja HL7 służąca przede wszystkim do wymiany informacji klinicznych obejmujących rejestrację pacjenta, a także zamówień medycznych. Została zaprojektowana tak, by móc sprawnie funkcjonować ze starszą wersją HL 7 (Strzelecka 2018).
- c) Standard Health Level 7 (HL7) Wersja 3.0 – jego zadaniem miał być wpływ na zmianę modelu przekazywania wiadomości w systemie. Wykorzystanie tego standardu miało mieć zastosowanie przede wszystkim w komunikacji elektronicznej między różnymi systemami informatycznymi (Goossen i Langford 2014). Ta wersja Standardu HL 7 nie zapewnia kompatybilności z żadną wcześniejszą wersją HL7, co jest jednoznaczne z brakiem przepływu informacji między tymi standardami (Strzelecka 2018).
- d) Standard FHIR (Fast Health Interoperable Resources) – zaprojektowany został jako innowacyjny standard, wykorzystujący wszystkie najlepiej funkcjonujące elementy dokumentów klinicznych HL7 przy wykorzystaniu najnowszych usług internetowych. Jego najważniejszymi elementami są tzw. zasoby używane w określonych warunkach przez systemy informatyczne opieki medycznej, bez rozróżnienia na procesy kliniczne czy administracyjne. Zasoby te mogą być przedstawiane dla obiektów XML i gwarantują elastyczność systemu zdrowotnego. W skład tych zasobów wchodzi: identyfikator, rodzaj zasobu, dane ustrukturyzowane oraz podsumowanie zawartości zasobu (Cierniewska i Bliźniuk 2017).
- e) DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) – standard ten wykorzystywany jest do przesyłania informacji graficznych, np. zdjęć rentgenowskich, badań USG (Strzelecka 2018). Zapewnia on połączenie w jednym pliku graficznym obrazu i danych medycznych, tzn.: informacji o pacjencie, informacji o przeprowadzonym badaniu, typu obrazu, jego parametrów oraz samego obrazu (Haripriya i Porkodi 2017).

Przyjęcie standardów w zakresie elektronicznego przesłania i wymiany danych medycznych zapewnia tworzenie efektywniejszych narzędzi do elektronicznej wymiany danych medycznych. Brak określania standardów przesyłania i przetwarzania danych medycznych może być przyczyną paraliżu działania nawet najbardziej innowacyjnych systemów, dlatego też podejście to zapewnia większą efektywność i wydajność systemów opieki medycznej, niweluje możliwość popełniania błędów, dzięki czemu w konsekwencji podnosi jakość świadczonych usług medycznych, co wpływa bezpośrednio na zdrowie i zadowolenie pacjentów.

Niezwykle istotnym przedsięwzięciem na przestrzeni ostatnich lat był projekt zespołu systemów informatycznych, stanowiących Elektroniczną Platformę Gromadzenia, Analizy i Udostępniania Zasobów Cyfrowych o Zdarzeniach Medycznych – zwanego Platformą P1. Głównym

zadaniem Platformy P1 oraz składających się na nią zespołów informatycznych jest usprawnienie procesów planowania oraz realizacji świadczeń zdrowotnych, a następnie monitorowanie ich realizacji oraz udostępnianie uprawnionym jednostkom i podmiotom dostępu do informacji o nich. Czynności te odbywają się za sprawą możliwości gromadzenia, tworzenia i analizy informacji o zdarzeniach medycznych, czyli danych o przetwarzanych w systemie informacjach medycznych, uzyskiwanych w ramach świadczeń zdrowotnych. Można powiedzieć, iż w praktyce jedną z głównych ról Platformy P1 jest sprawne i rzetelne zarządzanie elektroniczną dokumentacją medyczną, e-receptami a także e-skierowaniami (Strzelecka 2018). Do zadań platformy należy również publikowanie informacji w zakresie ochrony zdrowia na platformie zwanej Centrum e-Zdrowia, a dawniej funkcjonującej pod nazwą Centrum Systemów Informacyjnych Ochrony Zdrowia (CSIOZ) (Puls Medycyny 2020).

W związku z tym, iż od 2015 roku możliwe jest świadczenie usług medycznych na odległość z wykorzystaniem systemów teleinformatycznych przetwarzających oraz przesyłających dane medyczne w postaci elektronicznej dokumentacji medycznej, ośrodki opieki medycznej zobowiązane są do właściwego zabezpieczania oraz archiwizacji danych medycznych, gdyż jest to niezbędne do prawidłowego i efektywnego świadczenia usług zdrowotnych przy wykorzystaniu systemów teleinformatycznych (Kwiatkowska i Skórzewska - Amberg 2017). Jednak, jak pokazują badania przeprowadzane na przełomie lipca i sierpnia 2016 roku przez CSIOZ, niezwykle dużym wyzwaniem okazało się wykorzystywanie w praktyce systemów teleinformatycznych oraz zapewnianie dostępu do elektronicznej dokumentacji medycznej dla większości szpitali i zakładów udzielających świadczeń zdrowotnych (AŚZ-ów). Przeprowadzone analizy wykazały, iż możliwość posiadania konta internetowego pacjenta wdrożyło wówczas blisko 37% szpitali i około 5% AŚZ-ów. Jednocześnie, jedynie 15% spośród szpitali i AŚZ-ów umożliwiała pacjentom dostęp online do wyników ich badań, a jedynie 7% szpitali i 3% AŚZ-ów zapewniało dostęp do dokumentacji w formie elektronicznej z każdego miejsca. Ponadto, we wspomnianych badaniach aż 90% AŚZ-ów i ponad 72% szpitali zadeklarowało brak stosowania jakichkolwiek standardów dotyczących elektronicznej dokumentacji medycznej. Znacznie lepiej, zarówno szpitale, jak i AŚZ-ty, wypadają w kwestii wdrożenia polityki bezpieczeństwa teleinformatycznego, gdyż aż 82% szpitali i 56% AŚZ-ów zadeklarowało w tych badaniach jej posiadanie oraz wdrożenie. Oznacza to, że sposób przetwarzania danych medycznych przez wdrożone wówczas systemy zapewniał poufność i dostępność danych jedynie podmiotom uprawnionym oraz integralność. Warto wspomnieć, iż w badaniu tym wykazano w zasadzie bezawaryjność systemów teleinformatycznych w zakresach mogących powodować utratę jednostkowych danych medycznych - wystąpienie awarii odnotowano jedynie u 1% AŚZ-ów oraz w 3% szpitali biorących udział w badaniu (Kwiatkowska i Skórzewska - Amberg 2017). Badania te wyraźnie wskazały braki w przygotowaniu placówek ochrony zdrowia Polsce do wdrażania nowoczesnych rozwiązań i narzędzi informatycznych mających usprawnić działanie systemu zdrowia. Ponadto, warto zwrócić uwagę na problem braku sprawnej komunikacji pomiędzy z informatyzowanymi podmiotami. Wyniki tych badań jednoznacznie wskazują na charakter informatyzacji pionowej podmiotów ochrony zdrowia, przy jednoczesnym braku kompatybilności i synchronizacji, co w konsekwencji było sytuacją bardzo niepożądaną z punktu widzenia sprawnego działania opieki medycznej.

4. Podsumowanie

W związku z szybkim postępem technologicznym i coraz efektywniejszym wykorzystaniem technologii informacyjno-komunikacyjnych, także w sektorze ochrony zdrowia w Polsce, sprawne zarządzanie nimi jest koniecznością i stanowi jeden z głównych warunków dla prawidłowego funkcjonowania systemu ochrony zdrowia w obecnych czasach. Pojawiają się coraz bardziej innowacyjne metody leczenia oraz coraz bardziej innowacyjne technologie informacyjno-komunikacyjne do przesyłania i przetwarzania danych, zatem podnoszenie jakości usług medycznych powinno być postrzegane jako proces ciągły, który postępuje wraz z rozwojem technologicznym. Pacjenci oczekują od systemu ochrony zdrowia skuteczności oraz jakości, ale także bezpieczeństwa świadczonych usług. Dotyczy to zarówno standardów stricte medycznych związanych z wykorzystaniem nowych metod telemedycyny w ramach świadczenia opieki zdrowotnej, ale także

zapewnienia wysokiego standardu bezpieczeństwa również w zakresie przesyłania, przetwarzania danych medycznych i informacji o pacjencie. Jest to jedno z wyzwań, z którymi zarówno dziś jak i w przyszłości, będą zmagali się systemy informatyczne wykorzystywane w systemie ochrony zdrowia. Należy także pamiętać, że w dynamicznie rozwijającym się społeczeństwie informacyjnym pojawiają się także nowe zagrożenia i nieznane dotąd wyzwania, jednak system ochrony zdrowia oraz jakość świadczonych przez niego usług zawsze był i pozostanie dla społeczeństwa jednym z najważniejszych zagadnień, wymagających w przyszłości być może jeszcze większej uwagi niż dotychczas.

5. Literatura

- Anderson JG, Rainey MR, Eysenbach G (2003), The impact of cyberhealthcare on the physician-patient relationship. *Journal of Medical Systems* vol. 27 no. 1: 67-84, Pozyskano z https://www.researchgate.net/profile/Gunther_Eysenbach/publication/10873915_The_Impact_of_CyberHealthcare_on_the_Physician-Patient_Relationship/links/5537ec400cf2239f4e796ad4/The-Impact-of-CyberHealthcare-on-the-Physician-Patient-Relationship.pdf (dostęp: 15.12.2020).
- Cierniewska A, Bliźniuk G (2017) Zastosowanie standardu HL7 FHIR w mobilnej aplikacji medycznej. *Roczniki Kolegium Analiz Ekonomicznych* 46: 255-266, Pozyskano z http://rocznikikae.sgh.waw.pl/p/roczniki_kae_z46_19.pdf (dostęp: 15.12.2020).
- Cutler DM (2011) Where are the health care entrepreneurs? The failure of organizational innovation in health care, *Innovation Policy and the Economy*, vol. 11 no. 1: 1-28, Pozyskano z www.jstor.org/action/doBasicSearch?Query=Where+are+the+health+care+entrepreneurs%3F+The+failure+of+organizational+innovation+in+health+care&acc=off&wc=on&fc=off&group=none&refreqid=search%3A9a91f48add01043ce73c09b9e636000a (dostęp: 13.12.2020).
- Czerwińska M (2015) Narzędzia e-zdrowia jako instrumenty poprawiające dostęp do usług medycznych w regionie Nierówności Społeczne a Wzrost Gospodarczy nr 43: 173-185, Pozyskano z <http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.desklight-3731fb19-2d0b-4141-911a-eee11fbecf0a> (dostęp: 15.12.2020).
- Frączkowski K (2010) Systemy informacyjne oraz usługi w ochronie zdrowia oparte na technologiach SOA (Service Oriented Architecture). *Acta Bio-Optica et Informatica Medica* 1/2010, vol. 16: 81-86, Pozyskano z <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-BSL7-0039-0013> (dostęp: 13.12.2020).
- Goossen W, Langford LH (2014) Exchanging care records using HL7 V3 care provision messages. *Journal of the American Medical Informatics Association* vol. 21:363-368, Pozyskano z <http://academic.oup.com/jamia/article/21/e2/e363/707065?login=true> (dostęp: 15.12.2020).
- Gulraiz JJ, Muhammad UA, Chaudary NA, Muhammad FM (2018) Evolution of Health Level-7: A Survey, *Proceedings of the 2018 International Conference on Software Engineering and Information Management*, Pozyskano z: www.researchgate.net/publication/323790565_Evolution_of_Health_Level-7_A_Survey (dostęp: 13.12.2020).
- Haripriya P, Porkodi R (2017) An efficient storage and retrieval of DICOM objects using Big Data technologies. *International Journal of Advanced Research in Computer Science* no. 3: 271-275, Pozyskano z <http://www.ijarcs.info/index.php/Ijarcs/article/view/2993> (dostęp: 16.12.2020).
- Hofmański P (1997) Komentarz do wybranych przepisów Europejskiej Konwencji o ochronie Praw Człowieka i Podstawowych Wolności. *Standardy prawne Rady Europy, Teksty i Komentarze, T. III*. Warszawa: Oficyna Naukowa.
- Karkowski TA, Korczak K (2016) Zarządzanie wiedzą w ochronie zdrowia z wykorzystaniem wybranych rozwiązań ICT.
- Kwiatkowska EM, Skórzewska-Amberg M (2017) Technologie informacyjno-komunikacyjne w ochronie zdrowia – problematyka naruszania prywatności. *Internetowy Kwartalnik Antymonopolowy i Regulacyjny* nr 7(6): 28-39, Pozyskano z

- <http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.deskligh-a5f23840-6236-41ee-b700-a10b2775b1c9> (dostęp: 16.12.2020).
- Maurer T (2011) Cyber Norm Emergence at the United Nations – an Analysis of the Activities at the UN Regarding Cyber-Security. Science, Technology, and Public Policy Program Explorations in Cyber International Relations Project, Discussion Paper #211-11 Explorations in Cyber International Relations Discussion Paper Series, Harvard Kennedy School, Belfer Center for Science and International Affairs, Pozyskano z <https://www.un.org/en/ecosoc/cybersecurity/maurer-cyber-norm-dp-2011-11.pdf> (dostęp: 13.12.2020).
- Michalak J (2013) Czy system ochrony zdrowia może być efektywny? The Central European Journal of social sciences and humanities: 2005-2017, Pozyskano z <http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.ekon-element-000171285605> (dostęp: 16.12.2020).
- Puls Medycyny, Pozyskano z <https://pulsmedycyny.pl/csioz-zmienia-nazwe-na-centrum-e-zdrowia-993194> (dostęp: 12.12.2020).
- Słownik pojęć Strategii Rozwoju Transportu (Załącznik do Strategii Rozwoju Transportu do 2020 roku z perspektywą do 2030 roku), Pozyskano z: http://www.gov.pl/static/mi_arch/media/3510/Slownik_pojec_SRT.pdf (dostęp: 10.12.2020).
- Strzelecka A (2018) Wybrane standardy elektronicznej wymiany informacji w podmiotach leczniczych. Informatyka Ekonomiczna Business Informatics nr 4(50): 161-167, Pozyskano z https://www.dbc.wroc.pl/Content/72990/Strzelecka_Wybrane_standardy_elektronicznej_wymiany.pdf (dostęp: 12.12.2020).
- Strzelecka A (2018) Wybrane standardy elektronicznej wymiany informacji w podmiotach leczniczych. Informatyka Ekonomiczna Business Informatics nr 4(50): 161-167, za: Wdowiak L, Byczyński E, Pogorzelski B, Czubek A (2004) Standardy i normy jako elementy porządkujące systemy informacyjne w ochronie zdrowia. Zdrowie Publiczne nr 3: 394-399, Pozyskano z https://www.dbc.wroc.pl/Content/72990/Strzelecka_Wybrane_standardy_elektronicznej_wymiany.pdf (dostęp: 12.12.2020).
- Strzelecka A (2018) Wybrane standardy elektronicznej wymiany informacji w podmiotach leczniczych. Informatyka Ekonomiczna Business Informatics nr 4(50): 161-167, za: Wdowiak L, Kamiński Z, Horach A, Bojar I, (2009) Systemy informatyczne w ochronie zdrowia. Część 2 – doświadczenia krajowe. Zdrowie Publiczne 119(1): 80-85, Pozyskano z https://www.dbc.wroc.pl/Content/72990/Strzelecka_Wybrane_standardy_elektronicznej_wymiany.pdf (dostęp: 12.12.2020).
- Viangteeravat T, Anyanwu MN, Nagisetty VR, Kuscu E, Sakauye ME, Wu D (2011) Clinical data integration of distributed data sources using Health Level Seven (HL7) v3-RIM mapping. Journal of Clinical Bioinformatics: 1-32, Pozyskano z: <http://link.springer.com/article/10.1186/2043-9113-1-32#Abs1> (dostęp: 11.12.2020).