

**PRACE NAUKOWE**  
**Akademii im. Jana Długosza w Częstochowie**

**SCIENTIFIC ISSUES**  
**Jan Długosz University in Częstochowa**

**TECHNIKA, INFORMATYKA,**  
**INŻYNIERIA BEZPIECZEŃSTWA**

**TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE,**  
**SAFETY ENGINEERING**

**V**



Częstochowa 2017

Redaktor naczelny / *Editor-in-chief*: dr inż. Marcin SOSNOWSKI  
Redaktor pomocniczy / *Coeditor*: dr Tomasz PRAUZNER

Recenzenci współpracujący / *Reviewers*:

doc. RNDr. Karla BARČOVA, Ph.D. – Technical University of Ostrava, Czech Republic  
assoc. prof. Ákos BERECZKY – Budapest University of Technology and Economics,  
Hungary  
assoc. prof. Vitalii KASHYTSKYI – Lutsk National Technical University, Ukraine  
assoc. prof. Mykola MELNYCHUK – Lutsk National Technical University, Ukraine  
prof. Jozef METEŇKO – Academy of the Police Force in Bratislava, Slovakia  
prof. Josef REITŠPÍS – University of Security Management in Košice, Slovakia  
assoc. prof. Radomir ŠČUREK – Technical University of Ostrava, Czech Republic  
assoc. prof. Samuel UHRIN – Academy of the Police Force in Bratislava, Slovakia  
dr hab. inż. Wioletta BAJDUR – Politechnika Częstochowska  
dr hab. Jacek DWORZECKI – Wyższa Szkoła Policji w Szczytnie  
dr hab. Alina GIL – Akademia im. Jana Długosza w Częstochowie  
dr hab. inż. Adam GNATOWSKI – Politechnika Częstochowska  
dr hab. inż. Jarosław KRZYWAŃSKI – Akademia im. Jana Długosza w Częstochowie  
dr hab. inż. Marek LIS – Politechnika Częstochowska  
dr hab. Henryk NOGA – Instytut Techniki, Uniwersytet Pedagogiczny w Krakowie  
dr hab. inż. Jerzy PISAREK – Akademia im. Jana Długosza w Częstochowie  
dr hab. inż. Andrzej ROMAN – Akademia im. Jana Długosza w Częstochowie  
dr hab. Mikhail SELIANINOV – Akademia im. Jana Długosza w Częstochowie

Przygotowanie techniczne do druku: Katarzyna CIESIELSKA

Korekta: Dariusz JAWORSKI

Projekt okładki: Damian RUDZIŃSKI

© Copyright by Akademia im. Jana Długosza w Częstochowie  
Częstochowa 2017

Czasopismo indeksowane w: / *Journal indexed in*:

- BazTech <http://baztech.icm.edu.pl>
- Index Copernicus Journal Master List <http://indexcopernicus.com>

Pismo recenzowane

Podstawową wersją periodyku jest wersja papierowa

**ISSN 2300-5343**

Wydawnictwo im. Stanisława Podobińskiego  
Akademii im. Jana Długosza w Częstochowie  
42-200 Częstochowa, ul. Waszyngtona 4/8  
Tel. (34) 378-43-29, fax (34) 378-43-19  
[www.ajd.czyst.pl](http://www.ajd.czyst.pl)  
e-mail: [wydawnictwo@ajd.czyst.pl](mailto:wydawnictwo@ajd.czyst.pl)

## SPIS TREŚCI

### **Sylwia Błach**

Konflikty dotyczące prawa autorskiego gier komputerowych – diagnoza problemu i proponowane rozwiązania..... 7

### **Jerzy Krawiec**

Wpływ programowania równoległego na wydajność programu Javy..... 25

### **Iłona Kubik, Paweł Kwiaton**

Algorytm rozwiązywania kinematyki prostej manipulatorów antropomorficznych..... 39

### **Przemysław Rajca**

Analiza zagrożeń w przemyśle metalurgicznym na przykładzie wybranych stanowisk pracy huty stali..... 53

### **Wojciech Tutak, Renata Gnatowska, Jerzy Winczek, Elżbieta Gawrońska**

Analiza wydzielania ciepła w silniku o zapłonie samoczynnym ..... 67

### **Ewa Konieczko**

Analiza wpływu liczby pasażerów na czas ewakuacji Portu Lotniczego Radom ..... 75

### **Stanislav Lichorobiec, Věra Holubová, Radomír Ščurek**

Analiza bezpieczeństwa w przypadku wtargnięcia aktywnego strzelca do budynków szkolnych..... 83

### **Olgierd Kucharski**

Nakazy inspektora pracy dotyczące bezpieczeństwa i higieny pracy jako indywidualne akty administracyjne..... 95

### **Tomasz Prauzner, Adrian Kułak**

Węgiel brunatny – przyszłość czy przeszłość? Bezpieczeństwo energetyczne Polski w kontekście wydobycia surowca ..... 107

### **Tomasz Prauzner, Paulina Szewczyk**

Ocena bezpieczeństwa ruchu drogowego w programie symulacyjnym PTV VISSIM..... 121

### **Joanna Świątek-Prokop, Bartłomiej Klekot**

Badanie świadomości znaczenia przepisów bhp wśród pracowników sektora budowlanego ..... 135

### **Mikhail Selianinau**

Modularne zasady równoległe potokowego przetwarzania informacji..... 147

**Mikhail Selianin**

Bazowe elementy strukturalne urządzeń modularnych do cyfrowego przetwarzania informacji ..... 155

**Łukasz Kutrowski, Mateusz Miara**

Badania układu: belka – zmienna masa skupiona, modelującego suwnicę .... 165

**Agnieszka Makara, Zygmunt Kowalski, Katarzyna Fela**

Zagospodarowanie substancji pofermentacyjnej w aspekcie bezpieczeństwa ekologicznego ..... 177

**Andrzej Ślęzak, Izabella Ślęzak-Prochazka, Kornelia M. Batko, Aleksandra Zyska, Weronika Gawrys, Jacek Józwiak**

Analityczna metoda określania parametrów antropometrycznych w procesie redukcji masy ciała w aspekcie bezpieczeństwa zdrowia ..... 191

**Aleksander Gąsiorski, Zdzisław Posyłek, Andrzej Roman**

Symulacja numeryczna rzeczywistej baterii kondensatorowej pracującej w układach wielkiej częstotliwości w zastosowaniu do falowników. Część I. Kondensatory dla baterii wielkiej częstotliwości ..... 209

**Aleksander Gąsiorski, Zdzisław Posyłek, Andrzej Roman**

Symulacja numeryczna rzeczywistej baterii kondensatorowej pracującej w układach wielkiej częstotliwości w zastosowaniu do falowników. Część II. Modele elektryczne rzeczywistych kondensatorów tworzących baterie i symulacja pracy wybranych połączeń elementów tych baterii ..... 223

**Vitalii Kashytskyi, Oksana Sadova, Mykola Melnychuk, Petro Savchuk, Inna Boiarska**

Badanie struktury i składu chemicznego warstw generowanych na powierzchni wybranych kompozytów epoksydowych w obszarze tarcia w parach kinematycznych typu kompozyt-stal..... 237

## CONTENTS

### **Sylwia Błach**

Conflicts on copyright of computer games – diagnosis of the problem and suggested solutions ..... 7

### **Jerzy Krawiec**

The impact of parallel programming on performance of Java program..... 25

### **Ilona Kubik, Paweł Kwiaton**

Forward kinematics algorithm for anthropomorphic manipulators..... 39

### **Przemysław Rajca**

Analysis of hazards in the metalurgical industry on example of selected positions of steel works ..... 53

### **Wojciech Tutak, Renata Gnatowska, Jerzy Winczek, Elżbieta Gawrońska**

Analysis of heat release in compression ignition engine..... 67

### **Ewa Konieczko**

The influence of the number of passengers on the evacuation time of Radom Airport ..... 75

### **Stanislav Lichorobiec, Věra Holubová, Radomír Ščurek**

Safety study on threat by active shooter to school facilities..... 83

### **Olgiert Kucharski**

The labor inspector's orders concerning occupational health and safety as individual administrative acts ..... 95

### **Tomasz Prauzner, Adrian Kulak**

Brown coal - the future or past? Polish energetic security in case of material mining ..... 107

### **Tomasz Prauzner, Paulina Szewczyk**

Assessment of traffic safety in the PTV VISSIM simulation program ..... 121

### **Joanna Świątek-Prokop, Bartłomiej Klekot**

Study on the importance of health and safety regulation awareness among construction sector workers ..... 135

### **Mikhail Selianinau**

The modular principles of parallel pipeline information processing..... 147

### **Mikhail Selianinau**

The basic structural elements of modular devices for digital information processing..... 155

<b>Łukasz Kutrowski, Mateusz Miara</b> Studies of the system: beam - variable mass element modeling overhead crane.....	165
<b>Agnieszka Makara, Zygmunt Kowalski, Katarzyna Fela</b> Disposal of after-fermentation substance in the aspect of ecological safety .....	177
<b>Andrzej Ślęzak, Izabella Ślęzak-Prochazka, Kornelia M. Batko, Aleksandra Zyska, Weronika Gawrys, Jacek Józwiak</b> Analytical method for determining antropometric parameters in body mass reduction process in the aspect of health safety .....	191
<b>Aleksander Gašiorski, Zdzisław Posylek, Andrzej Roman</b> Numerical simulation of the actual capacitor bank working in high frequency systems for use in inverters. Part I. Capacitors for high frequency banks.....	209
<b>Aleksander Gašiorski, Zdzisław Posylek, Andrzej Roman</b> Numerical simulation of the actual capacitor bank working in high frequency systems for use in inverters Part II. Electrical models of the actual capacitors forming the banks and simulating the operation of selected connections of the components of these banks .....	223
<b>Vitalii Kashytskyi, Oksana Sadova, Mykola Melnychuk, Petro Savchuk, Inna Boiarska</b> Research of the composition and structure of protective films self-generated on the tribo surfaces of the epoxy composite materials .....	237



**Sylwia Błach**

*Instytut Informatyki, Politechnika Poznańska*

*ul. Piotrowo 2, 60-965 Poznań*

*e-mail: sylwia.p.blach@doctorate.put.poznan.pl*

## KONFLIKTY DOTYCZĄCE PRAWA AUTORSKIEGO GIER KOMPUTEROWYCH - DIAGNOZA PROBLEMU I PROPONOWANE ROZWIĄZANIA

**Streszczenie.** Rynek gier to dynamicznie rozwijający się sektor branży rozrywkowej, jednak nieustannie traktowany po macoszemu przez polskie prawodawstwo. Gry komputerowe nie są zdefiniowane w ustawie dotyczącej prawa autorskiego, a ich złożoność: poczynając od skomplikowanej budowy, przez różnorodność gatunkową i stylistyczną, aż do podobieństwa do produkcji filmowych utrudnia jednoznaczne przyporządkowanie do istniejących w „Dzienniku Ustaw” kategorii. W artykule zostały przedstawione przykładowe konflikty dot. prawa autorskiego gier oraz zastosowane rozwiązania. Zaproponowano wprowadzenie nowej kategorii, a także przeprowadzono analizę, jakie gry do jakich kategorii można włączyć.

**Słowa kluczowe:** prawo autorskie, gry komputerowe, informatyka.

## CONFLICTS ON COPYRIGHT OF COMPUTER GAMES - DIAGNOSIS OF THE PROBLEM AND SUGGESTED SOLUTIONS

**Summary.** The games market is dynamically growing sector of entertainment industry, however it is continually neglected by Polish legislation. Computer games are not defined in an act on copyright and their complexity: starting from sophisticated structure, through variety of genres and stylistics, to similarity to film productions makes it difficult to clearly assign them to categories already existing in The Journal of Laws. The article presents examples of conflicts on the copyright of computer games and applied solutions. The new category was proposed, as well as an analysis was made, of what games to which category can be included.

**Keywords:** copyright, computer games, computer science.

## Wprowadzenie

Rynek gier komputerowych jest dynamicznie rozwijającym się sektorem branży rozrywkowej. Wraz z pojawieniem się pierwszej gry wideo na świecie w 1947 roku (był to automat Cathode Ray Tube Amusement Device, a rozgrywka polegała na sterowaniu kropką za pomocą pokręteł [2]) i pojawianiem się kolejnych tytułów, rosło zainteresowanie społeczeństwa wirtualną rozrywką. Pierwszym przełomowym momentem w historii gier komputerowych było pojawienie się automatów z takimi grami, jak „Pong” (1972) „Space Invaders” (1978), „Pac-Man” (1982) [6], które szybko zyskały miano hitów. Kolejnym istotnym przełomem było wprowadzenie gier komputerowych do domów – w postaci konsol Amiga czy Atari, popularnych w latach 80. i 90. XX wieku czy w końcu – popularyzacja na rynku komputerów osobistych.

Wraz z rosnącym zainteresowaniem grami i produkcją coraz to nowszych tytułów pojawił się problem związany z prawem autorskim dotyczącym gier komputerowych. Dotychczasowe rozwiązania prawne nie definiowały osobnej kategorii dla tej branży rozrywki, natomiast istniejące klasyfikacje prowadziły do niejednoznacznych wyroków sądowych i sporów. Choć początki rozrywki komputerowej datuje się na lata 60. ubiegłego wieku, do tej pory prawo – zarówno polskie, jak i europejskie – nie określiło jednoznacznego stanowiska wobec praw autorskich w kontekście gier komputerowych. Jak twierdzi prawniczka Paula Pul na blogu LawMore: „(...) gry komputerowe są traktowane przez polskie prawo raczej po macoszemu, również orzecznictwo i doktryna nazbyt nie rozstrzyga ich ochrony prawnoautorskiej. Status prawny gier komputerowych wciąż nie jest precyzyjnie określony i budzi wiele wątpliwości” [12].

Istotne jest, aby twórca już na początku swoich prac wiedział, z jakich elementów wolno mu korzystać. Znajomość praw autorskich gwarantuje, że będzie korzystał z dostępnych narzędzi i motywów świadomie. Jest to niezwykle ważne w przypadku małych studiów gier (od kilku do kilkunastu osób) pracujących przy produkcjach gier niezależnych [20], zwanych też grami indie. Gry takie powstają bez finansowego wsparcia wydawcy, a co za tym idzie: mają ograniczony budżet na rozwój, ale też na skorzystanie z pomocy prawnej. Koszt wprowadzenia zmian w początkowej fazie projektu jest niewielki, ale wraz z upływem czasu koszt rośnie, co znacząco obniża szanse na doprowadzenie projektu do końca [8]. Hipotetyczna sytuacja, w której okazuje się, że twórcy nie mają praw do wizerunku głównego bohatera, w fazie planowania rozgrywki i fabuły jest łatwa do naprawy – wystarczy wymyślić innego bohatera. Jednak w momencie ukończenia projektu wymaga istotnych zmian w linii fabularnej, a co za tym idzie – w całej grze.

Celem tego artykułu jest krótkie przedstawienie historii konfliktów dotyczących prawa autorskiego w kontekście gier komputerowych, wyjaśnienie, dlaczego dotychczasowa klasyfikacja nie spełnia wymogów współczesnej roz-



rywki oraz zaprezentowanie rozwiązań, które mogłyby problem ten zmniejszyć, czy wręcz zniwelować.

## Krótką historia konfliktów dotyczących gier komputerowych

Dynamiczny rozwój branży gier w ostatnich latach spowodował narastanie problemu związanego z konfliktami dotyczącymi praw autorskich do gier komputerowych. Przez lata rozważano różne klasyfikacje, a wraz z każdym kolejnym sporem odkrywano nowe problemy. Poniżej została przedstawiona krótka historia subiektywnie wybranych najciekawszych konfliktów, które dotyczyły branży gier komputerowych.

### Konflikt dotyczący symulatorów farmy

Symulatory to gry, w których rozgrywka polega na symulowaniu wybranego elementu świata bądź życia (lub wielu złożonych elementów). W 2012 roku doszło do konfliktu pomiędzy dwoma polskimi producentami – autorami symulatorów farm, a konkretniej tytułu „Symulator Farmy”. Gra „Symulator Farmy” produkcji Giants wypuszczana była na polskim rynku przez wydawnictwo Techland. Ponadto od 2009 roku firma Techland wypuszczała drugi symulator farmy, o nazwie „Agrar Simulator”. Problem pojawił się, gdy w 2012 roku prawa do gry produkcji Giants przejęła firma CD Projekt. CDP postanowił wydawać „Symulator Farmy” pod angielską nazwą „Farming Simulator”. Jednak firma Techland, posiadająca prawa autorskie do nazwy „Symulator Farmy”, zaczęła pod nią wydawać grę „Agrar Simulator” [7]. Takie zamieszanie zostało potraktowane jako jawne wprowadzanie klientów w błąd – nazwy się powielają, a klienci niezorientowani w sporze kupowali nie ten produkt, na którym im zależało.

O skali problemu świadczy choćby odpowiedź CDP na całe zamieszanie: „Zwróciliśmy uwagę, że na polskim rynku pojawi się wkrótce symulator podobny do naszej gry. Chcemy z całą stanowczością podkreślić, że *Symulator Farmy 2013*, wydawany przez firmę Techland, nie jest kontynuacją gry *Symulator Farmy 2011*. Najnowszą odsłoną serii, która cieszy graczy od 2008 roku, jest *Farming Simulator 2013*” [7].

Konflikt ten nie trafił do sądu. Symulatory farmy, pod różnymi tytułami, nadal są w sprzedaży i tylko fan serii lub zorientowany w rynku wydawniczym gracz jest w stanie rozpoznać, z którym produktem ma do czynienia.

### Konflikt dotyczący gry Pong

W latach 70. ubiegłego wieku miał miejsce konflikt pomiędzy twórcami jednej z kultowych gier na automaty: „Pong” (1972). Gra ta miała symulować

rozgrywkę tenisa stołowego. Celem gracza było pokonanie przeciwnika poprzez uzyskanie wyższej liczby punktów. Wypuszczona została przez firmę Atari i aktualnie uznawana jest za jedną z najstarszych gier przeznaczonych na automaty [18].

Problem, który rozpoczął się w 1975 roku, związany był z tym, od kiedy można uznać, że prawa autorskie chronią grę – czy od momentu jej ustalenia, czyli wypuszczenia gry na rynek, czy od momentu jej stworzenia – choćby w postaci prototypowej.

Ralph Baer z Magnavox Oddyssey pozwał Atari za kradzież gry. Według jego zeznań kilka lat wcześniej stworzył grę, w której rozgrywka była identyczna jak w grze „Pong”. Nolan Bushnell (Atari) był pierwszą osobą, która grała w prototyp gry stworzonej przez Ralpha. Gra się Nolanowi do tego stopnia spodobała, że szybko stworzył swoją wersję i wypuścił ją na rynek jako „Pong” właśnie [3].

Sprawa zakończyła się ugodą. Warty jednak odnotowania jest fakt, że do tej pory pomysły na gry są regularnie kopiowane, a polskie prawo w artykule 1. ustawy o prawie autorskim [19] jasno określa, że reguły i idee nie są chronione prawem autorskim.

### **Konflikt dotyczący gry Pac Man**

Kolejny znany z historii gier konflikt również dotyczył produktu wypuszczonego przez Atari. Analizując go, można by posłużyć się starym polskim powiedzeniem: nie rób drugiemu, co tobie niemiłe.

„K.C.Munchkin” (1980), gra produkcji Philips na automat Oddyssey II, była kopią gry bijącej rekordy popularności w latach 80. – „Pac Mana”. Gra wykorzystywała dokładnie te same zasady rozgrywki – celem gracza było uciekanie przed stworkami oraz zbieranie punktów. Choć „K.C.Munchkin”, z uwagi na ciągły rozwój technologiczny, posiadał nowe funkcje czy lepszą grafikę, podobieństwo do pierwowzoru było uderzające.

Atari oskarżyło Philips o kradzież.

Sąd przychylił się do wniosku Atari, po raz pierwszy stosując ochronę prawną do tzw. *look and feel* interfejsu [3]. Pojęcie to oraz jego znaczenie dla popularności danej gry komputerowej zostało szczegółowo wyjaśnione na portalu NewMediaLaw: „(...) oznacza wygląd oraz sposób użytkowania interfejsu. Ochrona udzielona jego autorowi ma ogromne znaczenie, gdyż przyzwyczajenie się użytkownika do danych elementów ekspresji powoduje jego niechęć do nabywania gier (ale także programów komputerowych, aplikacji) zakładających inny, nowy sposób komunikacji z komputerem. Nie ma ogólnych, sztywnych zasad określających, czy w danym przypadku nastąpiło skopiowanie *look and feel* innego utworu. Ocena taka powinna każdorazowo następować w oparciu o indywidualne elementy danych interfejsów”[3].

W tym miejscu istotne jest zaznaczenie, że choć wspomnianą sprawę wygrało Atari oskarżające o skopiowanie gry, aktualnie na rynku nieustannie pojawiają się „klony” znanych rozwiązań – w tym samego „Pac Mana”.

### **Konflikt dotyczący Donkey Konga**

Problem z wielką małpą, czyli Donkey Kongiem, grą na automaty z roku 1981, pojawił się w związku z główną postacią. Firma Nintendo została oskarżona przez wytwórnię filmową Universal Studios. Zarzut związany był z prawami do postaci... King Konga, do której Universal Studios posiada pełne prawa [3].

Obrońcy Nintendo jako argument podawali, że ogromna małpa zakorzeniona jest w popkulturze i świadomości ludzkiej na tyle mocno, że w tym wypadku stanowczo nie może być mowy o kopii. Sąd przychylił się do tej argumentacji.

W XXI wieku, w którym czarodziej w okularach jednoznacznie kojarzy się z Harrym Potterem, dekadenski wampir w cylindrze – z hrabią Draculą, a czarnowłosa dziewczynka w białej koszuli – z Samarą z filmu „The Ring”, problem znalezienia postaci na tyle oryginalnej, by żaden z twórców współczesnej popkultury nie mógł rościć sobie do niej prawa, jest dość trudny. Wszystko zależy od interpretacji, ale także od tego, w jakim stopniu twórca zna inne popkulturowe dzieła, ponieważ mnogość postaci może prowadzić do nieświadomych zapożyczeń.

### **Konflikt dotyczący Scramble**

Kolejny konflikt, który miał miejsce w latach 80., dotyczył gry „Scramble”. Sprawa rozgrywała się w Stanach Zjednoczonych, gdzie autorzy mają prawo wyboru formularza służącego do zgłaszania dzieła. Autorzy mogą zgłosić grę albo jako dzieło audiowizualne, albo utwór literacki. Autorzy gry „Scramble” zdecydowali się na pierwszą z tych opcji.

Problem pojawił się, ponieważ firma Konami nie zgłosiła kodu programu, a jedynie nagrania z rozgrywki w dwóch trybach: *attract mode* oraz *play mode* [14]. Problem ten szczegółowo wyjaśnia Sebastian Wiśniewski: „Było to podstawą do podniesienia przez stronę pozwaną zarzutów, że utwór audiowizualny w postaci gry nie jest ani utrwalony, ani też oryginalny w rozumieniu § 102(a) Copyright Act. Oba zarzuty wynikały z faktu, że sekwencja obrazów pojawiających się na ekranie podczas każdej gry będzie inna, zależnie od tego, jakie działania podejmie gracz podczas danej rozgrywki. (...) Czy z faktu, że gracz ma wpływ na wyświetlane sekwencje wynika, że nie mogą one zostać jednak uznane za utwór audiowizualny? (...) Mimo że kolejność obrazów może być inna, a dźwięki odtwarzane w różnym czasie, to sekwencje obrazów należy za utrwaloną i możliwą do wielokrotnego odtworzenia, a przez to zdolną do objęcia ochroną przyznawaną utworom audiowizualnym” [14].

Ostatecznie sąd przychylił się do uznania, że sekwencje obrazów i dźwięków mogą być traktowane jako utwór audiowizualny.

### **Co powoduje konflikty – podstawowe problemy**

Gry komputerowe cechuje wielość tematyczna i stylistyczna. To, że można je traktować jako utwór chroniony prawem autorskim, nie podlega dyskusji, ponieważ gry spełniają najważniejsze przesłanki charakteryzujące utwór w rozumieniu prawa autorskiego:

- a) stanowią rezultat pracy człowieka,
- b) mają indywidualny charakter,
- c) stanowią przejaw działalności twórczej [19].

I nie ma tu znaczenia, czy mowa o grach jako utworach składających się z poszczególnych elementów, czy o grach jako końcowym produkcie. Problem jednak dotyczy tego, do jakiej kategorii utworów gry komputerowe można zaliczyć.

Niektóre spośród gier (jak na przykład „Angry Birds”, „Floppy Bird”, „World of Goo”) tworzone są przez niewielkie studia, często nawet jedno- czy dwuosobowe. Inne gry („Wiedźmin”, „Dying Light”, „Grand Theft Auto”) to rozbudowane projekty, w których tworzeniu udział bierze grono programistów, grafików, dźwiękowców, producent, a nawet coraz częściej aktorzy. Na rynku pojawiają się gry komputerowe zwane grami-doświadczeniami, w których rozgrywka sprowadzona zostaje do niezbędnego minimum, a najistotniejsza dla gracza staje się przedstawiona historia („The Path”, „Journey”). Gatunek ten zapożycza z wielu innych i na tę chwilę dopiero się wykształca, nie posiada więc jednoznacznej klasyfikacji. W języku angielskim gry-doświadczenia często klasyfikuje się do kategorii gier artystycznych. W tym miejscu pojawia się ważny problem dotyczący definicji gry komputerowej samej w sobie, z uwagi na to, że gry-doświadczenia przełamują wiele dotychczasowych schematów (choćby zmieniona zostaje proporcja pomiędzy udziałem gracza w rozgrywce a warstwą fabularną). Istnieją także gry („2048”, „Otchłań”, „Parameters”), w których nie doświadczymy wyszukanej grafiki, rozgrywka będzie opierać się na prostej formie tekstowej stworzonej przez programistę czy w przypadku gier przeglądarkowych – na podstawowych elementach strony www. W końcu należy brać pod uwagę gry bazujące na znanych nam wcześniej ze świata rzeczywistego zabawach (szachy, warcaby).

Jak powyżej przedstawiono, podstawowym problemem jednoznacznej prawnej klasyfikacji gier komputerowych jest ich różnorodność. Wydaje się, że najrozsądniejszą opcją byłoby zatem omawianie kwestii praw autorskich osobno w temacie każdego z gatunków. Nie jest to jednak rozwiązanie optymalne, ponieważ tak jak w literaturze czy w filmie, tak samo w grach gatunki się przeplatają, a pojawianie się zupełnie nowych, odrębnych gatunków sprawiłoby za-

pewne, że stworzona klasyfikacja byłaby nieaktualna już w momencie jej wprowadzenia do ustawodawstwa.

Warto także nadmienić, że jednym z podstawowych problemów dotyczących praw autorskich wobec gier jest kwestia związana z pomysłem na grę. Każda gra składa się z zasad i reguł. Zatem, zdawałoby się, że pomysł na grę powinien także być chroniony. Jednak znaczyłoby to, że wszelkie komputerowe scrabble, szachy czy inne znane ze świata analogowego gry byłyby tworamielegalnymi. Polskie prawo jednoznacznie wyjaśnia ten problem. Według artykułu 1. ustawy 2. pkt. 9 Prawa autorskiego „reguły, idee i procedury nie korzystają z ochrony praw autorskich [19]. Z drugiej jednak strony czy pomysłodawca zupełnie nowatorskiego systemu rozgrywki nie powinien być chroniony? Czy zamiast prawa autorskiego nie należałoby na przykład rozważyć skorzystania z prawa patentowego, skoro nasz analogowy świat coraz częściej przenosi się do świata cyfrowego?

W tym miejscu należy zadać pytanie odnośnie do postrzegania gry komputerowej jako zbioru elementów składowych. Ireneusz Matusiak, radca prawny, w swoim artykule z „Kwartalnika Urzędu Patentowego RP” nr 1/2013 skłania się ku temu, by grę postrzegać jako całość, z uwagi na fakt, że odbiorcę końcowego – gracza – nie interesują poszczególne elementy tworzące grę (kod binarny, tekstury, kod shaderów, modele postaci, system oświetlenia, wybrane ścieżki dźwiękowe), lecz efekt końcowy, który zobaczy na ekranie w postaci kompletnej, grywalnej gry [10]. Podobnie uważa mecenas Barbara Celejowska, twierdząc w artykule „Prawa autorskie a gry komputerowe”, że „pomimo tego, że nad jej stworzeniem pracuje na różnych płaszczyznach wiele osób, to pozostaje ona jednym utworem, a po oddzieleniu jednej z w/w płaszczyzn (np. graficznej), traci swoje indywidualne właściwości” [3]. Także amerykańskie prawo definiuje grę jako jeden, końcowy utwór, o czym świadczy analiza wykonana przez Sebastiana Wiśniewskiego: „Pozostawienie możliwości wyboru formularza rejestracji nie zmienia jednak zasadniczo stanowiska Copyright Office, które w każdym przypadku traktuje grę komputerową jako jeden utwór, który chroniony jest w każdym aspekcie, zarówno wizualnym, jak i programistycznym, niezależnie od zastosowanego formularza” [14] (mowa tu o formularzu, który należy wypełnić, gdy utwór ma być uznany za chroniony prawem autorskim i który wypełnia autor).

Na kolejny problem, a mianowicie – jakie prawa przysługują producentowi, uwagę zwraca Elżbieta Traple w monografii „Ochrona gry prawnej. Aktualne wyzwania prawne” – „Przedstawiciele doktryny zajmujący się prawnymi aspektami wideogier zgodnie zwracają uwagę na to, że najbardziej dotkliwy wydaje się brak regulacji dotyczącej nabywania praw przez producenta gry” [13].

W „Dzienniku Gazeta Prawna” z 3 stycznia 2013 roku, artykule pt. „Angry Birds należy objąć ochroną” zwrócono uwagę nie tylko na prawa autorskie dotyczące samej gry. Problem pojawia się w związku z ochroną postaci gry –

jak na przykład wspomnianych w artykule słynnych Wściekłych Ptaszków (ang. angry birds), które aktualnie stały się bohaterami maskotek, pojawiają się na gadżetach, a nawet mówi się o rzekomym filmie, który miałby z wykorzystaniem postaci z tej gry powstać [16]. Tutaj nasuwa się kolejne pytanie związane z tym, jak daleko powinna być posunięta ochrona dotycząca praw autorskich do gier, a w szczególności do stworzonych przez autorów gier postaci, historii, grafik.

### **Gra jako program**

W polskim ustawodawstwie nie istnieje jednoznaczna definicja programu komputerowego. W artykule pt. „Ochrona prawna programu komputerowego i jego eksploatacja w przedsiębiorstwie” Wojciech Gierszewski, prawnik specjalizujący się we własności praw intelektualnych, zwraca uwagę na fakt, że: „Polskie prawo nie definiuje w żaden sposób pojęcia programu komputerowego. Jest to powszechna praktyka w ustawodawstwach niemalże wszystkich krajów, a ma na celu uniknięcie dezaktualizacji definicji, jaka może nastąpić w obliczu rozwoju nowych rodzajów i form oprogramowania komputerowego. Doktryna prawa posługuje się szeroką definicją programu komputerowego jako zestawu instrukcji wykonywanych bezpośrednio lub pośrednio przez komputer w celu osiągnięcia określonego rezultatu” [5]. Przyjmując zatem tę doktrynę, należy rozważyć, czy traktowanie gry jako programu jest podejściem prawidłowym. Warto tu także nadmienić, że w polskim prawie grę komputerową chronią identyczne przepisy, jakie dotyczą utworu literackiego [19].

Za tym poglądem stanowi przede wszystkim fakt, że gra bez programu nie mogłaby istnieć. To właśnie program komputerowy stoi za mechaniką rozgrywki, czyli aspektem, bez którego gra nie byłaby grą, a stałaby się po prostu utworem audiowizualnym. W tym miejscu warty odnotowania jest fakt, że coraz częściej gry tworzy się z wykorzystaniem gotowych silników do tworzenia gier czy też bibliotek. Jeśli więc twórcy danej gry korzystają z gotowego silnika, powinni mieć na uwadze problem dotyczący tego, na ile ich praca – czyli w tym przypadku tworzony kod – jest twórczy, a na ile odtwórczy. Na ten problem zwraca uwagę m.in. Sebastian Wiśniewski. Dowiadujemy się, że „(...) sam silnik gry stanowi program komputerowy w rozumieniu prawa autorskiego, a więc tworzona gra zawsze będzie stanowiła utwór zależny” [14].

Z drugiej jednak strony należy zaznaczyć, że „aspekty techniczne tworzenia i budowy gier komputerowych sprawiają jednak, że ich ochrona prawna wyłącznie jako programu komputerowego może okazać się niewystarczająca z punktu widzenia interesów twórców i producentów, w zakresie elementów artystycznych i kreatywnych wchodzących w skład gry” [16]. Za poglądem, że gra nie może być jednoznacznie traktowana jak program, opowiada się też Ireneusz Matusiak. W swojej książce twierdzi on, że „(...) wyłącznie z techniczne-

go (informatycznego) punktu widzenia zapis binarny gry komputerowej uzasadnia potraktowanie gry jako programu komputerowego. (...) Program komputerowy, mimo że jest elementem niezbędnym w strukturze gry komputerowej, pełni w rzeczywistości rolę podrzędną techniczną w stosunku do gry” [11].

Uwzględniając te aspekty, gra przestaje być wyłącznie programem, staje się bowiem produktem, w którego fundamentach faktycznie stoi program, ale jako końcowe dzieło składa się z tak wielu elementów, że jednoznaczna klasyfikacja gry jako programu byłaby niesprawiedliwa wobec pozostałych osób zaangażowanych w tworzenie gry i – przede wszystkim – niewystarczająca, by ochronić takie elementy, jak grafikę, muzykę, scenariusz.

### **Gra jako dzieło zbiorowe**

Traktowanie gry komputerowej jako dzieła zbiorowego jest kolejną z branych przez prawników pod uwagę możliwości. Polskie prawo definiuje dzieło zbiorowe jako „utwór stworzony przez większy zespół autorów, zgodnie z ustaloną przez wydawcę koncepcją całości; prawo do poszczególnych części dzieła zbiorowego mających samodzielne znaczenie przysługuje ich autorom; prawo do całości dzieła zbiorowego i do jego tytułu przysługuje wydawcy” [17].

Definicja ta zdaje się być idealną opcją, doskonale charakteryzującą grę komputerową, a nawet uwzględniającą jej wydawcę. Jak jednak udowadnia Sebastian Wiśniewski, problemów związanych z klasyfikacją gry jako dzieła zbiorowego może być kilka. Przede wszystkim w dziele zbiorowym twórcy nie muszą znać końcowego kształtu dzieła. Wystarczy, że dostarczą składowe elementy. W przypadku gry komputerowej takie podejście nie jest możliwe – gra stanowi spójne dzieło, mocno zespolonych ze sobą elementów. Twórcy muszą na bieżąco się komunikować odnośnie końcowego efektu gry. Ponadto wszystkie elementy na etapie tworzenia gry komputerowej są ze sobą łączone. W dziele zbiorowym mamy jedynie do czynienia ze zbiorem elementów, które nie muszą być w żadnym stopniu ze sobą powiązane [14].

### **Gra jako utwór audiowizualny**

Utwory audiowizualne stanowią grupę utworów z artykułu 1. ustawy 2. pkt 9 [19]. Jednak – jak w przypadku programów komputerowych – ustawa ta nie zawiera jednoznacznej definicji. By zrozumieć, czym jest utwór audiowizualny, należy wiedzieć, że do tej kategorii zalicza się przede wszystkim filmy. Cechą charakterystyczną utworów audiowizualnych jest ich odbiór przez obserwatora za pomocą zmysłów wzroku czy słuchu. Należy także pamiętać, że kluczowy element stanowi możliwość dostrzeżenia w utworze ruchu obrazu – tak jak występuje w filmach. Kolejnym istotnym czynnikiem pozwalającym zakwalifikować gry komputerowe jako utwory audiowizualne jest skomplikowany

proces tworzenia czy współpraca wielu podmiotów. Ważnym faktem przemawiającym za klasyfikacją gier komputerowych są także nakłady finansowe.

Sebastian Wiśniewski w swojej pracy jasno definiuje utwory audiowizualne: „Obecnie można przyjąć, że pojęcie utworu audiowizualnego obejmuje nie tylko *klasyczne* dzieła kinematograficzne, ale także filmy rysunkowe, filmy wykorzystujące technikę komputerową (niektóre w technice powstania bardzo zbliżone do gier komputerowych, bądź wręcz bezpośrednio na nich oparte), a także pomniejsze formy audiowizualne” [14].

Jakkolwiek część produkowanych aktualnie gier komputerowych spełnia wymogi stawiane utworom audiowizualnym, tak pojawiają się dwa istotne zagadnienia, dyskredytujące możliwość jednoznacznej klasyfikacji:

a) Nie każda gra spełnia wszystkie wymogi. Niewielkie gry logiczne często nie składają się z ruchomych obrazów w rozumieniu znanym nam z kinematografii. Inne gry nie spełniają wymogów dotyczących znaczących nakładów finansowych. Natomiast gry tworzone przez niewielkie studia (nawet jedno- czy dwuosobowe) nie spełniają wymogu współpracy wielu podmiotów.

b) Fakt, że gra polega przede wszystkim na rozgrywce, sprawia, że gry nie sposób przyrównać do filmu, w którym to sekwencja obrazów jest zawsze stała. W grach komputerowych to gracz decyduje o występowaniu kolejnych „scen”. Szczególnie widoczne jest to w grach o nieliniowym charakterze fabuły.

W tym miejscu warto także wspomnieć, że w wielu grach pojawiają się krótkie przerywniki filmowe, zwane cut-scenkami. Spełniają one wymogi stawiane utworom audiowizualnym i powinny być chronione przepisami tych utworów dotyczącymi.

### **Gra jako utwór współautorski**

Utwór współautorski jest to utwór, nad którego stworzeniem pracowało wielu twórców, a efekty ich działań doprowadziły do stworzenia gotowego utworu jako jednolitej całości. Przenosząc tę definicję na tematykę gier, można pokusić się o taką właśnie kategoryzację – gra bowiem składa się z wielu elementów, które w efekcie końcowym stworzyły gotowy – nowy – utwór. Gdyby z danej gry wyciąć któryś z elementów: grafikę czy muzykę – gra komputerowa straciłaby swój pierwotny, założony kształt. W utworze współautorskim wszystkie elementy są ze sobą ściśle zespolone, co odróżnia utwór współautorski od dzieła zbiorowego [19].

W przypadku tej klasyfikacji podstawowym problemem staje się pytanie o to, komu i jakie prawa do gry przysługują. W grze komputerowej nie zawsze jest możliwe precyzyjne wyszczególnienie, który z autorów, za który z elementów gry odpowiada. Każdy z autorów ma inny wkład w proces produkcji gry. Dodatkowo należy uwzględnić, że niektórzy z autorów korzystają z gotowych elementów (na przykład programista korzystający z bibliotek), a inni tworzą



swoją część od podstaw (na przykład grafik rysujący ilustracje do gry). Kolejnym istotnym problemem jest kwestia wydawcy bądź producenta – nie ma on swojego wkładu twórczego w powstanie gry, a jednak to on ponosi największe ryzyko dotyczące produkcji.

### **Gra jako utwór literacki**

Zaklasyfikowanie gry jako utworu literackiego stanowi ciekawostkę. Choć polskie sądownictwo w ogóle nie uwzględnia takiej praktyki, to cytując Sebastiana Wiśniewskiego „(...) W Stanach Zjednoczonych programy komputerowe uważane są generalnie za utwory literackie i w takiej też formie podlegają one rejestracji. Obecnie rejestracja nie jest już warunkiem przyznania ochrony, lecz jest konieczna w przypadku dochodzenia roszczeń związanych z naruszeniem praw autorskich. Copyright Office zapewnia szereg formularzy, które odpowiadają poszczególnym rodzajom utworów” [14]. Co ciekawe, amerykańskie prawo daje możliwość wyboru osobie rejestrującej grę – w zależności od tego, czy gra składa się przede wszystkim z wartości literackiej, czy graficznej, osoba może zarejestrować ją jako utwór literacki lub utwór audiowizualny. Nie jest to rozwiązanie jednoznaczne, prowadził bowiem do konfliktów (choćby opisanego w drugim rozdziale konfliktu dotyczącego gry „Scramble”).

W Polsce programy komputerowe podlegają ochronie tak samo, jak utwory literackie (Art. 74, par. 1, Pr. aut.) [19].

### **Gra jako utwór nienazwany**

Istotną z możliwości jest zakwalifikowanie gier komputerowych do kategorii „utworów nienazwanych”. Choć termin ten nie występuje wprost w prawie autorskim, to używany jest na określenie wszystkich utworów, które spełniają wymogi stawiane utworom, czyli „przedmiotem prawa autorskiego jest każdy przejaw działalności twórczej o indywidualnym charakterze, ustalony w jakiegokolwiek postaci, niezależnie od wartości, przeznaczenia i sposobu wyrażenia (utwór)” (Art. 1, ust. 1, Pr. aut.) [19].

Opcja ta nie rozwiązuje problemu, a jedynie stanowi szerokie pole do własnej interpretacji przepisów przez prawników i sędziów. Uwzględniając rozmiary rynku gier komputerowych, stosowanie tworzonych ad hoc interpretacji dopasowanych do poszczególnych tytułów mogłoby doprowadzić do chaosu. Brak jasno wyszczególnionych zasad dotyczących postępowania w danej sytuacji jest w sądownictwie sytuacją niebezpieczną, skłaniającą do nadużyć i kładącą zbyt duży nacisk na własną interpretację problemu. Wypracowane techniki w prawie mają na celu lepszą ochronę praw autorskich i zaniechanie problemu braku klasyfikacji nie stanowi rozwiązania tego problemu.

### Gra jako gra komputerowa

W tym miejscu warto nadmienić, że niektóre kraje – jak na przykład Francja – zdefiniowały już jednoznacznie, czym jest gra komputerowa, choć nadal definicja ta nie występuje w kontekście praw autorskich. W przypadku Francji z definicją gry komputerowej spotykamy się w ustawie dotyczącej ulg podatkowych. Głosi, że gra to: „oprogramowanie udostępniane publicznie na nośniku materialnym lub online, zawierające elementy twórczości artystycznej i technologicznej, oferujące jednemu lub większej grupie użytkowników szereg interakcji opartych na symulacji w postaci ruchomych obrazów z dźwiękiem lub bez” [14].

### Podsumowanie rozdziału

W tabeli 1 uporządkowano rozważania dotyczące poszczególnych kategorii.

Tabela 1. Podsumowanie przedstawionych klasyfikacji i ich charakterystyki

Kategoria	Charakterystyka
<b>Program</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Zestaw instrukcji wykonywanych przez komputer w celu osiągnięcia określonego rezultatu.</li> <li>2. Chroniony tymi samymi prawami co utwór literacki.</li> </ol>
<b>Dzieło zbiorowe</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Utwór stworzony przez grupę autorów.</li> <li>2. Prawo do poszczególnych części dzieła przysługuje autorom, natomiast prawo do całości dzieła przysługuje wydawcy.</li> <li>4. Autorzy nie muszą znać efektu końcowego w momencie tworzenia elementów.</li> <li>5. Elementy dzieła zbiorowego nie muszą być ze sobą powiązane.</li> </ol>
<b>Utwór audiowizualny</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Odbiór za pomocą zmysłów wzroku i słuchu.</li> <li>2. Ruchome obrazy, jasno określone sekwencje.</li> <li>3. Do tej kategorii należą filmy.</li> <li>4. Skomplikowany proces tworzenia.</li> <li>5. Współpraca wielu podmiotów.</li> <li>6. Duże nakłady finansowe.</li> </ol>
<b>Utwór współautorski</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Utwór składający się z wielu elementów wykonanych przez różnych autorów, które zebrane w całość i ze sobą zespolone tworzą nowy utwór.</li> <li>2. Nie uwzględnia praw autorskich dla wydawcy czy producenta.</li> </ol>

Kategoria	Charakterystyka
<b>Utwór współautorski</b>	3. Wymaga określenia kto włożył jaką część w dzieło końcowe, by móc jasno zdefiniować komu jakie prawa się należą. 4. Każdy z współautorów już na etapie prac powinien znać zamierzony efekt końcowy.
<b>Dzieło literackie (Stany Zjednoczone)</b>	1. Jedna z dwóch kategorii przyznawanych grom w Stanach Zjednoczonych. 2. W polskim prawie programy komputerowe i dzieła literackie chronione są identycznie.
<b>Utwór nienazwany</b>	1. Każdy utwór, który nie zalicza się do innych kategorii.
<b>Gra komputerowa (Francja)</b>	1. Oprogramowanie udostępniane publicznie na nośniku materialnym lub online, zawierające elementy twórczości artystycznej i technologicznej, oferujące jednemu lub większej grupie użytkowników szereg interakcji opartych na symulacji w postaci ruchomych obrazów z dźwiękiem lub bez. 2. Definicja ta nie występuje w kontekście prawa autorskiego i nie ma na nie wpływu.

### Rozwiązanie problemu – propozycje

Rozważając możliwe rozwiązania, koniecznie trzeba brać pod uwagę czas ich wprowadzenia w życie. Najrozsądniejszym spośród rozwiązań zdaje się utworzenie nowej kategorii dla gier komputerowych, na tyle pojemnej, by uwzględniła wszystkie gatunki i niuanse. Należy jednak pamiętać, że jest to rozwiązanie praco-, a przede wszystkim czasochłonne. Problemy dotyczące praw autorskich gier komputerowych występują tu i teraz, dlatego nim zostanie zmienione prawo, należy obrać prawidłową technikę reagowania, najbardziej adekwatną do problemu.

### Elastyczny wybór kategorii – rozwiązanie ad hoc

W ramach pierwszego zaproponowanego rozwiązania wybrana została opcja umożliwiająca elastyczne przyporządkowywanie gier komputerowych.

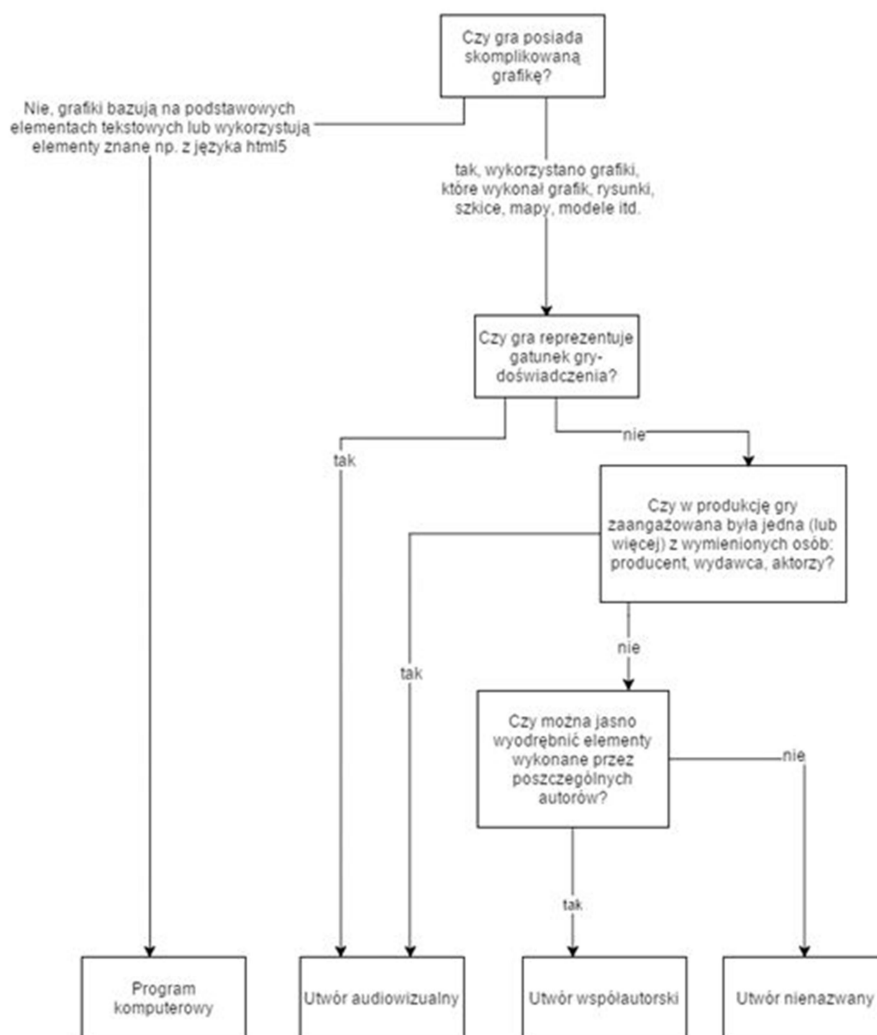
Zamiast stosowania jednoznacznej i identycznej definicji dla każdej gry, postanowiono podzielić gry ze względu na ich cechy charakterystyczne i według tego przyporządkowywać gry do danych kategorii utworów prawnie chronionych. Przedstawiony na rysunku 1. diagram ma na celu ułatwienie zaklasyfikowania gry do danej kategorii prawnej w zależności od indywidualnych cech tej gry. Wybierając odpowiedzi na pytania charakteryzujące daną grę, otrzymujemy jasny obraz tego, do której z kategorii rozważaną grę należałoby przypisać. Rozwiązanie to wykorzystuje fakt, że gry komputerowe są do tego stopnia różnie skonstruowane, a stworzenie nowego przepisu ich dotyczącego – czasochłonne, że należało znaleźć rozwiązanie, które być może nie będzie rozwiązaniem pełnym, ale na pewno optymalnym i uwzględniającym aktualną sytuację prawną. W diagramie celowo nie uwzględniono kategorii „dzieło zbiorowe”, gdyż jak udowodniono w rozdziale trzecim, rozdzielnny charakter elementów w dziele zbiorowym uniemożliwia przyporządkowanie gier do tej kategorii.

### **Stworzenie kategorii gier komputerowych – rozwiązanie przyszłościowe**

W ogólnym rozumieniu najlepszą klasyfikacją okazuje się utwór współautorski, aczkolwiek istnieją gry komputerowe, które należałoby rozpatrywać w ramach innej kategorii. W przyszłości należałoby ustanowić jednoznaczna definicję gry komputerowej – choćby idąc przykładem definicji francuskiej. Ochrona tak zdefiniowanej gry przypominałaby ochronę utworu współautorskiego, z tym że należałoby rozbudować ją o prawa dla producenta, wydawcy czy aktorów (np. w grach wykorzystujących technologię motion-capture). Najlepszym zatem rozwiązaniem byłoby powiązanie znanych definicji i z każdej z nich wybranie tych elementów, które są konieczne, czyli:

- a) ochronę kodu programu (na przykładzie programu komputerowego),
- b) ochronę elementów audiowizualnych (na przykładzie utworu audiowizualnego),
- c) ochronę gry jako całości (na przykładzie utworu współautorskiego),
- d) uwzględnienie praw autorskich dla dodatkowych osób zaangażowanych w produkcję gry, ze szczególnym uwzględnieniem producenta.

Stworzona z wykorzystaniem tych zasad definicja gry komputerowej powinna w stopniu wystarczającym określić, w jaki sposób chroniona jest gra – zarówno jako utwór końcowy, jak i zbiór elementów.



Rys. 1. Diagram ułatwiający przyporządkowanie gry do danej kategorii w zależności od jej cech charakterystycznych

## Uwagi końcowe

W artykule przedstawiono stosowane dotychczas rozwiązania dotyczące klasyfikacji gier komputerowych. Uwzględnione zostały rozważania prawników i przedstawione poglądy z różnych prac badawczych. Jak zauważono, problem ochrony prawnej gier komputerowych wynika z ich rozbudowanej formuły, faktu, że na grę składa się wiele czynników, a przede wszystkim z ich wielorakości gatunkowej. W artykule wykonano analizę dopasowywania gier do znanych już kategorii, a także zaprezentowano prosty algorytm wyboru, do jakiej kategorii, jaką grę powinno się przyporządkować. Jest to zaproponowane rozwiązanie tymczasowe, które powinno uporządkować sprawy sądowe, nim gry komputerowe doczekają się osobnej kategorii w prawie autorskim (którą to kategorię, z uwagi na niepodobieństwo gier do innych utworów autorskich, powinny gry dostać).

Celowo w artykule została pominięta tematyka związana z prawami majątkowymi, które są na tyle rozległym tematem, że wyczerpałyby pojemność artykułu. Pominięto także kwestie związane z prawami autorskimi do wirtualnych przedmiotów wytwarzanych przez graczy w trakcie gry (zjawisko spotykane między innymi w grach MMORPG). W końcu pominięta została także tematyka ustalenia gry komputerowej, czyli momentu, od którego można zacząć uznawać grę za ukończony, prawnie chroniony, produkt.

## Literatura

- [1] Balicki M., *Klony gier komputerowych: inspiracja czy plagiat?*, LooKreatywni – pierwszy serwis o prawie własności intelektualnej dla ludzi kreatywnych, 1.10.2015, [dostęp: 10.12.2016], w: <http://lookkreatywni.pl/kategorie/nowe-technologie/plagiat-gry-komputerowej/>.
- [2] Bartosik D., *Kamienie milowe w grach*, „CD-Action”, s. 100–102. Wydawnictwo Bauer, 11/2010.
- [3] Celejowska B., *Prawa autorskie a gry komputerowe*, NewMediaLaw, 25.08.2014, [dostęp: 10.12.2016], w: <http://newmedialaw.pl/prawa-autorskie-a-gry-komputerowe/>.
- [4] Flisak D., *Utwór Multimedialny w prawie autorskim*, Oficyna, 2008.
- [5] Gierszewski W., Wilkowski P., Korboński Ł., *Ochrona prawna programu komputerowego i jego eksploatacja w przedsiębiorstwie*, PARP, 12.11.2013, [dostęp: 20.12.2016], w: [https://www.web.gov.pl/e-punkt\\_pr-aut\\_i\\_dobra\\_osobiste/308\\_1021.html](https://www.web.gov.pl/e-punkt_pr-aut_i_dobra_osobiste/308_1021.html).
- [6] *Historia gier komputerowych*, [dostęp: 16.12.2016], w: [https://pl.wikipedia.org/wiki/Historia\\_gier\\_komputerowych#cite\\_note-CDA-11-2010-1](https://pl.wikipedia.org/wiki/Historia_gier_komputerowych#cite_note-CDA-11-2010-1).

- 
- [7] Kamiński P., *Gracze pokochali wirtualną farmę, ciężarówki i inne symulatory. Ale właściwie za co?*, Polygamia.pl, 1.11.2013, [dostęp: 10.12.2016] w: [http://polygamia.pl/Polygamia/1,96455,14882925,Gracze\\_pokochali\\_wirtualna\\_farme\\_ciezarowki\\_i\\_inne.html](http://polygamia.pl/Polygamia/1,96455,14882925,Gracze_pokochali_wirtualna_farme_ciezarowki_i_inne.html).
- [8] Kurlanc O., *Rozkład kosztów podczas cyklu życia projektu*, 9.03.2015, [dostęp: 1.01.2016], w: <http://jestempm.pl/koszty-podczas-cyklu-zycia-projektu>.
- [9] Matusiak I., *Postacie świata wirtualnego w prawie autorskim*, „Przegląd Prawa Handlowego”, Lipiec 2009.
- [10] Matusiak I., *Czy gra komputerowa jest chroniona prawem autorskim*, „Kwartalnik Urzędu Patentowego RP”, styczeń 2013.
- [11] Matusiak I., *Gra komputerowa jako przedmiot prawa komputerowego*, Wolters Kluwer Polska, 2013.
- [12] Pul P., *Komu przysługują prawa autorskie do gry komputerowej?*, LawMore, 11.11.2013, [dostęp: 20.12.2016], w: <http://lawmore.pl/komu-przysluguja-prawa-autorskie-do-gry-komputerowej/>.
- [13] Traple E., *Ochrona gry komputerowej – aktualne wyzwania prawne*, Wolters Kluwer Polska, 2015.
- [14] Wiśniewski S., *Prawnoautorska ochrona programów komputerowych z uwzględnieniem problematyki prezentacji ekranowych i gier komputerowych*, Praca magisterska na kierunku prawo, Uniwersytet Jagielloński, Wydział Prawa i Administracji, Kraków 2011.
- [15] Wiśniewski S., *Prawnoautorska kwalifikacja gier komputerowych - program komputerowy czy utwór audiowizualny?*, „Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Jagiellońskiego” 2012, nr 115.
- [16] *Angry Birds należy objąć ochroną*, „Dziennik Gazeta Prawna”, 03.01.2013.
- [17] *Słownik Pojęć*, Regionalny System Innowacji Zachodniopomorska Sieć Lokalnych Ośrodków Transferu Technologii i Innowacji, [dostęp: 11.12.2016], w: <http://www.rsi.org.pl/index.php/pl/Dzielo-zbiorowe--50,65.html>.
- [18] *The international arcade museum*, [dostęp: 15.12.2016], w: [http://www.arcade-museum.com/game\\_detail.php?game\\_id=9074](http://www.arcade-museum.com/game_detail.php?game_id=9074).
- [19] Dz. U. 1994 Nr 24 poz. 83, *USTAWA z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych*, [dostęp: 20.12.2016], w: <http://isap.sejm.gov.pl/DetailsServlet?id=WDU19940240083>.
- [20] *Niezależna gra komputerowa*, [dostęp: 1.01.2016], w: [https://pl.wikipedia.org/wiki/Niezale%C5%BCna\\_gra\\_komputerowa](https://pl.wikipedia.org/wiki/Niezale%C5%BCna_gra_komputerowa).







**Jerzy Krawiec**

*Politechnika Warszawska*

*Plac Politechniki 1, 00-661 Warszawa*

*e-mail: j.krawiec@wip.pw.edu.pl*

## WPŁYW PROGRAMOWANIA RÓWNOLEGŁEGO NA WYDAJNOŚĆ PROGRAMU JAVY

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono praktyczne aspekty programowania obiektowego w języku Java w zakresie programowania równoległego, czyli techniki stosowanej w celu wykorzystywania komputerów wieloprocesorowych (lub wielordzeniowych). Przedstawiono mechanizmy, które zapewniają programistom Javy korzystanie z wielu procesorów w przejrzysty i skalowany sposób. Zaprezentowano mechanizmy wspierające techniki programowania równoległego. Przedstawiono technikę rekurencji w ramach strategii „Dziel i zwyciężaj” oraz zasady przetwarzania sekwencyjnego. Zbadano możliwości zwiększenia kodu programu Javy w zakresie technik programowania równoległego na przykładzie frameworku *Fork/Join*. Przedstawiono możliwości tego frameworku pod kątem zwiększenia wydajności programu Javy. Przeprowadzono pomiary czasu wykonania programu dla różnych poziomów równoległości oraz różnych progów przetwarzania sekwencyjnego. Wykazano, że odpowiednia konstrukcja kodu Javy może znacznie skrócić czas wykonywania programu Javy, co przekłada się na wydajność programu.

**Słowa kluczowe:** programowanie, programowanie równoległe, Java, framework, wydajność programu, czas wykonania programu.

## THE IMPACT OF PARALLEL PROGRAMMING ON PERFORMANCE OF JAVA PROGRAM

**Abstract.** The article presents the practical aspects of object-oriented programming language Java in the field of parallel programming, a technique used in order to use multiprocessor computers (or multi-core). Mechanisms supporting parallel programming techniques were presented. Recursion technique in the framework of the "Divide and conquer" and the principle of sequential processing were presented. We examined the possibility of increasing the Java code program in the field of parallel programming

on the example framework Fork/Join. The possibilities of this framework to improve performance of a Java program were presented. The measurements of the program runtime for different levels of parallelism and different thresholds for sequential processing were conducted. It has been shown that proper design of Java code can significantly shorten the duration of the program Java, which translates to program performance.

**Keywords:** Programming, parallel programming, Java, code efficiency, framework, runtime.

## Wprowadzenie

Większość nowoczesnych języków programowania jest kompilowana do kodu wykonywalnego, co zapewnia większą wydajność systemu. Jednakże w Javie wyjściem generowanym przez kompilator języka jest interpreter kodu bajtowego, zwany maszyną wirtualną Javy (JVM<sup>1</sup>). Kod bajtowy to zoptymalizowany zestaw instrukcji. Interpretacja programu do kodu bajtowego znacznie ułatwia uruchomienie programu na wielu platformach (środowiskach), przez co uzyskuje się efekt przenośności – jedną z najważniejszych cech Internetu. Przenośność to możliwość uruchomienia programu na maszynie o dowolnej liczbie procesorów/rdzeni. Takiej przenośności nie można uzyskać w przypadku kodu wykonywalnego [1].

Ogólnie rzecz ujmując, program skompilowany do postaci pośredniej (bajtowej) i interpretowany przez JVM działa wolniej niż program skompilowany do postaci wykonywalnej. Jednakże różnica w wydajności może okazać się nieznacząca, jeżeli kod programu jest odpowiednio zapisany.

Powszechnie obecnie stosowane formy wykonania programu są określane mianem przetwarzania współbieżnego, równoległego i rozproszonego. Programem może być system operacyjny, kompilator języka programowania, maszyna wirtualna, np. JVM, lub program użytkowy. Wykonanie programu to realizacja określonych rozkazów i instrukcji, których celem jest rozwiązanie określonego problemu obliczeniowego. Rozkazy to pojedyncze polecenia realizowane przez procesory, które nie są bezpośrednio związane z kodem programu. Zbiór rozkazów dotyczy konkretnego uruchomienia programu. Konkretna czynność związana z wykonaniem programu jest przypisana danemu rozkazowi determinowanemu przez dane wejściowe programu. Natomiast instrukcje wykonują bardziej złożone zadania definiowane w postaci kodu i tłumaczone na rozkazy procesora. Zbiór rozkazów z reguły jest dzielony na podzbiory, gdzie rozkazy są wykonywane w sposób sekwencyjny, czyli w kolejności zdefiniowanej przez pro-

---

<sup>1</sup> Java Virtual Machine.

gramistę lub według kolejności określonej przez kompilator kodu źródłowego. Takie wykonanie kodu programu nazywane jest wątkiem.

Przetwarzanie współbieżne to sytuacja, w której rozkazy jednego wątku zaczynają się wykonywać już w momencie, gdy poprzedni wątek nie jest jeszcze zakończony. Jeżeli przynajmniej dwa rozkazy wątków wykonywanych współbieżnie są realizowane w tym samym czasie, to wtedy mamy do czynienia z przetwarzaniem równoległym. Przetwarzanie równoległe wymaga specjalistycznego sprzętu, np. maszyny z wieloma procesorami (rdzeniami) zarządzanej przez jeden system operacyjny, ale może być to także sieć komputerów, które mają swój system operacyjny. Uruchamianie współbieżne jest stosowane od wielu lat, program jest uruchamiany współbieżnie z innymi programami. Jest to zasługą przede wszystkim powszechnie stosowanych wielozadaniowych systemów operacyjnych. Program jest oddzielnym zbiorem rozkazów, które są wykonywane współbieżnie przez system operacyjny. W jednej sekundzie procesor wykonuje setki tysięcy operacji wejścia-wyjścia, ale przez znaczną część czasu jest w stanie uśpienia. Zatem przetwarzanie współbieżne jest pojęciem bardziej ogólnym w stosunku do przetwarzania równoległego. W związku z tym każde przetwarzanie równoległe jest przetwarzaniem współbieżnym, ale nie każde przetwarzanie współbieżne jest przetwarzaniem równoległym [2].

Kluczowymi elementami w programowaniu równoległym jest zidentyfikowanie współbieżności podczas realizacji programu. Współbieżności mogą mieć charakter twórczy lub techniczny. Zdefiniowanie synchronizacji pomiędzy procesorami oznacza, że model programowania jest znany. W tym aspekcie zapewnienie przenośności programu ma zasadnicze znaczenie.

Architektura wieloprocessorowa, a ściślej dostęp do pamięci operacyjnej przez poszczególne procesory, wpływa na tzw. zrównoleglanie programu. Pamięć współdzielona ułatwia programowanie i wpływa na wydajność programu, ponieważ umożliwia lepszą komunikację pomiędzy procesorami. Jednak należy pamiętać, że liczba procesorów, które mogą być w ten sposób połączone, jest ograniczona do kilkudziesięciu. Architektura bazująca na pamięci rozproszonej umożliwia łączenie znacznie większej liczby procesorów, rzędu kilku tysięcy, a koszty związane z jej zastosowaniem są znacznie niższe niż architektury bazującej na pamięci współdzielonej. Trzeba jednak liczyć się z tym, że programowanie staje się trudniejsze, a komunikowanie się między procesorami zachodzi wolniej w stosunku do architektury bazującej na pamięci współdzielonej [3].

Jednym z powszechnie stosowanych sposobów tworzenia programów równoległych jest zdefiniowanie metodologii. W jej ramy należałoby ująć wszystkie aspekty programowania równoległego. Taka metodologia zakłada pięć podstawowych zadań, które powinny być wykonane:

- dekompozycja zadań na podzadania;
- odwzorowanie zadań na procesy i wątki oraz elementy przetwarzania;

- podzielenie danych na elementy pamięci dotyczące elementów przetwarzania;
- zdefiniowanie sposobu wymiany danych między procesami oraz odzwierciedlenie go w sieci komunikacji między procesorami (rdzeniami);
- określenie sposobu synchronizacji procesów.

Specyficznym rodzajem stosowanej metodologii jest metodologia PCAM<sup>2</sup>, która zakłada dzielenie na zadania, określa sposób komunikacji oraz podział danych na wspólne i prywatne, określa sposób korzystania z danych, zapewnia synchronizację operacji na danych, analizę wariantów podziału oraz uwzględnia odwzorowanie programu na architekturę sprzętową [5]. Dość istotnym pojęciem w programowaniu równoległym jest równoległość danych, które oznacza model programowania, który definiuje sposób przydziału danych poszczególnym procesom oraz określa operacje na danych. Sama realizacja programu uwzględniająca komunikację i synchronizację procesów jest wykonywana przez środowisko (JVM) bez jawnego udziału programisty. W bardziej ogólnym (szerszym) sensie równoległość danych jest modelem tzw. zrównoleglenia danych poprzez dekompozycję danych, przydzielenie danych procesom i dopiero wykonanie programu zgodnie z jego twórcą. Model wykonania równoległego może być także rozważany jako model dekompozycji danych, gdzie na podstawie indeksu procesor ustala dane, na których operuje. Alternatywą takiego modelu jest model bazujący na równoległości sterowania, w którym na podstawie indeksu procesor określa ścieżkę realizacji programu lub iterację pętli.

Pomiędzy procesami powinna być zapewniona synchronizacja (uporządkowanie w czasie) i komunikacja (przesyłanie danych). Komunikacja polega na przesyłaniu do procesów (wątków) odpowiednich komunikatów, tzw. tokenów. Proces przesyłania może mieć charakter synchroniczny i asynchroniczny. Natomiast synchronizacja polega na zapewnieniu odpowiednich zależności czasowych w odniesieniu do procesów (wątków). Synchronizacja jest konieczna, gdy procesy mają wspólne struktury danych lub zapewniają dostęp do wspólnych zasobów [4].

Spełnienie wymagań programowania współbieżnego jest realizowane powszechnie za pomocą interfejsu Concurrent API<sup>3</sup>. Choć oryginalny interfejs był dość mocno rozbudowany i miał duże możliwości w zakresie tworzenia aplikacji wielowątkowych, to dopiero wprowadzenie frameworku *Fork/Join* umożliwia efektywne działanie programów w systemach wielordzeniowych [1]. Framework zapewnia rzeczywistą współbieżność, a nie sztuczny podział czasu procesora, co wprost przekłada się na czas wykonywania programu, a zatem i na jego wydajność.

---

<sup>2</sup> Partitioning Communication Agglomeration Mapping.

<sup>3</sup> Application Programming Interface.

Framework *Fork/Join* to mechanizm w postaci nowych klas i interfejsów wspierających programowanie równoległe. Framework został zdefiniowany w pakiecie *java.util.concurrent*. *Fork/Join* umożliwia wykorzystanie programowania wielowątkowego w dwojaki sposób:

- upraszcza tworzenie i stosowanie wielu wątków;
- automatycznie dostosowuje działanie do liczby dostępnych procesorów.

W systemach jednordzeniowych mechanizm wielowątkowości polega na współdzieleniu czasu procesora na poszczególne zadania, ale nie zapewnia optymalizacji przy wykorzystaniu systemów wielordzeniowych. W systemach wieloprocessorowych istnieje możliwość korzystania poszczególnych części kodu programowego z kilku procesorów jednocześnie. Takie środowisko umożliwia przyspieszenie niektórych operacji. Najważniejsze klasy frameworku to:

- *ForkJoinTask<V>*;
- *ForkJoinPool*;
- *RecursiveAction*;
- *RecursiveTask<V>*.

Klasa *ForkJoinTask<V>* to klasa abstrakcyjna, które definiuje zadanie i może być zarządzana przez obiekt typu *ForkJoinPool*. Parametr *V* określa typ danych zwracanych przez zadanie. Zadania typu *ForkJoinTask* są realizowane przez wątki, zarządzane przez pulę wątków typu *ForkJoinPool*. Zadania typu *ForkJoinTask* są bardziej efektywne niż wątki. Do najważniejszych metod zdefiniowanych przez klasę *ForkJoinTask<V>* należą:

- *final ForkJoinTask<V> fork()* – zwraca *this* po zaplanowaniu wykonania odpowiedniego zadania;
- *final V join()* – zwraca wynik zadania po jego zakończeniu, dla którego została wywołana;
- *final V invoke()* – inicjuje nowe zadanie, a po jego zakończeniu zwraca jego wynik.

Za pomocą metod *fork()* i *join()* można inicjować wiele zadań oraz wywoływać wiele zadań jednocześnie (metoda *invoke()*).

Klasa *ForkJoinPool* to klasa służąca do zarządzania zadaniami typu *ForkJoinTask*. Klasa definiuje następujące, najczęściej stosowane konstruktory [6]:

- *ForkJoinPool()* – domyślna pula zadań;
- *ForkJoinPool(int poziom)* – dodatkowo umożliwia określenie poziomu równoległości.

Do zarządzania wątków klasa *ForkJoinPool* stosuje mechanizm zwany wykradaniem zadań. Każdy wątek jest przypisany do kolejki zdarzeń. Jeżeli kolejka zdarzeń jakiegoś wątku jest pusta, zadanie jest odbierane innemu wątkowi. Taki mechanizm umożliwia zwiększenie wydajności programu i zapewnienie zrównoważone obciążenia.

Klasa *RecursiveAction* jest podklasą *ForkJoinTask<V>* i reprezentuje zadanie, które nie zwraca żadnego wyniku. *RecursiveAction* definiuje cztery metody, ale najczęściej stosuje się metodę *compute()*, która reprezentuje część obliczeniową zadania. Metoda ta jest definiowana następująco: *protected abstract void compute()*.

Klasa *RecursiveAction* jest wykorzystywana do implementacji strategii „Dziel i zwyciężaj” do zadań, które nie zwracają żadnego wyniku.

Klasa *RecursiveTask<V>* jest podklasą *ForkJoinTask<V>* i reprezentuje zadania, które zwracają wynik. Typ wyniku jest reprezentowany przez parametr *V*. Klasa ta definiuje najczęściej stosowaną metodę *compute()* w następujący sposób: *protected abstract V compute()*.

Klasa *RecursiveTask<V>* jest wykorzystywana do implementacji strategii „Dziel i zwyciężaj” do zadań, które zwracają jakiś wynik.

Strategia „Dziel i zwyciężaj” stosuje technikę rekurencji, polegającą na rekurencyjnym dzieleniu zadań na podzadania tak małe, aby można je było wykonać w trybie sekwencyjnym. Proces dzielenia zadania trwa dopóty, dopóki nie uzyskamy wartości progowej, od której przetwarzanie sekwencyjne zajmuje mniej czasu niż dalsze dzielenie zadań. Atutem tej strategii jest stworzenie możliwości równoległego przetwarzania danych. Kluczowym warunkiem efektywności strategii „Dziel i zwyciężaj” jest odpowiedni wybór progu, który stwarza możliwość przetwarzania sekwencyjnego. Optymalizacja progu przetwarzania sekwencyjnego zależy od czasu niezbędnego w celu przetworzenia danych. Dokumentacja API Javy rekomenduje od 100 do 10 000 kroków obliczeniowych dla pojedynczego zadania. Należy pamiętać, że oprócz aplikacji w Javie, również system operacyjny musi mieć dostęp do czasu procesorów, co oznacza, że program nie będzie miał nieograniczonego dostępu do wszystkich procesorów.

Poziom równoległości to liczba wątków, które mogą być wykonywane współbieżnie, co oznacza liczbę zadań realizowanych jednocześnie z zastrzeżeniem, że liczba tych zadań nie może być większa niż liczba procesorów. Domyślny konstruktor klasy *ForkJoinPool* oznacza, że program używa domyślnego poziomu równoległości odpowiadającej liczbie procesorów. Poziom równoległości może być określany poprzez utworzenie obiektu klasy *ForkJoinPool* według następującej wersji konstruktora: *ForkJoinPool(int poziom)*. Wartość parametru *poziom* określa poziom równoległości, który musi zawierać się w zakresie od 1 do wartości mniejszej niż wartość graniczna danej implementacji.

Do pomiarów czasu wykonywania programu najczęściej stosuje się metodę *nanoTime()* z klasy *System*. Metoda zwraca wynik z zegara z dokładnością rzędu nanosekund. W celu ułatwienia eksperymentów można wykorzystać następujące metody:

- *int getParallelism()* – metoda zdefiniowana w klasie *ForkJoinPool*;
- *int availableProcessors()* – metoda zdefiniowana w klasie *Runtime*.

Metoda *getParallelism()* jest stosowana do określenia bieżącego poziomu równoległości – domyślnie równego liczbie dostępnych procesorów.

Za pomocą metody *availableProcessors()* można określić liczbę dostępnych procesorów w systemie. Wynik zwracany przez tę metodę może być za każdym razem inny ze względu na żądania pozostałych procesorów pracujących w danym systemie.

## Badania wydajności programu Javy

Wszystkie pomiary przeprowadzono za pomocą komputera o następujących parametrach:

- procesor: Intel(R) Core™ i5-2520M CPU @ 2,5 GHz;
- pamięć RAM: 4GB;
- dysk: 112GB SSD;
- karta graficzna: Intel (R) HD Graphics 3000;
- system operacyjny: WINDOWS 7 64-bitowy;
- Java Platform (JDK) 8u73 / 8u74.

Wydajność programu jest funkcją czasu wykonania operacji wg następującego wzoru:

$$W = \frac{1}{t}$$

w którym:

*W* – wydajność kodu programu;

*t* – czas wykonania programu.

Różne wartości czasu wykonywania operacji są wynikiem wahań wydajności procesora, która jest trudna do ustalenia w momencie pomiaru. Dlatego też obliczano wartość średnią czasu wykonania operacji na podstawie 100 pomiarów, a w tabeli wyników uwzględniono 10 najmniejszych wartości czasu wykonania programu każdego wariantu. Do pomiaru czasu wykonania programu służącego do tworzenia zadania frameworku *Fork/Join* przypisano pierwiastek sześcienny z liczb, będących elementami tablicy.

W badaniach użyto następującego kodu źródłowego (badania przeprowadzono dla poziomów równoległości 1 i 2 oraz progów przetwarzania sekwencyjnego: 100, 300, 700, 1 000, 3 000, 7 000, 10 000):

```
import java.util.concurrent.*;  
class Tablica extends RecursiveAction {  
    int progi_sekw;  
    double[] dane;
```

```
int start, end;
Tablica(double[] abc, int a, int b, int p) {
dane = abc;
start = a;
end = b;
progi_sekw = p;
}
@Override
protected void compute() {
if((end - start) < progi_sekw) {
for(int i = start; i < end; i++) {
dane[i] = Math.cbrt(dane[i]);
}
}
else {
int middle = (start + end) / 2;
invokeAll(new Tablica(dane, start, middle, progi_sekw),
new Tablica(dane, middle, end, progi_sekw));
}
}
}
class Framework {
public static void main(String jekr[]) {
int poziom;
int progi;
if(jekr.length != 2) {
System.out.println("Sposób użycia: FJExperiment poziom-równoległości próg ");
return;
}
poziom = Integer.parseInt(jekr[0]);
progi = Integer.parseInt(jekr[1]);
long beginTime, endTime;
ForkJoinPool pula = new ForkJoinPool(poziom);
```



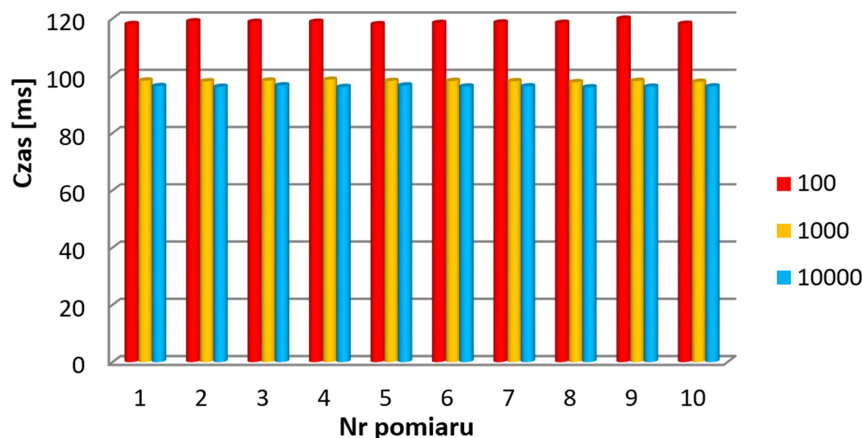
```

double[] liczba = new double[1000000];
for(int i = 0; i < liczba.length; i++)
    liczba[i] = (double) i;
    Tablica zadanie = new Tablica(liczba, 0, liczba.length, progi);
    beginTime = System.nanoTime();
    pula.invoke(zadanie);
    endTime = System.nanoTime();
    System.out.println("Poziom równoległości: " + poziom);
    System.out.println("Próg przetwarzania sekwencyjnego: " + progi);
    System.out.println("Czas działania: " + (endTime - beginTime) + " ns");
    System.out.println();
}

```

W tabeli 1 przedstawiono pomiary czasów wykonania programu do tworzenia zadania frameworku *Fork/Join* w zależności od progu przetwarzania równoległego przy poziomie równoległości 1.

Rysunek 1 przedstawia wykres czasu wykonania programu (oś rzędnych) dla 10 pomiarów (oś odciętych) w przypadku różnych progów przetwarzania: 100, 1 000 i 10 000 przy poziomie równoległości 1.



Rys. 1. Porównanie czasów wykonywania programu do tworzenia zadania frameworku *Fork/Join* przy poziomie równoległości 1  
Źródło: opracowanie własne.

W tabeli 2 przedstawiono wyniki pomiaru dla tego samego programu, ale przy poziomie równoległości 2.

Tab. 1. Pomiarzy czasów wykonywania programu [ns] do tworzenia zadania ramworku Fork/Join przy poziomie równoległości 1

Próg przetwa- rzenia	Nr pomiaru										$X_0$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
100	118048383	119002852	118797179	118832074	117987625	118437971	118592328	118469581	119928585	118126793	118622337
300	105795839	107723229	107966257	105060188	107450644	105115609	105666936	107275762	106507681	105721536	106428368
700	100627808	100515325	100825678	98152785	98565357	98108038	99802253	99987808	98721355	100316634	99562304
1 000	98309542	98038596	98299689	98607583	98188848	98206501	98084574	97762723	98201985	97849754	98154980
3 000	97465965	97820674	98122406	97761560	97855105	98136364	97167127	98053439	96725818	97116633	97622309
7 000	97379776	96892900	97062034	96492643	96696672	96722534	96915889	96083766	96375645	97097749	96771961
10 000	96386234	96123910	96635423	96065205	96597654	96218741	96290993	95945741	96164962	96258561	96268742

 $X_0$  – wartość średnia

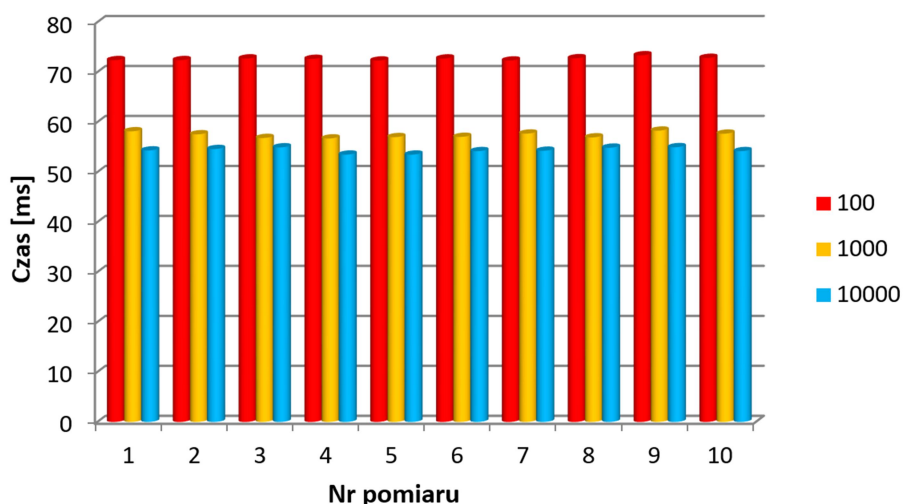
Źródło: opracowanie własne.

Tab. 2. Pomiar czasu wykonywania programu [ns] do tworzenia zadania frameworku *ForK/Join* przy poziomie równoległości 2

Próg przetworzenia	Nr pomiaru										X <sub>0</sub>
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
100	72389803	72392226	72726019	72642273	72305647	72716987	72310983	72769124	73357398	72845480	72645594
300	67709337	68942867	69098404	67238520	68768412	67273990	67626839	68656488	68164916	67661783	68114156
700	66414353	66340115	66544947	64780838	65033136	64751305	65869487	65991953	65156094	66208978	65711121
1 000	58152161	57546234	56813456	56715342	56985053	57034316	57687863	56934560	58285580	57671442	57382601
3 000	56530260	56735991	56910995	56701705	56754801	56919091	56356934	56870995	56100974	56327647	56620939
7 000	55506472	55228953	55325359	55000807	55117103	55131844	55242057	54767747	54934118	55345717	55160018
10 000	54314212	54599523	54938613	53484553	53482910	54177920	54259613	54871698	54969402	54177099	54327554

Źródło: opracowanie własne.

Rysunek 2 przedstawia wykres czasu wykonania programu (oś rzędnych) dla 10 pomiarów (oś odciętych) w przypadku różnych progów przetwarzania: 100, 1 000 i 10 000 przy poziomie równoległości 2.



Rys. 2. Porównanie czasów wykonywania programu do tworzenia zadania frameworku *Fork/Join* przy poziomie równoległości 2  
Źródło: opracowanie własne.

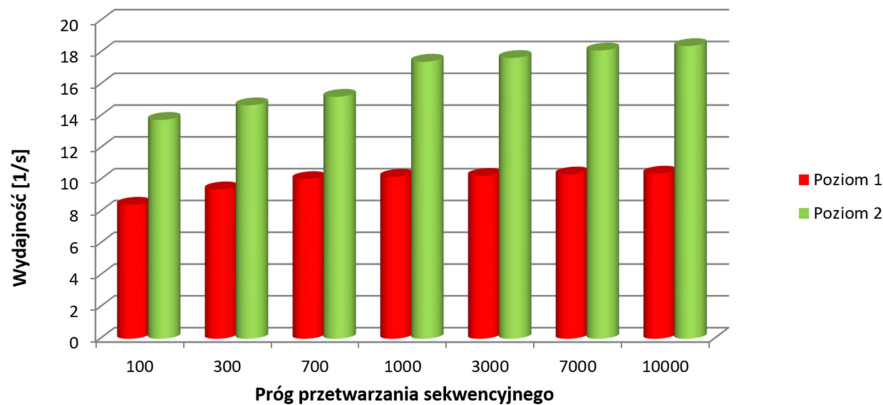
W tabeli 3 przedstawiono wyniki obliczeń wydajności programu na podstawie pomiarów czasu wykonania programu do tworzenia zadania frameworku *Fork/Join* w zależności od progów przetwarzania sekwencyjnego i poziomów równoległości.

Tab. 3. Wyniki obliczeń wydajności programu [1/s] do tworzenia zadania frameworku *Fork/Join*

Poziom równoległości	Próg przetwarzania sekwencyjnego						
	100	300	700	1 000	3 000	7 000	10 000
1	8,43	9,40	10,04	10,19	10,24	10,33	10,39
2	13,77	14,68	15,22	17,43	17,66	18,13	18,41

Źródło: opracowanie własne.

Na rysunku 3 przedstawiono porównanie wydajności programu (oś rzędnych) dla 10 pomiarów (oś odciętych) w przypadku progów przetwarzania sekwencyjnego z zakresu (100–10 000) i poziomów równoległości 1 i 2.



Rys. 3. Porównanie wydajności programu w zależności od progów przetwarzania sekwencyjnego dla różnych poziomów równoległości

Źródło: opracowanie własne.

## Podsumowanie

Programowanie równoległe i współbieżne umożliwia efektywne gospodarowanie mocą na poziomie fizycznym (sprzętowym). Przetwarzanie równoległe znacznie skraca czas wykonywania obliczeń niż w przypadku przetwarzania sekwencyjnego. Natomiast przetwarzanie współbieżne, również w środowisku jednoprocessorowym, umożliwia dekompozycję zadań, czyli np. niezależne przetwarzanie danych, operacje wejścia-wyjścia oraz komunikowanie się z użytkownikiem.

Odpowiednio zapisany kod programu ma duży wpływ na wydajność programu Javy. Konstrukcja kodu Javy może znacznie skrócić czas wykonywania programu Javy. Nieznaczne wahania czasu wykonania operacji dla różnych pomiarów wynikają z różnej wydajności samego procesora przy różnych pomiarach.

Przedstawione badania dowodzą, że zwiększenie wydajności programu może być uzyskane poprzez większą wartość poziomu równoległości oraz odpowiednio dobranego do nich progu przetwarzania sekwencyjnego. Z przeprowadzonych badań wprost wynika, że zwiększenie progu przetwarzania sekwencyjnego ze 100 do 1 000 skutkuje ponad 20-procentowym wzrostem wydajności programu (21% z jednym procesorem i 27% z dwoma procesorami), ale zwiększenie progu przetwarzania sekwencyjnego z 1 000 do 10 000 powoduje tylko nieznaczny wzrost wydajności programu (2% i 6% odpowiednio). Wzrost wydajności programu z procesorem dwurdzeniowym w stosunku do jednorodzeniowego, dla zakresu progów przetwarzania sekwencyjnego od 100 do 10 000, wynosi od 63% (próg 100) do 77% (próg 10 000).

**Literatura**

- [1] Schildt H., *Java The complete Reference, 9th Edition*, McGraw-Hill Companies, Inc. 2014.
- [2] Banaś K., *Programowanie równoległe i rozproszone*, Kraków 2011.
- [3] [https://www.icm.edu.pl/kdm/Programowanie\\_równoległe](https://www.icm.edu.pl/kdm/Programowanie_równoległe), (data dostępu: 2016-08-17).
- [4] Wilczewski M., *Programowanie współbieżne i równoległe*, <http://docplayer.pl/5020048-Programowanie-wspolbiezne-i-rownoległe-dr-inz-marcin-wilczewski-2013.html>, (data dostępu: 2016-08-17).
- [5] *Designing Parallel Algorithms*, <https://www.mcs.anl.gov/~itf/dbpp/text/node14.html> (data dostępu: 2016-08-19).
- [6] Oaks S., *Java Performance – The Definite Guide*, O'Reilly Media Inc. 2015.



**Ilona Kubik, Paweł Kwiaton**

*Czestochowa University of Technology*

*Institute of Mechanics and Machine Design Fundamentals*

*ul. Dąbrowskiego 73, 42-201 Częstochowa*

*e-mail: kwiaton@imipkm.pcz.pl*

## FORWARD KINEMATICS ALGORITHM FOR ANTHROPOMORPHIC MANIPULATORS

**Abstract.** The paper presents the problem of forward kinematics of an anthropomorphic manipulators. The proposed forward kinematics algorithm based on equations of classical mechanics. The sample simulations have been done for four degrees of freedom manipulator mounted on the Martian rover. The correctness of the proposed algorithm has been verified with the help of results obtained using Denavit-Hartenberg notation. The shown derivations are basis to consider of dynamics problem. The presented algorithm can be also used for other devices having only rotational joints.

**Keywords:** algorithm, anthropomorphic manipulator, forward kinematics, DH notation.

## ALGORYTM ROZWIĄZYWANIA KINEMATYKI PROSTEJ MANIPULATORÓW ANTROPOMORFICZNYCH

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono zagadnienie kinematyki prostej manipulatorów antropomorficznych. Zaproponowany algorytm rozwiązywania kinematyki prostej sformułowano, bazując na metodzie wykorzystującej równania mechaniki klasycznej. Przedstawiono przykładowe wyniki symulacyjne dla manipulatora o czterech stopniach swobody zamontowanego na łaziku marsjańskim. Działanie zaproponowanego algorytmu sprawdzono, porównując uzyskane wyniki z rezultatami otrzymanymi z wykorzystaniem notacji Denavita-Hartenberga. Otrzymane parametry ruchu manipulatora stanowią podstawę do rozważań zagadnień dynamicznych. Zaprezentowany algorytm może być wykorzystywany także do innych urządzeń posiadających tylko przeguby obrotowe.

**Słowa kluczowe:** algorytm, manipulator antropomorficzny, kinematyka prosta, notacja DH.

## Introduction

Motion analysis of manipulators without taking into account their physical features and forces acting on them, is the first stage of full robots movement description. Together with the technological development, the issue of analysis of kinematic systems is continuously improving. Currently, the appropriate conventions of calculation [10] are used to describe of this problem. In the case of manipulators, the Denavit-Hartenberg (DH) notation or its modified versions [2-5, 11] are mostly applied.

The paper presents alternative approach which based on the equations of classical mechanics. This approach was used inter alia to study of rotary cranes [1, 8] and it has been described, in more detail, in books [12, 13]. The advantage of the proposed approach is the possibility of directly connection of kinematics analysis with dynamics analysis of examined objects.

The paper focuses on solution of forward kinematics of anthropomorphic (equipped only with rotary joints) manipulator and working out of the algorithm to determination of coordinates and orientation of gripping device of manipulator. The proposed algorithm can be used for anthropomorphic manipulator with any number of robot arms. Using the presented algorithm, the sample numerical calculations have been carried out for real manipulator [7] mounted on the Martian rover. Moreover the obtained results were confronted with the numerical results obtained on the basis of DH method [2].

## The algorithm for determination the forward kinematics of the anthropomorphic manipulators

In the Figure 1 the kinematics scheme of any anthropomorphic manipulator is presented. In the computational model, it has been assumed that: the members of manipulator have infinite rigidity, the axes of local Cartesian coordinate systems are parallel regarding to each other. On this base it can be stated that each relative motion of the system is the translational motion [8, 12]. The motion of the tip of manipulator is the relative motion, therefore it is necessary to determine coordinates of each characteristic point ( $O_1, O_2, \dots, O_n$ ) and make their proper summation.



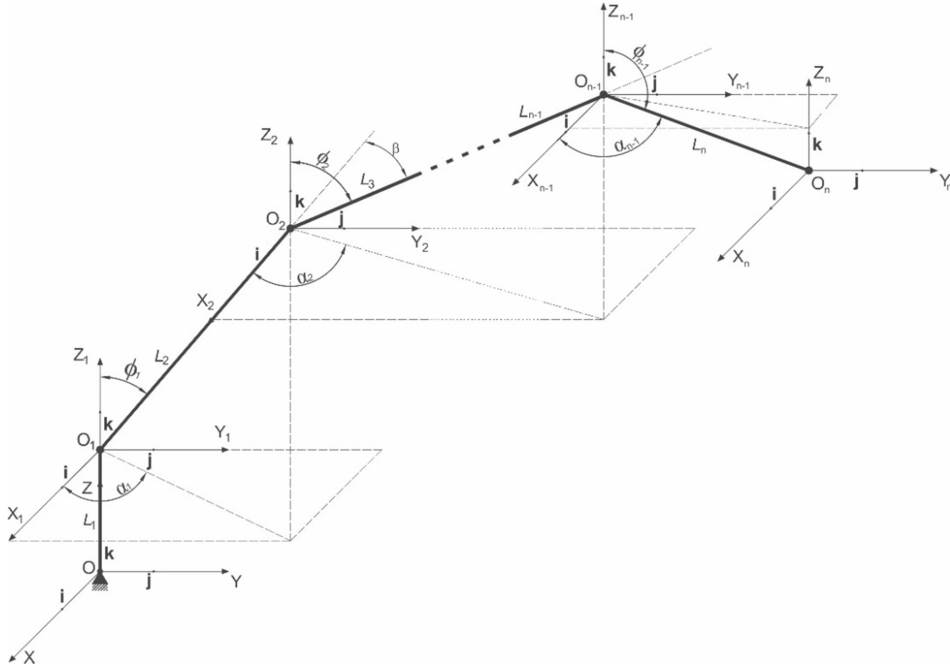


Fig. 1. Kinematics scheme of anthropomorphic manipulator for any number of robot arms

The position of points in Cartesian coordinate system can be written using vector:

$$\mathbf{l}_m = X_m \mathbf{i} + Y_m \mathbf{j} + Z_m \mathbf{k}, \quad (1)$$

and generalized coordinates in curvilinear coordinate system:

$$q^1, q^2, q^3, \quad (2)$$

where  $m$  is the characteristic point number of the anthropomorphic manipulator.

By differentiation of the equation with time:

$$\dot{\mathbf{l}}_m = \mathbf{l}_m(q^1, q^2, q^3), \quad (3)$$

relation between velocities in Cartesian coordinate system and curvilinear coordinate system is obtained:

$$\mathbf{v}_m = \frac{\partial \mathbf{l}_m}{\partial q^i} \dot{q}^i. \quad (4)$$

Denote [8]:

$$A_{ki} = \frac{\partial b_k}{\partial q^i}, \quad (5)$$

it is possible to get the relation:

$$\dot{b}_k = A_{ki} \dot{q}^i, \quad (6)$$

$$\dot{q}^i = B^{ik} \dot{b}_k, \quad (7)$$

where:

$\mathbf{B}$  – inverse matrix to  $\mathbf{A}$ ,  $\dot{q}^i$  – components of the velocity vector.

If  $\mathbf{A}$  is nonsingular matrix, equation (7) can be solved relative to generalized velocities [12]. The velocities have different tilters, because the generalized coordinates have also different tilters. It is therefore necessary to project velocities to directions of generalized coordinates using unit vectors [6, 8, 12]:

$$\mathbf{e}_j = \frac{1}{\left| \frac{\partial \mathbf{l}_m}{\partial q^j} \right|} \frac{\partial \mathbf{l}_m}{\partial q^j}, \quad \left| \frac{\partial \mathbf{l}_m}{\partial q^j} \right| = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \left( \frac{\partial b_i}{\partial q^j} \right)^2}. \quad (8)$$

Physical components of velocity in curvilinear coordinate system can be defined as functions of coordinate velocity vector  $X$ ,  $Y$  and  $Z$  in the Cartesian coordinate system.

Analogical to velocities, physical components of accelerations can be determined by multiplication velocity vector by unit vector [8, 12]:

$$\tilde{a}_j = \left\{ \frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial}{\partial \dot{q}^j} \left( \frac{1}{2} v^2 \right) \right] - \frac{\partial}{\partial q^j} \left( \frac{1}{2} v^2 \right) \right\} \cdot \frac{1}{\left| \frac{\partial \mathbf{l}_m}{\partial q^j} \right|}, \quad (9)$$

where:

$$v^2 = g_{lr} \dot{q}^l \dot{q}^r, \quad (10)$$

$$g_{lr} = \delta_{ik} \frac{\partial x_i}{\partial q^l} \frac{\partial x_k}{\partial q^r}, \quad (11)$$

$\delta_{ik}$  - Kronecker delta.

In analogical way, it is possible to determine relative motion of arbitrary point for anthropomorphic manipulators.

Analyzing absolute motion it is necessary to remember, that motion of particular point relative to fixed coordinate system is translational motion. Displacement of gripper tip of the manipulator can be defined by the equation:

$$\mathbf{l}_n^* = \mathbf{l}_1 + \mathbf{l}_2 + \dots + \mathbf{l}_n, \quad (12)$$

and velocity as well as acceleration vectors of gripper tip of the manipulator have the following form:

$$\mathbf{v}_n^* = \mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_2 + \dots + \mathbf{v}_n, \quad (13)$$

$$\mathbf{a}_n^* = \mathbf{a}_1 + \mathbf{a}_2 + \dots + \mathbf{a}_n, \quad (14)$$

where  $n$  is a number of characteristic points of the anthropomorphic manipulator.

Taking into account above derivations, an algorithm (Fig. 2) which allows to determine the motion parameters of the gripping device of any anthropomorphic manipulator has been formulated.

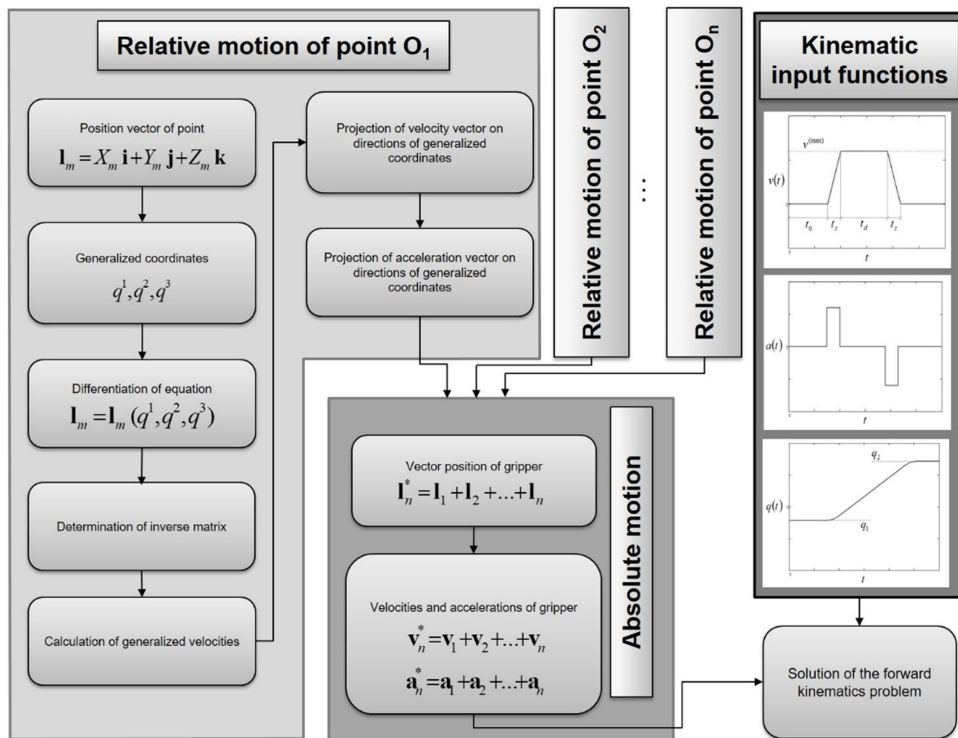


Fig. 2. Solution of forward kinematics problem - block diagram

## Sample numerical results

On the basis of proposed algorithm, the sample numerical calculations have been done for the manipulator mounted on the Martian rover [7] (Fig. 3).

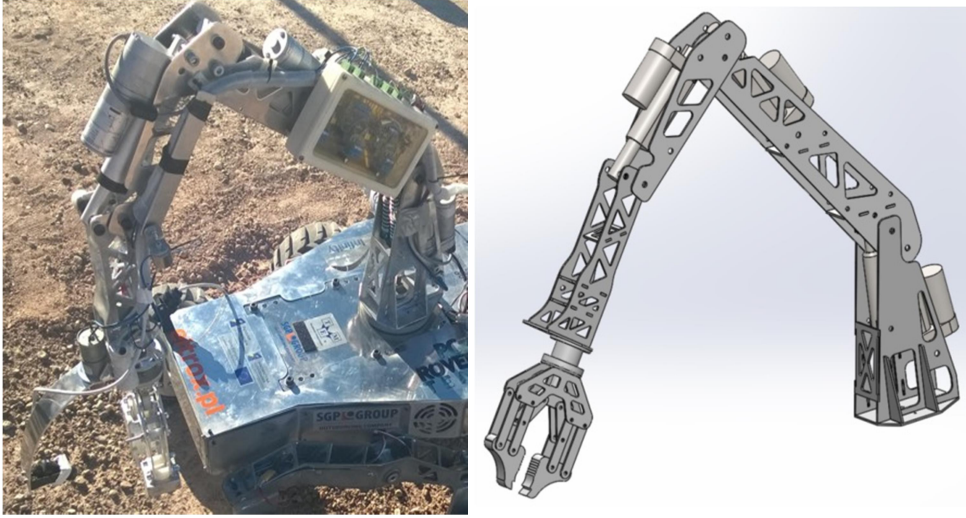


Fig. 3. Manipulator mounted on the Martian rover: real object (on the left), geometrical model (on the right) [7]

The considered system has four degrees of freedom (fig. 4) (the movement of gripper is not taken into account) and assumed that:

- the upper arms of the manipulator rotate together with the base column:

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_n = \alpha(t) + \pi, \quad (26)$$

- the arms of the manipulator have constant length:  $L_1=57\text{mm}$ ,  $L_2=300\text{mm}$ ,  $L_3=280\text{mm}$ ,  $L_4=150\text{mm}$ .

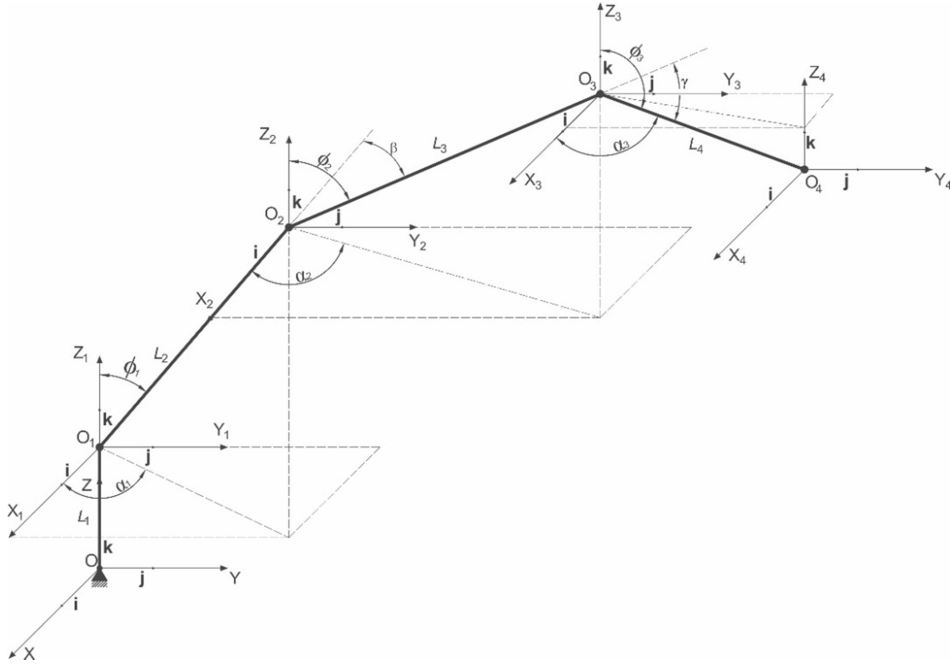


Fig. 4. Kinematic scheme of analyzed manipulator

The components of position, velocities and accelerations for tip of the manipulator have the following form (based on the presented algorithm):

- position components:

$$l_X^* = [L_2 \sin(\phi_1) + L_3 \sin(\phi_2) + L_4 \sin(\phi_3)] \cos(\alpha), \quad (15)$$

$$l_Y^* = [L_2 \sin(\phi_1) + L_3 \sin(\phi_2) + L_4 \sin(\phi_3)] \sin(\alpha), \quad (16)$$

$$l_Z^* = L_1 + L_2 \cos(\phi_1) + L_3 \cos(\phi_2) + L_4 \cos(\phi_3), \quad (17)$$

- velocity components:

$$\begin{aligned} v_X^* = & v_{L_2} \cos(\alpha) \sin(\phi_1) - v_\alpha \sin(\alpha) + v_{\phi_1} \cos(\alpha) \cos(\phi_1) + \\ & + v_{L_3} \cos(\alpha) \sin(\phi_2) - v_\alpha \sin(\alpha) + v_{\phi_2} \cos(\alpha) \cos(\phi_2) + \\ & + v_{L_4} \cos(\alpha) \sin(\phi_3) - v_\alpha \sin(\alpha) + v_{\phi_3} \cos(\alpha) \cos(\phi_3), \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned}
v_Y^* &= v_{L_2} \sin(\alpha) \sin(\phi_1) - v_\alpha \cos(\alpha) + v_{\phi_1} \sin(\alpha) \cos(\phi_1) + \\
&+ v_{L_3} \sin(\alpha) \sin(\phi_2) - v_\alpha \cos(\alpha) + v_{\phi_2} \sin(\alpha) \cos(\phi_2) + \\
&+ v_{L_4} \sin(\alpha) \sin(\phi_3) - v_\alpha \cos(\alpha) + v_{\phi_3} \sin(\alpha) \cos(\phi_3),
\end{aligned} \tag{19}$$

$$\begin{aligned}
v_Z^* &= v_{L_2} \cdot \cos(\phi_1) - v_{\phi_1} \cdot \sin(\phi_1) + v_{L_3} \cdot \cos(\phi_2) + \\
&- v_{\phi_2} \cdot \sin(\phi_2) + v_{L_4} \cdot \cos(\phi_3) - v_{\phi_3} \cdot \sin(\phi_3),
\end{aligned} \tag{20}$$

- acceleration components:

$$\begin{aligned}
a_X^* &= a_{L_2} \cos(\alpha_1) \sin(\phi_1) - a_{\alpha_1} \sin(\alpha_1) + a_{\phi_1} \cos(\alpha_1) \cos(\phi_1) + \\
&+ a_{L_3} \cos(\alpha_2) \sin(\phi_2) + a_{\alpha_2} \sin(\alpha_2) + a_{\phi_2} \cos(\alpha_2) \cos(\phi_2) + \\
&+ a_{L_4} \cos(\alpha_3) \sin(\phi_3) - a_{\alpha_3} \sin(\alpha_3) + a_{\phi_3} \cos(\alpha_3) \cos(\phi_3),
\end{aligned} \tag{21}$$

$$\begin{aligned}
a_Y^* &= a_{L_2} \sin(\phi_1) \sin(\alpha_1) + a_{\alpha_1} \cos(\alpha_1) + a_{\phi_1} \cos(\phi_1) \sin(\alpha_1) + \\
&+ a_{L_3} \sin(\phi_2) \sin(\alpha_2) + a_{\alpha_2} \cos(\alpha_2) + a_{\phi_2} \cos(\phi_2) \sin(\alpha_2) + \\
&+ a_{L_4} \sin(\phi_3) \sin(\alpha_3) + a_{\alpha_3} \cos(\alpha_3) + a_{\phi_3} \cos(\phi_3) \sin(\alpha_3),
\end{aligned} \tag{22}$$

$$\begin{aligned}
a_Z^* &= a_{L_2} \cos(\phi_1) - a_{\phi_1} \sin(\phi_1) + a_{L_3} \cos(\phi_2) - a_{\phi_2} \sin(\phi_2) + \\
&+ a_{L_4} \cos(\phi_3) - a_{\phi_3} \sin(\phi_3),
\end{aligned} \tag{23}$$

where:

$$\phi_2 = \beta + \phi_1, \tag{24}$$

$$\phi_3 = \gamma + \phi_2. \tag{25}$$

The motion of arms is controlled by the linear induction motors, but the plane motion is turned into the rotary motion. Therefore, in the presented numerical calculations, the kinematic input functions (Fig. 5) concern the angular velocities.

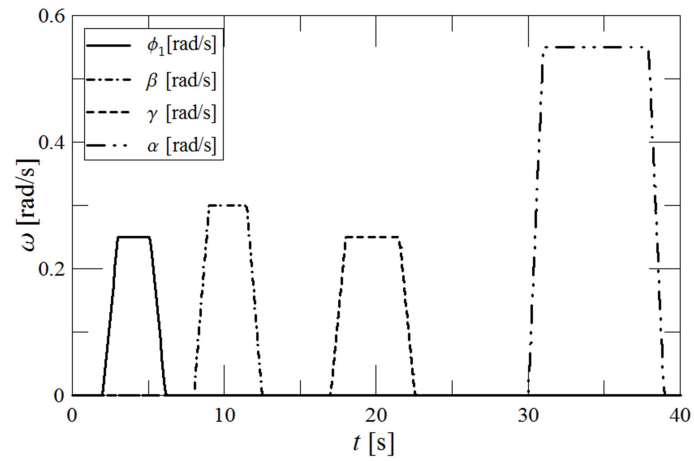


Fig. 5. Kinematic input functions (control signals)

The gripper trajectory (Fig. 6), velocity and acceleration components (Fig. 7, 8) have been determined with the help of formulae (15-23), kinematic input functions and the following initial positions:  $\alpha=0^\circ$ ,  $\phi_1=15^\circ$ ,  $\beta=0^\circ$ ,  $\gamma=0^\circ$ .

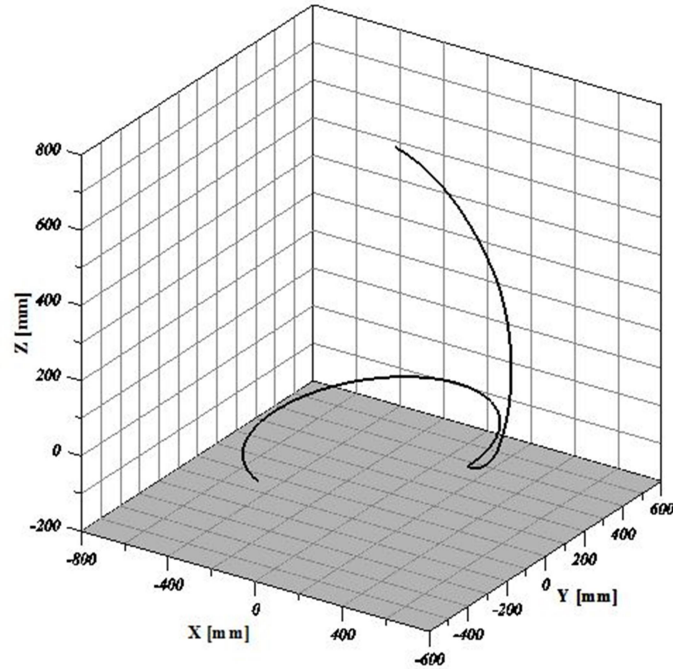


Fig. 6. Motion trajectory of the tip of the analyzed manipulator in the global coordinate system

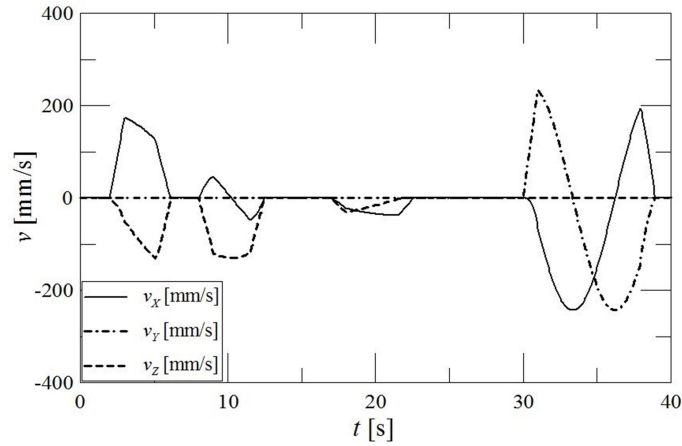


Fig. 7. Velocity of the tip of the analyzed manipulator in the global coordinate system

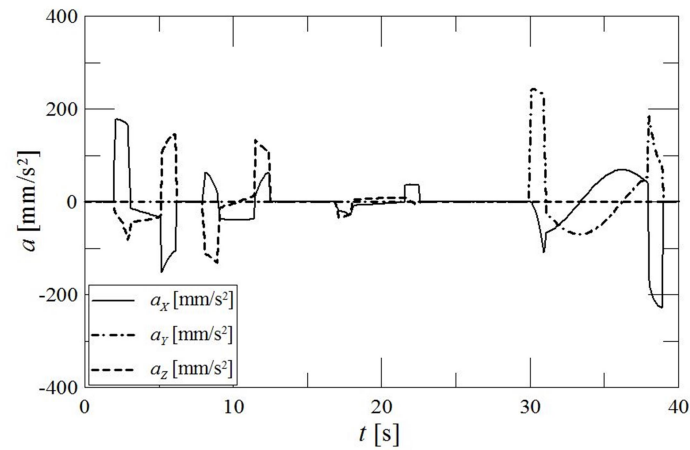


Fig. 8. Acceleration of the tip of the analyzed manipulator in the global coordinate system

## Verification of the proposed algorithm

To check correctness of the proposed algorithm the forward kinematics problem using DH parameters [2, 3, 5, 14] for presented case has been solved. In Table 1 the DH kinematics parameters for the considered anthropomorphic manipulator (Fig. 4) are presented. The following denotations:  $\theta_i$  – joint angle rotation,  $a_i$  – length of element,  $\alpha_i$  – torsion of element,  $d_i$  – offset of joint [4] have been introduced.



Table 1. DH parameters for the analyzed manipulator

Member number	$\theta_i$	$d_i$	$a_i$	$\alpha_i$
1	$\alpha$	$l_1$	0	$90^\circ$
2	$\varphi_1$	0	$l_2$	0
3	$\beta$	0	$l_3$	0
4	$\gamma$	$l_4$	0	$-90^\circ$

The determined transformation matrices between individual coordinate systems in the matrix product form create main transformation matrix of the system. On account of the fact that position of the gripping device of manipulator can be described with coordinates of point  $O_n$  in effector coordinate system, it can be obtained [9,11]:

$$\begin{bmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha)[L_2 \cos(\phi_1) + L_3 \cos(\phi_1 + \beta) + L_4 \cos(\phi_1 + \beta + \gamma)] \\ \sin(\alpha)[L_2 \cos(\phi_1) + L_3 \cos(\phi_1 + \beta) + L_4 \cos(\phi_1 + \beta + \gamma)] \\ L_1 + L_2 \sin(\phi_1) + L_3 \sin(\phi_1 + \beta) + L_4 \sin(\phi_1 + \beta + \gamma) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (28)$$

Finally the coordinates of the gripper have the following form:

$$l_x = \cos(\alpha)[L_2 \cos(\phi_1) + L_3 \cos(\phi_1 + \beta) + L_4 \cos(\phi_1 + \beta + \gamma)] \quad (29)$$

$$l_y = \sin(\alpha)[L_2 \cos(\phi_1) + L_3 \cos(\phi_1 + \beta) + L_4 \cos(\phi_1 + \beta + \gamma)] \quad (30)$$

$$l_z = L_1 + L_2 \sin(\phi_1) + L_3 \sin(\phi_1 + \beta) + L_4 \sin(\phi_1 + \beta + \gamma) \quad (31)$$

The position components of the tip of manipulator for the selected time moments get on the basis of the elaborated algorithm and DH parameters are compared in Table 2.

Table 2. Comparison of coordinates obtained using the proposed algorithm and DH parameters

Time [s]	Coordinates determined using the proposed algorithm			Coordinates determined using DH parameters		
	X	Y	Z	X	Y	Z
2	111,3	0	772,4	111,3	0	772,4
4	365,6	0	681,9	365,6	0	681,9
8	584,9	0	484,1	584,9	0	484,1
12	592,0	0	67,7	592,0	0	67,7
18	574,2	0	38,5	574,2	0	38,5
30	441,6	0	-20,3	441,6	0	-20,3
34	-153,2	414,1	-20,3	-153,2	414,1	-20,3
40	-151,0	-414,9	-20,3	-151,0	-414,9	-20,3

Based on the showed results (Table 2), the compatibility of the formulated algorithm can be confirmed.

## Summary

The paper presents the forward kinematics algorithm for anthropomorphic manipulators with any number of robot arms. Motion parameters have been determined using classical mechanics equations. The proposed method, in contrast to the Denavit-Hartenberg (DH) notation, allows to determine except for position, the velocity and acceleration of the tip of manipulator. These parameters are essential to solution of dynamics problem.

Applying the presented algorithm, the computer calculations for the manipulator mounted on the Martian rover, have been conducted. Position, velocity and acceleration of the gripping device of manipulator have been determined. Moreover the correctness of the algorithm have been verified with the help of DH parameters. The presented algorithm can be used for any anthropomorphic manipulators as well as other devices having only rotational joints. The presented derivations will be the basis for the solution of manipulator dynamics.

## References

- [1] Cekus D., Modelowanie, identyfikacja modeli i badania dynamiki układów mechanicznych, Wyd. PCz, Częstochowa, 2013.
- [2] Denavit J., Hartenberg R.S., A kinematic notation for lower – pair mechanisms based on matrices, *Trans ASME J. Appl. Mech* Vol. 23, 1955, p. 215-221
- [3] Frączek J., Wojtyra M., Kinematyka układów wieloczłonowych, WNT, Warszawa, 2008.
- [4] Hauenstein J.D., Wampler C.W., Pfulner M., Synthesis of three-revolute spatial chains for body guidance, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 110, 2017, p. 61-72,  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2016.12.008>
- [5] Iliukhin V.N., Mitkovskii K.B., Bizyanova D.A., Akopyan A.A., The modeling of Inverse Kinematics for DOF manipulator, *Procedia Engineering*, Vol. 176, 2017, p. 498-505,  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.349>
- [6] Kłosiński J., Badania symulacyjne wybranych modeli żurawia samojezdnego, *ZN Politechniki Opolskiej*, „Mechanika” 64, 2001, s. 193-200.
- [7] Pierzgański M., Ptak P., Cekus D., Sokół K: Modeling and stress analysis of a manipulator mounted on a Mars rover, *Procedia Engineering*, Volume 177, 2017, 121-126;  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.199>
- [8] Posiadała B., Modelowanie i badania zjawisk dynamicznych wysięgników teleskopowych i żurawi samojezdnych, WNT, Warszawa, 2000.
- [9] Posiadała B., Tomala M., Cekus D., Waryś. P., Work cycle optimization problem of manipulator with revolute joints, *Int. J. Dynam. Control*, Vol. 3, 2015, p. 94-99.
- [10] Russo M., Ceccarelli M., A Workspace Analysis of 4R Manipulators via Level-Set Formulation, *New Trends in Mechanism and Machine Science*, 2016, p. 483-491.
- [11] Siciliano B., Sciavicco L., Villani L., Oriolo G., *Robotic – Modelling, Planning and Control*, Springer, London, 2009
- [12] Skalmierski B., *Mechanika: Podstawy mechaniki klasycznej*, Wyd. PCz, Częstochowa, 1998.
- [13] Skalmierski B., *Mechanika: Podstawy mechaniki ośrodków ciągłych*, Wyd. PCz, Częstochowa, 1998.
- [14] Skalik A., Skrobek D., Waryś P., Cekus D., Kinematic analysis of four degrees of freedom manipulator, *Solid State Phenomena*, Vol. 220-221, 2015, p. 277-282,  
DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.220-221.277>





**Przemysław Rajca**

*Katedra Pieców Przemysłowych i Ochrony Środowiska*

*Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów*

*Politechnika Częstochowska*

*Armii Krajowej 19, 42-200 Częstochowa*

*e-mail: przemek16m@wp.pl*

**ANALIZA ZAGROŻEŃ W PRZEMYŚLE METALURGICZNYM  
NA PRZYKŁADZIE WYBRANYCH STANOWISK PRACY  
HUTY STALI**

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono analizę zagrożeń w przemyśle metalurgicznym na przykładzie huty stali wraz z oceną stanu bezpieczeństwa na wybranych stanowiskach tego zakładu, ze szczególnym uwzględnieniem hałasu i szkodliwych czynników chemicznych, a także zaproponowaniem rozwiązań zmniejszających wpływ ww. czynników na pracownika.

**Słowa kluczowe:** huta stali, zagrożenia, hałas, zapylenie, wskaźnik częstotliwości wypadków, ryzyko zawodowe, bezpieczeństwo pracy.

**ANALYSIS OF HAZARDS IN THE METALURGICAL  
INDUSTRY ON EXAMPLE OF SELECTED POSITIONS  
OF STEEL WORKS**

**Abstract.** The article presents an analysis of the hazards in the steelmaking industry on the example of the steelworks together with the safety assessment at selected sites of this plant, with particular regard to noise and harmful chemical factors, and to propose measures to reduce the impact of these factors on the worker.

**Keywords:** steelworks, hazards, noise, dustiness, accident frequency index, occupational risk, occupational safety.

Środowisko pracy osób zatrudnionych w przemyśle ciężkim, do którego zalicza się przemysł hutniczy, wiąże się ze specyficznymi warunkami pracy, ponieważ występuje tam znaczna liczba zagrożeń zawodowych. Dotyczy to zwłaszcza istotnego dla tej branży zagrożenia hałasem, wysokiej temperatury prowadzonych procesów, a także obecności szkodliwych substancji chemicznych i pyłów [1].

### Specyfika środowiska pracy hutnika

Miejscem pracy osób zatrudnionych w hutach żelaza i stali jest hala produkcyjna, lecz również magazyn i składowisko usytuowane na zewnątrz obok zabudowań. Piece hutnicze oddają duże ilości ciepła, toteż w hali występuje wysoka temperatura. Natomiast w okresie zimowym poza halą utrzymuje się niska temperatura, co pokazuje zmienność warunków pracy w zależności od pory roku. Wewnątrz obiektu hali produkcyjnej znajdują się maszyny do produkcji i obróbki stali, stanowiące źródło znacznego hałasu i wibracji. Ponadto podczas procesów metalurgicznych ma miejsce emisja szkodliwych substancji chemicznych, występujących w postaci pyłów i dymów. Dodatkowe zagrożenia stwarzają urządzenia w ruchu, środki transportu wewnątrzzakładowego, czy też wąskie przejścia i nierówne powierzchnie. W związku z tym istnieje ryzyko kolizji bądź upadku, a przez to odniesienia poważnych obrażeń lub nawet śmierci. Praca hutnika zwykle ma charakter fizyczny i najczęściej wykonywana jest indywidualnie. Na rys. 1 przedstawiono hutnika podczas pracy [2, 3].



Rys. 1. Hutnik / wytapiacz stali [3]

## **Dominujące zagrożenia występujące w zakładzie przemysłu hutniczego**

W zakładach zajmujących się produkcją i przetwórstwem metali, pracownicy często są ekspozowani na oddziaływanie hałasu o wartościach ponadnormatywnych, tzn. o poziomie ekspozycji powyżej 85 dB. Największe oddziaływanie dotyczy osób zatrudnionych przy obsłudze pieców hutniczych (szczególnie elektrycznych pieców łukowych, gdzie hałas zmienia się w zależności od fazy topienia). Dominującym źródłem hałasu w tego rodzaju piecach jest łuk elektryczny, pulsujący proporcjonalnie do chwilowej wartości prądu (tzw. model pulsującego cylindra). Dzięki temu emituje on dźwięki o częstotliwości 100 Hz, a także przemieszcza się w kierunku bocznym między elektrodą a złomem (tzw. model pulsującej struny). W ten sposób jest generowany hałas szerokopasmowy w zakresie 300–1000 Hz. EAF (Electric Arc Furnaces) mogą być także źródłem drgań i dźwięków z zakresu niskich częstotliwości (poniżej 100 Hz). Najczęściej sytuacja ta ma miejsce, gdy dochodzi do wzbudzenia drgań własnych ścian, sklepień i fundamentów pieca. Natomiast w przypadku konwertyzacji tlenowych, głównym źródłem hałasu jest strumień tlenowy, wytwarzający hałas aerodynamiczny (powstający podczas wypływu gazu z dysz) i uderzeniowy (podczas kontaktu strumienia z kadzią). Wyróżniamy również hałas kawitacyjny (podczas powstawania pęcherzyków gazu w kąpielu), a także hałas gazów spalinowych uchodzących z wnętrza urządzenia [4, 5, 6].

Ogólnie rzecz biorąc, na stanowiskach pracy przy produkcji wyrobów ze stopów metali występuje ekspozycja na wiele substancji chemicznych, mogących przybierać postać pyłów, dymów i par, a także substancji gazowych. Niektóre substancje mogą ujemnie wpływać na zdrowie pracownika, m.in. przyczyniając się do rozwoju chorób nowotworowych. Wspomniana gałąź przemysłu wywołuje emisję wielu substancji, których źródłem mogą być materiały będące półproduktem dla wyrobów, czyli stopów metali, ale również komponenty wykorzystywane w procesie produkcji, np. chłodziwa, otuliny elektrod spawalniczych, farby i kąpiele galwaniczne, formy do odlewania detali, itd. Substancje chemiczne mogą powstawać także w czasie samego procesu produkcyjnego wyrobów metalowych, np. podczas zalewania form skorupowych gorącym metalem wydzielają się substancje powstałe podczas termicznego rozkładu żywic fenolowoformaldehydowych. Praktycznie każdy metal wchodzący w skład odlewu, a także jego związki, mogą zalegać w powietrzu otaczającym stanowisko pracy. Wysoka temperatura procesu odlewania sprawia, że metale obecne w obrębie stanowiska są widoczne w postaci dymów. Kolejnym istotnym efektem odlewania detali metalowych jest emisja pyłów zawierających wolną krzemionkę krystaliczną (WKK), na którą ekspozycja występuje podczas obsługi pieców i kadzi odlewniczych. Nie można również zapomnieć o powsta-

jących w czasie tego procesu substancjach gazowych, tworzonych głównie przez tlenek węgla, ponadto dwutlenek siarki, dwutlenek węgla, tlenki azotu, formaldehyd i inne. Oprócz wspomnianych wcześniej metali oraz pyłów krzemionki, powietrze w zakładach przemysłu metalurgicznego może zawierać także wiele związków organicznych. Badania przeprowadzone w odlewniach żeliwa i staliwa wykazały obecność około 140 związków organicznych, w szczególności są to: węglowodory alifatyczne (do 19 atomów węgla), węglowodory aromatyczne, związki karbonylowe: formaldehyd, acetaldehyd, aceton, substancje rakotwórcze: benzen, wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA). W produkcji odlewów ze stopów metali, do głównych źródeł związków rakotwórczych zalicza się masy formierskie oraz stopy posiadające w swoim składzie rakotwórcze metale [7].

O gorącym środowisku pracy mówi się wówczas, gdy temperatura powietrza mieści się w zakresie 20–65°C, przy wilgotności względnej od 10 do 80%. Praca w przemyśle ciężkim wiąże się często z oddziaływaniem gorącego środowiska pracy, a także narażeniem na znaczące promieniowanie cieplne. Wielokierunkowe działanie promieniowania cieplnego może pochodzić od:

- powierzchni wytwarzanych elementów o temperaturze od 500 do 1500°C,
- źródeł otwartego ognia.

W takiej sytuacji intensywność promieniowania nierzadko jest większa od  $1000 \frac{W}{m^2}$ . Poza tym w gorącym środowisku pracownicy narażeni są na czynniki niebezpieczne, takie jak: rozpryski i odpryski gorącego metalu, gorące powierzchnie, a w przypadku prac z instalacjami elektrycznymi, zakłócenie łuki elektryczne, stwarzające ponadto ryzyko termiczne. Najczęściej na gorący mikroklimat środowiska pracy są ekspozowane osoby zatrudnione m.in. w przetwórstwie przemysłowym (przy produkcji i przetwórstwie metali), górnictwie itp. Oprócz gorącego mikroklimatu pracownik narażony jest na wiele innych zagrożeń, do których można zaliczyć: płomień, promieniowanie podczerwone, ciepło konwekcyjne, rozpryski roztopionych metali [8].

### **Analiza zagrożeń i ocena stanu bezpieczeństwa pracy w zakładzie przemysłu hutniczego na wybranych stanowiskach pracy - analiza własna**

W związku z mnogością zagrożeń, występujących podczas pracy w zakładach zajmujących się produkcją i przetwórstwem metali, w części badawczej pracy skupiono się na kluczowych zagrożeniach, dotyczących hałasu i zapylenia w środowisku pracy huty stali. Następnie dokonano analizy wypadkowości w zakładzie na przestrzeni ostatnich lat, wraz z zaproponowaniem programu



działań zmniejszających ryzyko zawodowe i jednocześnie zwiększających poziom bezpieczeństwa pracy.

### **Analiza zagrożenia hałasem na podstawie pomiarów tego czynnika w środowisku pracy**

Pomiary hałasu zostały przeprowadzone na wybranych stanowiskach zakładu przemysłu hutniczego, zgodnie z normami: PN-N-1307:1994 oraz PN-EN ISO 9612:2011. Obejmowały one typowe dla zagrożenia hałasem stanowiska pracy, a także uwzględniały narażenie tym czynnikiem innych pracowników przebywających na danym wydziale huty. W analizowanym zakładzie pomiary hałasu przeprowadzono metodą pośrednią, z uwzględnieniem charakterystycznych miejsc przebywania pracownika, a także sprzętu wykorzystywanego na danym stanowisku pracy. Przyrządem pomiarowym użytym do pomiarów był miernik poziomu dźwięku SVAN 955, o klasie dokładności wynoszącej 1.

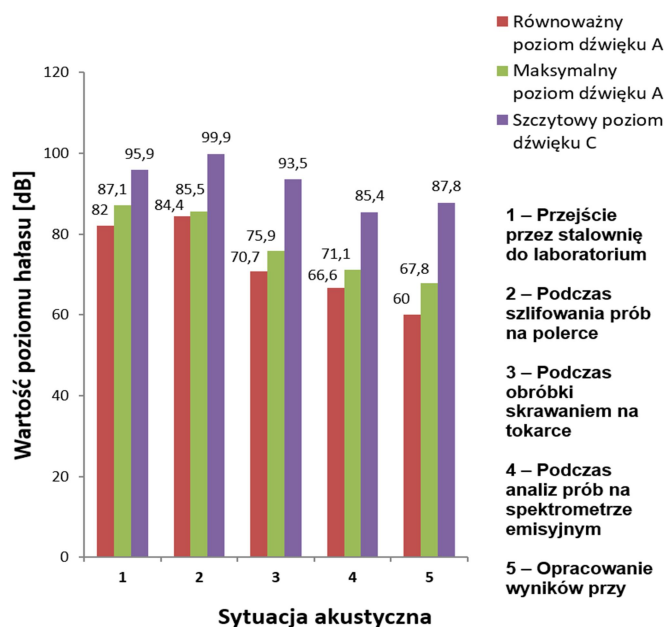
#### **Stanowisko pracy: laborant- kwalifikator**

##### **Miejsce pracy: Hala Stalowni, Laboratorium**

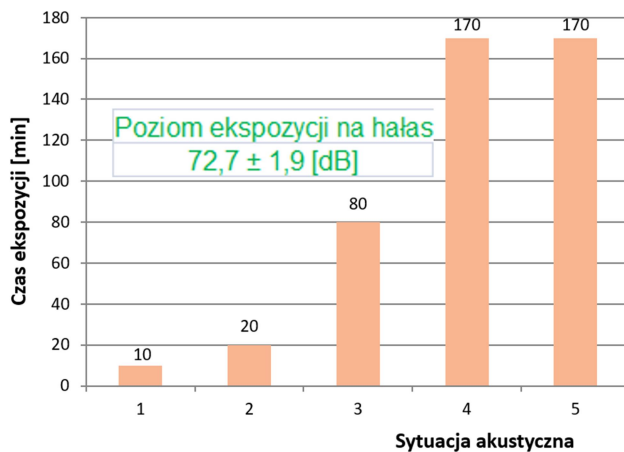
Do kompetencji pracownika zatrudnionego na powyższym stanowisku należy przygotowanie i analiza prób. Laborant-kwalifikator jest narażony zarówno na hałas występujący w hali stalowni (szczególnie podczas obsługi szlifierki i tokarki), jak i generowany przez spektrometr emisyjny w laboratorium. Natomiast kluczowym zagadnieniem w aspekcie zagrożenia hałasem jest czas ekspozycji na hałas, ponieważ na jego podstawie oblicza się poziom ekspozycji na hałas odniesiony do 8-godzinnego dobowego wymiaru czasu pracy. Na rys. 2 zestawiono wyniki pomiarów hałasu dla stanowiska laborant-kwalifikator usytuowanego na wydziale stalowni.

Jak można zaobserwować, największe poziomy hałasu odnotowano dla dwóch pierwszych sytuacji akustycznych (odpowiednio: Przejście przez stalownię do laboratorium oraz Podczas szlifowania prób na polerce). Na rys. 3 pokazano, jak czas ekspozycji na hałas wpływa na poziom ekspozycji na wskazany czynnik środowiska pracy.

Wspomniane sytuacje akustyczne charakteryzowały się krótkim czasem ekspozycji (zaledwie 10 min oraz 20 min), co w niewielkim stopniu przełożyło się na zwiększenie poziomu ekspozycji na hałas, która nie przekroczyła wartości dopuszczalnej (85 dB). Ze względu na powyższe, rozpatrywane stanowisko pracy spełnia normy dla hałasu w miejscu pracy i żadne działania nie są wymagane.



Rys. 2. Zestawienie wyników pomiarów hałasu na stanowisku: laborant-kwalifikator (wydział stalowni)



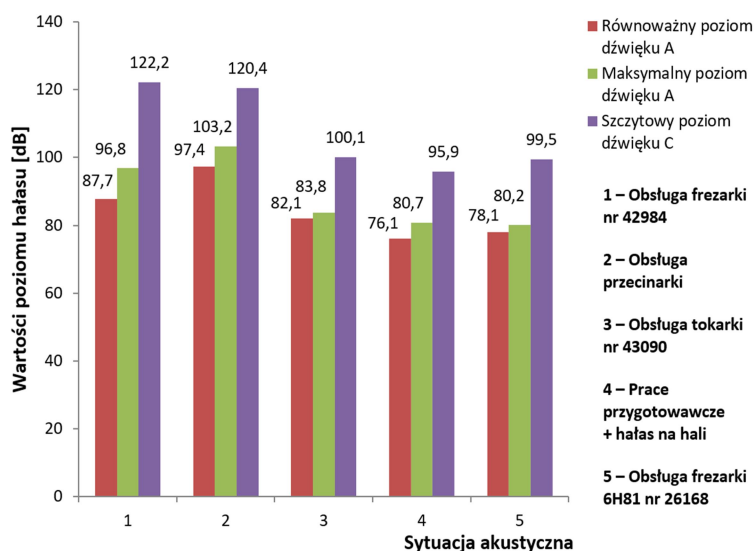
Rys. 3. Wpływ czasu ekspozycji na poziom ekspozycji na hałas na analizowanym stanowisku pracy

### Stanowisko pracy: frezer, tokarz

#### Miejsce pracy: Warsztat tokarsko-frezerski, Hartownia

Do obowiązków pracownika zatrudnionego na powyższym stanowisku należy przygotowanie i analiza prób. Tokarz, frezar jest ekspozowany na hałas emitowany głównie przez obrabiarki t. j.: przecinarka, tokarka nr 43090, frezar-

ka nr 42984, frezarka 6H81nr 26168. Na rys. 4 przedstawiono wyniki pomiarów hałasu dla stanowiska frezer, tokarz.



Rys. 4. Zestawienie wyników pomiarów hałasu na stanowisku: frezer, tokarz

Ze względu na specyfikę powyższego stanowiska pracy, występują wyższe poziomy hałasu, generowane przez maszyny do obróbki skrawaniem. Największe wartości parametrów hałasu odnotowano podczas obsługi frezarki nr 42984 oraz obsługi przecinarki (odpowiednio 1 i 2 sytuacja akustyczna). Na rys. 5 ukazano wpływ czasu ekspozycji na poziom ekspozycji na hałas na stanowisku frezer, tokarz.



Rys. 5. Wpływ czasu ekspozycji na poziom ekspozycji na hałas na ww. stanowisku

Wysokie wartości poziomu hałasu, łącznie z długimi czasami ekspozycji na ten czynnik, przełożyły się na wysoki poziom ekspozycji na hałas dla analizowanego stanowiska pracy (powyżej 85 dB). Ze względu na to, że poziom ekspozycji na hałas odniesiony do 8-godzinnego dnia pracy przekracza ustalone normy dla hałasu w miejscu pracy, należy podjąć działania korygujące. Do takich działań można zaliczyć:

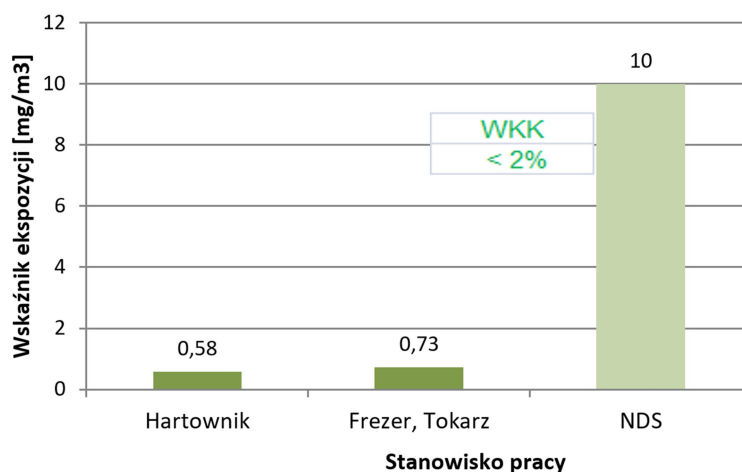
- regulację obrabiarek obejmującą dobranie właściwych parametrów pracy,
- sprawdzenie i ewentualną naprawę obudów,
- odpowiednie odizolowanie maszyn od podłoża,
- zaopatrzenie pracowników w ochronniki słuchu.

W przypadku posiadania dodatkowych środków finansowych można także wziąć pod uwagę zmiany konstrukcyjne w obrabiarkach, pozwalające na zmniejszenie szkodliwego wpływu hałasu na pracownika, np. zamontowanie dodatkowej osłony z tworzywa dźwiękochłonnaizolacyjnego. Uwzględniając zasadność tego rozwiązania, należy porównać poniesione koszty i uzyskane efekty.

### **Ocena narażenia na pyły w oparciu o pomiary zapylenia w omawianej hucie stali**

We wspomnianym wcześniej zakładzie dokonano również pomiarów czynników chemicznych występujących w postaci pyłów z uwzględnieniem zawartości wolnej krzemionki krystalicznej (WKK). Próbkę powietrza do pomiarów pobrano zgodnie z normami PN-Z-04008-7:2002 oraz PN-EN 689:2002. Analizie zapylenia poddano stanowiska pracy: hartownik oraz frezer, tokarz. Do głównych obowiązków pracowników zatrudnionych na wskazanych stanowiskach pracy należy przygotowywanie prób. Zidentyfikowano źródła emisji pyłu w postaci prób oraz urządzeń do ich mechanicznej obróbki. Dodatkowo zasygnalizowano także brak wentylacji mechanicznej. Na rys. 6 przedstawiono wskaźniki ekspozycji na pyły na ww. stanowiskach.

Średnie stężenie ważone frakcji wdychalnej pyłu na badanych stanowiskach pracy nie przewyższało odpowiadającej mu wartości najwyższego dopuszczalnego stężenia (NDS), a obliczony wskaźnik ekspozycji stanowi zaledwie 0,06 NDS (hartownik) oraz 0,07 NDS (frezer, tokarz). Po analizie powyższych stanowisk pracy stwierdzono spełnienie wymagań norm dla czynników pyłowych w miejscu pracy, a tym samym brak przeciwwskazań do jej bezpiecznego wykonywania.



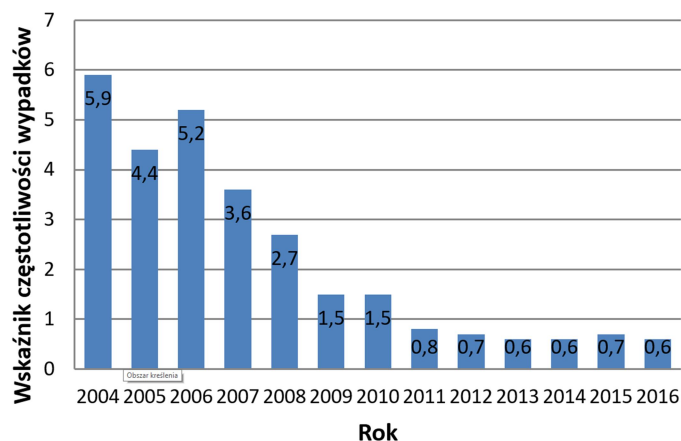
Rys. 6. Zestawienie wskaźników ekspozycji na pyły dla wybranych stanowisk huty stali na tle wartości NDS

### Analiza stanu bezpieczeństwa pracy na podstawie wskaźnika wypadkowości w przytoczonym wcześniej zakładzie przemysłu hutniczego

W omawianym zakładzie przemysłu hutniczego zmniejszanie wskaźnika wypadkowości oraz podnoszenie poziomu bezpieczeństwa pracy stanowi priorytet. Pomocnym narzędziem w realizacji tego celu okazuje się sukcesywnie wdrażany system zarządzania świadomością w dziedzinie bhp, a także kształtowanie wśród pracowników dobrych nawyków. Sami zatrudnieni coraz częściej dostrzegają korzyści wynikające z prawidłowego stosowania odzieży roboczej i ochronnej oraz użytkowania sprzętu ochrony osobistej, dlatego niejednokrotnie angażują się w prace nad poprawą ich jakości. Pokazuje to wysoki poziom ergonomii w zakładzie. Na uwagę zasługuje także dbałość pracodawcy o zatrudnionych poza miejscem pracy, poprzez organizowanie akcji szczepień ochronnych lub badań przesiewowych oraz dotyczących propagowania zdrowego trybu życia. Na rys. 7 pokazano dynamikę zmian wskaźnika częstotliwości wypadków w analizowanej hucie stali.

Wskaźnik częstotliwości wypadków wylicza się ze wzoru:

$$W = \frac{\text{liczba wypadków}}{\text{liczba zatrudnionych}} \cdot 1000$$



Rys. 7. Wskaźnik częstotliwości wypadków

Analizując wykres, można dostrzec niemal dziesięciokrotne zmniejszenie się wskaźnika częstotliwości wypadków za rok 2016 w porównaniu do roku 2004. Od 2006 r. wskaźnik ten sukcesywnie się zmniejszał lub pozostawał na zbliżonym poziomie. W ostatnich latach słyszy się o intensywnym rozwoju technologii w przemyśle ciężkim, niemniej jednak to od samego pracownika zależy najwięcej, a błędy ludzkie są uważane za jedne z najczęstszych przyczyn wypadków przy pracy. W związku z tym, w analizowanej hucie kładzie się duży nacisk na rozwijanie świadomości bezpieczeństwa oraz kształtowanie dobrych nawyków w pracy zawodowej. Jest to realizowane poprzez szkolenia pracowników, a także zaangażowanie pionu kierowniczego w poprawę warunków bhp.

W omawianym zakładzie przemysłu hutniczego pracę wykonuje wielu wykonawców, dlatego pracodawcy zależy na równym traktowaniu wszystkich i zapewnieniu jednakowego poziomu bezpieczeństwa pracy. W tabeli 1 zamieszczono dane dotyczące poziomu bhp wśród wykonawców za 2014 r.

Wskaźnik częstości wypadków jest w tej grupie znacznie wyższy niż u pracowników rodzimych. Niestety, w roku 2014 odnotowano jeden wypadek śmiertelny z udziałem pracownika podwykonawcy.

Tab. 1. Dane liczbowe dotyczące wykonawców

	<b>Kobiety</b>	<b>Mężczyźni</b>	<b>Ogółem</b>
Liczba wypadków przy pracy ogółem	0	24	24
Liczba wypadków śmiertelnych	0	0	0
Liczba wypadków zbiorowych i ciężkich	0	1	1
Łączna liczba dni niezdolności do pracy z tytułu wypadków przy pracy	0	1070	1070
Wskaźnik częstotliwości wypadków	0	2,21	2,21
Wskaźnik ciężkości wypadków ( $C_w = \text{liczba dni niezdolności} / \text{liczba wypadków}$ )	0	44,58	44,58
Liczba stwierdzonych chorób zawodowych	1	11	12
Liczba wypadków wykonawców ogółem	0	28	28
Liczba wypadków śmiertelnych, zbiorowych i ciężkich wykonawców	0	1	1

Po analizie tych niepokojących danych postanowiono wprowadzić szereg rozwiązań, mających na celu zwiększenie poziomu bezpieczeństwa firm partnerskich. Do priorytetowych postulatów zaliczono:

- konieczność przeszkolenia pracowników wykonawców przed wejściem na teren huty,
- audytowanie pracy tych pracowników przez rodzimych pracowników zakładu, a następnie przesyłanie raportów z audytów do pracodawcy,
- zachęcanie kierownictwa firm wykonawczych do większego dozoru oraz audytowania podległych pracowników na terenie huty, z którą została nawiązana współpraca,
- przygotowanie instrukcji bezpieczeństwa dla podwykonawców,
- organizowanie spotkań dyrektora zakładu z przedstawicielami wykonawców, w celu wymiany spostrzeżeń i lepszej współpracy na rzecz poprawy bezpieczeństwa pracy wszystkich zatrudnionych.

## Podsumowanie

Przemysł hutniczy jest zaliczany do przemysłu ciężkiego i stanowi jego ważną gałąź, ale niestety, wiąże się także ze znaczną liczbą zagrożeń zawodowych. W związku z tym, w części badawczej pracy dokonano analizy kluczo-

wych zagrożeń dotyczących hałasu oraz zapylenia w środowisku pracy huty stali, a także poddano ocenie poziom wypadkowości w zakładzie na przestrzeni ostatnich lat, wraz z zaproponowaniem programu działań ograniczających ryzyko zawodowe, a tym samym zwiększających poziom bezpieczeństwa pracy. Po przeanalizowaniu pomiarów hałasu na wybranych stanowiskach huty stali stwierdzono na jednym z nich odchylenie od normy dla tego czynnika, a także zaproponowano działania korygujące z wykorzystaniem metod technicznych. Po przeprowadzeniu analizy zagrożeń czynnikami pyłowymi na wybranych stanowiskach pracy zakładu przemysłu hutniczego stwierdzono spełnienie wymagań norm dla pyłów i brak przeciwwskazań do bezpiecznego wykonywania pracy na badanych stanowiskach. Po dokonaniu analizy bezpieczeństwa pracy w zakładzie przemysłu hutniczego stwierdzono dużą skuteczność ograniczania wskaźnika częstotliwości wypadków, a także podnoszenia poziomu bezpieczeństwa pracy poprzez sukcesywne wdrażanie systemu zarządzania świadomością w dziedzinie bezpieczeństwa oraz kształtowanie dobrych nawyków, zarówno wśród rodzimych pracowników, jak i podwykonawców. W związku z powyższym, w analizowanej hucie stali w odpowiedni sposób potraktowano konieczność reagowania na występujące zagrożenia oraz sukcesywnego zwiększania poziomu bezpieczeństwa pracy.

## Literatura

- [1] Witryna internetowa Polskiej Unii Dystrybutorów Stali: <http://www.puds.pl/aktualnosci/wiadomosc-dnia/czolowka-swiatowej-branzy-stalowej>, 6.02.21017 r.
- [2] Przewodnik po zawodach - Wydanie II, Tom IV, Ministerstwo Gospodarki, Pracy i polityki społecznej, Warszawa, 2003 r., dokument elektroniczny: <http://psz.praca.gov.pl>, 6.02.17 r.
- [3] Edukacyjne forum kwalifikacji zawodowych. Multimedialny katalog zawodów. Zawód: Technik hutnik, Program operacyjny kapitał ludzki, Priorytet III Wysoka jakość systemu oświaty, dokument elektroniczny: <https://zasobyip2.ore.edu.pl/pl/publications/download/42978>, 6.02.2017 r.
- [4] Mikulski W., Karczmarska A., Koton J.: *Hałas na stanowiskach pracy*, Zakład Wibroakustyki i Bio-Dynamiki Systemów, Politechnika Poznańska, dokument elektroniczny: <http://neur.am.put.poznan.pl>, 06.02.2017 r.
- [5] Witryna internetowa Centralnego Instytutu Ochrony Pracy: <http://archiwum.ciop.pl/1718.html>, 6.02.2017 r.
- [6] Pawlas K., Boroń M., Pawlas N., *Hałas z udziałem hałasu niskoczęstotliwościowego. Broszura informacyjna dla pracodawców*, Instytut Medycyny Pracy i Zdrowia Środowiskowego, Sosnowiec, 2013 r.



- [7] Gawęda E.: Zagrożenia chemiczne i pyłowe w procesach produkcji wyrobów metalowych, *Bezpieczeństwo Pracy*, nr 4, 2008, s. 7-11.
- [8] Bartkowiak G., Marszałek A.: Obciążenie cieplne pracowników w gorącym środowisku pracy i sposoby jego redukcji, *Bezpieczeństwo Pracy*, nr 10, 2012, s. 28-32.





**Wojciech Tutak, Renata Gnatowska, Jerzy Winczek, Elżbieta Gawrońska**

*Faculty of Mechanical Engineering and Computer Science*

*Czestochowa University of Technology*

*Al. Armii Krajowej 21, 42-200 Czestochowa*

*e-mail: tutak@imc.pcz.pl*

## ANALYSIS OF HEAT RELEASE IN COMPRESSION IGNITION ENGINE

**Abstract.** The main goal of this research was to analyze the heat release in a compression ignition (CI) engine. Work contains description of the combustion process in the combustion chamber of CI engine with an explanation of the combustion stages. The research was conducted for wide range of load. At full load of engine achieved the highest value of pressure rise, temperature, fuel consumption and indicated mean effective pressure. The lowest values of these parameters were obtained for the smallest load. The full load of engine was characterized by the highest value of the heat release, and the longest combustion period due to the large share of diffusion combustion phase. The lowest load was characterized by 3.5 times less in value of heat release than in case of maximum load and heat release rate course was without visible diffusion combustion phase.

**Keywords:** compression ignition engine, diffusion combustion, premixed combustion.

## ANALIZA WYDZIELANIA CIEPŁA W SILNIKU O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM

**Streszczenie.** Głównym celem badań było przeprowadzenie analizy wydzielania ciepła w silniku o zapłonie samoczynnym. Badana jednostka to sześciocyldrowy silnik z zapłonem samoczynnym o mocy 80 kW, poddany obciążeniom w szerokim zakresie. Dla obciążenia maksymalnego uzyskano największy przyrost ciśnienia, temperatury, godzinowego zużycia paliwa oraz ciśnienia indykowanego. Najmniejsze wartości powyższych parametrów zostały uzyskane dla najmniejszego obciążenia. Obciążenie maksymalne charakteryzuje się najwyższą ilością wydzielonego ciepła, a także najdłuższym procesem spalania za sprawą dużego udziału spalania dyfuzyjnego. Przy obciążeniu minimalnym wydzielania ciepła było 3,5- krotnie mniej niż dla maksymalnego, ponadto proces spalania trwał najkrócej, bez widocznego udziału spalania dyfuzyjnego.

**Słowa kluczowe:** silnik o zapłonie samoczynnym, spalanie kinetyczne, spalanie dyfuzyjne.

## Introduction

The study of the rate of heat release, i.e. the conversion of chemical energy to mechanical energy, allows analysis of the operation of the piston engine. The source of information on the rate of heat release in the internal combustion (IC) engine is the combustion pressure course obtained during experimental researchers [1-2, 10-13, 16]. To characterize the combustion process in the IC engine, it is important to identify its start and the end. In a spark-ignition engine, spark ignition is often considered as the beginning of combustion. In the compression ignition engine, there is also the so-called: ignition delay period and its duration depend on many physicochemical factors. The ignition delay is defined as the time between the start of fuel injection to the beginning of the combustion process. The total delay of ignition consists of: physical delay - fuel atomization, evaporation of fuel droplets, mixing with air and chemical delay - pre-flame reactions. Ignition delay is one of the most important parameters of compression ignition (CI) engines which will directly affect the performance, emission and combustion. A number of investigations have been conducted to study the ignition delay and combustion duration of diesel fuel combustion [4, 12].

Attempts to determine the rate of heat release in a piston engine have been made since the beginning of the existence of engines. One of the earliest work on this issue was Marvin's work published in 1928, in which the author evaluated the rate of heat release on the basis of an analysis of the logarithmic graph of pressure course [1, 5, 8]. The heat release process in the IC engine is used to determine the combustion rate of fuel. Particular attention is given to the position of 50% of the heat release relative to the position of the engine crankshaft. It is stated in the literature that if half of the heat release is about 8 degree after top dead center (TDC) then the engine achieves maximum efficiency. An analysis of the heat release process can be carried out as an analysis of the heat release rate (HRR) and analysis of the mass fraction burned (MFB) [2, 3, 15]. Determining the moment of 50% heat release is also important for engine control [9]. In determining the rate of combustion in the IC engine, the so-called Vibe function [17]. This is a semi-empirical relationship used to determine the course of fuel mass fraction changes during combustion process occurred in the thermal cycle of IC engine.

As part of the work, a compression ignition internal combustion engine was investigated. The collected measurement data was used to calculate the basic indicators characterizing the operation of the piston engine at various loads as well as to analyze the process of heat release. The analysis allowed

characterizing the process of heat release and identification of combustion phases, the determination of the ignition delay and the combustion duration.

## Test stand and measurement system

The research stand was a six-cylinder, compression ignition IC engine. The tested engine is the power component of the mobile generator set. The aggregate load was a heat pump with adjustable power, which allowed for a gradual change in the load of the tested engine. The main engine parameters are presented in Tab. 1.

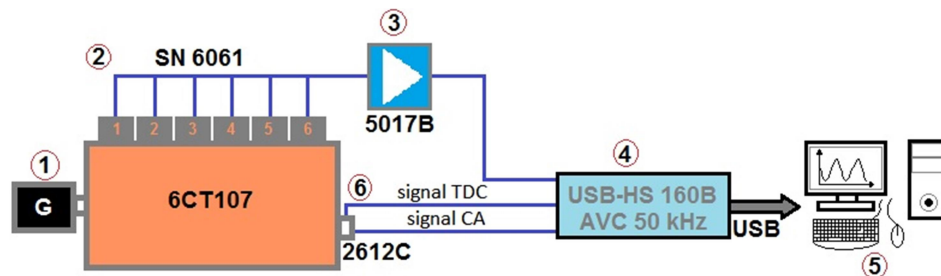


Fig. 1 Diagram of the system for engine's indication 1 - 6-cylinder internal combustion engine, 2 - pressure sensors, 3 - signal amplifier, 4 - measurement card, 5 - computer, 6 - crankshaft position sensor.

Table 1. Engine specification

Parameters	value
displacement	6.54 dm <sup>3</sup>
rotational speed	1500 rpm
crank throw	60.325 mm
cylinder bore	107.19 mm
connecting-rod length	245 mm
compression ratio	16.5 -
intake valve opening	10±4° BTDC deg
intake valve closure (IVC)	50±4° ABDC deg
exhaust valve opening	46±4° BBDC deg
exhaust valve closure (EVC)	14±4° ATDC deg
injection angle	9°±1.5° deg

During the engine's indication, the pressure in all 6 cylinders was indicated with the resolution of 1 deg. The compression pressure was also measured to determine the thermodynamic top dead center (TDC). Kistler's pressure sensors 6061 SN 298131 were used during the study (sensitivity:  $\pm 0.5\%$ ) and charge amplifier Kistler 5011B of linearity of FS  $< \pm 0.05\%$ . The test engine operated with constant rotational speed 1500 rpm. The measured data were collected using data acquisition module, Measurement Computing USB-1608HS – 16 bits resolution, sampling frequency 20 kHz. The error of piezoelectric pressure transducer is  $\delta_p = 0.5\%$  and the amplifier  $\delta_a = 3\%$ . The measurement error of *IMEP* is  $\delta_{IMEP} = \delta_{ITE} = 3.1\%$ .

Analysis of combustion process in the internal combustion engine usually is carried out with the rate of heat release [14]. Heat release rate ( $dQ/d\phi$ ) is calculated on the basis of the measured in-cylinder pressure data and crank angle readings. The basis for determining the heat release rate is the first law of thermodynamics and the equation of state. After rearranging and simplifications, the heat release rate vs. crank angle is obtained in well-known form as follows:

$$\frac{dQ}{d\phi} = \frac{1}{\kappa - 1} \left[ \kappa p \frac{dV}{d\phi} + V \frac{dp}{d\phi} \right] \quad (1)$$

where:  $\kappa$ - the ratio of specific heats,  $V$  – cylinder volume,  $p$  – in cylinder pressure.

Instantaneous cylinder volume  $V$  is precisely described by engine geometry. Due to omitting as follows: heat transfer to walls, crevice volume, blow-by and the fuel injection effect, the resulted heat release rate is termed as the net heat release rate. The cumulative net heat released is obtained by integrating Eq. 1 over the crank angle  $\phi$ .

## Results

On the bench, the engine was investigated for 6 loads. The obtained results were used for analysis of heat release. Among other things, the indication mean effective pressure, the engine's performance and the hourly and specific fuel consumption were determined as well. The engine was indicated in all cylinders and the arbitrarily first cylinder was selected for the purpose of the analysis. For the maximum test load that was 55 kW for this engine, a heat release analysis was also carried out using the (Rassweiler–Withrow) R&W concept of pressure distribution [6-7, 9].

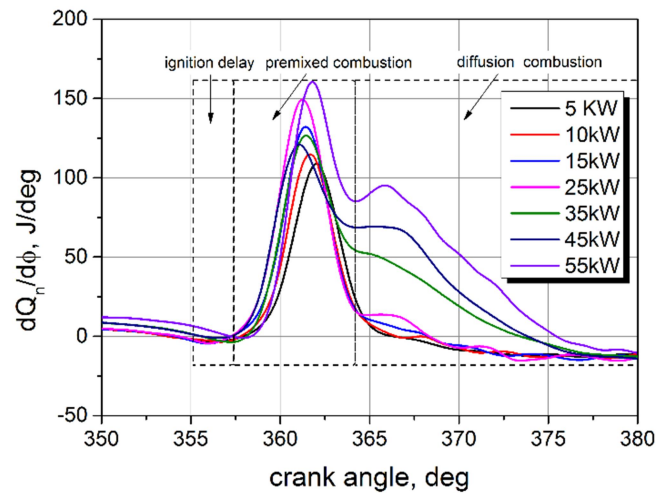


Fig. 2 The heat release rates for the test engine for all analyzed loads

Figure 2 shows the combination of the heat release rates for the test engine for all analyzed loads. Traces for loads of 5-25 kW have similar waveforms, without a clear contribution to diffusion combustion. Between 35 and 55 kW the share of diffusion combustion increases. Runs of 5-25 kW do not exceed 150 J/deg. The smallest heat release rate is for 5 and 10 kW loads and is 123 J/deg, the highest for 55 kW equals 162 J/deg. After exceeding the 25 kW load, the diffusion phase is clearly visible during the course of the heat release, thus reducing the contribution of premixed combustion to diffusion. The figure shows the start point of the diesel injection and the distribution of heat to the four combustion phases (Fig. 3). The first phase is called the ignition delay, which for this engine was about 8 deg. Of course, this value was different for each of the loads, as shown in the previous analysis. The second stage of combustion, called premixed combustion phase in this engine, started after the ignition delay period and lasted about 5 deg after TDC, which was comparable to the ignition delay time. The third stage of heat release is diffusion combustion phase, controlled primarily by the evaporation process and the fuel-air mixture was the longest and occupied nearly 15 deg. This third stage of combustion was noticeable, as already mentioned, for the three highest loads. In addition, it is evident here that with the increase in engine load, the share of heat release rate at this stage increases. For a 35 kW load, the maximum value of the heat release rate in the diffusion combustion phase was 53 J/deg, for a 45 kW load it was 69 J/deg and for a maximum load of 92 J/deg. The last step was post-combustion.

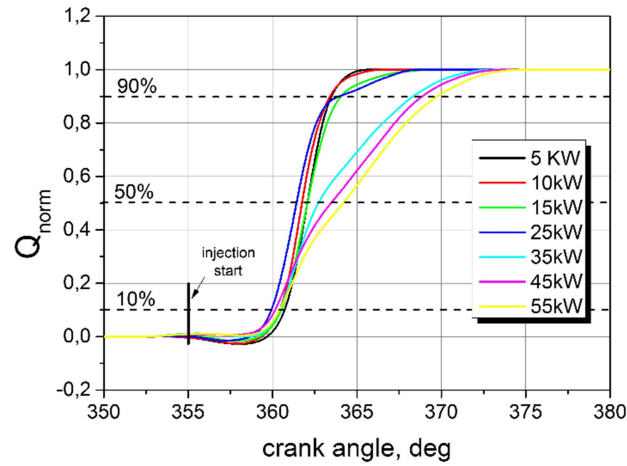


Fig. 3 The normalized heat release in the test engine

Figure 3 shows the normalized heat release traces for the tested engine. As shown, the 5, 10 kW loads are close to each other and their course is more violent than for 35, 45 and 55 kW, because with small loads, premixed combustion phases takes place. For smaller loads, the total heat output ends at about 368 deg while for the higher at about 374 deg.

Based on the analysis of  $Q_{norm}$  traces, it is possible to evaluate the combustion process by determining the ignition delay time and the combustion duration time. The ignition delay time is defined as the time from the beginning of the injection until the 10% heat is released. Combustion duration time is defined as the period from the time of 10% heat release up to 90% release.

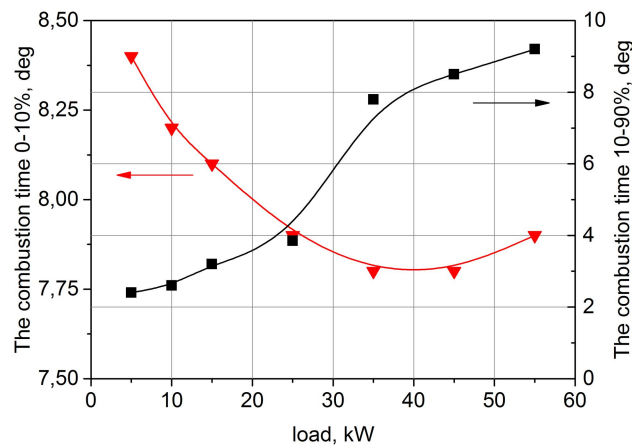


Fig. 4 The delay time of ignition and the duration of combustion



On the basis of the data presented in Figure 4, it can be assumed that as the engine load increases, the ignition delay time decreases, while the differences in values are small in the range of 1 deg. The visible difference is in combustion duration. For loads up to 25 kW there was a relatively small increase in combustion time, while for loads exceeding 25kW there was a noticeable increase in combustion duration. As Fig. 4 shows, the shortest duration of fuel burnout was recorded at 5 kW and reached 2.4 deg, while the longest time was 55 kW at 9.3 deg. The upward trend is due to the absence of diffusion combustion phase at the first four loads and its growing share in the case of loads 35, 45 and 55 kW.

## Summary

The paper presents an analysis of the heat release in the combustion process in a compression ignition internal combustion engine. Based on the conducted research it was stated:

- With the increase in engine load, the nature of the heat release rate in the engine under test was changed. The increasing load on the engine caused the diffusion rate to increase relative to the premixed phase of the combustion rate curve. The 25 kW load was dominated by premixed combustion. After exceeding this load, ie 35 kW load, the diffusion rate is shown on the heat rate curve.
- With the increase in load, the ignition delay time decreased slightly.
- With increasing load, the duration of combustion increased. Exceeding 50% of engine load it is a noticeable increase in combustion time due to the increasing share of the diffusion phase during the combustion process in the engine.

## Reference

- [1] d'Ambrosio S., Ferrari A., Galleani L., *In-cylinder pressure-based direct techniques and time frequency analysis for combustion diagnostics in IC engines*. Energy Conversion and Management, 99, 2015, p. 299-312, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.03.080>
- [2] Ebrahimi R., Effect of specific heat ratio on heat release analysis in a spark ignition engine, Scientia Iranica, 18 (6), pp. 1236, 2011, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scient.2011.11.002>
- [3] Grab-Rogaliński K., Szwaja S., Tutak W., *The Miller cycle based IC engine fuelled with a CNG/hydrogen*. Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 21, No. 4, p.137-144, 2014, DOI: <http://dx.doi.org/10.5604/12314005.1130459>

- [4] Jamrozik A., Tutak W., *Modelling of combustion process in the gas test engine*. Perspective Technologies and Methods in Mems Design, MEMSTECH, Lviv - Polyana, Ukraine. s. 14-17, 2010
- [5] Marvin C., *Combustion Time in the Engine Cylinder and Its Effect on Engine Performance*. N.A.C.A. Report No. 276, 1928, s. 391-406.
- [6] Mendera K.Z., Smereka M., *On the influence of fuel type on optimal location of 50% mass fraction burned*, Journal of KONES Powertrain and Transport, 13, 4, 2006, p. 334-342.
- [7] Rassweiler, G. M., Withrow, L., *Motion Pictures of Engine Flames Correlated with Pressure Cards*, SAE Transactions, Vol. 38, pp. 185-204, 1938.
- [8] Rychter T., Teodorczyk A., *Teoria silników tłokowych*, WKiŁ, Warszawa 2006.
- [9] Smereka M., *Analiza procesu wydzielania ciepła w tłokowym silniku spalinowym o zapłonie iskrowym*. Praca doktorska, Politechnika Częstochowska, 2009.
- [10] Staś M.J., *Sposób oceny przebiegu wydzielania ciepła w silniku tłokowym o zapłonie samoczynnym z wtryskiem bezpośrednim*. Journal of KONES, Internal Combustion Engines, 7, 1-2, 2000, p. 485-496.
- [11] Tutak W., *Bioethanol E85 as a fuel for dual fuel diesel engine*, Energy Conversion and Management 86, 2014, p. 39-48,  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2014.05.016>
- [12] Tutak W., *Determination of Ignition Delay in the Combustion Process of CI Engine*. Proceedings of IX<sup>th</sup> International Conference in MEMS Design, MEMSTECH'2013, s.73-78, Lviv-Polyana, 2013.
- [13] Tutak W., Jamrozik A., Gruca M., *CFD modeling of thermal cycle of supercharged compression ignition engine*. Journal of Kones Powertrain and Transport, 19, 1, 2012, p. 465-472.
- [14] Tutak W., *Modelling and analysis of some parameters of thermal cycle of IC engine with EGR*. Combustion Engines 4/2011 (147). p. 43-49, 2011.
- [15] Tutak W., *Numerical investigation on effects bioethanol fuel E85 on combustion process of dual-fuel diesel engine powered in PFI system*. Logistyka 4, 2014.
- [16] Tutak W., *Numerical investigation on effects bioethanol fuel E85 on combustion process of dual-fuel diesel engine powered in PFI system*. Logistyka 4/2014, 2014.
- [17] Vibe I. I., *Brennverlauf und Kreisproceß von Verbrennungs-motoren*, VEB Technik, Berlin, 1970.



**Ewa Konieczko**

*Wydział Matematyczno-Przyrodniczy  
Akademia Jana Długosza w Częstochowie  
al. Armii Krajowej 13/15, 42-200 Częstochowa*

## ANALIZA WPŁYWU LICZBY PASAŻERÓW NA CZAS EWAKUACJI PORTU LOTNICZEGO RADOM

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono proces tworzenia oraz wyniki przeprowadzonych symulacji procesu ewakuacji pasażerów z wykorzystaniem programu Pathfinder, na przykładzie Portu Lotniczego Radom. Symulacją bazową jest ewakuacja odwzorowana na podstawie ewakuacji przeprowadzonej w ramach ćwiczeń „RADOM 2016” epizod „Port Lotniczy”. Kolejno przeprowadzone zostały cztery modyfikacje symulacji bazowej.

**Słowa kluczowe:** ewakuacja, port lotniczy, Port Lotniczy Radom.

## THE INFLUENCE OF THE NUMBER OF PASSENGERS ON THE EVACUATION TIME OF RADOM AIRPORT

**Abstract.** The paper presents the development of evacuation model in Pathfinder software and the results of the simulation of passengers evacuation from Radom Airport. The base simulation is the one prepared on the basis of real evacuation carried out under “RADOM 2016” training. Four modifications of the base simulation are presented.

**Keywords:** evacuation, airport, Radom Airport.

## Wstęp

Port lotniczy jest miejscem, gdzie bezpieczeństwo jest najbardziej istotne. Co dzień spotykają się tam setki, a nawet tysiące osób. Głównym celem portu lotniczego, jest stworzenie odpowiednich, tj. bezpiecznych i bezawaryjnych, warunków obsługi pasażerów, obejmujących wykonywanie lotów, ochronę przed bezprawnymi aktami ingerencji, jak również ratownictwo lotniskowe.

Aspekt bezpieczeństwa to podstawowe kryterium, przy projektowaniu samolotów, pełni również bardzo ważną rolę w procesie projektowania obiektów naziemnych, takich jak terminale pasażerskie. Biorąc pod uwagę tysiące pasażerów, którzy codziennie korzystają z usług linii lotniczych, pierwszą najważniejszą cechą terminali powinna być funkcjonalność. Jednak nie można zapominać o bezpieczeństwie. Aby je zapewnić, należy spełnić, czasami surowe, przepisy dotyczące ochrony przeciwpożarowej, szczelności stref oraz możliwości swobodnej oraz płynnej ewakuacji w obliczu zagrożenia.

Na przebieg procesu ewakuacji wpływa wiele czynników, do podstawowych możemy zaliczyć parametry związane z czynnikiem ludzkim takie, jak wiek, płeć, szybkość poruszania czy czas reakcji związany z porą dnia oraz miejscem, w którym się znajdujemy podczas ewakuacji [1, 2]. Kolejnym czynnikiem są warunki związane z rozwojem potencjalnego zagrożenia. Pomimo nieprzewidywalności procesu ewakuacji, dzięki programom komputerowym możemy proces ten lepiej poznać.

## Parametry wejściowe oraz proces tworzenia modelu

Podstawową częścią pracy było uzyskanie odpowiedzi na pytanie: jak liczba pasażerów wpływa na czas ewakuacji portu lotniczego. W tym celu przeprowadzone zostały symulacje ewakuacji pasażerów z Portu Lotniczego Radom. W pracy wykorzystano program symulacyjny Pathfinder.

Pathfinder jest symulatorem zachowania tłumu, przeznaczonym do modelowania złożonych scenariuszy ewakuacji. Program umożliwia wyznaczenie czasu bezpiecznego wyjścia z budynku, wykorzystując w obliczeniach algorytm sztucznej inteligencji. Wiele trybów symulacji i definiowalne cechy pracowników znajdujących się w budynku z łatwością pozwalają na odkrywanie różnych scenariuszy ewakuacji. Pathfinder jest specjalnym typem symulatora, gdzie każdy zdefiniowany pracownik posiada szereg indywidualnych cech, które mogą wpływać na jego ruchy i decyzje podczas symulacji niezależnie od innych jednostek [3].

W ramach pracy przeprowadzona została symulacja bazowa oraz 4 modyfikacje tej konfiguracji.

Tab. 1. Zestawienie założeń poszczególnych konfiguracji

\*zastosowane w stosunku do pasażerów, nie w stosunku do pracowników portu oraz służb ratunkowych.

<b>Konfiguracje</b>	<b>Liczba pasażerów</b>	<b>Wzorzec zachowania uwzględniający początkowe opóźnienie</b>	<b>Wzorzec zachowania uwzględniający zerowe początkowe opóźnienie *</b>
Konfiguracja bazowa	129	Tak	Tak
Modyfikacja konfiguracji bazowej nr 1	229	Tak	Tak
Modyfikacja konfiguracji bazowej nr 2	329	Tak	Tak
Modyfikacja konfiguracji bazowej nr 3	429	Tak	Tak
Modyfikacja konfiguracji bazowej nr 4	529	Tak	Tak

Każda konfiguracja obejmowała wykonanie dwóch symulacji ewakuacji z daną liczbą osób przebywających na terenie portu lotniczego. Pierwsza – z zastosowaniem pięciu różnych wzorców zachowania, oraz druga – z natychmiastową reakcją na ewakuację.

Pierwszą symulacją, a zarazem konfiguracją bazową, wykonaną z wykorzystaniem programu jest odwzorowanie ewakuacji przeprowadzonej 8 września 2016 r. w ramach ćwiczeń „RADOM 2016” epizod „Port Lotniczy”. Ćwiczenie miało na celu przeprowadzenie wspólnego działania służb lotniskowych i zewnętrznych służb państwowych w sytuacji zagrożenia.

W celu odwzorowania warunków ewakuacji przeprowadzonej w ramach ćwiczenia, w symulacji uwzględniono następujące pomieszczenia terminalu:

- hall ogólnodostępny wraz z szatnią;
- bar wraz z zapleczem;
- toaletę męską w części ogólnodostępnej;
- pomieszczenia biurowe.

Pomieszczenia obejmują łącznie powierzchnię 700 m<sup>2</sup>. Ewakuacja osób z budynku została przeprowadzona za pomocą siedmiu wyjść ewakuacyjnych:

- 4 wyjścia ewakuacyjne o szerokości 140 cm,
- 2 wyjścia o szerokości 90 cm,
- oraz drzwi o łącznej szerokości 135 cm.

W celu narysowania wszystkich pomieszczeń, które zostały uwzględnione w symulacji ewakuacji, wykorzystano podkład graficzny, zimportowany w formacie DXF, przedstawiający terminal pasażerski Portu Lotniczego Radom. Pomieszczenia oraz drzwi zostały utworzone narzędziami rysunku Pathfinder.



Rys. 1. Rzut terminalu pasażerskiego z uwzględnioną częścią, która została wykorzystana w symulacji ewakuacji pasażerów

W symulacji pierwszej zastosowano 5 wzorców zachowania, celem odwzorowania rzeczywistego zachowania osób w trakcie zagrożenia. Zachowania 1–4 obejmowały opuszczenie terminalu dowolnym wyjściem, z wyjątkiem drzwi nr 002, ponieważ drzwi te znajdują się w części biurowej. Zachowanie 5 bazowało na podążaniu do dowolnego wyjścia.

Zachowania głównie różniły się początkowym opóźnieniem:

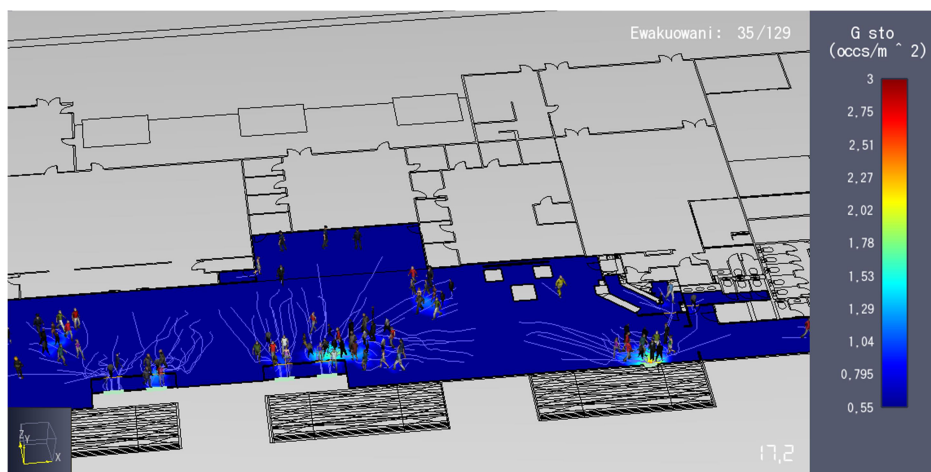
- zachowanie 1: początkowe opóźnienie 0 s,
- zachowanie 2 : początkowe opóźnienie 4 s,
- zachowanie 3: początkowe opóźnienie 9 s,
- zachowanie 4: początkowe opóźnienie 15 s,
- zachowanie 5: początkowe opóźnienie 30s.

Zachowanie 5 zastosowane zostało w stosunku do pracowników portu oraz służb ratowniczych. Osoby te ewakuację rozpoczynają w momencie, gdy ostatni pasażerowie opuszczają teren terminalu.



Rys. 2. Okno edycji Zachowania 5 zastosowanego w stosunku do pracowników portu oraz służb ratowniczych

Modelem zachowania wykorzystanym we wszystkich symulacjach jest model zmiennosterujący. W hallu ogólnodostępnym znajdowało się 119 osób, w części biurowej 10 osób.



Rys. 3. Widok procesu ewakuacji pasażerów – konfiguracja bazowa

Po upływie 47,3 sekund ewakuowane zostały wszystkie osoby z terminalu pasażerskiego.

W symulacji drugiej w celu sprawdzenia teorii, że to liczba pasażerów ma istotny wpływ na czas procesu ewakuacji, przeprowadzona została symulacja tej samej liczby pasażerów, jednak z wykorzystaniem innych wzorców zachowania:

- Zachowanie 1: początkowe opóźnienie 0 s,
- Zachowanie 2: początkowe opóźnienie 25 s (zastosowane w stosunku do pracowników portu oraz służb ratowniczych).

Ewakuacja osób odwzorowana na podstawie przeprowadzonych ćwiczeń z uwzględnieniem zerowego opóźnienia czasowego w stosunku do pasażerów przebywających na terenie portu trwała 45,8 sekundy.

Kolejno analogicznie przeprowadzone zostały modyfikacje konfiguracji bazowej.

## Podsumowanie uzyskanych wyników

Tab. 2. Zestawienie otrzymanych wyników symulacji

	<b>Wzorzec zachowania uwzględniający początkowe opóźnienie</b>	<b>Wzorzec zachowania uwzględniający zerowe początkowe opóźnienie</b>
<b>Konfiguracja bazowa</b>	47,3 s	45 s
<b>Modyfikacja nr 1</b>	53 s	45,3 s
<b>Modyfikacja nr 2</b>	57,3 s	49,5 s
<b>Modyfikacja nr 3</b>	64 s	58,3 s
<b>Modyfikacja nr 4</b>	78,3 s	68,8 s

Konfiguracja bazowa obejmowała przebywanie 129 osób na terenie terminalu pasażerskiego, w tym 80 pasażerów znajdujących się bezpośrednio w hallu ogólnodostępnym. Ewakuacja z zastosowaniem pięciu wzorców zachowania trwała 47,3 sekundy, z kolei czas ewakuacji z zastosowaniem zerowego opóźnienia czasowego zmniejszył się do 45 sekund.

Modyfikacja nr 1 obejmowała przebywanie 180 pasażerów oraz 49 pracowników portu lotniczego. Czas ewakuacji osób z zastosowaniem 5 wzorców zachowania trwał 53 sekundy. Tylko o 7,7 sekundy mniej trwała ewakuacja osób z zastosowanym wzorcem natychmiastowej reakcji.

W kolejnej modyfikacji konfiguracji bazowej zwiększono liczbę pasażerów znajdujących się w hallu ogólnodostępnym do 280. Liczba pracowników portu pozostała bez zmian. W symulacji pierwszej osoby zostały ewakuowane

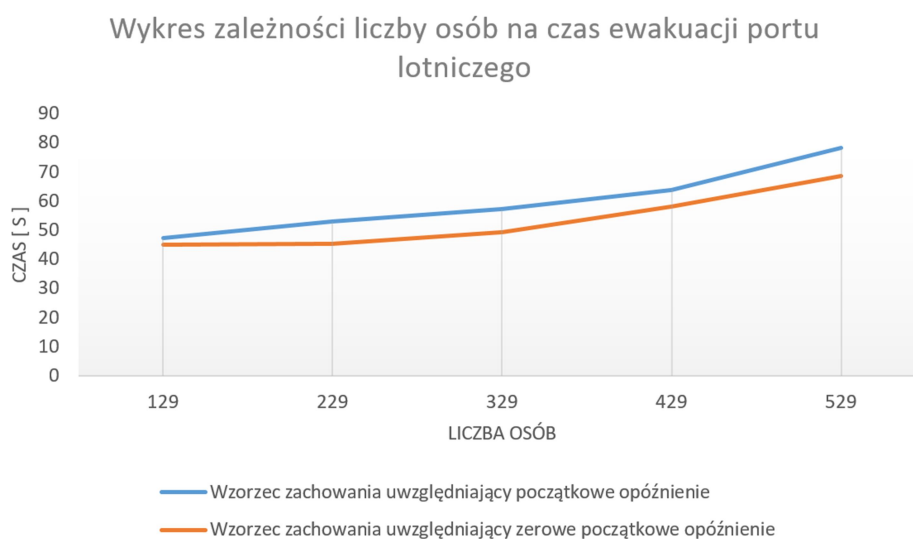


w czasie 57,3 sekund. W symulacji drugiej czas ten zmniejszył się do 49,5 sekund.

Modyfikacja numer 3 obejmowała ewakuację 380 pasażerów portu lotniczego. Podobnie jak w przypadku poprzedniej konfiguracji liczba pracowników portu nie uległa zmianie. Ewakuacja osób z terminalu z zastosowaniem opóźnienia początkowego trwała 64 sekundy. W przypadku zastosowania zerowego opóźnienia początkowego czas ten wyniósł 58,3 sekund.

W ostatniej modyfikacji konfiguracji bazowej liczba pasażerów przebywających w hallu ogólnodostępnym wynosiła 480. Dalsze zwiększanie liczby pasażerów nie było możliwe z uwagi na brak miejsca. Symulacja obejmowała ewakuację 529 osób. W wyniku symulacji pierwszej czas ten wyniósł 78,3 sekundy, z kolei symulacja druga dała wynik 68,8 sekund.

Po przeprowadzeniu pięciu symulacji można zauważyć, że niezależnie od zastosowanych wzorców zachowania, na czas ewakuacji największy wpływ ma liczba osób biorących udział w procesie. Zależność doskonale przedstawia wykres poniżej.



Rys. 4. Porównanie czasów ewakuacji uzyskanych z wykorzystaniem programu symulacyjnego

## Wnioski

W pracy przedstawiona została symulacja odwzorowania ewakuacji osób przeprowadzona w ramach ćwiczeń „RADOM 2016” epizod „Port Lotniczy” oraz cztery modyfikacje tej konfiguracji. Czas ewakuacji osób z terminalu pasa-

żerskiego uzyskany w trakcie ćwiczeń (około 1 minuta [4]) w porównaniu do czasu uzyskanego w wyniku przeprowadzonej symulacji bazowej różni się o około 12 do 15 sekund, w zależności od zastosowanych wzorców. Wyniki też są bardzo zbliżone do siebie, możemy więc założyć, że ewakuacja w warunkach ćwiczeń przebiegała podobnie jak z użyciem symulatora. Powodem różnicy w uzyskanym czasie może być początkowe opóźnienie, uproszczenia przyjęte w modelu czy sam dobór zachowania

Hall ogólnodostępny portu zgodnie z przepisami ochrony przeciwpożarowej [5, 6] przystosowany jest do jednoczesnego przebywania 200 osób, dzięki symulacji możemy zauważyć, że przy takiej liczbie pasażerów ewakuacja przebiega sprawnie. W momencie, kiedy ewakuowanych osób jest o ponad 2 razy więcej, czas wydłuża się od 50 do 62%, a sam proces nie przebiega tak płynnie. Analizując przebieg wszystkich symulacji, można zauważyć tworzenie się zatorów przy wyjściu ewakuacyjnym bezpośrednim z hallu ogólnodostępnego (drzwi o szerokości 90 cm). Czas ewakuacji mógłby ulec zmniejszeniu, dzięki wyeliminowaniu tego problemu. Poszerzenie drzwi do szerokości np. 140 cm zwiększyłoby ich przepustowość, a co za tym idzie, ewakuacja przebiegałaby szybciej i sprawniej.

## Literatura

- [1] Joseph L. Smith, *Agent-Based Simulation of Human Movements During Emergency Evacuations of Facilities*, Structures Congress 2008, DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/41016\(314\)90](http://dx.doi.org/10.1061/41016(314)90)
- [2] Cłapa I., Dziubiński M. *Zachowanie ludzi jako jeden z czynników determinujących przebieg procesu ewakuacji*, Wydawnictwo CNBOP-PIB, 2014.
- [3] <http://pyrosim.pl/o-pathfinder/> (odwiedzony: 03.06.2017 r.)
- [4] Raport z przebiegu ćwiczenia pod nazwą „RADOM 2016” Epizod „Port Lotniczy” w dniu 08 września 2016 r.
- [5] Ustawa z dnia 24 sierpnia 1991 r. *o ochronie przeciwpożarowej* (Dz. U. 1991 nr 81 poz. 351).
- [6] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. *w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie* (Dz. U. 2010 nr 109 poz. 719).



**Stanislav Lichorobiec, Věra Holubová, Radomír Ščurek**

*Faculty of Safety Engineering*

*Dpt. of Security Services*

*VŠB -Technical University of Ostrava*

*Lumirova 13, 700 30 Ostrava Vyskovice, Czech Republic*

*e-mail: radomir.scurek@vsb.cz*

## SAFETY STUDY ON THREAT BY ACTIVE SHOOTER TO SCHOOL FACILITIES

**Abstract.** The reality of the danger of active shooters performing a terror attack at school facilities during the working hours, inspires to thought about possible guidelines under which an unarmed person could stop an armed aggressor in the moment he breaks into school and launches an attack. Quality physical security measures can prevent infiltration of a trespasser into a building or make it at least difficult, however it is necessary to always take into consideration that the physical security measures will be surpassed and the attacker infiltrates the building. Surviving an active shooter event is possible when following the “run-hide-fight & survive” guidelines.

**Keywords:** Active shooter, active killer, victim, protection of people and property, security guidelines.

## ANALIZA BEZPIECZEŃSTWA W PRZYPADKU WTARGNIĘCIA AKTYWNEGO STRZELCA DO BUDYNKÓW SZKOLNYCH

**Streszczenie.** Analiza zagrożeń w przypadku wtargnięcia aktywnego strzelca do budynków szkolnych skłania do analizy możliwości zatrzymania uzbrojonego agresora przez osobę nieuzbrojoną już w chwili rozpoczęcia ataku. Fizyczne i elektroniczne środki ochrony mogą uniemożliwić lub utrudnić przedostanie się osoby niepowołanej do obiektu, jednak należy rozważyć ewentualność infiltracji obiektu przez intruza. W takim przypadku niezbędne jest postępowanie zgodnie z zasadą „uciekaj, ukryj się, walczyć i przetrwać”.

**Słowa kluczowe:** aktywny strzelec, ofiara, ochrona osób i mienia, wytyczne w zakresie bezpieczeństwa.

## Introduction

Violence at schools is a frequently discussed topic in both media and academia lately. On one hand, there is a growing amount of news about growing school violence coming from abroad, and on the other there is a defined effort to prevent such events as the attack at Zdar nad Sazavou Business School from October 2014. There are multiple school violence prevention programs developed, primarily focusing at students and pupils, and the terms “active shooter” or “active killer” are defined.

As it is impossible to fully avoid a school attack, it is however possible to implement measures aiming at making an attack very difficult to perform or at least to minimize the impact of it. When the modus operandi of the Zdar nad Sazavou school attack is analyzed, substantial conclusions can be drawn with regards to devising such efficient security counter measures.

This article is not intended as a complex study on the school violence subject, it rather focuses on providing a response to whether it is feasible to encounter an active shooter who has already infiltrated the school grounds.

## Active shooter

It may not be widely acknowledged in the public, however the subject of active shooters is currently very topical on a global scale and active shooters undoubtedly present a specific security threat to the society. At this moment there is no technology or methodology known that would ensure a perfect security against an *active shooter* attack, which in its nature is an independent and individual decision and thus it is variable in time, place and mode.

Active shooter can be defined as a highly aggressive armed individual who resorts to using weapons and explosives against civilians at a specific site in order to reach his/hers objectives. The explosives are frequently used to increase the impact of the attack.

Why are firearms and explosives preferred? Besides the ultimate efficiency, it is also because they enable remote and thus less personal killing which is not as burdening for the attacker. In extreme cases of a depersonalized killing, when the impact on a human victim is not visible, the killer may assume that nothing “bad” had actually happened – just like in case of a bomber performing an air raid from high above the ground.

The active shooter prefers firearms to avoid any physical or emotional contact that would compromise the perfect delivery of the plan – indiscriminately killing as many as possible.

Active shooters would also carry more weapons than they are capable of using. They are neurotically pedantic about being equipped well enough and

even more than that. They would not rely on a single firearm and do assume that the more firearms they carry the better, and sometimes they carry armament that actually hinders their effort [4, 7].

Whereas the killing itself is indiscriminate, the choice of the place of the killing is not. Active shooter would operate in densely populated places where the shooting can be most efficient. The moments of surprise combined with uncontrollable panic caused by shooting at a crowded place are very important factors that increase the efficiency of the attack. This means that a school, especially the classrooms, is from this perspective a high-risk environment compared to toilets, cellars and other secluded places. Victims on the other hand are not selected and escaping individuals are never pursued – in active shooters logic pursuing individuals is wasted time that can be used to murder more victims.

What motivates active shooters' aggressive behavior? The psychological profiles describe an active shooter as an outsider with inclination to violence and aggression, or an individual fascinated by violence, playing violent video games, or a mentally ill person, or a person suffering from frustration or bullying, however high level of determination and independence in preparation and execution of the attack are common for the profiles.

The motivation to perform an attack stems from frustration and feeling of dispossession which originate in, for example, loss of employment, problems at work, exclusion from community, conflicts with classmates or teachers, unrequited love, reaction to a terror attack or various religious or political beliefs. The aggression does not surface prior to the attack, and if it does then it is done in private, for example by torturing animals. The dejected individual tends to locate the source of the frustration and to resolve it using weapons.

The outsiders are paradoxically far more dangerous than bullied individuals. Bullied pupils or students ventilate their negative emotions continuously, while outsiders expelled from the community of a school class are rather invisible, not successful, stamped as “weirdos”, and tend to release the accumulated frustration at once in a terminal and irreversible event, using the most lethal of means – weapons and explosives.

Active shooters are normally not under the influence of alcohol or drugs, they don't negotiate or take hostages, and they have no exit route planned either – they expect committing suicide or being killed in the shootout [1, 4, 7].

The victims are unarmed people, unprepared for the aggressive armed attack, crowded in a place with limited possibility of escape or concealment. Then the following questions are relevant:

- is a potential victim able to face an armed and motivated attacker?
- is an unarmed person able to stop such an attack?
- is a victim able to survive such an attack following any rules or method?

- Is there anything or anyone that can stop such an attack?

The answer to the above questions is definite: there is a minimal chance of surviving when facing an active shooter. However, well set-up and practiced security guidelines can improve this chance.

## Security study of school

The goal of the security study was to assess the current level of the inter-related physical security measures with focus on the possibility of infiltration of an armed trespasser into the school premises and at the same time to assess the level of security measures in case the trespasser breaches the physical security, enters the premises and launches an attack.

The security study investigated two types of facilities in scope – elementary school and grammar school. The infiltration through side entrances or building skin deficiencies was out of scope of the study. The risk assessment followed the process as recommended in ČSN 73 4400 Prevention of crime – management of planning, implementation and utilization of schools and school facilities.

The risk of unauthorized access to the object was determined using a semi-quantitative method and the risk level measured for the elementary school was ascertained as high, which corresponds to degree of “unacceptable”, for the grammar school the risk level was evaluated as medium with a corresponding degree of “conditionally acceptable”

Following questions were relevant in the study:

- Does the school take an attack by an active shooter into consideration when planning security measures?
- Has any scenario based on a real attack been elaborated?
- How are the teachers and students prepared for such a situation?
- Are there any evacuation rooms, or at least rooms that can be safely locked, available at the school?

The risk level in case of a trespasser having already infiltrated the building and having launched an attack, was assessed as very high, which corresponds to the degree of acceptability defined as “unacceptable”. The school managements are not ready for this type of attack. The outcome of the security study is a recommendation of security counter measures both in terms of the technical elements which aim to prevent unauthorized access to school or to make it difficult, and organizational measures applicable when the potential attacker breaches the physical security measures, infiltrates the building and launches an attack. The priority of this article is the latter – the recommendation of the organizational security countermeasures.

---

### **Suggested security guidelines for barring of unauthorized access – making unauthorized access to schools difficult**

The level of protection of people and property depends on each school's security policy which results from the individual school management's decision on the level and strategy of security protection. Very important in this respect is the physical security which is represented by a system of precautions that prevent or make it difficult for a trespasser to enter the object.

The school management's goal should be to eliminate the possibility of an attacker entering the premises. As it is not possible to eliminate the risk to the full extent, a lot can be done in terms of securing the main entrance. Still, the security measures of a school need to be assessed from a high level perspective to avoid a situation where the main focus is dedicated to securing the main entrance, while the trespasser can enter the premises easily using the side entrances or takes advantage of security deficiencies of the building skin. However, it has to be taken into consideration that the attacker will breach the physical security system and enter the premises.

Given the fact that the basic steps towards security of any organization are risk identification, taking preventive countermeasures and periodical follow-up, each school's management should start with a qualified assessment of the actual security risks from the process and structural point of view and the definition of the threat levels to be addressed. Then it is necessary to deploy quality means of physical protection that combine technical means of security, security personnel and security routines that prevent or make difficult any unauthorized access to the premises [4, 6, 7].

The Czech Technical Standard ČSN 73 4400 Prevention of crime – management of planning, implementation and utilization of schools and school facilities provides the school managements with a qualified set of guidelines to uncovering physical security deficiencies and suggests counter measures [9].

A vital role in this respect plays prevention in the form of a sum of countermeasures aiming to reduce the risk of an attack and emergency situations of this type. The preparedness of the school management is depending on having developed relevant response scenarios, securing appropriate training and materials, securing the cooperation of the law enforcement agencies, their level of training, equipment, technical and economical means to provide competent response to threats [3].

## **Suggested security guidelines in case an attacker has entered the premises**

In case the system of physical security is breached by active shooter, it is of the utmost importance for everybody to safely escape the premises. Still, escaping may be impossible for some people. What options do have those who remain involuntarily in the building? First of all, it is necessary to find a shelter, and then, in the hiding, to stick to the guidelines of behavior. In theory this sounds easy, but to what degree is this actually feasible today?

There is a way how to prepare the potential victims – there is a set of security guidelines in terms of general organization and function of the emergency alert system, which the potential victims have to be familiar not only in theory but also in the way of active practice.

Based on the lessons learned from countries where an active shooter attack has already happened, the following method is suggested to minimize the number of victims:

**“RUN ► HIDE ►► FIGHT ►►► SURVIVE AN ACTIVE SHOOTER EVENT”**

**“RUN” – when an active shooter is in your vicinity**



Illustration no. 1 [8]

- if there is an escape path, attempt to evacuate!
- evacuate whether others agree to or not!
- leave your belongings behind!
- help others escape if possible!
- prevent others from entering the area!
- call 911 when you are safe!



**“HIDE” – if evacuation is not possible, find a place to hide**



Illustration no. 2 [8]

- lock and/or blockade the door using large objects – such as a copy machine, a bench, a cabinet, etc.!
- silence your cell phone!
- hide behind large objects!
- remain very quiet!
- the hiding place should be out of the shooter's view
- the hiding place should provide protection if shots are fired in your direction
- the hiding place should not trap or restrict your options for movement

**“FIGHT” – as a last resort, and only if your life is in danger:**



Illustration no. 3 [8]

- attempt to incapacitate the shooter – you are acting under self-defense and necessity!
- improvise weapons – use a chair, a fire extinguisher, a kettle!
- act determined, aggressively and use the moment of surprise!
- commit to your actions – your life is at stake!

#### **“When law enforcement & emergency arrive”**



Illustration no. 4 [8]

- remain calm and follow instructions!
- keep your hands visible at all times!
- avoid pointing or yelling!
- know that help for the injured is on its way!

**To evaluate any defense’s pertinence and usefulness, or to evaluate active resistance of individuals facing an armed attacker, based on operative experience it can be stated that if the active shooter met resistance, the outcome was negative in some of the events. However, if the active shooter remained unchallenged, the outcome was always negative!!!**

#### **The general organization and function of the emergency alert system**

The school principal is accountable for the organization and function of the emergency alert system, as such his/her responsibilities include:

- defining the way people will be informed about imminent danger
- defining possible and recommended evacuation routes

- defining evacuation rooms in relation to the size of the school, these should serve as shelter in case evacuation is impossible
- checking regularly that responsible personnel is familiar with the security guidelines published
- setting dates of practical rehearsals of evacuation of both staff and students, and making sure these rehearsals are regular and include synchronization with the emergency agencies
- regular assessment of the level and status of the security measures intended to prevent entry of the premises by an armed attacker
- regular update of the security documentation and ensuring that emergency agencies are consulted about any changes [6].

### **Acoustic Alarm Signal**

The acoustic signal used for warning against an active shooter threat should be different from the signal used as a fire alarm and at the same time shouldn't be identical with the school bell. The right to set off the emergency alarm should be restricted to every trained member of the staff, and the alarm should be set off in case the threat is detected, suspected or as soon as information about it is received.

### **Informing the emergency agencies**

The information about an emergency situation has to be passed immediately in the following extent: location, type of threat, information on injuries and casualties, number of attackers, their description, type of weapon used – firearm, stabbing or cutting weapon, explosive, etc., name, surname and phone number of the reporting person. If the situation changes suddenly, the emergency agencies have to be informed again and without delay. The moment the rescue arrives and the situation allows it, it is necessary to immediately contact the emergency personnel in order to provide more specific and up-to-date information.

### **If the evacuation is possible**

If possible, everybody has to escape the danger zone of the school following the evacuation route or any other safe route. The evacuation is considered feasible if the source of danger is remote and the escape routes are close. All personal belongings should be left behind, and people should move as quickly as possible along the designated escape paths avoiding the use of elevators. Everybody must remain silent, considerate and first aid can only be provided

only if this does not put anybody at risk. When reaching the outdoor area people should disperse and report back in person or by phone once the threat is over.

### **If the evacuation is not possible**

If case safe evacuation is impossible, there have to be places selected beforehand that serve as shelter. Such shelter should preferably be a room with thick walls and solid door that opens in the outward direction, and should be equipped with a first aid kit and a communication device that allows reporting on the status of the people hiding inside.

The locked door should be further blockaded by larger objects such as benches, tables, chairs, etc.. The lights should be shut off in the room and all electronic devices should be turned off. People in the room should lie down away from the door and windows and remain calm. The same rules apply also to any other rooms not primarily designated as evacuation rooms, where people may seek shelter [2, 6, 7].

In case of suspicion of planted improvised explosive device, it is necessary to inform the person in charge of the building and the emergency agencies and immediately evacuate the place. The suspicious object should not be moved or manipulated with, however if the situation allows it, it is favorable to take a picture of the object and its surroundings.

Explosives are substances able to transform in a detonative manner and release vast amount of energy in an instant. Given their high destructive potential, explosives are the most commonly used means of attack. Also, explosives are used in order to destroy any evidence that may lead to the attacker. During an explosion the air is compressed violently at the epicenter and is released into the surroundings in the form of shock wave. The size and severity of it depends on the type and amount of the explosive and also on the way it has been planted. The safe distance for a standing person is specified in the following equation [5]:

$$r_b = k_b \cdot k_u \cdot \sqrt{Q} \quad (1)$$

where:

$r_b$  = safe distance

$k_b$  = building type coefficient

$k_u$  = coefficient depending on the amount and type of planting of the explosive

$Q$  = the weight of the explosive [kg]

Explosive planted in the form of an improvised explosive device consists of the outer shell, which serves both as container and concealment, the explosive substance itself and the initiating system that determines the form and timing of the explosion. The explosive substances used can vary from military grade explosives, industrial explosives, explosive compounds used as propel-

lants in ammunition, low explosive pyrotechnic compounds used in fireworks, improvised explosives and even explosive gasses. If the outer shell is made of solid material, then the secondary factor of the device's lethal effect is the splinters and fragments with initial velocity reaching 1500 m/s. The effective range of these fragments depends on the same factors as severity of the shock wave with the addition of the shape of the fragments. The last contributing factor is the powerful acoustic bang. All factor named above contribute to the lethal and wounding effect of an explosion [5].

## Conclusion

Quality means of physical security are able to prevent or at least make difficult unauthorized entry of an offender to school grounds, however it is necessary to bear in mind at the same time that perfect security does not exist. Security counter-measures of all kinds and levels of protection can be surpassed, and the risk of a trespasser infiltrating the premises and launching an attack is always present. The chances of people surviving a direct encounter with an active shooter are minimal, however the others within the premises can raise their chance of surviving by being familiar with the emergency guidelines and being well versed in certain emergency behavior. Regular cooperation with police and emergency agencies is vital, the efficiency of an intervention is dramatically increased if the rescue teams know the premises well beforehand. Especially for the police tactical teams entering the premises, the prior knowledge of the technical and tactical features of the buildings as well as knowing the emergency routines rehearsed by the potential victims can mean the difference between success and failure.

## Acknowledgment

This article was written under the project “The development of rescue destructive charges for demolition of structurally deficient buildings”, no. VI 20152019047, which is a part of the Security Research Programme BV III/1-VS of the Ministry of Interior of the Czech Republic.

## References

- [1] Smolík J., Šílení střelci: uvedení do problematiky, odborný článek. Bezpečnostní teorie a praxe 4/2011. ISSN 1801-8211.
- [2] Zasady postępowania na wypadek wtargniecia napastnika na teren placowki oswiatowej. Ministerstwo Spraw Wewnetrznych, Warszawa, Polsko, 2014.

- [3] Zoubková I., Moulisová M., Kriminologie a prevence kriminality. Vyd. 1. Praha: Armex, 2004, 146 s. ISBN 80-86795-05-5.
- [4] Security magazín: Deset doporučení k zlepšení bezpečnosti škol [online]. Security Media, s.r.o., 2016 [cit. 2016-02-29].
- [5] Vávra P., Vágenknecht J.: Teorie působení výbuchu, Univerzita Pardubice, Fakulta chemicko-technologická, 2002, 2004, ISBN 80-7194-494-7. Dostupné z: <http://www.securitymagazin.cz/legislativa/deset-doporuceni-k-zlepseni-bezpecnosti-skol-1404043809.html>. 81.
- [6] Security magazín: Útoky teroristů na školy se stupňují [online]. Security Media, s.r.o., 2016 [cit. 2016-02-29]. Dostupné z: <http://www.securitymagazin.cz/zpravy/utoky-teroristu-na-skoly-se-stupnuji-1404044366.html>.
- [7] Sekuritaci: Studentský portál o bezpečnosti. Šílení střelci ve školách – historie, rizika, predikce útoku a bezpečnostní opatření [online]. 2008 [cit. 2016-02-29]. Dostupné z: <http://www.sekuritaci.cz/sileni-strelci-ve-skolach-historie-rizika-predikce-utoku-a-bezpecnostni-opatreni/>.
- [8] Ilustrační obrázky dostupné z: [https://pixabay.com/cs/photos/%C3%BA-%C4%9Bku/?orientation=&image\\_type=&cat=&colors=&q=&order=polar&pagi=2](https://pixabay.com/cs/photos/%C3%BA-%C4%9Bku/?orientation=&image_type=&cat=&colors=&q=&order=polar&pagi=2).
- [9] ČSN 73 4400 Prevence kriminality - řízení bezpečnosti při plánování, realizaci a užívání škol a školských zařízení.



**Olgierd Kucharski**

*Instytut Prawa, Administracji i Zarządzania*

*Wydział Filologiczno-Historyczny*

*Akademia Jana Długosza w Częstochowie*

*ul. Zbierskiego 2/4, 42-200 Częstochowa*

*e-mail: o.kucharski@ajd.czyst.pl*

## NAKAZY INSPEKTORA PRACY DOTYCZĄCE BEZPIECZEŃSTWA I HIGIENY PRACY JAKO INDYWIDUALNE AKTY ADMINISTRACYJNE

**Streszczenie.** Celem tej pracy jest określenie teoretyczno-prawnego charakteru decyzji z zakresu bezpieczeństwa i higieny pracy wydawanych przez inspektora pracy. Najważniejsze znaczenie ma rozróżnienie decyzji deklaratoryjnych od konstytutywnych oraz związanych od swobodnych. Jak wynika z dokonanej analizy, większość decyzji ma charakter deklaratoryjny oraz związany. Ma to związek z przyjętą przez ustawodawcę koncepcją organów kontroli i nadzoru nad warunkami pracy oraz zasadą legalizmu.

**Słowa kluczowe:** Państwowa Inspekcja Pracy, decyzje.

## THE LABOR INSPECTOR'S ORDERS CONCERNING OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY AS INDIVIDUAL ADMINISTRATIVE ACTS

**Abstract.** The purpose of this work is to define a legal and theoretical character of a labour inspector's decision relating to workplace health and safety.

The most important issue is to distinguish declaratory from constitutive from free and relative ones. As the analysis shows most decisions has declaratory and free character which is relevant to the theory inspection and surveillance bodies accepted by national legislature and also the principle of legality.

**Keywords:** State Labour Inspektion, decision.

1. Nadzór nad warunkami pracy sprawowany przez organy administracyjne w imieniu państwa wymaga podejmowania działań mających na celu usuwanie stwierdzanych nieprawidłowości czy zagrożeń. Każdy organ administracyjny ma ustawowo określone prawne formy działania. Wynika to z zasady legalizmu polegającej na tym, że organy administracyjne mogą podejmować działania jedynie wtedy, gdy mają ku temu podstawy prawne<sup>1</sup>. Celem tej zasady jest zagwarantowanie bezpieczeństwa prawnego każdemu obywatelowi, a więc działania przez organy państwa tylko w sposób zgodny z obowiązującymi przepisami kompetencyjnymi. W doktrynie prawa zasada legalizmu jest rozumiana jako konieczność spełnienia w każdym działaniu organu administracyjnego dwóch łącznych przesłanek, tj. że każde działanie powinno być oparte na przepisie prawa oraz powinno być utrzymane w granicach prawa<sup>2</sup>.

Inspektor pracy, będąc organem administracyjnym, musi zawsze respektować powyższą zasadę. Ustawodawca wyposażył go w szereg kompetencji, w tym możliwości nadzorcze polegające na wydawaniu aktów mających na celu usunięcie stwierdzanych nieprawidłowości<sup>3</sup>. Ich charakter prawny może budzić pewne wątpliwości. Celem tego artykułu jest dokonanie analizy nakazów jako indywidualnych aktów administracyjnych, jakie wydaje inspektor pracy, w aspekcie teoretyczno-prawnym.

2. Istnieją różne rodzaje prawnych form działania organów administracyjnych, w tym inspektorów pracy. W tym artykule zajęto się nakazami, które należy zaliczyć do aktów administracyjnych indywidualnych, ponieważ rozstrzygają konkretne i jednostkowe sprawy<sup>4</sup>.

---

<sup>1</sup> W literaturze jest ta reguła określana mianem zasady praworządności albo legalności i wynika wprost z art. 7 Konstytucji RP z 1997 r. oraz art. 6 Kodeksu postępowania administracyjnego (ustawa z 14.06.1960 r., Dz. U. z 2016 r. poz. 23 ze zm.).

<sup>2</sup> Prawo administracyjne. Pojęcie, instytucje, zasady w teorii i orzecznictwie, red. M. Stahl, Wyd. Lex a Wolters Kluwer business, Warszawa 2013, s. 125.

<sup>3</sup> Art. 11 i 11a ustawy z 13.04.2007 r. o Państwowej Inspekcji Pracy (Dz. U. z 2015 r. poz. 640 z późn. zm.). Kompetencje Państwowej Inspekcji Pracy scharakteryzowano m.in. w pracach: Olgierd Kucharski, Państwowa Inspekcja Pracy a Rzecznik Praw Obywatelskich - próba porównania, [w:] Instytucje ombudsmanskie w Polsce (wybrane zagadnienia), pod red. A. Gronkiewicz, Wydawnictwo AJD, Częstochowa 2013, s. 169–190; Olgierd Kucharski, Organy nadzoru i kontroli nad warunkami bezpieczeństwa i higieny pracy w Polsce, Prace Naukowe Akademii im. Jana Długosza w Częstochowie. Technika, Informatyka, Inżynieria Bezpieczeństwa, Częstochowa 2015, Tom III, s. 69–92; Olgierd Kucharski, System organów nadzoru i kontroli nad warunkami bezpieczeństwa i higieny pracy, [w:] Podmioty prawa we współczesnej administracji publicznej pod red. P. Bieś-Srokosz, K. Muchy, Wydawnictwo AJD, Częstochowa 2016, s. 77–87; Olgierd Kucharski, Państwowa Inspekcja Pracy oraz Państwowa Inspekcja Sanitarna jako organy nadzoru i kontroli przestrzegania prawa pracy (rozdział 18), [w:] Aktualne zagadnienia prawa pracy i polityki socjalnej (Zbiór studiów), t. III pod red. B. M. Cwiertniaka, Wyd. Humanitas, Sosnowiec 2013, s. 269–288.

<sup>4</sup> System prawa administracyjnego, Tom 5 Prawne formy działania administracji red. R. Hauser, Z. Niewiadomski, A. Wróbel, Wyd. C.H.Beck, Warszawa 2013, s. 151.



Niezależnie od sporów teoretycznych, toczonych wokół określenia indywidualnego aktu administracyjnego, można wskazać, że – ogólnie rzecz ujmując – definiuje się go jako działanie charakterystyczne dla administracji publicznej, z którym nierozzerwalnie związana jest władczość<sup>5</sup>.

Definicje bardziej szczegółowe wskazują, że przez akty administracyjne indywidualne rozumie się oparte na przepisach prawa administracyjnego władcze, jednostronne oświadczenia woli organu administracji publicznej, kształtujące sytuację prawną konkretnie wskazanego adresata w indywidualnie oznaczonej sprawie<sup>6</sup>. Jeszcze inne ujęcie tego zagadnienia wskazuje, że cechami charakterystycznymi aktu administracyjnego są: oparcie go na przepisach prawa administracyjnego, władczość oświadczenia woli organu, wywoływanie skutków nie tylko w prawie administracyjnym, ale także w innych dziedzinach prawa, podwójna konkretność, tj. określenie konkretnego adresata i konkretnej sprawy, wydawanie w wyniku prowadzenia postępowania administracyjnego<sup>7</sup>. Warto wskazać, że ustaleń w tym zakresie dokonało również orzecznictwo sądownoadministracyjne, określając, że indywidualny akt administracyjny jest to jednostronne rozstrzygnięcie organu administracji państwowej o wiążących konsekwencjach obowiązującej normy prawnej dla indywidualnie określonego podmiotu i konkretnej sprawy, podjęte przez ten organ w sferze stosunków wewnętrznych<sup>8</sup>.

Niezależnie od sporów definicyjnych można poddać analizie elementy składające się na indywidualny akt administracyjny.

Każdy akt administracyjny jest czynnością prawną<sup>9</sup>. To znaczy, że akt ten jest wydawany w celu wywołania bezpośrednich skutków prawnych i je wywołuje<sup>10</sup>. Czynność prawna jest zatem źródłem stosunków prawnych, czyli inaczej – kreuje powstanie jakiegoś nowego stanu w obrocie prawnym.

Podkreślić należy, że akty administracyjne są wydawane na podstawie przepisów prawa administracyjnego, a nie innych gałęzi prawa<sup>11</sup>.

Kolejnym elementem jest to, że akt indywidualny zawiera rozstrzygnięcie jakiejś sytuacji. Ten element rozumiany jako świadome i celowe dokonywanie przesądzenia o konsekwencjach prawnych jest cechą istotną każdego aktu. Rozstrzygnięcie należy rozumieć jako przesądzenie o istnieniu konsekwencji praw-

<sup>5</sup> Tamże s. 174.

<sup>6</sup> M. Wierzbowski, A. Wiktorowska, Akt administracyjny [w:] Prawo administracyjne red. M. Wierzbowski, Wyd. Wolters Kluwer, Warszawa 2015, s. 251.

<sup>7</sup> Prawo administracyjne pod red. E. Ury, Rzeszów 1996, s. 89.

<sup>8</sup> np. wyrok NSA z 22.09.1983r w sprawie o sygn. SA/Wr367/83 opubl. w ONSA 1983, nr 2, poz. 75.

<sup>9</sup> System prawa administracyjnego..., s. 175.

<sup>10</sup> K. Ziemiński, Indywidualny akt administracyjny jako form prawną działania administracji, Poznań 2005, s. 466.

<sup>11</sup> Prawo administracyjne pod red. M. Wierzbowskiego, Wyd. Wolters Kluwer, Warszawa 2015, s. 252.

nych jakiegoś zachowania<sup>12</sup>, a więc ustanowienie, zmianę lub zniesienie stosunku prawnego<sup>13</sup>. Niekiedy rozstrzygnięcie to nazywa się „załatwieniem sprawy”<sup>14</sup> i polega na przesądzeniu konsekwencji prawnych, co jest ostatecznym celem postępowania. Ten element został wskazany w art. 104 Kodeksu postępowania administracyjnego jako istotny dla każdej decyzji administracyjnej. Trzeba podkreślić, że treść indywidualnego aktu administracyjnego musi być na tyle precyzyjna, aby – po pierwsze – adresat wiedział, jak go wykonać, ale po drugie – w razie niewykonania organy egzekucyjne wiedziały, jakie działania podjąć, by doprowadzić do jego zrealizowania.

Władczość aktu administracyjnego przejawia się w tym, że wydawany jest w imieniu państwa, a jego wykonanie jest zagwarantowane przymusem państwa<sup>15</sup>. Przez to musi mieć stanowczy – jednoznaczny charakter, który będzie wskazywał stronie, jak ma się zachować. Oczywiście akt administracyjny jest wydawany przez organ administracyjny, a więc podmiot posiadający kompetencje do dokonania tej czynności prawnej, działający w imieniu państwa<sup>16</sup>.

Kolejnym elementem aktu indywidualnego jest jego uzewnętrznienie drogą złożenia stosownego oświadczenia woli, stanowiącego czynność konwencjonalną kompetentnego podmiotu wykonującego zadania z zakresu administracji publicznej. Przez podmiot kompetentny rozumie się organ w ujęciu funkcjonalnym, a więc wyposażony w kompetencje do podejmowania działań władczych<sup>17</sup>. Rozstrzygnięcie sprawy musi być sformułowane w taki sposób, aby można się było zapoznać z jego treścią, a rozstrzygnięcie mogło przybrać postać materialną<sup>18</sup>. Treść aktu musi zatem zawierać uzewnętrznione oświadczenie woli kompetentnego podmiotu zakomunikowane adresatowi<sup>19</sup>.

Indywidualność aktu administracyjnego polega na wskazaniu konkretnego adresata aktu. Następuje to przez wskazanie cech podmiotu pozwalających go zidentyfikować jako podmiot, którego mają dotyczyć skutki prawne aktu<sup>20</sup>. Podmioty te muszą zatem istnieć w momencie wydawania aktu administracyjnego oraz być w sposób nie budzący wątpliwości zidentyfikowane oraz wskazane<sup>21</sup>.

<sup>12</sup> K. Ziemiński, *Indywidualny...*, s. 498 i n.

<sup>13</sup> *Prawo administracyjne* red. M. Zdyb, J. Stelmasiak, Wyd. Wolters Kluwer, Warszawa 2016, s. 203.

<sup>14</sup> K. Ziemiński, *Indywidualny...*, s. 491.

<sup>15</sup> *Prawo administracyjne* red. M. Zdyb, J. Stelmasiak..., s. 203.

<sup>16</sup> *Prawo administracyjne* pod red. M. Wierzbowskiego, Wyd. Wolters Kluwer, Warszawa 2015, s. 252.

<sup>17</sup> *System prawa administracyjnego...*, s. 176.

<sup>18</sup> Tamże,

<sup>19</sup> K. Ziemiński, *Indywidualny...*, s. 492.

<sup>20</sup> *System prawa administracyjnego*, Tom 5 *Prawne formy działania administracji* red. R. Hauser, Z. Niewiadomski, A. Wróbel..., s. 177.

<sup>21</sup> Tamże.

Konkretność jako cecha aktu administracyjnego polega na określeniu sytuacji, w jakiej adresat tego aktu ma się w określony sposób zachować. Taka sytuacja musi być zidentyfikowana i wskazana, a więc istnieć w momencie wydawania aktu<sup>22</sup>.

Wszystkie te cechy muszą spełniać akty indywidualne wydawane przez inspektora pracy, niezależnie od nazwy rodzajowej aktu, jaka zostanie mu nadana.

**3.** W związku z faktem, że indywidualne akty administracyjne (a więc i nakazy inspektora pracy dotyczące bezpieczeństwa i higieny pracy) mogą dotyczyć bardzo zróżnicowanych zjawisk, można dokonać typologii ich różnych rodzajów.

Podziałem, który jest bardzo klarowny, jest rozróżnienie aktów indywidualnych na wewnętrzne i zewnętrzne. Podział ten opiera się na kryterium rodzaju więzi łączących podmiot administrujący, wydający akt, z jego adresatem<sup>23</sup>. W przypadku, gdy te podmioty są połączone podporządkowaniem organizacyjnym opartym na przepisach prawa powszechnie obowiązującego, to mamy do czynienia z aktami wewnętrznymi. Inaczej rzecz można ująć, że podmioty znajdują się w pozycji podległości organizacyjnej lub służbowej w stosunku do wydającego akt<sup>24</sup>. W przypadku braku takich powiązań, mamy do czynienia z aktami zewnętrznymi. Akty zewnętrzne wymagają szczegółowej podstawy prawnej wynikającej z norm powszechnie obowiązujących.

W przypadku decyzji wydawanych przez inspektora pracy mamy do czynienia zawsze z aktami zewnętrznymi skierowanymi do pracodawców albo innych podmiotów zatrudniających pracowników<sup>25</sup>.

Kolejnym podziałem – wydaje się, że kluczowym dla zrozumienia istoty decyzji wydawanych przez inspektora pracy – jest podział na akty deklaratoryjne i akty konstytutywne<sup>26</sup>. Kryterium tego podziału jest charakter stosunku prawnego regulowanego decyzją<sup>27</sup>, sposób kształtowania stosunku prawnego<sup>28</sup>, albo czy dany akt konstytuuje (tworzy) nowy element w obrocie prawnym w postaci ukonstytuowania nowego stosunku administracyjnoprawnego, albo jego zmiany lub ustania, czy akt jedynie potwierdza (deklaruje) istnienie stosunku prawnego, który powstał już z mocy obowiązującego prawa<sup>29</sup>.

<sup>22</sup> Tamże.

<sup>23</sup> System prawa administracyjnego, Tom 5 Prawne formy działania administracji red. R. Hauser, Z. Niewiadomski, A. Wróbel..., s. 178.

<sup>24</sup> Prawo administracyjne pod red. M. Wierzbowskiego..., s. 255.

<sup>25</sup> Art. 10-13 ustawy z 13.04.2007 r. o Państwowej Inspekcji Pracy (Dz. U. z 2015 r. poz. 640 ze zm.).

<sup>26</sup> System prawa administracyjnego, Tom 5 Prawne formy działania administracji red. R. Hauser, Z. Niewiadomski, A. Wróbel..., s. 179.

<sup>27</sup> Prawo administracyjne pod red. Z. Niewiadomskiego, Wyd. LexisNexis, Warszawa 2005, s. 194.

<sup>28</sup> Prawo administracyjne pod red. M. Stahl, Wyd. Lex a Wolters Kluwer business, Warszawa 2013, s. 465.

<sup>29</sup> System prawa administracyjnego, Tom 5 Prawne formy działania administracji red. R. Hauser, Z. Niewiadomski, A. Wróbel..., s. 180.

Akty konstytutywne charakteryzują się tym, że wywołują określony skutek prawny na przyszłość, nie wcześniej niż od momentu jego wydania (*ex nunc*)<sup>30</sup>. Skutkiem takiego aktu jest zatem albo powstanie nowego obowiązku (uprawnienia), albo zniesienie jakiegoś obowiązku (uprawnienia), ewentualnie jego zmiana. Celem tego rodzaju aktów prawnych jest ingerencja organu administracyjnego w obrót prawny powodująca powstanie, zmianę, ustanie jakiegoś stosunku prawnego

Elementem istotnym aktów deklaratoryjnych jest natomiast to, że wywołują skutki prawne również z mocą wsteczną (*ex tunc*), ponieważ charakteryzują się tym, że tylko stwierdzają istnienie pewnych skutków prawnych (obowiązków) powstałych z mocy prawa z chwilą zaistnienia określonego stanu faktycznego<sup>31</sup>. Stwierdzają one zatem (deklarują) powstanie określonego skutku prawnego w tej chwili, w której ziściły się przesłanki określone przez ustawodawcę, a z którymi związał on konieczność wystąpienia tych skutków prawnych<sup>32</sup>. Istotą aktów deklaratoryjnych jest zatem potwierdzenie istnienia jakiegoś stosunku prawnego w obrocie prawnym, wprowadzenie stanu pewności, czy też wykluczenie wątpliwości.

W literaturze wskazuje się na pewne trudności odróżnienia aktów deklaratoryjnych od konstytutywnych związane z tym, że dopiero od momentu wydania aktu deklaratoryjnego istnieje skuteczna możliwość powołania się na prawa i obowiązki w nim stwierdzone, a z drugiej strony, że niektóre akty konstytutywne zawierają w sobie pierwiastek deklaratoryjny<sup>33</sup>. Dodatkowych źródeł nieporozumień dostarcza fakt, że akty deklaratoryjne mają zawsze charakter aktów związanych, tak jak niektóre akty konstytutywne, za to niektóre akty konstytutywne mają charakter swobodny (uznaniowy)<sup>34</sup>.

Niezależnie od wskazanych problemów podział ten ma fundamentalne znaczenie dla zrozumienia charakteru prawnego decyzji wydawanych przez inspektora pracy. Wszelkie decyzje administracyjne (nakazy) wydawane na podstawie art. 11 i 11a ustawy o Państwowej Inspekcji Pracy będą miały deklaratoryjny charakter. Oznacza to, że inspektor pracy nie kreuje stosunku prawnego, co do istnienia jakiegoś obowiązku prawnego, a jedynie potwierdza fakt jego istnienia. Wynika to z samej istoty nakazów dotyczących bezpieczeństwa i higieny pracy. Ustawodawca wprowadził pewne standardy postępowania mającego na celu zapewnienie ochrony zdrowia i życia pracownika, a ich treść merytoryczną zawarł w licznych przepisach prawa materialnego, począwszy od

<sup>30</sup> Tamże.

<sup>31</sup> Prawo administracyjne pod red. M. Stahl, ..., Warszawa 2013, s. 465; Prawo administracyjne pod red. M. Wierzbowskiego..., s. 257.

<sup>32</sup> System prawa administracyjnego, Tom 5 Prawne formy działania administracji red. R. Hauser, Z. Niewiadomski, A. Wróbel..., s. 180.

<sup>33</sup> Tamże, s. 181.

<sup>34</sup> Tamże.

Działu X Kodeksu pracy<sup>35</sup>, a skończywszy na licznych rozporządzeniach wykonawczych. Inspektor pracy tylko potwierdza, że taki obowiązek dotyczy również określonego podmiotu, jeżeli ten podmiot sam z siebie go nie przestrzega. Podobny charakter będą miały również nakazy placowe<sup>36</sup>. Zupełnie inny charakter będą miały natomiast decyzje inspektora pracy wydawane na podstawie przepisów art. 237<sup>11</sup> § 4 oraz art. 304<sup>5</sup> § 2 Kodeksu pracy, ponieważ one będą skutkowały powstaniem nowego obowiązku prawnego, jakim będzie odpowiednio zwiększenie liczebności służby bhp, albo zezwolenie na wykonywanie pracy przez dziecko. Warto podkreślić, że w takim przypadku zmienia się podejście do wydawanej decyzji, która wymaga głębszego uzasadnienia i przez to większej odpowiedzialności przy jej wydawaniu.

Podziałem, który ma również znaczenie praktyczne dla zrozumienia charakteru decyzji wydawanych przez inspektora pracy, jest wyróżnienie aktów administracyjnych indywidualnych swobodnych (uznaniowych) i aktów związanych. Kryterium tego podziału opiera się na związaniu lub braku związania podmiotu wydającego decyzję przez ustawodawcę, co do treści rozstrzygnięcia<sup>37</sup>. Odróżnienie od siebie aktów związanych i swobodnych polega na sposobie udzielenia kompetencji podmiotowi do regulowania danego typu sprawy, a nie na samym akcie (który jest tylko konsekwencją regulacji ustawowych). W sytuacji, gdy organ administracyjny zostaje zobowiązany do wydania aktu administracyjnego o określonej z góry treści, to będzie to akt związany. W takim przypadku wystąpienie określonego stanu faktycznego i prawnego powoduje w konsekwencji wydanie aktu indywidualnego o takiej, a nie innej, treści<sup>38</sup>.

W sytuacji natomiast, gdy przepisy prawa dają możliwość pewnych luzów decyzyjnych, czy też swobody wyboru możliwości rozstrzygnięcia i przez to kształtowania danego stosunku prawnego, będziemy mieli doczynienia z aktem uznaniowym, co jest charakterystyczne dla decyzji konstytutywnych. Przy podejmowaniu decyzji organy administracyjne będą miały zatem pewien zakres swobody, ponieważ ustawodawca zrezygnował z dokładnego uregulowania warunków wydania (przesłanek) konkretnego aktu indywidualnego<sup>39</sup>. Akty wydawane w ramach uznania administracyjnego wiążą się z możliwością wydania przez organ administracyjny aktu o różnej treści w takim samym stanie

<sup>35</sup> Ustawa z 16.06.1974 r. Kodeks pracy (Dz. U. z 2016 r poz. 1666 z późn. zm.)

<sup>36</sup> Olgierd Kucharski, Nakazy placowe inspektora pracy w orzecznictwie sądownoadministracyjnym, [w:] *Sądowa kontrola administracji publicznej. Doświadczenia, dylematy, perspektywy* pod red. E. Wójcickiej, Wydawnictwo AJD, Częstochowa 2017, s. 255–272.

<sup>37</sup> *Prawo administracyjne* pod red. M. Wierzbowskiego..., Warszawa 2015, s. 259. *System prawa administracyjnego*, Tom 5 *Prawne formy działania administracji* red. R. Hauser, Z. Niewiadomski, A. Wróbel..., s. 182.

<sup>38</sup> *Prawo administracyjne* pod red. M. Wierzbowskiego..., s. 259.

<sup>39</sup> *Prawo administracyjne* pod red. M. Stahl..., s. 466.

faktycznym, przy czym wszystkie rozstrzygnięcia będą legalne<sup>40</sup>. Należy jednak zaznaczyć, że działania organu administracyjnego w ramach swobodnego uznania nie oznaczają niczym nieskrępowanej swobody, ponieważ podlegają one kontroli sądów administracyjnych<sup>41</sup>. W szczególności możliwość wydania aktów uznaniowych występuje wtedy, gdy ustawodawca w przepisach prawnych dających podstawy do ich wydania używa pojęć nieostrych, albo wyrażenia organ „może wydać”, albo wskazania możliwości podjęcia działań bez wskazania dokładnego stanu faktycznego, w którym może nastąpić to działanie i wtedy posługuje się pojęciami organ „ustala, określa”.<sup>42</sup>

W przypadku decyzji inspektora pracy będziemy mieli do czynienia z indywidualnymi aktami administracyjnymi (nakazami) „związanymi” – w przypadku, gdy są wydawane na podstawie przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy sformułowanymi w sposób jednoznaczny w jakimś akcie prawnym (ustawie, rozporządzeniu). Akty swobodne będą dotyczyły sytuacji, gdy nakazy inspektora pracy opierają się na „zasadach” bezpieczeństwa i higieny pracy, a więc wskazaniach doświadczenia życiowego, posiadanej wiedzy, racjonalnego działania, ale niewyartykułowanych wprost w treści powszechnie obowiązujących przepisów prawa.

Aktami indywidualnymi swobodnymi będą również decyzje wydawane przez inspektora pracy na podstawie Kodeksu pracy (art. 237<sup>11</sup> § 4 oraz art. 304<sup>5</sup> § 2).

Podziałem, który jest istotny dla scharakteryzowania indywidualnych aktów administracyjnych wydawanych przez inspektorów pracy, jest podział na akty wydawane przy udziale woli adresata oraz akty wydawane bez udziału woli adresata. Podział ten może początkowo budzić zdziwienie z racji tego, że indywidualne akty administracyjne mają jednostronny charakter i są wynikiem władczego działania organów państwa. W tym podziale chodzi jednak o coś innego. Ma on za zadanie zróżnicować akty wydawane na wniosek adresata aktu od tych wydawanych niezależnie od woli stron. Kryterium tego podziału stanowi zatem to, czy adresat aktu ma wpływ na wydanie aktu, a niekiedy jego treść, czy też nie<sup>43</sup>. W każdym przypadku zatem, gdy akt jest wydawany na wniosek lub ma on wpływ na jego treść, będzie on również kwalifikowany jako akt zależny od woli adresata. W sytuacjach natomiast, gdy akt jest wydawany bez udziału woli adresata, tzn. gdy nie ma on wpływu na wszczęcie postępowania, czy też nie ma możliwości żądania zaniechania wydania merytorycznego rozstrzygnięcia – będzie to akt niezależny od woli adresata<sup>44</sup>.

<sup>40</sup> Tamże, s. 259 i 260.

<sup>41</sup> Prawo administracyjne pod red. M. Stahl..., s. 466.

<sup>42</sup> Tamże, s. 467.

<sup>43</sup> System prawa administracyjnego, Tom 5 Prawne formy działania administracji red. R. Hauser, Z. Niewiadomski, A. Wróbel..., s. 188.

<sup>44</sup> Tamże.

W przypadku aktów indywidualnych wydawanych przez inspektora pracy, decyzjami wydawanymi niezależnie od woli adresata będą wszystkie nakazy, których podstawą prawną jest art. 11 i 11a ustawy o Państwowej Inspekcji Pracy, a także art. 237<sup>11</sup> § 4 Kodeksu pracy. Zależna natomiast od woli adresata będzie decyzja zezwalająca na pracę dzieci, wydawana na podstawie art. 304<sup>5</sup> § 2 Kodeksu pracy, ponieważ wniosek o jej wydanie może być w każdej chwili wycofany przez wnoszącego i wtedy postępowanie będzie ulegało umorzeniu.

Podziałem aktów administracyjnych indywidualnych, nawiązującym do opisanego wyżej, jest rozróżnienie decyzji na pozytywne i negatywne. Akty pozytywne przyznają adresatowi określone uprawnienie, a akty negatywne nakładają obowiązki lub odmawiają przyznania uprawnienia, o które ubiega się adresat<sup>45</sup>. W literaturze ten podział bywa też określany jako rozróżnienie aktów uprawniających od aktów zobowiązujących, gdzie kryterium podziału jest to, czy na adresacie danego aktu ciąży w wyniku jego wydania obowiązek określonego zachowania, czy przysługuje mu jakieś uprawnienie<sup>46</sup>.

W odniesieniu do aktów indywidualnych wydawanych przez inspektora pracy decyzjami negatywnymi (aktami zobowiązującymi) będą wszystkie nakazy, których podstawą prawną jest art. 11 i 11a ustawy o Państwowej Inspekcji Pracy, a także art. 237<sup>11</sup> § 4 Kodeksu pracy. Natomiast aktem pozytywnym (uprawniającym) będzie decyzja zezwalająca na pracę dzieci wydawana na podstawie art. 304<sup>5</sup> § 2 Kodeksu pracy, o ile nie zostanie wydana decyzja odmowna.

4. Podsumowując powyższe ustalenia, należy wskazać, że inspektor pracy ma szerokie kompetencje. To powoduje, że wydawane przez niego indywidualne akty administracyjne (niezależnie od noszonej nazwy) mają różną charakterystykę teoretycznoprawną. Wynika to zarówno z samej konstrukcji i celu wydawania indywidualnych aktów administracyjnych przez inspektorów pracy, jak i szerokiej właściwości rzeczowej nałożonej na te organy przez ustawodawcę.

Przedstawione wyżej klasyfikacje wydawanych aktów najlepiej wskazują ową różnorodność. Najpowszechniej stosowane nakazy wydawane na podstawie art. 11 ustawy o Państwowej Inspekcji Pracy mają deklaratoryjny charakter, co oznacza, że potwierdza się w nich tylko istnienie określonego obowiązku prawnego (stworzenia bezpiecznych i higienicznych warunków pracy). Jest to związane z najważniejszą rolą, jaką ma sprawować inspekcja pracy, tj. nadzorem i kontrolą warunków bezpieczeństwa i higieny pracy, co zakłada egzekwowanie wykonywania obowiązków, które każdy podmiot zatrudniający powinien, przy dołożeniu pewnej staranności, znać i stosować w praktyce.

Zupełnie inny charakter mają decyzje wydawane na podstawie Kodeksu pracy (art. 237<sup>11</sup> § 4 oraz art. 304<sup>5</sup> § 2), w tym przypadku to dopiero ocena indy-

<sup>45</sup> Prawo administracyjne pod red. M. Stahl..., s. 466.

<sup>46</sup> System prawa administracyjnego, Tom 5 Prawne formy działania administracji red. R. Hauser, Z. Niewiadomski, A. Wróbel..., s. 189.

widualnych warunków, badanych w każdym przypadku, będzie skutkować decyzją o powstaniu jakiegoś obowiązku czy prawa dla danego podmiotu.

Analiza pozostałych podziałów ma już głównie subsydiarny charakter, który pozwala na dokonanie bardziej subtelnych rozróżnień.

Żyjąc w demokratycznym państwie prawa, każdy obywatel oczekuje ochrony swoich praw. Dotyczy to również oczekiwań, że organy administracji będą wykonywać nałożone zadania w taki sposób, by następował wzrost zaufania do władzy, co jest związane z praworządnością działań, bezstronnością, dokładnym wyjaśnianiem stanu faktycznego, uwzględniając interes społeczny oraz słuszny interes stron. Przechodząc do rodzajów decyzji wydawanych przez inspektora, należy wskazać, że zdecydowana większość z nich ma charakter deklaratoryjny. Uzasadnieniem takiej konstrukcji prawnej jest właśnie to, że taka charakterystyka prawnych form działania inspektora pracy pozwala na najlepszą ochronę praw i wolności obywatelskich przed nadmierną (dowolną) ingerencją organu administracji państwowej w funkcjonowanie podmiotu zatrudniającego osoby. Organ interweniuje (wydaje decyzje) zasadniczo tylko wtedy, gdy jest zagrożone bezpieczeństwo osoby zatrudnionej, a zakres takich działań określają rygorystycznie przepisy prawa.

Podkreślić należy, że rolą organów Państwowej Inspekcji Pracy jest usuwanie stwierdzonych nieprawidłowości, tj. nadzór i kontrola warunków pracy, a nie tworzenie nowych standardów ochrony warunków pracy. Można powiedzieć, że rola inspektorów pracy polega na egzekucji standardów bezpieczeństwa pracy już istniejących, a nie ich kreowaniu. W wyjątkowych jedynie przypadkach decyzja może być oparta na zasadach bezpieczeństwa i higieny pracy, a więc niewyartykułowanych wprost w przepisach prawa obowiązkach. W takiej sytuacji organ musi dokładnie uzasadnić swoje stanowisko, co pozwala podmiotowi kontrolowanemu na jego weryfikację i ewentualne odwołanie, celem sprawdzenia poprawności działań organu administracji.

Wnioskiem wypływającym z przedstawionej charakterystyki decyzji inspektorów pracy jest również to, że Państwowa Inspekcja Pracy jest tylko organem nadzoru i kontroli stosowania regulacji prawnych już istniejących. Natomiast to prawodawca musi na bieżąco weryfikować, modyfikować, tworzyć i stanowić standardy ochrony pracy. Takie działania są wykonywane oczywiście przy uzyskaniu merytorycznej pomocy wyspecjalizowanych instytucji, np. instytutów badawczo-rozwojowych, w tym Centralnego Instytutu Ochrony Pracy.

Organy nadzoru i kontroli tworzą pewien system, od którego wymaga się spójności i konsekwencji w działaniu<sup>47</sup>. W razie wystąpienia problemów z regulacjami dotyczącymi bezpieczeństwa i higieny owe organy powinny za pośred-

<sup>47</sup> Olgierd Kucharski, *Organy nadzoru i kontroli nad warunkami bezpieczeństwa i higieny pracy w Polsce,...*, s. 69-92; Olgierd Kucharski, *System organów nadzoru i kontroli nad warunkami bezpieczeństwa i higieny pracy,...*, s. 77-87.



---

nictwem Rady Ochrony Pracy sygnalizować konieczność podjęcia odpowiednich działań legislacyjnych. W szczególności dotyczy to sytuacji, gdy nie są w stanie w pełni realizować swych kompetencji, albo uważają, że w prawie są luki. Natomiast organy nadzoru i kontroli warunków pracy nie mogą zastępować prawodawcy, modyfikując lub tworząc standardy w zakresie bhp. Taki podział zadań wynika z zasad demokratycznego państwa prawa.





**Tomasz Prauzner<sup>1</sup>, Adrian Kulak**

<sup>1</sup>*Institute of Technology and Safety Systems*

*Jan Długosz University in Częstochowa*

*al. Armii Krajowej 13/15, 42-200 Częstochowa*

*e-mail: matompra@poczta.onet.pl*

## **BROWN COAL - THE FUTURE OR PAST? POLISH ENERGETIC SECURITY IN CASE OF MATERIAL MINING**

**Abstract.** Points of the article are: summarizing the seventy years of lignite presence on the national energetic market, describing current share of raw material in electricity production in Poland, analyzing possible effects of reduction of its output and proposing an alternative in case of burn-out of deposits. As a part of writing article, research methods that were used: analyze of texts, documents, directives and assess the current situation regarding climatic and energetic policy.

**Keywords:** lignite, brown coal, energy, energy security, Polish energy policy, climate policy, lignite mining history, lignite future.

## **WĘGIEL BRUNATNY - PRZYSZŁOŚĆ CZY PRZESZŁOŚĆ? BEZPIECZEŃSTWO ENERGETYCZNE POLSKI W KONTEKŚCIE WYDOBYCIA SUROWCA**

**Streszczenie.** Celem artykułu jest podsumowanie siedemdziesięciu lat obecności węgla brunatnego na krajowym rynku energetycznym, opisanie aktualnego udziału tytułowego surowca w produkcji energii elektrycznej w Polsce, dokonanie analizy możliwych skutków zmniejszenia jego wydobycia i zaproponowanie alternatywy w przypadku wyeksploatowania złóż. Podczas przygotowania artykułu posłużono się następującymi metodami badawczymi: analiza tekstów, dokumentów, dyrektyw oraz ocena bieżącej sytuacji politycznej dotyczącej polityki klimatyczno-energetycznej.

**Słowa kluczowe:** węgiel brunatny, energetyka, bezpieczeństwo energetyczne, polityka energetyczna Polski, polityka klimatyczna, historia wydobycia węgla brunatnego, przyszłość węgla brunatnego, eksploatacja złóż.

## **Introduction**

In the age of ever-increasing numbers of conventional and non-conventional methods of production and consumption, societies and decision-makers in developing energy security strategies can analyze the advantages and disadvantages of using a particular fuel or element. A number of factors may influence the opinion, and the interpretation of each one is dependent on the material and resource situation of the country, but also on the mentality and the worldview of society.

Energy is present in human life since the dawn of time. The oldest traces of the use of fire, that is, heat energy, derive from two million years ago. About three hundred thousand years ago, the primitive man began to sustain the burning flame and commonly use it, taking from it immeasurable benefits that we – common society also cannot give up, despite the advances in technology and the passing of time. Human, and almost every living entity will be always accompanied by primary needs - warmth, safety, hunger and this will not change in the near future. But as time goes by, more raw materials are beginning to play a key role in the economy: wood has replaced coals and oil, which are used on a large scale, and in turn are starting to be displaced by radioactive elements. Unconventional energy that can satisfy most of the energy needs, regardless of latitude and climate, can be named as utopia. It is possible that humanity will begin to use water and its hydrogen and geothermal energy in the context of commonly used fuels in the future. In addition to the development and dissemination of technology enabling such a process, changes in the economic and climatic policies of fuel and energy states and consortia may be necessary.

The main factor, including the presence of raw material in a given area or its possible import, is cost-effectiveness. Almost all members of the European Union (except Denmark) are more or less dependent on foreign sources of electricity, so in most countries processing of raw materials is available on the domestic market. In the first place (26%) among the most used energy sources is coal-fired [2]. Gas (23%) is on the next position, mostly imported from outside of the European Union [3]. Third place is reserved for the processing of radioactive elements (14%), which are also imported from other continents.

Recalling the topic of nuclear energy, one should analyze the next factor that determines the energy policy of the country - the social mentality and possible unwillingness of the given sources of energy, we can show Lithuania as an example. As a result of the closure of the Ignalina Nuclear Power Plant, which covered 90% of the country's needs, Lithuania became dependent on imports of electricity from abroad. The reason for ending the operation of this power plant was the commitment of the Lithuanian government in the framework of EU accession to the exclusion of the plant, and a referendum held in 2012, in which Lithuanian public opposed the construction of a new reactor in Ignalina.

As another example of social prejudice to nuclear power we can show Poland. In our country, unlike Lithuania, no nuclear power plant was ever built, although in 1982 its construction was started in Żarnowiec. As a result of the Chernobyl disaster in 1986 and growing social aversion, the construction of the Pomeranian Power Plant in 1989 was halted.

Ecology, directives and other elements of the legislative power are the next determinants of the use of fuels in the context of energy security. Awareness of the need for environmental protection on a broader scale is a relatively new initiative in Poland, which at the time of the emergence most power plants and growing demand for electricity played a marginal role. Only with the passage of time, systemic transformation and generational exchanges, this issue has returned to the popular debate. Ecological environment may influence the construction, possibly abandoning it directly through protests and social actions. However, the earlier, indirect factor is the laws, standards and directives without which the project will stop at the conceptual stage.

## **History of lignite mining in Poland**

In Poland the oldest pre-partition coal mine was established in 1766 in Szczakowo (today's Jaworzno) [4]. Since then, with the inauguration of the next mines, the extraction of raw materials has grown steadily, mainly in Upper Silesia. Over a century later, in 1882, Thomas Edison's design and implementation of the world's first power plant logically uncovered the next use of coal - the production of electricity. Another device which used this sedimentary rock as fuel was the steam engine used in the manufactures (mechanical energy production). Soon, in 1900, technological progress also appeared in the territory of present-day Poland - then Russian Empire - in the form of the first municipal power plant, located in Radom. The subsequent years, including the periods of the two world wars, were related to the further development of the industry and increasing demand for raw materials. After the end of the World War II in 1945, it was necessary to develop a plan to rebuild destroyed economy and energy infrastructure. The first step was the adoption of a law under which the Polish state took control of all industrial enterprises, including among others the mining industry [5]. The determinant of this policy was the necessity of restoring stability, energy security and increasing electrification of cities, and later also villages. In 1947 Poland, by virtue of a decision [6], took control of the first lignite mines in the area of Turów near Bogatynia [7] (before the war under German jurisdiction) from the Soviet Union. At that point, a period of control of a previously unavailable type of mining began, culminating in 1988, when Poland was in the top five world lignite mining. In 1947, only 4.3 million tons of raw material was harvested [8], seven and a half times less than hard coal in the

same period (62 million tons [9]). Disproportion later reached the most similar value in 1993 - 68 million tons of lignite mined to 131 million tons of hard coal (less than twice). This ratio, however, did not translate into a disproportion in electricity production in that year (only about 10% was produced from hard coal).

One of the advantages of lignite is the location of the deposit on much higher lots than hard coal. This is due to the much later development of the former (at least 8 million years - lignite, 28 million years - hard coal). Due to the small depth of the deck, the cost of mining is lower by engaging fewer employees and by using more machines. In addition, the number of accidents in open pit mines is low. The disadvantages are: low calorific value - an average of 6 MJ to 11 MJ / kg, limited transport capacity (therefore the power stations are always close to the lignite mine), negative impact on the environment (therefore the raw material is referred to as the "dirtiest").

There are two important factors that have contributed to the increase in lignite mining after 1947. The first of these was the launch of two large mines in 1955-1963: KWB<sup>1</sup> Konin and KWB Adamów. As of 1969, almost half of the mentioned fossil fuel in the country came from mining operations. Another factor was the discovery of the largest known lignite deposits in the world, estimated at 2 billion tonnes in the village of Piaski (municipality of Kleszczów, Bełchatów district) in 1960. Due to the scale of investments, conceptual planning took up as much as 12 years, and as a result, it was not until the 1980s that brown coal was first acquired. As a result of these events, the country achieved a maximum domestic production of 73.3 million tons in 1988.

In the years when the next five-year plans were being developed (an important element of the plans was the construction of the mines and the power plants), there was a boom in the industry that resulted in increased demand for electricity. Between 1980 and 2008, the average annual demand in Poland was about 30% [10], not to mention the earlier postwar years. Another factor contributing to this demand was also the demographic rise (an increase from 24 million in 1946 to almost 38 million in 1988 [11]). For these reasons, the development of the analyzed industry and exploitation of the title fossil fuel in Poland can be considered as justified and necessary to achieve the assumed economic goals and to ensure energy security.

---

<sup>1</sup> KWB – pol. Kopalnia Węgla Brunatnego – eng. Brown Coal Mine

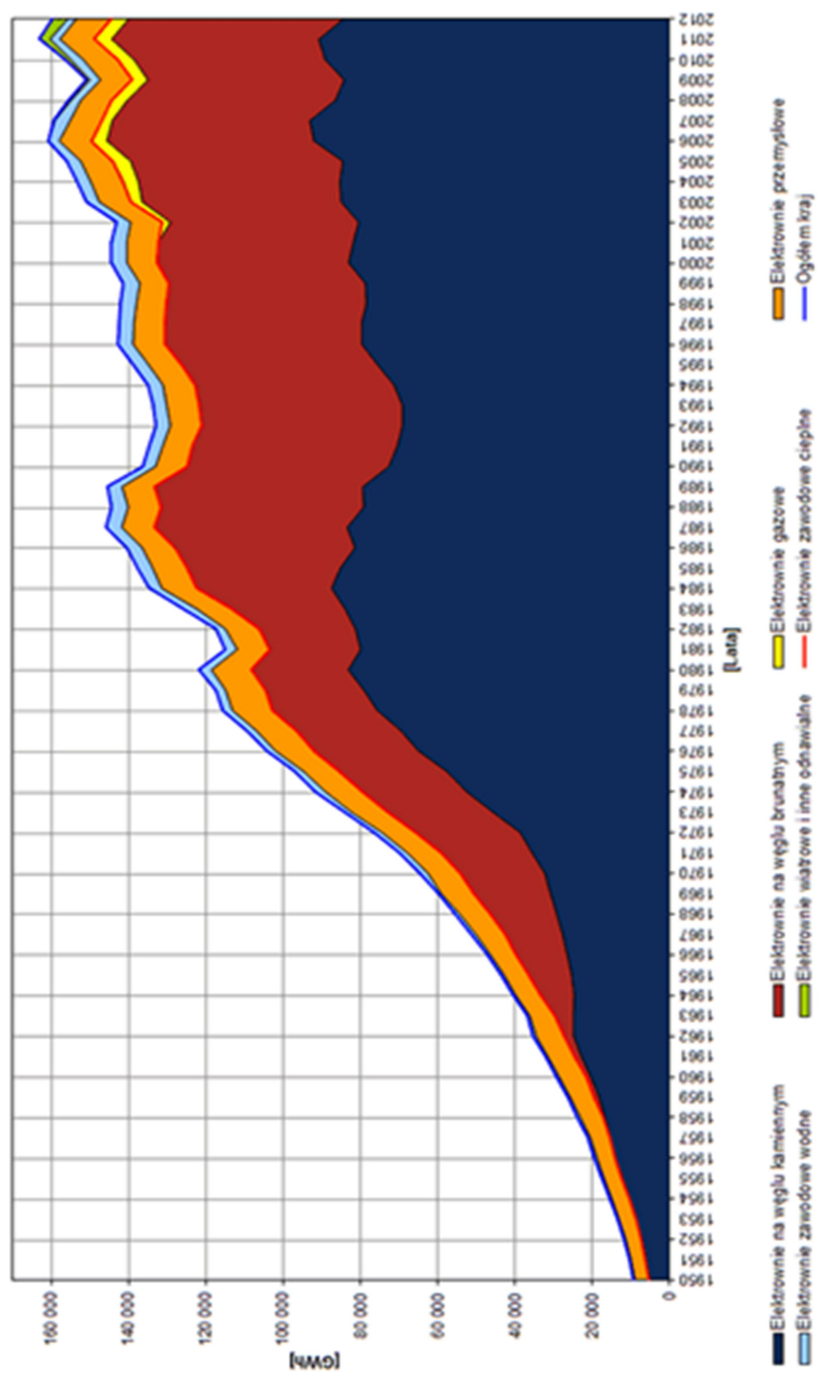


Fig. 1. Electric production in Poland in the years 1950-2012 [source: [www.wysokienapiecie.pl](http://www.wysokienapiecie.pl)]

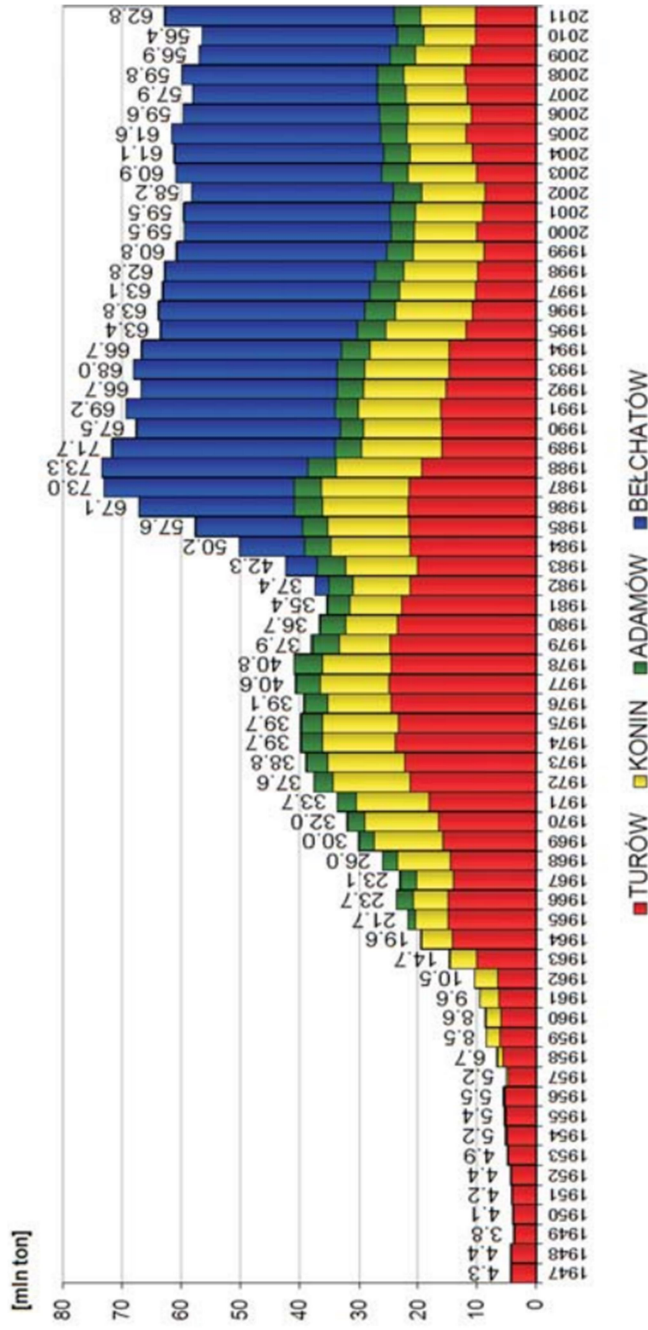


Fig. 2. Lignite mining in Poland in the years 1947-2011 [source: Kasztalewicz 2012]



## Contemporary participation of lignite in electricity production in Poland

Over 60 million tons of lignite has been mined in Poland in 2016 (downward trend, with a maximum of 77.3 million tons in 1988). In 2015, 53.5 TWh (terawatt hours) was generated on this fossil fuel, which accounted for 33.11% of electricity produced in Poland [13]. Operation of the raw material on a similar level should be maintained until 2023, when the work in the Adamów KWB is going to be complete. Up to 2030, there will be an end of mining in Konin which is near Adamów (they are in one association of power plants - PAK). Adamów Power Plant, the first of the PAK group, may end its operation in 2018 [14]. The reason is that it's not compliant with the EU directive from the energy and climate package on greenhouse gas emissions (the plant was not included in the Transitional National Plan<sup>2</sup>). Modernization and adaptation to new standards in nearby mines seems unprofitable due to high costs and short lignite mining time.

The exploitation of new excavations in this region, which would give hope to prolong the existence of the power plant does not indicate much - the efforts to invest in the Dęby Szlacheckie (Babiak municipality) and a 40 km away Ościslów will be unsuccessful. In the referendum, the inhabitants of the first commune expressed a negative opinion on the establishment of the mine. In Ościslów, the local population expresses a similar opinion, and is supported by the ecological movement. The General Directorate for Environmental Protection is also not approving. On March 10, 2017, the company refused to specify the environmental conditions for the Ościslów uplift. This is related to the possibility of violating protected areas under the Natura 2000 program and the redevelopment of 225 hectares of high-class agricultural land. Due to the appeal lodged by the KWB Konin authorities, the reissue of the decision was to take place on September 22, 2017, but it did not come to an end. Operation of the new deposit could extend the electricity production in this part of the Great Poland until around 2045. In summary, within thirteen years from now, two power plants supplying fuel for power stations which generate about 8% of Polish electricity will be shut down. In addition, according to climate policy, every member of the European Union is obligated to reduce greenhouse gas emissions by 20% by 2020, compared to 1990 levels (EU Directive, Article 28, paragraph 1).

---

<sup>2</sup> The plan, which aims to adjust the infrastructure of industrial plants with a minimum burning capacity of 50 MW to the standards set out in the Industry Emissions Directive by 30 June 2020.

## Plans for exploitation of new lignite deposits

According to current predictions, in the years 2040-2044, brown coal deposits will be depleted in the Bełchatów and KWB Turów. They are the only power plants that will be able to extract the raw material in Poland after 2030. If no new lignite deposits are to be exploited, this will mean the need for new fuels for the Bełchatów Power Plant and the Turów Power Plant, which are currently producing up to a quarter of Polish electricity [16] [17]. The modernization of the blocks 3-12 in 2016-2017, and the construction of the new thirteenth block in the Bełchatów Power Plant took a total of about 14 billion PLN [18] [19]. In turn, in Turów in 2019, a 450 MW unit will be put into operation, costing 4 billion PLN [20]. The costs incurred are determined by the need to find alternatives to operate these plants after 2040, especially in the era of ever-increasing electricity demand. We cannot forget that after 2020, every ten years there will be an increase in EU greenhouse gas emission limits, which in 2030 will be only 60% of 1990 emissions.

The most realistic for this moment is the operation of the Złoczew field (containing about 500 million tons of lignite [21]), from which the raw material would be transported by conveyors or trains to a distant 50 km straight line of the Bełchatów Power Plant. Brown coal, which also consists of water, would lose quality during transport, so this variant is still being analyzed. At present, the Polish Energy Group is applying for a concession for mining in the area of Złoczew. The presentation of the "Winter Package" by the European Commission, or, in fact, the commitment to fulfill it, is a threat to the development of the investment mentioned by the Ministry of Energy [22]. It may be added that, unlike Ościsłów and Szlacheckie Dęby, the inhabitants of Złoczew mostly contribute positively to the construction of the mine. Its creation would provide fuel for the Bełchatów Power Plant until at least 2055 (if a positive decision will be made for a long-distance coal transport).

The second deposit, which is the most considered in terms of exploitation, is located in Gubin-Brody municipalities, in the Lubuskie province, near the border with the Germany. Its content is estimated at 1.6 billion tonnes of lignite [23]. However, there are the same contraindications as in Ościsłów and Szlacheckie Dęby - the reluctance of the local population and the protests of ecological movement. In addition, in 2016 The Regional Directorate for Environmental Protection in Gorzów Wielkopolski has suspended the procedure for issuing a decision on environmental conditions for the planned mine [24]. Polish Energy Group manager admitted on November 3, 2017 that the administrative procedure for the construction of the Gubin power plant and mine is much more complicated than in the Złoczew area. In Poland there are some of the world's largest lignite deposits, which are located north of Legnica.



Fig. 3. Distribution of lignite deposits in Poland [source: National Geological Institute]

There are more than 15 billion tons of this sedimentary rock [25], five times as much as in Poland since 1947, and seven and a half times more than in Bełchatów Basin (the raw material is more caloric). The deposit is not considered in the operational context in the years to come due to lack of public support, conflict with the ecological movement, and planned location of the S3 expressway which will be over the deposit [26].

Of the six locations indicated at the parliamentary meeting on July 5, 2017, currently only in one is a chance to implement plans for the establishment of a lignite mine (Złoczew). All others have encountered difficulties in the form of: lack of social acceptance (including three negative references to the construction of local referendums), protests of ecological groups, and two refusals to define environmental conditions for mining operations by the Environmental Protection Directorate. This means that after 2040 the only lignite-fired power

station can be the Bełchatów Power Plant (generating 20% of the 33% generated by power plants fired with the title material).

By virtue of the Act of 28 November 2003 (Article 125) [27], it was restated to the owner of a property if his lignite mines were owned by the country. Theoretically, it can issue a decision for 12 months, but in reality it can be repeatedly extended. The same law describes the need to pay compensation for losses (it is possible to appeal to the governor [28]). In practice, this means that if the company decides on the environmental conditions of the project and receives a concession for lignite mining, it may start with the support of the district office and without approval of the local population, which may be a decision taken only centrally.

## Conclusions

According to government assumptions, the core of the national energy sector is to remain hard coal and lignite by 2050 (with increasing share of renewable energy, biomass and biofuels). This policy with growing electricity demand will interfere with the "Winter Package" and the commonly-known IED (Industry Emissions Directive - Directive 2010/75 / EU of the European Parliament and of the Council). In the case of persistent greenhouse gas emissions and as a result of EU pressure, it may be necessary to close several power plants. The consequence will be the increasing import of electricity from abroad (which has recently reached a maximum of about 0.8 GW), which would have a negative impact on its price. Another variant (in the case of overruns after 2020), whose cost-effectiveness is a matter of debate, is to pay the contribution while shutting down power plants (if the cost of electricity is higher than the contribution).

In order to adapt the infrastructure to European restrictions, modernizations should be carried out throughout the country, at least on a scale such as those of Bełchatów and Turów, which absorbed a total of over 18 billion PLN. By investing 48 billion PLN [29], we are able to build a nuclear power plant with installed capacity of over 3,000 MW, which would meet more than 11% of domestic demand, thus filling the gap left over from lignite mining and power plant operations in Adamów and Konin. Such share of nuclear power in electricity production would coincide with the plans of the Polish Energy Group for the year 2025 [30] whose implementation by the need to acquire technology and land development is delayed. In addition, this would reduce greenhouse gas emissions and increase the likelihood of adapting to growing EU standards. According to the executives of the Ministry of Energy, Poland can afford to invest in nuclear power [31]. In a variant that uses alternative sources of electricity, the share of lignite in the industry could be around 20%. Considering the

growing demand for electricity and its growing import, finding new solutions in the Polish energy sector is necessary [32]. In addition, in the perspective of 2030 and the growing threshold for reducing greenhouse gas emissions, action is needed in the near future.

The following alternatives exist for traditional coal power plants that could be used in Poland:

1. development of geothermal energy (mainly in the context of thermal energy), especially in the area of Polish lowland [33];
2. increasing imports of natural gas and crude oil;
3. investment in nuclear power, including uranium and thorium recovery (e.g. coal in Bełchatów has an average of 3.3 g / Mg of thorium and 3.3 g / Mg of uranium.) At 52 million tons of coal ash deposited at the Power Plant Bełchatów is hypothetically able to raise more than 100 thousand kg of uranium and 80 thousand kg of thorium (no information on the occurring isotopes);
4. development of clean coal technology, i.e. carbon sequestration (CSS), coal gasification.

## References

- [1] <http://www.educom.net.pl/kluczowe-wynalazki-w-historii-swiata/ogien-ja-ko-najwazniejszy-wynalazek-prehistorii> (Access date: 18/10/2017)
- [2] Grudziński Z., Kaliski M., Szurlej A.: *Polityka energetyczna*, tom 15, zeszyt 4: Węgiel i gaz ziemny w produkcji energii elektrycznej Polski i UE, wyd. Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, 2012, s. 202
- [3] <http://weglowodory.pl/wydobycie-gazu-ziemnego-na-swiecie/> (Access date: 29/10/2017)
- [4] Rams A.: *Najdawniejsze dzieje górnictwa węgla kamiennego w Polsce*, wyd. Muzeum Miasta Jaworzno, 2014, s. 3
- [5] Ustawa z dnia 6 stycznia 1946 r. o przejęciu na własność Państwa podstawowych gałęzi gospodarki narodowej- Dz.U. 1946 nr 3 poz. 17
- [6] Orzeczenie z dnia 18 czerwca 1947 r. o przejściu przedsiębiorstw na własność Państwa - M.P. 1947 nr 92 poz. 614
- [7] <http://trini.geoblog.pl/wpis/19727/historia-kopalni-wegla-brunatnego-turow-kolo-bogatyni> (Access date: 29/10/2017)
- [8] Kasztalewicz Z.: *Polityka energetyczna*, tom 15, zeszyt 4: Błaski i cienie górnictwa węglowego w Polsce, wyd. Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, 2012, s.11
- [9] *Wspólne sprawy*, nr 2, Wyd. Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Górnictwa, 2012, s. 6

- [10] <http://wysokienapiecie.pl/rynek/1468-rynek-energii-w-polsce-w-2015> (Access date: 29/10/2017)
- [11] [https://stat.gov.pl/files/gfx/portalinformacyjny/pl/defaultaktualnosci/5468/12/5/1/podstawowe\\_informacje\\_o\\_rozwoju\\_demograficznym\\_polski\\_do\\_2014.pdf](https://stat.gov.pl/files/gfx/portalinformacyjny/pl/defaultaktualnosci/5468/12/5/1/podstawowe_informacje_o_rozwoju_demograficznym_polski_do_2014.pdf) (Access date: 29/10/2017)
- [12] Główny Urząd Statystyczny: Wydobywanie węgla brunatnego, 2016
- [13] <http://wysokienapiecie.pl/rynek/1468-rynek-energii-w-polsce-w-2015> (Access date: 29/10/2017)
- [14] <https://www.money.pl/gielda/wiadomosci/arttykul/ze-pak-elektrownia-adamow-kopalnia-sprzedaz,7,0,2308103.html> (Access date: 30/10/2017)
- [15] <http://www.przeglادkoninski.pl/PL-H5/4/4907/decyzji-dla-oscislowa-cia-gle-nie-ma-kopalnia-nadal-czeka.html> (Access date: 30/10/2017)
- [16] <https://pgegiiek.pl/Nasze-oddzialy/Elektrownie/Elektrownia-Belchatow> (Access date: 30/01/2017)
- [17] <https://pgegiiek.pl/Nasze-oddzialy/Elektrownie/Elektrownia-Turow> (Access date: 30/10/2017)
- [18] <http://www.wnp.pl/wiadomosci/elektrownia-belchatow-zbuduje-13-blok-energetyczny,5037.html> (Access date: 30/10/2017)
- [19] [http://energetyka.wnp.pl/koncowa-faza-wielkiej-modernizacji-blokow-w-elektrowni-belchatow-wideo,276001\\_1\\_0\\_0.html](http://energetyka.wnp.pl/koncowa-faza-wielkiej-modernizacji-blokow-w-elektrowni-belchatow-wideo,276001_1_0_0.html) (Access date: 30/10/2017)
- [20] <http://www.rynekinfrastruktury.pl/wiadomosci/koszt-budowy-el-turow-podwyszony-o-280-mln-zl--51978.html> (Access date: 30/10/2017)
- [21] Kasztalewicz Z.: Polityka energetyczna, tom 15, zeszyt 4: Blaski i cienie górnictwa węglowego w Polsce, wyd. Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, 2012, s.21 (Access date: 30/10/2017)
- [22] <http://www.dzienniklodzki.pl/wiadomosci/sieradz/a/budowa-kopalni-wegla-brunatnego-zloczew-moze-nie-dojsc-do-skutku,11867036/> (Access date: 30/10/2017)
- [23] [http://orka.sejm.gov.pl/opinie8.nsf/nazwa/390\\_20170705/\\$file/390\\_20170705.pdf](http://orka.sejm.gov.pl/opinie8.nsf/nazwa/390_20170705/$file/390_20170705.pdf) (Access date: 30/10/2017)
- [24] <http://www.gazetalubuska.pl/strefa-biznesu/wiadomosci/z-regionu/a/koniec-marzen-o-kopalni-i-elektrowni-gubinbrody,10513326/> (Access date: 30/10/2017)
- [25] <http://nettg.pl/news/129580/skreslenie-zloza-legnica-to-blad-zaniechania> (Access date: 30/01/2017) (Access date: 30/10/2017)
- [26] [http://fakty.lca.pl/legnica,news,54318,Zloze\\_wegla\\_brunatnego\\_Legnica\\_skreslone\\_.html](http://fakty.lca.pl/legnica,news,54318,Zloze_wegla_brunatnego_Legnica_skreslone_.html) (Access date: 30/01/2017)(Access date: 30/10/2017 r.)
- [27] Ustawa z dnia 28 listopada 2003 r. o zmianie ustawy o gospodarce nieruchomościami oraz o zmianie niektórych innych ustaw, Dz.U. 2004 nr 141 poz. 1492 (Access date: 30.10.2017 r.)
- [28] [ww.powiat-belchatowski.pl/content/files/file-xq00yq-1471796456.pdf](http://ww.powiat-belchatowski.pl/content/files/file-xq00yq-1471796456.pdf) (Access date: 30/10/2017)

- 
- [29] [http://energetyka.wnp.pl/przelom-ws-budowy-elektrowni-atomowej-w-polsce,303470\\_1\\_0\\_0.html](http://energetyka.wnp.pl/przelom-ws-budowy-elektrowni-atomowej-w-polsce,303470_1_0_0.html) (Access date 04/11/2017)
- [30] <http://www.cire.pl/gal,17,75,0,0,0,0,0,zmiany-struktury-paliw-w-podsektorze-wytwarzania-polskiej-grupy-energetycznej.html> (Access date: 04/ 11/ 2017)
- [31] <http://biznesalert.pl/tchorzewski-budowa-elektrowni-jadrowej-koszt-75-mld-zl-stac-nas/> (Access date: 04/11/2017)
- [32] <http://gramwzielone.pl/trendy/24926/wczoraj-najwieksze-zapotrzebowanie-na-moc-w-historii-kse> (Access date: 04/11/2017)
- [33] Górecki W.: Atlas zasobów geotermalnych formacji mezozoicznej na Niżu Polskim, wyd. Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, 2006
- [34] Bojakowska I., Lech D., Wołkowicz S.: Gospodarka surowcami mineralnymi, tom 24, zeszyt 2: Uran i tor w węglach kamiennych i brunatnych ze złóż polskich, 2008, s. 56







**Tomasz Prauzner<sup>1</sup>, Paulina Szewczyk**

<sup>1</sup>*Institute of Technology and Safety Systems*

*Jan Długosz University in Częstochowa*

*al. Armii Krajowej 13/15, 42-200 Częstochowa*

*e-mail: matompra@poczta.onet.pl*

## ASSESSMENT OF TRAFFIC SAFETY IN THE PTV VISSIM SIMULATION PROGRAM

**Abstract.** In the paper, the simulation project to evaluate the capacity and the degree of congestion was presented. Due to the time-consuming traffic, the most advantageous modification is to optimize the duration of the light cycles in programs for signaling light. Based on the project, it was assessed that the communication and technical solutions used are optimal and don't require modification.

**Keywords:** computer simulation, motion engineering.

## OCENA BEZPIECZEŃSTWA RUCHU DROGOWEGO W PROGRAMIE SYMULACYJNYM PTV VISSIM

**Streszczenie.** W pracy został przedstawiony projekt symulacji do oceny przepustowości i stopnia powstawania zatorów komunikacyjnych. Ze względu na czasowe obciążenie ruchem, najkorzystniejszą modyfikacją jest optymalizacja czasu trwania cykli świateł w programach do sterowania sygnalizacją świetlną. Na podstawie opracowanego projektu oceniono, iż zastosowane rozwiązania komunikacyjne oraz techniczne są optymalne i nie wymagają modyfikacji.

**Słowa kluczowe:** symulacja komputerowa, inżynieria ruchu.

### Introduction

The aim of the project was to make a crossroads model in the PTV VISSIM computer program, which was used to simulate traffic of vehicles and other users at the example of the junction of Jana Pawła II Street and Armii Krajowej

Street in Czestochowa. The crossroads is one of the most heavily trafficked road junctions in the city, because it connects extremely important traffic directions, Jana Pawła Street leads towards the west towards Jasna Gora, and in the east to the expressway E75, towards Katowice and Warsaw. On the other hand, Armii Krajowej Street is a provincial road no. 48, which allows access to the center of the residents of the housing developments: "Tysiąclecie" and "Północ". In the research part was simulated actual flow of vehicles, people, cyclists on a working day in rush hour. Measurements were made at two hours on the same day: in the morning and in the evening. Based on the obtained data, a crossroads model and a computer simulation were used to evaluate traffic safety (Fig.1).

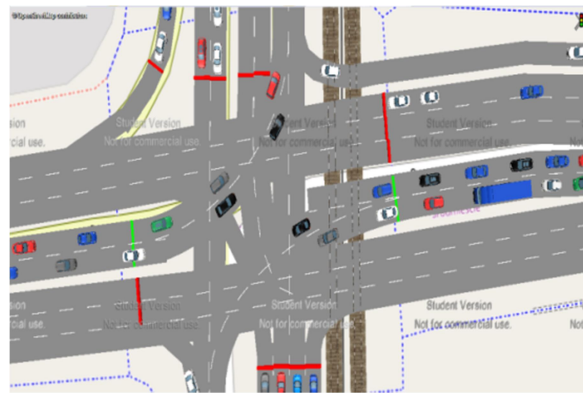


Fig.1. Virtual crossroads model, visible traffic and simulation of traffic lights [author: Szewczyk P., 2017]

For this purpose, a pedestrian crossing was created. Figure 2 shows the simulation with all participants in the traffic, divided into separate signaling groups. The next move, has been add pedestrians to create the road infrastructure.

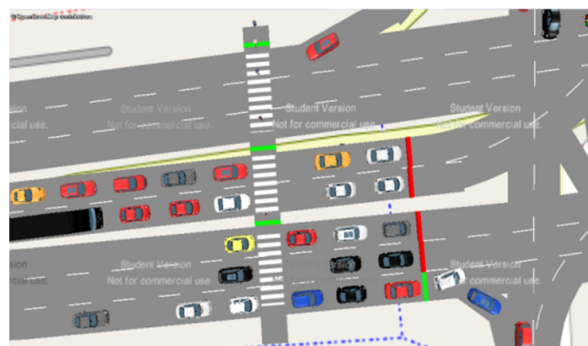


Fig.2. Simulation of pedestrian traffic [author: Szewczyk P., 2017]

In addition to the applied roads and pedestrian crossings, there were also plotted out traffic control infrastructure (traffic lights, traffic signs, detection equipment, etc.) (Fig.3). The actual signaling model was developed by the ZIR Group company commissioned by the Municipal Road Administration in Czestochowa (MZDiT).

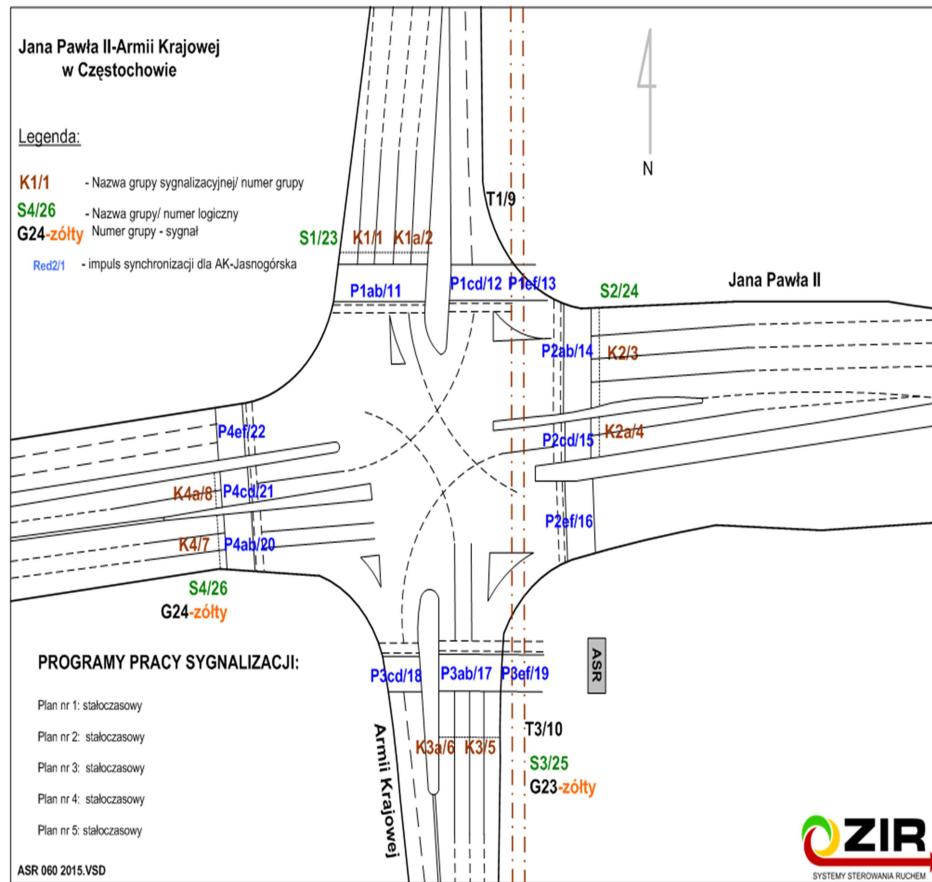


Fig. 3. Traffic light scheme at crossroads of Jana Pawła II Street - Armii Krajowej Street in Czestochowa [source: Municipal Road Administration and Transport in Czestochowa (MZDiT)]

The above diagram shows four signaling groups ring-fenced for all traffic participants. Each of them has a name and a group number, as well as a logical number specifying a specific signal. The pedestrians are marked in blue. Because it is a large crossroads and pedestrian crossings cross the dual carriageway - according to the rules - the pedestrian islets were marked. In this case, each junction of the roadway is considered as a separate passage and designates a se-

parate signal. The signaling groups referring to wheeled vehicles are marked with brown and green, and the green group is a conditional turn signal to the right. The last of the groups, defined in black, refers to public transport vehicles - trams. Owing to the high variability of traffic at this crossroads, five fixed timetable plans have been developed, which are run according to the time of day (Fig. 4). The most important and difficult task in organizing traffic at crossroads is to develop traffic signals in a safe and economical way. This means that the same signals can not be duplicated on the collision inlets. You should also take into account the geometry of the crossroads, where each vehicle has a different turn radius. Therefore, their mass, speed and different braking distance of the vehicles should be treated into account light signals. The time of stop is important for safety reasons. The red light should not take too long, as it can cause overload on a given section, and also lead to nervous situations among drivers. Frequent changes are also not advisable due to the multiple launching and stopping of vehicles. This is disadvantageous because of the fuel economy, the increase in emissions of toxic substances and the generation of excessive noise.

In Częstochowa there is an ITS system, ie Intelligent Transport System. The task of the system is functional and efficient communication planning in urban agglomerations and local areas requiring traffic management. Its activities include minimizing congestion, increasing the throughput of street sections and junctions, and improving safety, liquidity and traffic economy. The system consists of some integrated subsystems, such as traffic control, vehicle monitoring and traffic monitoring. Their purpose is to collect data from detectors and cameras located in different places. Obtained information about the number and speed of vehicles, traffic congestion and data throughput junctions are analyzed by the system and by means of algorithms determined appropriate variable values for traffic signals. The system effectively defines priorities for individual inlets and adjusts the characters for specific traffic flows.

## **Methods of Research**

The collection of the necessary data for the PTV VISSIM simulation program was made at two hours of the day. The first measurement was from 7:25 am to 8:25 pm, while the second one was measured in the evening from 17:30 to 18:30. Due to the large number of vehicles and inlets, the measurement was made for a quarter of an hour, and the result was multiplied by four, giving a full hour of measurement. Due to the sequence duration of 110 seconds, seven vehicle measurements were obtained within fifteen minutes. The traffic control programs received from the Municipal Road Administration and Transport in Czestochowa (MZDiT) proved invaluable. Data was collected in specially prepared form (Fig. 5).





The form allows you to analyze each inlet intersection by direction and type of traffic participants. The time frame was chosen because of the time of commute of people to work. In these hours there is the greatest rotation in the city, and thus at the junction, which is conducive to obtaining reliable data for analysis. The second measurement took place on the same day, however, in the evening from 18:00 to 19:00. At that time, traffic is slowing, people moving around the city are mostly passers-by, walkers and locals going shopping.

### Results of Research

On the basis of the data from the traffic intensity form, a table was drawn up in Excel and graphical interpretation of data showing the direction of travel of vehicles (Fig.6). Both the participation of pedestrians and the participants in the public transport are not considered because of their negligible effect on congestion. Blue backgrounds are marked by vehicles entering the junction.

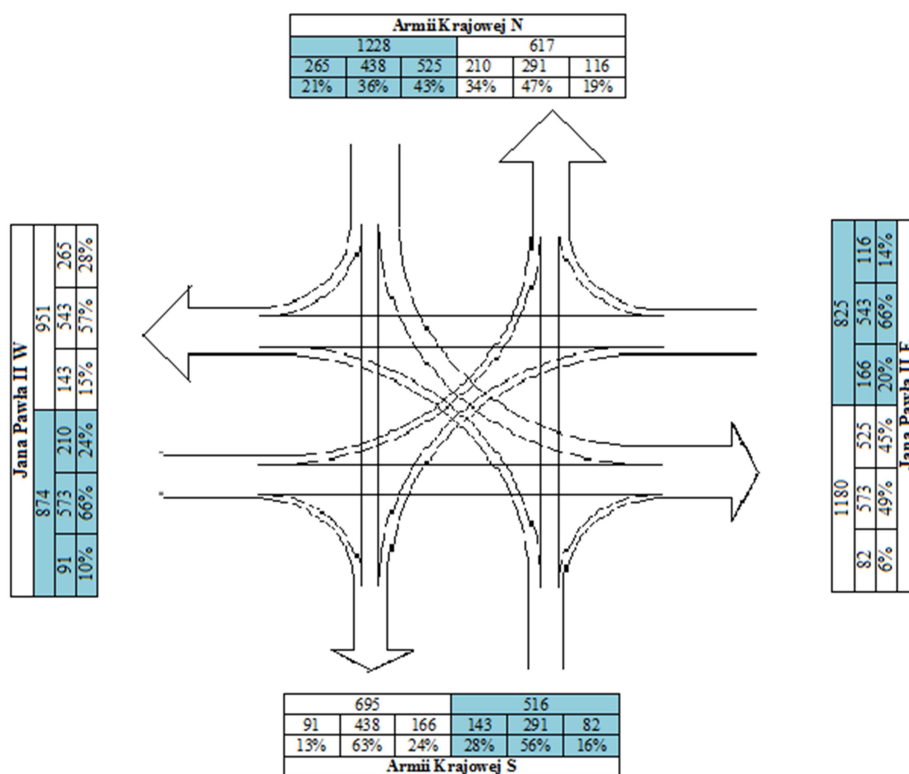


Fig. 6. An exemplary diagram showing the traffic intensity at the junction during measurement period 1 [author: Szewczyk P., 2017]

During measurement first period, the highest traffic is at Armii Krajowej Street towards the city center, where the share of vehicles is 1228, of which almost half (46%), turns left towards the city bypass. Another 36% are vehicles moving straight to the center, while the remaining 21% are heading west Jana Pawła II Street. The next most burdened inlet is Jana Pawła II Street from the direction of Jasna Góra. In this case, the majority of vehicles (61%) are heading towards the city while driving straight ahead. The remaining 24% are left turning vehicles in Armii Krajowej Street towards the Technical University in Częstochowa, and 10% to the right in Armii Krajowej Street to the center. Another inlet with 825 vehicles is Jana Pawła II Street from east to west. More than half of the vehicles (66%) are moving towards Wieluń and Opole, another 20% turn right to the center and the remaining 14% to the right - the direction of Łask and Działoszyn. The least burdened inlet is Armii Krajowej Street from the center (516 vehicles), of which 56% go straight north, 28% west, and 16% right, towards the bypass. Most of the vehicles leaving the junction are heading towards Jana Pawła II Street - from the north is 525 vehicles, from the west 573 vehicles, and from the south only 82 vehicles. Analysis of the second measurement period showed that traffic was less than traffic in the morning. Based on data from measurement 1 and 2, it can be said that the most commonly chosen driving direction is Jana Pawła II Street in the direction of Warsaw and Katowice. This involves access to the E75 expressway and the newly built bypass of the city, which allows you to get out of the city quickly and avoid many traffic congestions in the center. Traffic data obtained in the field as well as received from the Municipal Road Administration and Transport in Czestochowa (MZDiT) allowed to compile the simulation in PTV VISSIM program. Measurements of simulation programs (Fig. 4) proved to be invaluable, as manual counting of signaling signals would not be reliable. Thanks to MZDiT the project actually reflects the real conditions at the junction. Creating a simulation program is based on the verification of the intersection geometry as well as the traffic density. We ought to remember that the individual signals have specific lengths. This is to optimize the loss of travel time and hence the throughput. Contrary to previous assumptions, the simulation project showed that the current simulation program is effective (Fig. 7).

The photos below show respect for traffic signals. Figure 8 presents Armii Krajowej Street on the north side, where in both measurements, this inlet was the heaviest. One of the belts has a large number of vehicles, but at the moment of change to a green signal, vehicles are systematically lowering the inlet. The signal lights are set up so that no participants are allowed to meet vehicle.





Fig. 7. Scheme of signaling program used during simulation [author: Szweczyk P., 2017]

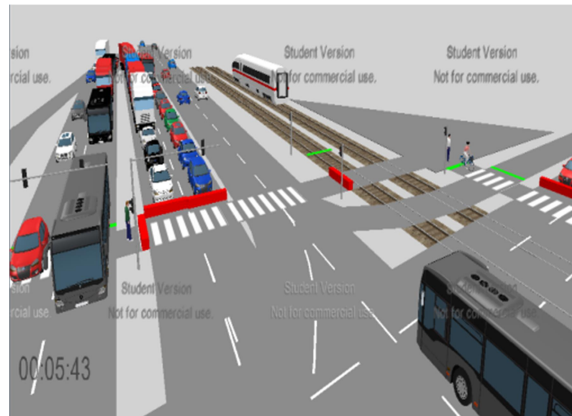


Fig. 8. Simulation of the traffic signal [author: Szewczyk P., 2017]

The studies conducted in rush hour, indicate that the collisions don't occur at the junction. A similar situation is in the case of traffic testing in the evening. Obtained measurements and results lead to the conclusion that the traffic signal is well organized and does not require improvement.

One of the ways to find congestion are mobile and desktop applications. They require access to the Internet to obtain location information. Data is obtained from GPS signals in vehicles, as well as from control of traffic cameras. Determining of the traffic jams is done on the basis of historical traffic information at a particular location, day of the week, and time of day and year. The information is updated on a regular basis and processed every few days. Examples of such applications are Targeo maps or NaviExpert. They allow estimation of travel time and anticipate unusual events, but do not have navigation functions (Fig. 9, 10).

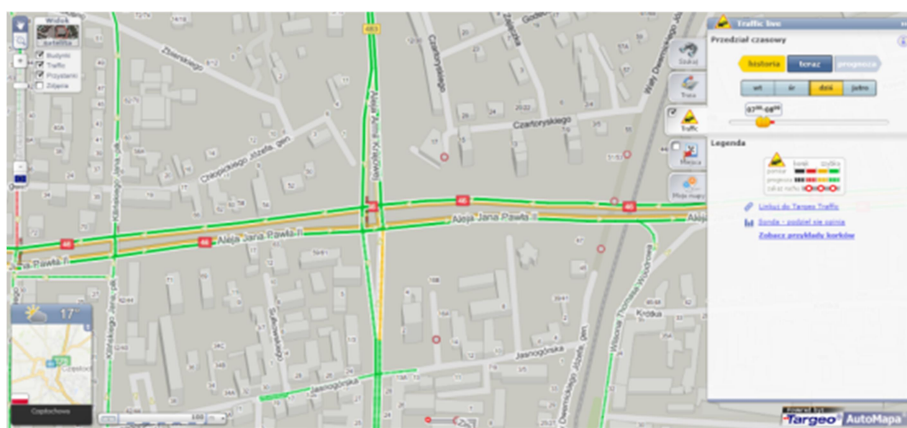


Fig. 9. Compaction level at intersection Jana Pawła II Street - Armii Krajowej Street during first measurement [map.thargeo]

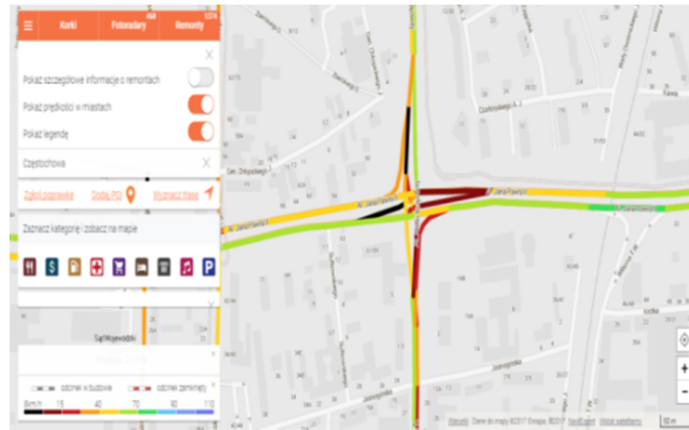


Fig. 10. Compaction level at intersection Jana Pawła II Street - Armii Krajowej Street during first measurement [NaviExpert map]

The NaviExpert map is more detailed and accurate than the Targeo map, because the traffic patterns of the given turn were also taken into account.

## Conclusions

In our times technological development is especially dynamic and inevitable. Existing computer programs and simulators will over time be replaced by newer and better devices. In the age of computers all research and analysis are non-invasive, so this field of study will be certainly continue to develop. The collected empirical evidence shows that the traffic both in peak and evening time doesn't cause a large traffic jams at the junction. The project may be subject an errors resulting from the chosen method of counting vehicles. Due to the high traffic volume, the survey could not be conducted by one person. As a result, three additional people were used to help each other, who individually watched their assigned inlet. The number of participants was calculated according to the duration of the cycle. This means that approximately seven or eight results were obtained during a fifteen-minute measurement. All the same, the project included the total number of vehicles per hour, without dividing the duration of each traffic light cycle.

Comparing measurements taken by observers and received by mobile applications, differences in interpretation of inlet compaction can be noted. Maps are based on the large number of data received, which after verification, is processed into information about the degree of traffic congestion. The difference between the data results from a different way of counting some parameters

(eg. number of traffic participants, time of change of lights) affecting the final result. The results of the survey are also interfered by the student licence of application which limited the option of programme. Despite the use of averaged data, the simulation project can be considered as a relatively reliable reflection of the real traffic. The number of traffic participants identified in PTV VISSIM and obtained in the research is similar. The free version of application blocks some features, but this isn't an obstacle to creating a basic road infrastructure simulation. In order to determine the duration of the signaling cycles, it is necessary to first determine the traffic volume and the types of vehicles moving at the intersection. Next, you need to adjust the type of signaling program for the junction. This is a complex process, because it must take into account adequate bandwidth, security and time wasting. Unfortunately, it isn't possible to combine all these conditions due to their mutual exclusion. Ensuring high security is associated with an increased number of phases, which in turn leads to lower throughput and thus greater time losses. The presented theme is also a practical example of the use of deterministic simulation programs in technical and vocational education in accordance with the commonly proclaimed constructivism and cognitive science.

## References

- [1] Krych A., Słownictwo kompleksowych badań i modelowania potoków ruchu, [www.ksk.pk.edu.pl](http://www.ksk.pk.edu.pl), (access: 25.06.2017).
- [2] Baza Wiedzy Inżynierii Ruchu, <http://www.bwir.org>, (access: 25.06.2017).
- [3] Biuro Inżynierii Transportu Pracownie Projektowe Cejrowski & Krych, VISSIM, [www.bit-poznan.com.pl](http://www.bit-poznan.com.pl), (access: 25.06.2017).
- [4] DYREKTYWA 2002/49/WE PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO I RADY z dnia 25 czerwca 2002 r. odnosząca się do oceny i zarządzania poziomem hałasu w środowisku, <http://siskom.waw.pl> (access: 25.06.2017).
- [5] Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, <https://www.gddkia.gov.pl>, (access: 25.06.2017).
- [6] Miejski Zarząd Dróg i Transportu w Częstochowie, <http://mzd.czyst.pl>, (access: 25.06.2017).
- [7] PRAWOORUCHUDROGOWYM.PL, <https://prawooruchudrogowym.pl>, (access: 25.06.2017).
- [8] Rozporządzenie Ministrów Infrastruktury oraz Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 31 lipca 2002 r. w sprawie znaków i sygnałów drogowych, Dziennik Ustaw <http://prawo.sejm.gov.pl>, (access: 25.06.2017).
- [9] Szewczyk P., Sposoby ograniczenia zużycia paliwa w nowoczesnych pojazdach ciężarowych, Politechnika Lubelska. 2015.

- [10] Szewczyk P., Przegląd aktualnych programów symulacyjnych w inżynierii bezpieczeństwa. Opracowanie projektu symulacji w wybranym programie, AJD, 2017.
- [11] Transport Publiczny, ITS w Częstochowie to nie tylko płynny ruch, [www.transport-publiczny.pl](http://www.transport-publiczny.pl), (access: 25.06.2017).





**Joanna Świątek-Prokop<sup>1</sup>, Bartłomiej Klekot**

<sup>1</sup>*Wydział Matematyczno-Przyrodniczy*

*Akademia im. Jana Długosza*

*al. Armii Krajowej 13/15, 42-200 Częstochowa*

*e-mail: j.prokop@ajd.czyst.pl*

## **BADANIE ŚWIADOMOŚCI ZNACZENIA PRZEPISÓW BHP WŚRÓD PRACOWNIKÓW SEKTORA BUDOWLANEGO**

**Streszczenie.** Budownictwo jest najbardziej wypadkowym sektorem gospodarki. W związku z tym niezwykle ważne jest przestrzeganie uregulowań z zakresu BHP. W pracy zbadano, jaka jest świadomość ich znaczenia wśród pracowników budowlanych. Przeprowadzono badania ankietowe wśród 200 zatrudnionych. Uzyskane wyniki pokazują, że pracownicy doceniają znaczenie przepisów BHP, jednakże nie zawsze, w sposób świadomy się do nich stosują.

**Słowa kluczowe:** sektor budowlany, przepisy BHP, świadomość.

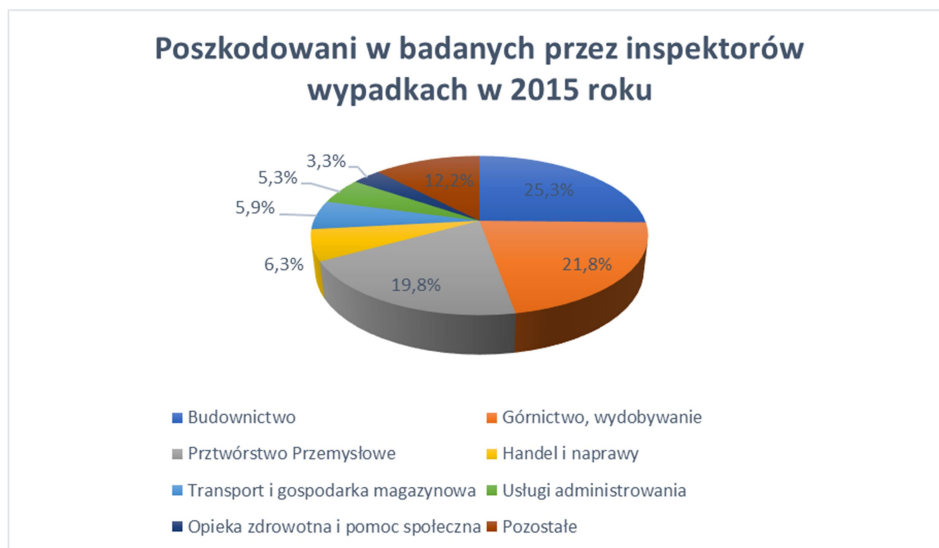
## **STUDY ON THE IMPORTANCE OF HEALTH AND SAFETY REGULATION AWARENESS AMONG CONSTRUCTION SECTOR WORKERS**

**Abstract.** Construction is the most-accident sector of the economy. Therefore, it is extremely important to comply with health and safety regulations. In this paper we examined the awareness of their importance among construction workers. Questionnaire surveys were carried out among 200 employees. The obtained results show that employees appreciate the importance of health and safety regulations, however, they do not always consciously apply them.

**Keywords:** construction sector, health and safety regulation, awareness.

## Wstęp

Sektor budowlany jest, według danych podawanych przez GUS w latach 2004–2016, jednym z najbardziej wypadkowych w całej Polskiej Klasyfikacji Działalności. Wysoki poziom świadomości pracowników oraz ich pozytywne podejście do zagadnienia przestrzegania przepisów to cele, jakie powinni stawiać sobie wszyscy pracodawcy. Proces dbania o bezpieczeństwo na budowie wymaga, aby uczestniczyli w nim wszyscy pracownicy, na wszystkich stanowiskach.



Rys. 1. Poszkodowani w wypadkach przy pracy (Opracowanie własne na podstawie danych GUS i PIP)

Tylko w 2015 roku [1] koszty inwestycji budowlanych na terenie Polski wyniosły 165 mld zł, wzniesiono 100 492 nowych budynków oraz położono 19 231 kilometrów nowych torowisk. Co warte uwagi, w omawianym roku, sektor budownictwa zatrudniał ponad 400 tysięcy osób, czyli ok. 5% zatrudnionych we wszystkich sektorach. Takie liczby zmuszają do bardzo uważnego śledzenia sytuacji i poziomu BHP w tym obszarze, gdyż z racji swojego zasięgu mają one wpływ na życie i zdrowie wielu osób.

Zarówno na pracodawcę, jak i na pracownika zostały nałożone (ustawowo) pewne prawa i obowiązki. Część z nich wynika z obowiązującej Konstytucji Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 2 kwietnia 1997 r. (art. 66 – Prawo do bezpiecznych i higienicznych warunków pracy) oraz ustawy, jednej z nadrzędnych, mówiących bezpośrednio o procesie pracy – Kodeksu pracy (np. art. 207. § 2,



mówiący o konieczności ochrony życia i zdrowia pracowników przez pracodawcę). Pracodawca jest zobowiązany zapewnić bezpieczeństwo i odpowiednią ochronę zdrowia na każdym stanowisku pracy, ale równie ważne jest podejście pracowników do obowiązujących przepisów BHP, gdyż w dużej mierze to właśnie ono decyduje o bezpieczeństwie poszczególnych jednostek.

### **Czynniki szkodliwe i niebezpieczne na placu budowy**

Na placach budowy występują zarówno czynniki szkodliwe jak i niebezpieczne, dlatego pracodawca i sam pracownik muszą być świadomi zagrożeń płynących ze wszystkich stron.

Czynniki niebezpieczne na placu budowy to przede wszystkim:

- możliwość wystąpienia wybuchu, pożaru lub przebywanie w strefie, w której doszło do uwolnienia się substancji toksycznych (często wykorzystywanych w procesie budowy);
- zagrożenia mechaniczne – wszelkiego typu. Mogą to być zarówno pracujące i poruszające się na placu budowy maszyny, ale również ich elementy, które często z racji swojej budowy lub zastosowania mogą zwiększać ryzyko rozcięć, zgnieceń lub pochwyceń pracowników. O występowaniu takiego ryzyka powinni być poinformowani operatorzy maszyn lub urzędników, przede wszystkim zaś osoby, które mogą znaleźć się w ich zasięgu działania;
- nieodpowiednie podłoże. Przez ten czynnik należy rozumieć podłoże, które nie zapewnia odpowiedniego poziomu przyczepności (śliskie lub mokre) lub jest ułożone pod kątem, który uniemożliwia wykonywanie na nim czynności w sposób bezpieczny. Z takim podłożem może się wiązać ryzyko uderzenia przez spadające elementy, np. w sytuacji, gdy takim podłożem będzie rusztowanie, na którym za pomocą narzędzi ręcznych będą wykonywane jakiegokolwiek prace. W przypadku poślizgnięcia się osoby, która takie czynności wykonuje, może ona upuścić narzędzia, które spadając, mogą spowodować uszczerbek na zdrowiu osób znajdujących się niżej.

Czynniki szkodliwe na placu budowy to w głównej mierze:

- hałas oraz drgania mechaniczne. Czynniki bezpośrednio wynikające z charakterystyki wykonywanych prac. Hałas może być spowodowany przez maszyny, obecne na każdym etapie budowy (dźwigi, koparkoładowniki, wiertarki etc.). Maszyny mogą również generować drgania przenoszone na pracowników. Oba te czynniki mogą prowadzić do całkowitej lub częściowej utraty słuchu oraz/lub wystąpienia choroby wibracyjnej;

- czynniki chemiczne. Podczas budowy nowego obiektu bądź modernizacji już istniejącego stosowanych jest wiele substancji, które w pewnych warunkach (stężenie, temperatura lub sposób składowania) mogą być szkodliwe dla człowieka.

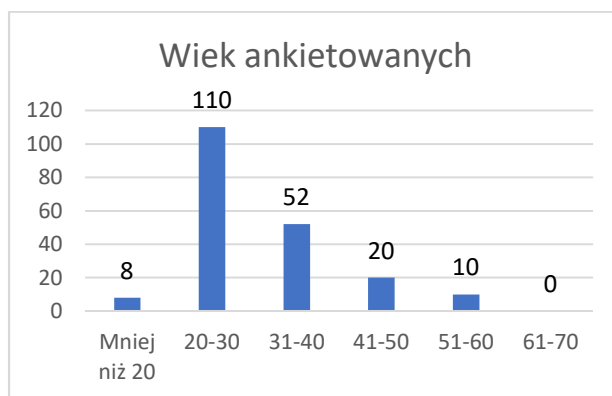
Pracodawca powinien nie tylko być świadomy istniejących zagrożeń, ale przede wszystkim powinien zrobić wszystko, aby zminimalizować je w jak największym stopniu. Po stronie pracodawcy leży obowiązek zaopatrzenia pracowników w środki ochrony indywidualnej lub zbiorowej. Ponadto jeżeli w środowisku pracy występuje zagrożenie, którego nie da się zniwelować dostępnymi środkami ochrony lub poprzez zmianę procesu technologicznego, pracodawca, na swój koszt, zobligowany jest do przeprowadzania pomiarów danego czynnika (np. hałasu), jego kontroli i porównania jej wyników z obowiązującymi dopuszczalnymi wartościami granicznymi.

Występowanie takich czynników oraz wymóg zapewniania przez pracodawcę odpowiednich środków ochrony zdrowia jest istotny zwłaszcza w przypadku prac uznanych za szczególnie niebezpieczne. Czynności takie, ujęte w spisie, charakteryzują się zwiększonym ryzykiem wystąpienia zdarzenia wypadkowego. Są to prace, które wymagają ciągłego nadzoru ze strony przełożonych lub osób odpowiedzialnych za BHP na danej budowie. Dodatkowo, obowiązkowe jest stworzenie odpowiedniego dokumentu (Instrukcja bezpiecznego wykonywania robót) lub przeprowadzenie szkolenia, które objaśnia najbardziej niebezpieczne elementy lub czynności w danej pracy oraz przedstawia ich właściwe i bezpieczne wykonanie.

## Wyniki badań i dyskusja

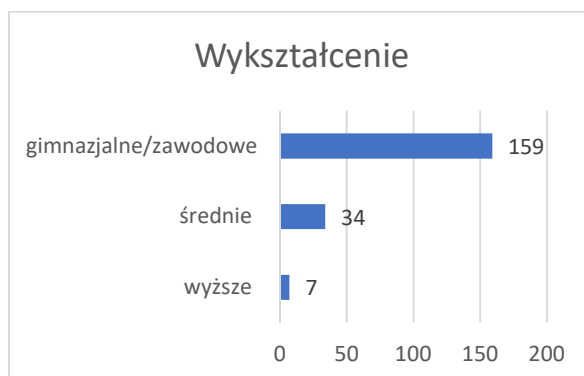
W celu zbadania stosunku pracowników do obowiązujących przepisów BHP przeprowadzono na grupie 200 pracowników budowlanych anonimowe badania ankietowe. Ankieta składała się z 12 pytań; 94% respondentów stanowili mężczyźni, 6% kobiety.

Dominującą grupę ankietowanych stanowią pracownicy w wieku 20–30 lat, następnie 31–40. W wyższych kategoriach wiekowych liczba zatrudnionych maleje (wśród ankietowanych jedynie 10 osób jest powyżej 50. roku życia.) Osoby nieco starsze (powyżej 50. roku życia) nie są już tak aktywne w tym sektorze.



Rys. 2. Wiek ankietowanych

Jednym z czynników wpływających na taki rozkład jest charakter wykonywanej pracy – przeważnie dominuje praca fizyczna, duża aktywność ruchowa, stres, etc.



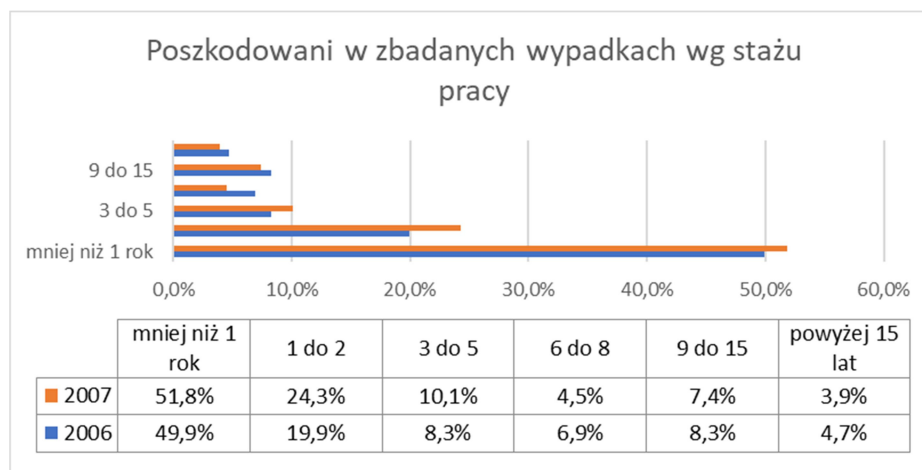
Rys. 3. Wykształcenie ankietowanych

Wśród respondentów dominowały osoby z wykształceniem gimnazjalnym lub zawodowym, jedynie 7 osób posiadało wykształcenie wyższe, i byli to kierownicy budowy.

Badania przeprowadzone przez GUS [2] wykazują, że wykształcenie pracowników ma wpływ na częstość występowania problemów zdrowotnych (w badanej grupie problemy wśród osób z wyższym wykształceniem wynosiły ok. 17%, natomiast w przypadku osób o wykształceniu nie wyższym niż gimnazjalne, wskaźnik ten wyniósł ponad 38%). Występowanie jakichkolwiek problemów zdrowotnych korelujących z wykształceniem może dawać podstawy do wniosku, że podobnie ma się sytuacja w kwestii wypadków przy pracy.

Wydaje się więc konieczne branie wykształcenia respondentów jako czynnika, który może wpływać na poziom świadomości nt. zagrożeń wśród pracowników sektora budowlanego.

Staż pracy jest istotnym czynnikiem wpływającym na wypadkowość. 83% wszystkich udzielonych odpowiedzi dotyczyło trzech wariantów długości pracy w sektorze budowlanym – mniej niż rok (35%), 1 do 2 lat (25%), oraz 3 do 5 lat (23%). Odpowiedzią, na którą warto zwrócić uwagę, jest odpowiedź: od 6 do 8 lat (9%). Taki rozkład odpowiedzi pozwala zakładać, że budownictwo należy do sektorów, w których trudno szukać pracowników z ponaddziesięcioletnim doświadczeniem (w przypadku respondentów ten warunek spełnia zaledwie 20 osób). Sytuacja taka może być potencjalnym zagrożeniem oraz sygnałem alarmowym.

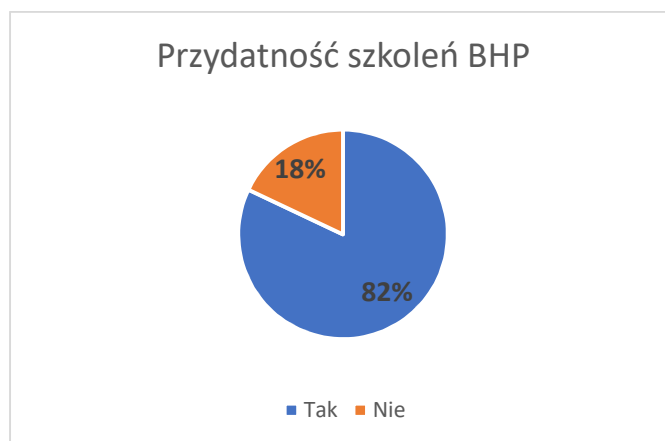


Rys. 4. Poszkodowani w wypadkach w latach 2006–2007 w zależności od stażu pracy. (Opracowanie własne na podstawie danych GUS i PIP)

Z wykresu wynika, iż staż odgrywa wielką rolę w przypadku wypadków przy pracy. Około 70% poszkodowanych to osoby pracujące krócej niż 2 lata.

Wszyscy ankietowani, przed rozpoczęciem pracy, brali udział w szkoleniach BHP organizowanych przez pracodawcę. 60% oceniło je dobrze lub bardzo dobrze, 25% źle, 15% średnio. Należy mieć na uwadze fakt, że pytanie to dotyczyło subiektywnej oceny pracowników. Niepokojące jest, że 25% odpowiedziało się jednoznacznie negatywnie.

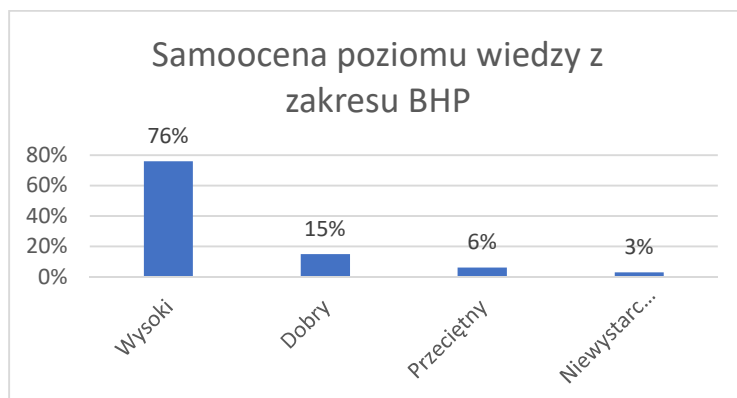
Na pytanie sprawdzające, czy informacje przekazywane na szkoleniach BHP przydały się ankietowanym w pracy, 82% odpowiedziało pozytywnie, 18% nie widziało powiązania pomiędzy przekazywaną wiedzą a praktyką.



Rys. 5. Ocena przydatności szkoleń BHP w pracy

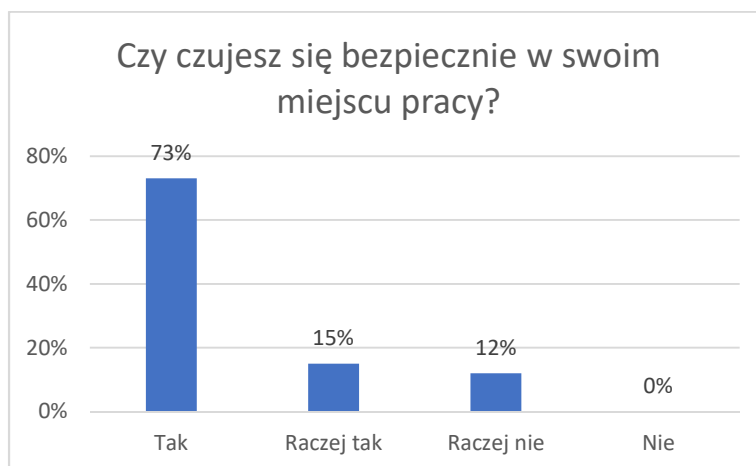
Ostatnie dwa pytania sugerują konieczność modyfikacji tematyki szkoleń lub ich formy, w taki sposób, aby odsetek zadowolonych był większy. Jednocześnie 89% respondentów oceniło, że szkolenia BHP poprawiają bezpieczeństwo na budowie.

Zapytaliśmy ankietowanych, jak oceniają swój stan wiedzy z interesującego nas zakresu. Poziom samozadowolenia jest wysoki – nie ocenialiśmy realnej wiedzy.



Rys.6. Odpowiedź na pytanie: Jak oceniasz poziom swojej wiedzy z zakresu BHP?

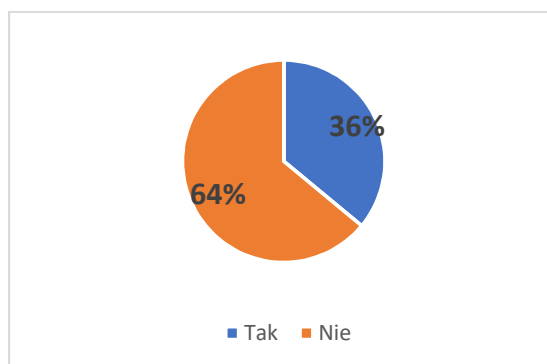
76% określiło swój poziom wiedzy z zakresu BHP jako wysoki, 15% jako dobry, a 3% (6 osób) jako niewystarczający. Jednocześnie poczucie bezpieczeństwa w pracy deklaruje 88% badanych.



Rys. 7. Ocena poczucia bezpieczeństwa w miejscu pracy

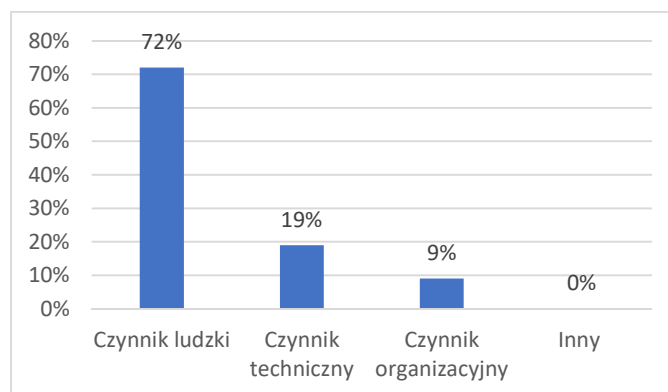
Nie było osób, które określiłyby jednoznacznie, że nie czują się bezpiecznie na swoim stanowisku pracy, co pokrywa się z wcześniejszymi odpowiedziami na pytania zawarte w ankiecie.

Niepokojący jest dość lekceważący stosunek do środków ochrony indywidualnej. Pomimo wskazań, 36% ankietowanych zdarzyło się pracować bez nich.



Rys. 8. Czy pomimo wskazań zdarzyło się Pani/Panu pracować bez środków ochrony?

Sugeruje to niedostateczną kontrolę ze strony przełożonych oraz konieczność głębszego uświadomienia znaczenia środków ochrony indywidualnej w obszarze bezpieczeństwa. Równocześnie na pytanie o przyczyny wypadków 72% ankietowanych wskazało czynnik ludzki.



Rys. 9. Przyczyny wypadków przy pracy – wg ankietowanych

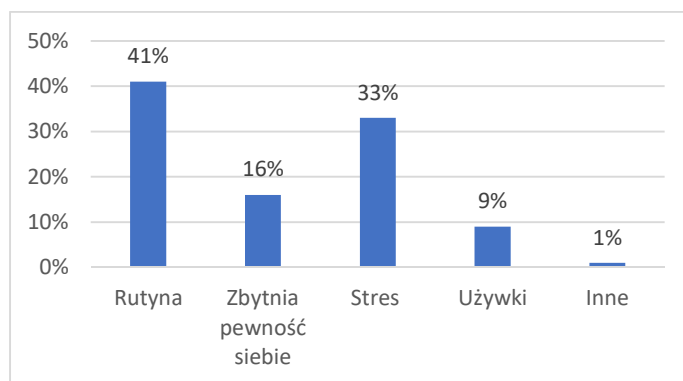
Jest to prawda, którą potwierdzają również statystyki. Na przestrzeni dekady (od 2004 do 2014) czynnik ludzki był przyczyną ponad połowy wszystkich odnotowanych wypadków. Należy jednak mieć na uwadze fakt, że wypadki są często pochodną wszystkich czynników, dlatego ich analiza to czynność wymagająca wielkiej dokładności i wiedzy.

Przez czynnik ludzki należy rozumieć wszelkie zachowania ludzi, które mogły spowodować wypadek – zbyt duża pewność siebie, celowe nieużywanie ŚOI, naprawy lub działania podejmowane bez odpowiedniego nadzoru czy umiejętności, czy chociażby używki (praca pod wpływem alkoholu, narkotyków etc.)

Kolejną odpowiedzią był czynnik techniczny – wypadki spowodowane były przez wszelkiego rodzaju uszkodzenia narzędzi, rusztowań, maszyn, itd. Odpowiedź taką zaznaczyło 19% ankietowanych. Te dane również korelują z tymi, które pozyskał GUS. W rocznikach statystycznych tej organizacji czynnik techniczny również znajdował się na drugim miejscu, będąc przyczyną ok. 10% wszystkich wypadków łącznie.

Czynnik organizacyjny, przez który należy rozumieć wszelkie zaniechania ze strony pracodawcy – brak środków ochrony, szkoleń, nadzoru lub złą organizację pracy (nieodpowiednie przerwy, archaiczne rozwiązania techniczne itd.) – to 9% wszystkich odpowiedzi udzielonych na to pytanie.

Kolejne pytanie w ankiecie miało na celu określenie tego, jakie czynniki według ankietowanych są główną przyczyną nieprzestrzegania przez pracowników przepisów BHP. W celu ułatwienia respondentom udzielenia odpowiedzi na to pytanie, podane zostały cztery warianty odpowiedzi. Dodatkowy, piąty, pozwalał na dodanie odpowiedzi, która nie została uwzględniona w zestawie.



Rys. 10. Przyczyny lekceważenia przepisów BHP

Rutyna to – według pracowników, którzy odpowiadali w badaniu, najczęstszy powód nieprzestrzegania przez pracowników przepisów BHP, odpowiedzi takiej udzieliło 41% ankietowanych. Drugą najbardziej popularną odpowiedzią był stres – 33% respondentów. Obie te odpowiedzi zaliczyć można do kategorii szkodliwych czynników psychofizycznych. Czynniki te powodują u pracownika nadmierne zmęczenie psychiczne oraz wypalenie zawodowe. W połączeniu z monotonią wykonywanych czynności mogą doprowadzić np. do depresji. Powyższe dane wskazują, że według pracowników praca w stresie oraz schematyczne, monotonne wykonywanie czynności mogą prowadzić do sytuacji, w których pracownicy tracą uważność, wskutek czego dochodzi do wypadku.

Do takich sytuacji, zdaniem ankietowanych, prowadzić również może zbytńia pewność siebie (takiej odpowiedzi udzieliło 16% wszystkich respondentów) oraz używki (9% wszystkich uczestników badania). Dwie osoby wskazały odpowiedzi inne niż te podane jako proponowane. Jedna z nich mówiła o tym, że pracownicy nie przestrzegają przepisów, ponieważ ich nie znają – jest to uzasadnienie, które jest nie do zaakceptowania. Druga osoba stwierdziła, że nieprzestrzeganie przepisów spowodowane jest tym, że pracownicy uważają, że nie ma realnej potrzeby ich istnienia – uważają, że są niepotrzebne.

Na ostatnie pytanie: „Czy uważa Pani/Pan, że przepisy BHP mają znaczenie w zachowaniu bezpieczeństwa na placu budowy?” wszyscy ankietowani odpowiedzieli twierdząco, co niestety nie oznacza, że wszyscy się do nich stosują.

## Podsumowanie

Przeprowadzone badania wskazują na dużą świadomość znaczenia przepisów BHP wśród pracowników sektora budowlanego. Z drugiej strony, pomimo tej świadomości znacząca grupa pracowników (36%) deklaruje, że zdarza



im się pracować bez środków ochrony indywidualnej pomimo istniejących wskazań, co świadczy o lekceważącym podejściu do przepisów.

Takie dane sprawiają, że należy przeanalizować metody oraz techniki, jakie stosowane są obecnie w szkoleniach BHP dla osób pracujących w budownictwie, i spróbować dodać do nich rozwiązania, które pomogą w zwiększeniu świadomości pracowników. Zmiany w szkoleniach wstępnych i okresowych pozwolą na uświadomienie większej liczby pracowników (zarówno tych po szkoleniu wstępnym, którzy posiadają pewną wiedzę z tego zakresu, jak i tych, którzy odbywać je będą pierwszy raz).

Szkolenie wstępne zapewnia pracodawca, musi je odbyć każdy nowo zatrudniony, jednak zdarza się, że pracownicy traktują takie szkolenia jako mało znaczący etap przy podejmowaniu pracy. Przyczyn takiego stanu rzeczy może być wiele. Pierwszym czynnikiem, powodującym takie odczucia pracowników, może być to, że w wielu przypadkach szkolenia przeprowadzane są bardzo schematycznie, przez osoby zewnętrzne (niepracujące w danym zakładzie), które nie uwzględniają specyfiki pracy oraz przyjętych rozwiązań w danej firmie, a podczas swojej pracy bazują na stworzonym schemacie, który pasuje zarówno dla pracowników biurowych, jak i wykonujących pracę o innym charakterze. Dobrą praktyką jest zatrudnianie osoby pracującej w konkretnej firmie (a jeżeli nie ma w niej nikogo o odpowiednich kwalifikacjach – jej zatrudnienie). Osoba taka, pomijając fakt, że jest znana pracownikom (łatwiejsza komunikacja, większa swoboda rozmów), na pewno w większym stopniu, niż osoba spoza firmy, zna jej specyfikę. Kolejnym aspektem, który powoduje, że szkolenia BHP są marginalizowane, jest sam sposób ich prowadzenia. Proponowany przekaz nie jest dostosowany do konkretnego odbiorcy. O ile istnieją odpowiednie wytyczne co do prowadzenia takiego szkolenia (czas jego trwania, dokładne składowe, jakie muszą zostać uwzględnione, etc.) [4, 5] o tyle warto jest pokusić się o rozwiązania, które zaowocują większą interakcją na linii pracownik–szkoleniowiec. Wzorowe szkolenie wstępne powinno również w jasny i łatwy do zapamiętania sposób opisywać potencjalne zagrożenia. Ciekawym rozwiązaniem wydaje się korzystanie z coraz bardziej popularnych technik nauczania – jak sugestopedia – czy innych osiągnięć z zakresu neurodydaktyki.

Szkolenie wstępne składa się z dwóch części, gdzie druga, tj. instruktaż stanowiskowy, odpowiednio przeprowadzony, również może skutkować lepszymi rezultatami niż przekazywanie pracownikowi samej wiedzy teoretycznej. Celem tego rodzaju szkolenia jest zapoznanie pracownika z bardziej szczegółowymi (niż w przypadku pierwszej, mimo wszystko, bardziej teoretycznej części) wymaganiami co do zasad, jakie muszą być realizowane podczas pracy na danym stanowisku. Większa aktywizacja pracowników to cel, jaki powinni postawić sobie wszystkie osoby przeprowadzające szkolenia BHP. Takie działanie to pewność, że wszelkie pytania pracowników nie pozostaną bez odpo-

wiedzi, co w dużym stopniu przełożyć się może na zmniejszenie liczby sytuacji wypadkowych.

### **Literatura**

- [1] Główny Urząd Statystyczny, Mały Rocznik Statystyczny Polski 2016, Warszawa, 2017, str. 243-252
- [2] Wypadki przy pracy i problemy zdrowotne związane z pracą, GUS, Warszawa, 2008r., str.26-28
- [3] Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 26 września 1997 r. w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy (tekst jedn.: Dz. U. z 2003 r. Nr 169, poz. 1650 z późn. zm.)
- [4] Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 9 października 2007 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie szkolenia w dziedzinie bezpieczeństwa i higieny pracy
- [5] Ramowy program instruktazu ogólnego - załącznik nr. 1 do rozporządzenia Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 27 lipca 2004 r. (poz. 1860)



**Mikhail Selianin**

*Wydział Matematyczno-Przyrodniczy*

*Akademia im. Jana Długosza*

*al. Armii Krajowej 13/15, 42-200 Częstochowa*

*e-mail: m.selianin@ajd.czyst.pl*

## THE MODULAR PRINCIPLES OF PARALLEL PIPELINE INFORMATION PROCESSING

**Abstract.** In the present paper, we deal with the methodology of implementation of the modular arithmetic algorithms using the parallel-pipeline residues summation blocks with respect to the bases of modular number system. These summation blocks are the main structural elements of high-speed modular operating devices, they provide high throughput performance of input data sets and are oriented to the wide application of VLSI chips.

**Keywords:** Modular number system, modular arithmetic, modular computing structures, parallel data processing, pipeline mode.

## MODULARNE ZASADY RÓWNOLEGŁE POTOKOWEGO PRZETWARZANIA INFORMACJI

**Streszczenie.** W niniejszym artykule omówiono metodologię implementacji algorytmów arytmetyki modularnej przy wykorzystaniu równoległe potokowych bloków sumowania reszt w odniesieniu do podstaw modularnego systemu liczbowego. Te bloki sumujące są głównymi elementami strukturalnymi wysokowydajnych modularnych urządzeń obliczeniowych, one również zapewniają wysoką wydajność przepustowości zestawów danych wejściowych i są zorientowane na szerokie zastosowanie układów scalonych VLSI.

**Słowa kluczowe:** modularne systemy liczbowe, arytmetyka modularna, modularne struktury obliczeniowe, równoległe przetwarzanie informacji, tryb potokowy.

## Introduction

The unique property of the modular number systems (MNS) to perform a natural decomposition of the computational processes into independent components of less complexity led to the widespread use of modular arithmetic (MA) in modern computer science and its applications as an effective mathematical apparatus for mapping of the computational processes into the high-speed parallel pipeline architectures [1-5].

The term "parallelism" is usually used to denote all the forms of simultaneous processing of information in a computer. Nevertheless, this concept is often interpreted in a more narrow sense confining itself to considering only those forms of processing that are characterized by the independence of simultaneously operating devices, systems, and their constituent parts. In this case, we can say about the spatial distribution of time overlapping computing processes or their components.

In contrast, the pipeline information processing is characterized by a spatio-temporal distribution of the implemented computational processes, i.e. by such computational organization at which each running process is distributed sequentially in time between all the used devices, systems or their elements. Both parallelism and pipelining can be considered at three logical levels: elementary operations on words, arithmetic operations and computation processes.

The modular computing structures (MCS) are focused on the high-speed processing of digital information on the first two of these levels [2-5]. The most significant feature of MA algorithms is that their implementation actually reduces to independent of each other summation operations of the sets of low-bit residues with respect to the modules of the number system. These operations are easily parallelized and they provide a high performance of the MCS when organizing the pipeline mode of information processing.

## The basic notation and terminology

Let us introduce the following notation:

$\mathbf{Z}$  is the set of all integers;

$[x]$  denotes the floor of  $x$ , i.e. the greatest integer less than or equal to  $x$ ,

$[x] = \max \{y \in \mathbf{Z} \mid y \leq x\}$ ;

$\lceil x \rceil$  denotes the ceiling of  $x$ , i.e. the smallest integer greater than or equal to  $x$ ,  $\lceil x \rceil = \min \{y \in \mathbf{Z} \mid y \geq x\}$ ;

$\mathbf{Z}_m = \{0, 1, \dots, m - 1\}$  is the set (ring) of least nonnegative residue modulo  $m > 1$ ;

$|x|_m$  denotes the element of  $\mathbf{Z}_m$  congruent to  $x$  modulo  $m$ ;

$m_1, m_2, \dots, m_k$  are the natural modules ( $k \geq 2$ ).

### The generalized structure of algorithms of MNS-based computer arithmetic

The classical MNS is defined by means of a set of pairwise prime natural numbers (modules)  $m_1, m_2, \dots, m_k$  ( $k > 1$ ) by a mapping that assigns to each integer  $X$  ( $X \in \mathbf{Z}$ ) a codeword of the form  $(\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_k)$ , where  $\chi_i = |X|_{m_i}$  ( $i = 1, 2, \dots, k$ ) [2, 3]. Concerning the computer algorithms of MA, it is easy to see that due to the internal parallelism of MNS each of these algorithms can in general be divided into  $k$  sections, the  $i$ th of which corresponds to the basic module  $m_i$  ( $i = 1, 2, \dots, k$ ) and represents a certain set of operations on low-bit values. Such operations form the basis of the information processing at the level of elementary operations on words in the modular computing devices. In view of the low digit capacity of the operands, all the basic operations can be implemented in tabular way at the same time.

The analysis of algorithms of the MNS computer arithmetic shows that their sections have the same generalized structure, the typical element of which is a sequence of operations shown in Fig. 1.

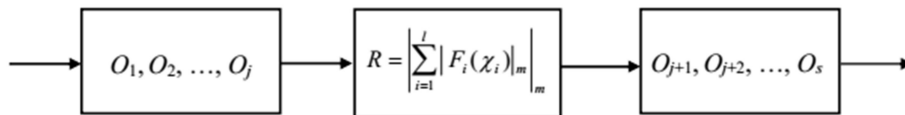


Fig. 1. A typical element of the section of MA algorithms

In general, this sequence contains two chains of basic operations  $O_1, O_2, \dots, O_j$  and  $O_{j+1}, O_{j+2}, \dots, O_s$  ( $j > 0, s > j$ ) on low-bit values, which are separated by the operation of a modular sum calculation of the form

$$R = \left| \sum_{i=1}^l |F_i(\chi_i)|_m \right|_m \quad (1)$$

with the formation of the number of modulo overflows:

$$\Pi = \left\lfloor \frac{1}{m} \sum_{i=1}^l |F_i(\chi_i)|_m \right\rfloor, \quad (2)$$

where  $F_i(\chi_i)$  is the integer-valued function of residue  $\chi_i$  with respect to some module  $m$  corresponding to the given section of the considered algorithm;  $l \geq 2$ .

The expression (1) and so the entire sequence of operations shown in Fig. 1 can easily be pipelined. Therefore, the MA algorithms have in general the same property. In other words, they have a pipeline structure.

### The constructing principles of modular operating devices

The calculation of expressions of the form (1), (2) in the pipeline mode is most simply and efficiently carried out using the parallel-pipeline residues summation block (RSB), which structure is shown in Fig. 2.

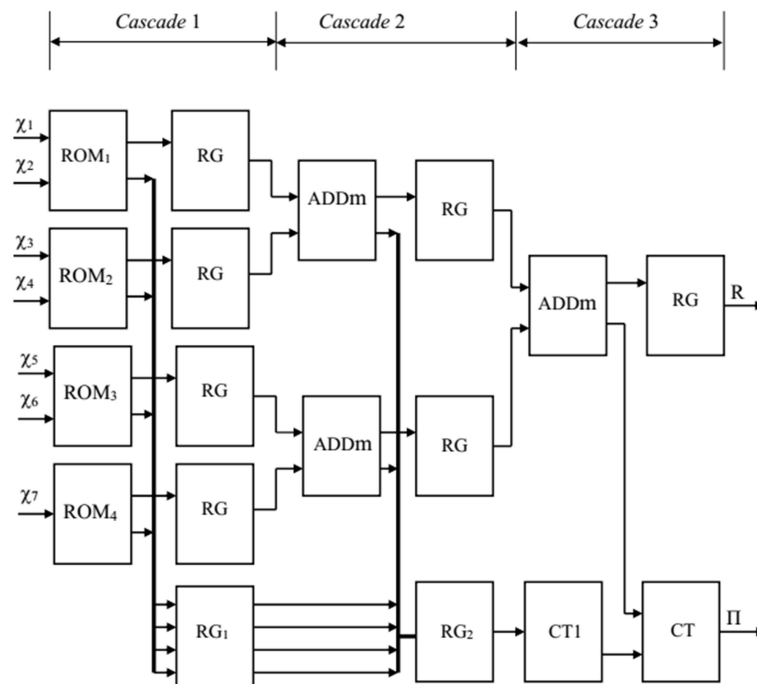


Fig. 2. The structure of the parallel-pipeline RSB (the case  $l = 7$ )

The parallel-pipeline RSB has a  $T_l$ -cascade pyramidal structure ( $T_l = \lceil \log_2 l \rceil$ ) and is implemented with the help of the read only memory (ROM)  $ROM_j$  ( $j = 1, 2, \dots, t$ ;  $t = \lceil l/2 \rceil$ ), the adders  $ADD_m$  modulo  $m$  with the overflow flag, the unit counter  $CT_1$ ; the registers  $RG$  of the cascades from the

1st to the  $T_l$ th, the registers  $RG_s$  ( $s = 1, 2, \dots, T_l - 1$ ) and the counter  $CT$ . The digit capacity of the registers  $RG$  is  $b = \lceil \log_2 m \rceil$  bits, the counter  $CT$  is a  $\lceil \log_2(l - 1) \rceil$ -bit counter.

If the number  $l$  is even, then all the ROMs ( $ROM_1, ROM_2, \dots, ROM_t$ ) used in the first cascade of the RSB perform transformations of the pairs of input residues  $\langle \chi_1, \chi_2 \rangle, \langle \chi_3, \chi_4 \rangle, \dots, \langle \chi_{l-1}, \chi_l \rangle$  into the pairs of values  $\langle R_1, \omega_1 \rangle, \langle R_2, \omega_2 \rangle, \dots, \langle R_t, \omega_t \rangle$ , respectively, where

$$R_j = \left| \left| F_{2^{j-1}}(\chi_{2^{j-1}}) \right|_m + \left| F_{2^j}(\chi_{2^j}) \right|_m \right|_m; \quad (3)$$

$$\omega_j = \left\lfloor \frac{1}{m} \left( \left| F_{2^{j-1}}(\chi_{2^{j-1}}) \right|_m + \left| F_{2^j}(\chi_{2^j}) \right|_m \right) \right\rfloor \quad (4)$$

( $j = 1, 2, \dots, t$ ).

As it follows from (3),  $ROM_j$  has a capacity of  $2^{b_{2^{j-1}}+b_{2^j}}$  words of length  $b + 1$  bits ( $b_{2^{j-1}}$  and  $b_{2^j}$  are the digit capacity of the residues  $\chi_{2^{j-1}}$  and  $\chi_{2^j}$ , respectively). The pair of values  $\langle R_j, \omega_j \rangle$  is written to the ROM  $ROM_j$  at the address  $\chi_{2^{j-1}} + \chi_{2^j} 2^{b_{2^{j-1}}}$  for all possible values of the variables  $\chi_{2^{j-1}}$  and  $\chi_{2^j}$ . Thus,  $\chi_{2^{j-1}}$  and  $\chi_{2^j}$  are the lower and upper parts of the address, respectively, along which the desired two-dimensional value  $\langle R_j, \omega_j \rangle$  is written to the ROM. For odd  $l$ ,  $ROM_1, ROM_2, \dots, ROM_{t-1}$  transform the pairs of residues as described above, and  $ROM_t$  transforms a single residue  $\chi_l$  into the value

$$R_t = \left| F_l(\chi_l) \right|_m. \quad (5)$$

Just this case is shown in Fig. 2. For odd  $l$ ,  $ROM_t$  has a capacity of  $2^{b_l}$  words of length  $b$  bits, and the value  $R_t$  is written to its memory at address  $\chi_l$  for all the possible values of the variable  $\chi_l$ .

The counter  $CT_l$  of units in the word serves for counting the number of unit bits in the binary code  $(x_{l-3} x_{l-4} \dots x_0)_2$  arriving from the output of the register  $RG_{T_l-1}$  in each clock cycle of the RSB. This function is implemented most simply using a ROM with a capacity of  $2^{l-2}$  words of length  $T_{l-1}$  bits, and the value  $\sum_{s=0}^{l-3} x_s$  is written to its memory at the address  $\sum_{s=0}^{l-3} x_s 2^s$  for all possible values of the variables  $x_0, x_1, \dots, x_{l-3}$  ( $x_s \in \{0, 1\}$ ,  $s = 0, 1, \dots, l-3$ ). The counter  $CT_l$  can also be implemented as a special circuit triggered during one modular clock cycle.

In the RSB of the concerned type, the calculation of the modular sum  $R$  together with the formation of the overflow number  $\Pi$  (see (1) and (2)) takes  $T_l$  clock cycles. In the first clock cycle, the residues  $R_1, R_2, \dots, R_t$  (see (3) and (5)) are evaluated by means of  $ROM_1, ROM_2, \dots, ROM_t$  and are written into the corresponding registers  $RG$  of the first cascade, and the binary flags  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{l_1}$  (see (4),  $l_1 = \lfloor l/2 \rfloor$ ) are also stored in the  $l_1$ -bit register  $RG_1$ .

During the  $v$ th clock cycle ( $v = 2, 3, \dots, T_l - 1$ ) the  $l_v$  modular adders  $ADD_m$  of the  $v$ th cascade ( $l_v = \lfloor t_{v-1} \rfloor$ ;  $t_j = \lfloor t_{j-1}/2 \rfloor, j = 2, 3, \dots, v-1, t_1 = t$ ) add modulo  $m$  the pairs of residues obtained at the previous  $(v-1)$ th clock cycle. As this takes place, the generated overflow digits  $\omega_{L_{v-1}+1}, \omega_{L_{v-1}+2}, \dots, \omega_{L_v}$  ( $L_v = L_{v-1} + l_v, L_1 = l_1$ ) are written to the group of  $l_v$  upper bits of the register  $RG_v$ . At the same time, the binary flags  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{L_{v-1}}$  are passed from the register  $RG_{v-1}$  to the group of  $L_{v-1}$  lower bits of the register  $RG_v$ . Let us note that in the case of odd  $t_{v-1}$  the last  $t_{v-1}$ th residue of the residue set passing to the  $v$ th cascade of RSB does not take part in paired summing, so it is passed into the last  $t_v$ th register  $RG$  of the  $v$ th cascade.

At the final  $T_l$ th clock cycle of the residue summation process the adder  $ADD_m$  of the  $T_l$ th cascade evaluates the desired value of the modulo sum  $R$  (see (1)), the unit counter  $CT_1$  determines the number  $\sum_{s=0}^{l-2} \omega_s$  of overflows modulo  $m$  occurred during all the previous clock cycles, which pass to the  $T_l$ -bit counter  $CT$  through its information input. The overflow digit  $\omega_{l-1}$  generated by the adder  $ADD_m$  is fed to the counting input of the counter  $CT$  and thereafter the desired value  $\Pi$  (see (2)) is formed in it.

For construction of this RSB the  $l + 1$  ROMs, the  $l + T_l - 3$  registers of the length  $b$  bit, the  $T_l - 1$  registers of the length from  $l_1$  to  $l - 2$  bits and the counter are required. It is assumed that the modular adders  $ADD_m$  and the unit counter  $CT_1$  are implemented by a ROM.

Due to the pipeline structure of the described RSB, the input data sets  $\langle \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_l \rangle$  can enter to it in every clock cycle, i.e. with a frequency  $f_{MT} = 1 / t_{MT}$ , where  $t_{MT}$  is the duration of the modular clock cycle. Therefore, in the pipeline mode the streams of typical operation sequences will also be executed with the same speed (see fig. 1). Thus, the parallel-pipelined RSBs with respect to the modules  $m_1, m_2, \dots, m_k$  of the number system, providing the maximum throughput performance for digital information processing at the level of operations on low-bit values, constitute the bulk of the equipment of high-speed modular operating devices.

The most important distinguishing feature of MA computer algorithms is that within the framework of pipeline structures of the considered type the simultaneous implementation of typical sequences of operations is easily performed even when such operations form the cycles. As a result, despite the sequential



character of the applied procedures, in these cases the high-speed performance is achieved at relatively small hardware expenses. This circumstance also determines the simplicity of controlling the pipeline modular devices.

## Conclusion

The basic operation of all the non-modular procedures in the MA is the summation of the sets of residues with respect to the MNS modules together with the generation of the number of overflows occurred during their summation. These calculations are most simply and efficiently carried out by means of the parallel pipeline RSBs having a cascade pyramidal structure and processing the input data sets in every clock cycle. The parallel pipeline RSBs provide the highest speed for both parallel and serial implementations of non-modular procedures.

The fact that the performance of any operation on an arbitrary set of residues with a relatively small total digit capacity can always be carried out, in principle, in the tabular way by means of the same functional units (memory blocks, programmable logical matrixes, etc.) is of particular interest.

Thus, due to the internal parallelism, tabular structure and simplicity of pipelining at the level of operations on low-bit values, the MA algorithms represent an ideal basis for the synthesis of parallel pipeline modular computing devices, which provide high throughput performance and are oriented to the wide application of VLSI chips.

## References

- [1] Akushsky I.J., Yuditsky D.I., *Computer arithmetic in residual classes*, Soviet radio, Moscow, 1968 (in Russian).
- [2] Chernyavsky A.F., Danilevich V.V., Kolyada A.A., Selyaninov M.Y., *High-speed Methods and Systems of Digital Information Processing*, Belarusian State University Press, Minsk, 1996 (in Russian).
- [3] Kolyada A.A., Pak I.T., *Modular Structures of Pipeline Digital Information Processing*, University Press, Minsk, 1992 (in Russian).
- [4] Mohan P.V. Ananda, *Residue Number Systems: Algorithms and Architectures*, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [5] Omondi A., Premkumar B., *Residue Number Systems. Theory and Implementation*, Imperial College Press, London, 2007.





**Mikhail Selianin**

*Wydział Matematyczno-Przyrodniczy*

*Akademia im. Jana Długosza*

*al. Armii Krajowej 13/15, 42-200 Częstochowa*

*e-mail: m.selianin@ajd.czyst.pl*

## THE BASIC STRUCTURAL ELEMENTS OF MODULAR DEVICES FOR DIGITAL INFORMATION PROCESSING

**Abstract.** In this paper, we consider four basic methods for design of the modular adders, subtractors and multipliers suitable for modular number system: the direct logical method, the adder method, the ring shift method and the tabular method. It is shown that the variant of look-up table implementation of modular arithmetic operations using permanent storage devices is the simplest and most effective for organization of high-speed pipeline digital information processing.

**Keywords:** Modular arithmetic, modular number system, modular computing structures, modular operations, look-up table data processing.

## BAZOWE ELEMENTY STRUKTURALNE URZĄDZEŃ MODULARNYCH DO CYFROWEGO PRZETWARZANIA INFORMACJI

**Streszczenie.** W niniejszym artykule przedstawiono cztery główne sposoby projektowania modularnych sumatorów, subtraktorów oraz mnożników: bezpośrednia metoda logiczna, metoda oparta na podstawie sumatorów binarnych, metoda przesunięcia cyklicznego oraz metoda tabelaryczna. Wykazano, że wariant tabelarycznej realizacji operacji arytmetycznych z zastosowaniem pamięci tylko do odczytu jest najbardziej prostym i skutecznym rozwiązaniem w zakresie szybkiego potokowego przetwarzania informacji cyfrowej w resztowych systemach liczbowych.

**Słowa kluczowe:** arytmetyka modularna, modularne systemy liczbowe, modularne struktury obliczeniowe, operacje modularne, tabelaryczne przetwarzanie informacji.

## Introduction

The performance increase and the functionality expansion have always been and now are the main goals of the developing process of computing machinery. The implementation of new and more efficient methods of organization and realization of computation processes is one of the main ways to achieve these goals along with improvement in computer engineering. The analysis of the known approaches used in the development of high-performance computing structures shows that all of them have one common distinctive feature, which essence consists in the application of certain forms of parallel digital information processing.

Among all numerical systems, the number systems with a parallel structure are the most suitable for carrying out the parallel computations, especially the high-speed ones. First of all, the modular number systems (MNS), which are characterized by the maximum level of internal parallelism, belong to such systems [1–5]. The unique property of MNS to perform a natural decomposition of computational processes into independent components of less complexity led to the widespread use of modular arithmetic (MA) in modern computer science and its applications as an effective mathematical apparatus for a mapping of computational processes into the high-speed parallel architectures.

## The basic notation and terminology

Let us introduce the following notation:

$\mathbf{Z}$  is the set of all integers;

$\lceil x \rceil$  denotes the ceiling of  $x$ , i.e. the smallest integer greater than or equal to  $x$ ,  $\lceil x \rceil = \min \{y \in \mathbf{Z} \mid y \geq x\}$ ;

$\mathbf{Z}_m = \{0, 1, \dots, m - 1\}$  is the set (ring) of least nonnegative residue modulo  $m > 1$ ;

$\mathbf{Z}_m^* = \{1, 2, \dots, m - 1\}$  is the cyclic group of the ring  $\mathbf{Z}_m$ ;

$\varphi(m)$  is the Euler function (the number of positive residues of the ring  $\mathbf{Z}_m$  relatively prime to  $m$ );

$|x|_m$  denotes the element of  $\mathbf{Z}_m$  congruent to  $x$  modulo  $m$ ;

$m_1, m_2, \dots, m_k$  are the natural modules ( $k \geq 2$ );

## The modern approaches for implementation the modulo operations

One of the most important characteristics of MA caused by the parallelism of the MNS structure is that the process of performing any operation on

numbers in a modular code, both modular and non-modular, reduces to a sequence of sets of single-step operations of the form

$$\gamma = F(\alpha, \beta), \quad (1)$$

where  $F$  is some function;  $\alpha$ ,  $\beta$  and  $\gamma$  are the nonnegative integer variables whose maximum values are commensurable with the values of the used modules of MNS. Various special methods which ensure high speed can be applied to implement the operations described by the relation (1) due to the smallness of  $\alpha$  and  $\beta$ .

The adders, subtractors and multipliers with respect to MNS modules are the most common functional units (FU) of modular computing devices. There are four main methods for designing modular units: the direct logical method, the adder method, the ring shift method as well as the table method [3].

### The direct logical method

In the direct logical design method, the modular operations are described at a level of switching function systems by means of which the binary digit values of the sums, differences and products of residues with respect to the corresponding modules are formed.

The result  $\gamma$  of the realized operation of the type  $\gamma = O(\alpha, \beta)$  ( $\alpha \in \mathbf{Z}_{m_i}$ ,  $\beta \in \mathbf{Z}_{m_j}$ ;  $i, j \in \mathbf{Z}_k$ ;  $O$  is a known function) is obtained in the binary code  $\gamma = (\gamma_{\lambda-1} \gamma_{\lambda-2} \dots \gamma_0)_2$  by using the previously synthesized Boolean relations

$$\gamma_l = O_l(\alpha_0^{(i)}, \alpha_1^{(i)}, \dots, \alpha_{\lambda_i-1}^{(i)}; \beta_0^{(j)}, \beta_1^{(j)}, \dots, \beta_{\lambda_j-1}^{(j)}) \quad (l = 0, 1, \dots, \lambda - 1), \quad (2)$$

where  $O_l$  is some switching function;  $\alpha_0^{(i)}, \alpha_1^{(i)}, \dots, \alpha_{\lambda_i-1}^{(i)}$  and  $\beta_0^{(j)}, \beta_1^{(j)}, \dots, \beta_{\lambda_j-1}^{(j)}$  are the binary digits of the operands  $\alpha$  and  $\beta$ , respectively;  $\lambda_i = \lceil \log_2 m_i \rceil$ ,  $\lambda_j = \lceil \log_2 m_j \rceil$ ,  $\lambda$  is the code length of the value  $\gamma$ .

Modular adders, subtractors and multipliers are implemented in the form of combinational circuits, which are synthesized within the traditional approach applied in the case of binary digital devices. As a rule, the expressions (2) have a simple form and allow an effective realization by means of the simple programmable logical arrays (PLA) due to the small values of the parameters  $\lambda_i$  and  $\lambda_j$ . The modular matrix structures on this basis are distinguished by simplicity, regularity and high competitiveness. The pipeline information processing is easily organized within these structures.

### The adder method

This method implies that the binary adders are provided with the additional logic circuits that enable the addition of the residues with respect to the selected modules, at the same time all the arithmetic operations are carried out during a certain number of additions. The adder method is realized most simply with the use of modules of the form  $m = 2^b, 2^b \pm 1$  ( $b$  is a natural number) and its application is reasonable only for sufficiently large  $m$ .

The idea underlying the adder method of the organization of computation processes in modular blocks consists in the use of the index principle of performance of the modular calculations and the binary adders as the basic FU. The isomorphism of the multiplicative group  $\mathbf{Z}_m^*$  and the additive group  $\mathbf{Z}_{m-1}$  set by the mapping  $G: \mathbf{Z}_m^* \rightarrow \mathbf{Z}_{m-1}$ , which assigns to each element  $\chi \in \mathbf{Z}_m^*$  the unique element  $G(\chi) = \text{ind}_m \chi$  from  $\mathbf{Z}_{m-1}$  satisfying the equality

$$|g^{\text{ind}_g \chi}|_m = \chi, \quad (3)$$

plays a significant part in practical realization of the mentioned idea [6]. Here,  $g$  is a primitive root modulo  $m$  defined as an element of commutative group  $\langle \mathbf{Z}_m^*, \times \rangle \subset \langle \mathbf{Z}_m, + \rangle$  with the order  $N = \varphi(p) = m - 1$ ; the element  $\text{ind}_g \chi$  of the group  $\mathbf{Z}_{m-1}$  is called an index or discrete logarithm of the number  $\chi$  to the base  $g$  modulo  $m$ . According to (3), in the case of prime  $m$  for any  $\alpha, \beta \in \mathbf{Z}_m^*$  the following relation is true

$$|\alpha\beta|_m = |g^{\text{ind}_g |\alpha\beta|_m}|_m = |g^{|\text{ind}_g \alpha + \text{ind}_g \beta|_{m-1}}|_m. \quad (4)$$

Thus, the multiplication modulo prime  $m$  can always be reduced to modular addition because of the isomorphism of multiplicative group  $\mathbf{Z}_m^*$  and additive index group  $\mathbf{Z}_{m-1}$ . According to (4), in order to obtain the result of the modular multiplication  $|\alpha\beta|_m$  it is enough to determine the indices  $\text{ind}_g \alpha$  and  $\text{ind}_g \beta$  of the operands  $\alpha$  and  $\beta$ , add them modulo  $m - 1$  and then transform the resulting residue  $\text{ind}_g |\alpha\beta|_m = |\text{ind}_g \alpha + \text{ind}_g \beta|_{m-1}$  into the desired product  $|\alpha\beta|_m$ . For small value of the module  $m$ , the direct and inverse transformations of the residues  $\chi$  and  $\text{ind}_g \chi$  ( $\chi \in \mathbf{Z}_m$ ) corresponding to the mappings

$G: \chi \rightarrow \text{ind}_g \chi$  and  $G^{-1}: \text{ind}_g \chi \rightarrow \chi$  in practice are easily carried out by the look-up table method [2, 3]. Since the volume of the tables required for transformations is about 10 times less than it is for the table of residue multiplication modulo  $m$ , then a considered method of modular multiplication with the use of indices

appears more efficient than a direct table method, especially with increase of the value of module  $m$ .

The advantages of the adder method become even more appreciable if the addition of the indices  $\text{ind}_g \alpha$  and  $\text{ind}_g \beta$  is performed not modulo  $m-1$  but with respect to the set of pairwise prime modules whose product coincides with  $m-1$ . We note that in view of the simplicity of  $m$ , the module  $m-1$  is composite. The use of specified decomposition procedure for the formation of  $\text{ind}_g |\alpha\beta|_m$  allows us to optimize the corresponding adder architectures both in complexity and speed.

### The ring shift method

Another approach to creation of modular blocks, at which the data processing is carried out exclusively in a unitary code using only registers, is based on the use of certain properties of the residue ring  $\mathbf{Z}_m$  as well as the tables of addition, subtraction and multiplication operations modulo  $m$ , i.e. the matrices  $[[\alpha + \beta|_m]$ ,  $[[\alpha - \beta|_m]$ ,  $[[\alpha \times \beta|_m]$  ( $\alpha, \beta \in \mathbf{Z}_m, m > 1$ ). An example of a matrix structure of addition and subtraction operations for the module  $m = 5$  is shown below:

$$[[\alpha + \beta|_m] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 0 \\ 2 & 3 & 4 & 0 & 1 \\ 3 & 4 & 0 & 1 & 2 \\ 4 & 0 & 1 & 2 & 3 \end{bmatrix}, [[\alpha - \beta|_m] = \begin{bmatrix} 0 & 4 & 3 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 4 & 3 & 2 \\ 2 & 1 & 0 & 4 & 3 \\ 3 & 2 & 1 & 0 & 4 \\ 4 & 3 & 2 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

As it may be seen from (5), the  $\alpha$ th matrix row of the modular addition (subtraction) can be obtained by the  $\beta$ -fold cyclic shift to the left (right) of the elements of the zero row.

Let us consider the algorithm of formation of the modular sum  $|\alpha + \beta|_m$  in a unitary code, which is determined as an  $m$ -bit code of the value  $\chi \in \mathbf{Z}_m$  such that its  $\chi$ th digit is equal to 1.

The ring shift method is based on the isomorphism of the finite Abelian groups  $\langle \mathbf{Z}_m; + \rangle$  and  $\langle \mathbf{E}_m; \circ \rangle$  of the order  $m$ , where  $\mathbf{E}_m = \{2^\chi \mid \chi \in \mathbf{Z}_m\}$  and the operation " $\circ$ " is performed by the rule

$$a \circ b = 2^{|\log_2 a + \log_2 b|_m} \quad (a, b \in \mathbf{E}_m). \quad (6)$$

The required isomorphic mapping  $U : \mathbf{Z}_m \rightarrow \mathbf{E}_m$  associates each residue  $\chi \in \mathbf{Z}_m$  with an element  $x = 2^\chi$  of the set  $\mathbf{E}_m$ . At the same time, according to (6) for  $\alpha, \beta \in \mathbf{Z}_m$  and  $a, b \in \mathbf{E}_m$  the following equalities hold

$$U(\alpha) \circ U(\beta) = U(|\alpha + \beta|_m), \quad (7)$$

$$|U^{-1}(a) + U^{-1}(b)|_m = U^{-1}(a \circ b). \quad (8)$$

It follows from (7) and (8) that in order to obtain the modular sum  $\gamma = |\alpha + \beta|_m$  it is sufficient to convert the operand  $\alpha$  into the  $m$ -bit unitary code (i.e. the binary code of the number  $U(\alpha)$ ) using the decoder. Further, the generated code is cyclically shifted by  $\beta$  bits to the left (towards the higher bits) in the  $m$ -bit ring shift register, and then the resultant unitary code (i.e. the binary code of  $U(\gamma)$ ) is transformed into the binary code of the required residue  $\gamma$  using the encoder.

Using the ring shift method it is possible to perform not only addition but also subtraction of the elements of the set  $\mathbf{Z}_m$ . In contrast to the sum  $|\alpha + \beta|_m$ , when obtaining the modular difference  $|\alpha - \beta|_m$  of residues  $\alpha$  and  $\beta$  the  $m$ -bit unitary code  $U(\alpha)$  is cyclically shifted by  $\beta$  bits not to the left but to the right, i.e. in the direction of the lower bits.

The realizations of this type have a regular structure and are well-suited for chips implementation.

Let us notice that in the case of the modular sum

$$R = \left| \sum_{l=1}^v R_l \right|_m \quad (R_l \in \mathbf{Z}_m), \quad (9)$$

consisting of  $v > 2$  terms the effectiveness of the application of the ring shift method substantially increases due to the simplicity of accumulating the results of the summations performed during the calculation (9). This is clearly illustrated by the following implementation algorithm of the expression (9):

- 1) convert  $R_1$  into the unitary code ( $R_1 \rightarrow U(R_1)$ ) and assign the initial value  $U(R_1)$  to the  $m$ -bit variable  $r$  ( $r = U(R_1)$ );
- 2) assign the value 2 to the index  $l$  ( $l = 2$ );
- 3) shift cyclically the binary code of  $r$  by  $R_l$  bits to the left;
- 4) if the equality  $l = v$  holds, then go to the step 5); otherwise increment the index  $l$  by 1 ( $l = l + 1$ ) and go to the step 3);
- 5) convert the unitary code of  $r$  into the binary code ( $r \rightarrow U^{-1}(r)$ ) and assign the sought-for value  $U^{-1}(r)$  to the variable  $R$  ( $R = U^{-1}(r)$ ).

If the actions provided in items 1) and 2) of the given algorithm are replaced by the following sequence of operations:

- assign the initial state  $r = U(0) = 2^0 = 1$  to the the  $m$ -bit variable  $r$ ;
- assign the value 1 to the index  $l$  ( $l = 1$ ),



then the calculation process of the expression (9) is carried out using only the cyclic shift operations and the encryption operation in the final step (see item 5) above).

As for the multiplication operation modulo  $m$ , the structure of the matrix  $[\alpha \times \beta]_m$  is visible from the following example for  $m = 5$ :

$$[\alpha \times \beta]_m = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 4 \\ 0 & 2 & 4 & 1 & 3 \\ 0 & 3 & 1 & 4 & 2 \\ 0 & 4 & 3 & 2 & 1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

This operation can be reduced to modular addition because of the isomorphism of the multiplicative group  $\mathbf{Z}_m^*$  and the additive index group  $\mathbf{Z}_{m-1}$ . Taking the above into account, it follows from (4) that in order to obtain the result  $|\alpha\beta|_m$  of the modular multiplication in the case of prime  $m$  it is enough to generate the  $(m-1)$ -bit unitary code of the index  $\text{ind}_g \alpha$  with the help of decoder, cyclically shift it by  $\text{ind}_g \beta$  bits to the left and then transform the  $(m-1)$ -bit unitary code of the residue  $|\text{ind}_g \alpha + \text{ind}_g \beta|_{m-1} = \text{ind}_g |\alpha\beta|_m$  into the binary code of the desired modular product  $|\alpha\beta|_m$  using an encoder. The defined approach can be generalized to composite modules.

It should be noted that the ring shift method can naturally be used to add the indices in the adder method considered above. In this case, the transformations  $\alpha \rightarrow \text{ind}_g \alpha$  and  $\text{ind}_g |\alpha\beta|_m \rightarrow |\alpha\beta|_m$  are changed by the transformations  $\alpha \rightarrow 2^{\text{ind}_g \alpha}$  and  $2^{\text{ind}_g |\alpha\beta|_m} \rightarrow |\alpha\beta|_m$ , which are realized by a decoder and an encoder, respectively. If the concerned shift ring process (after obtaining  $|\alpha\beta|_m$  in the  $(m-1)$ -bit shift register) is carried out with its initial content  $U(0) = 1$ , then only the second substitution of the transformations mentioned above is needed.

### The table implementation using memory blocks

The considered designing methods of the modulo adders, subtractors and multipliers allow us to construct the modular blocks with high speed. However, the practical application of this blocks is expedient only when they are performed in the form of VLSI chips.

In the absence of the required VLSI chips, the tabular implementation of arithmetic operations in MNS using persistent storage devices (e.g., read only memory (ROM)) and other high-density storage devices is the simplest and most effective technique [2, 3]. In this way not only the modular operations of addition, subtraction and multiplication can be implemented but also

more complex operations, for example, the expressions of the form:  $|F_1(\alpha) \pm F_2(\beta)|_m$  and  $|F_1(\alpha) \times F_2(\beta)|_m$ , where  $F_1(\alpha)$  and  $F_2(\beta)$  are some functions;  $\alpha$  and  $\beta$  are the residues with respect to some modules. At the same time, for the most of the required table schemes the hardware costs can be substantially reduced due to the symmetry of modular operations.

If, for example, a certain ROM has a capacity of  $2^b$  words of length  $b'$  bits, then it can be used to implement any function of the form  $\chi' = F(\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_l)$ , where  $\chi' \in \{0, 1, \dots, 2^{b'} - 1\}$ ;  $\chi_i \in \{0, 1, \dots, 2^{b_i} - 1\}$ ; ( $i = 1, 2, \dots, l$ );  $\sum_{i=1}^l b_i \leq b$ ;  $b, b', b_1, b_2, \dots, b_l$  and  $l$  are natural numbers. To do this, it is enough to write to the ROM memory the value  $F(\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_l)$  at the address  $X = \chi_1 + \chi_2 2^{b_1} + \dots + \chi_l 2^{b_1+b_2+\dots+b_{l-1}}$  for all admissible values of the variables  $\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_l$ . Then, when a set of values  $\langle \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_l \rangle$  is fed to the address inputs of the ROM, the required result  $\chi'$  will be formed at its output.

In the case of pipeline information processing, the registers are connected to the outputs of the ROM. At the same time, the modular clock time  $t_{MT}$  is determined by the time  $t_{ROM}$  needed to read the word from the memory and the time  $t_R$  needed to store it in the register, i.e.  $t_{MT} = t_{ROM} + t_R$ .

Within the framework of the considered variant of tabular implementations, the ROMs in essence are unique logical elements and form the elemental basis of modular digital devices in combination with conventional logic elements as well as typical components of computing machinery which carry out digital information processing at the level of elementary operations on words. The modular computing structures based on the ROMs are distinguished by the uniformity, high degree of integration, simplicity of pipeline configurations; they provide a high speed and reliability and their effectiveness is steadily increasing with the improvement of integrated circuit technology.

## Conclusions

The foregoing allows us to conclude that because of the isomorphism of the multiplicative group of the ring  $\mathbf{Z}_m$  and the additive index group  $\mathbf{Z}_{m-1}$  there is a principal possibility of constructing the modular blocks based only on the FU of practically the same type, for example, mainly on the basis of the ROM, PLM, shift registers or binary adders. This circumstance ensures exceptionally high manufacturability of modular computing architectures.

From a practical point of view, the fact that the resulting computing structures require only the use of FU operating with low-bit input values, when implementing the algorithms of MA, is of special interest. Since the execution of any operation on arbitrary set of residues with a relatively small total digit capacity can, in principle, always be done by the tabular way using the same type

of FU (ROM, PLM, etc.), then the hardware modular computing structures are characterized by an extremely high degree of uniformity and regularity, ideally consistent with the design features of the modern and prospective VLSI technologies, are well-suited to restructuring and organization of adaptive operation modes, have a low design cost as well as a number of other important advantages.

## References

- [1] Akushsky I.J., Yuditsky D.I., *Computer arithmetic in residual classes*, Soviet radio, Moscow, 1968 (in Russian).
- [2] Chernyavsky A.F. (red.), *High-speed methods and systems of digital information processing*, Belarusian State University Press, Minsk, 1996 (in Russian).
- [3] Kolyada A.A., Pak I.T., *Modular structures of pipeline digital information processing*, University Press, Minsk, 1992 (in Russian).
- [4] Mohan P.V. Ananda, *Residue number systems: Algorithms and architectures*, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [5] Omondi A., Premkumar B., *Residue number systems. Theory and implementation*, Imperial College Press, London, 2007.
- [6] Vinogradov I.M., *Fundamentals of number theory*, Nauka, Moscow, 1981 (in Russian).





**Łukasz Kutrowski, Mateusz Miara**

*Częstochowa University of Technology*

*Institute of Mechanics and Machine Design Fundamentals*

*ul. Dąbrowskiego 73, 42-201 Częstochowa*

*e-mail: kutrowski@imipkm.pcz.pl, miara@imipkm.pcz.pl*

## STUDIES OF THE SYSTEM: BEAM - VARIABLE MASS ELEMENT MODELING OVERHEAD CRANE

**Abstract.** This paper presents the free vibration problem of beam with additionally attached mass element. The considered system can be treated as simplified to two-dimensional model of the bridge crane. In this model the displacement of the hoist along the girder is analyzed and the longitudinal motion of the bridge crane does not occur. Based on the Hamilton's principle, the boundary problem for this system has been formulated. On the basis of numerical simulations the influence of the position of the mass element (representing the hoist and mass of the load) on the free vibration frequencies of the system has been presented. The accepted mathematical model has been verified by the experimental studies.

**Keywords:** bridge crane, free vibrations, beam.

## BADANIA UKŁADU: BELKA - ZMIENNA MASA SKUPIONA MODELUJĄCEGO SUWNICĘ

**Streszczenie.** W niniejszej pracy rozważano problem drgań swobodnych belki z dodatkowo zamocowanym elementem masowym. Układ ten może modelować konstrukcję suwnicy pomostowej, przy założeniu pewnych uproszczeń. Sprowadzono model obiektu rzeczywistego do zagadnienia dwuwymiarowego, w którym rozważa się możliwość przemieszczania wciągnika wzdłuż dźwigara, a ruch wzdłużny suwnicy nie występuje. Sformułowano zagadnienie brzegowe odnośnie do drgań układu na podstawie zasady Hamiltona. Przedstawiono symulacje numeryczne określające wpływ położenia elementu masowego (który reprezentuje układ wciągnika wraz z ładunkiem) na częstotliwości drgań własnych układu. Przeprowadzono badania eksperymentalne odnośnie do drgań rozważanego układu, pozwalające na weryfikację przyjętego modelu matematycznego.

**Słowa kluczowe:** suwnica, drgania swobodne, belka.

## **Introduction**

The free vibrations of the beams are one of the fundamental problem considered in the analysis of the vibration of structural elements. The vibrations of the beam can be considered as a discrete or continuous system, depending on the description [11, 12] of the problem. To the analysis of the beam systems the Bernoulli-Euler theory, in which is assumed that the segment before and after deformation is straight and perpendicular to the axis of the beam, is applied. The second method to formulation and solution of the free vibration problem of the beams is Timoshenko theory. This theory additionally takes into account the influence of lateral forces on deflection and rotational inertia [16].

The overhead cranes are one of the types of the cranes operating in intermittent mode, which are equipped with a mechanism to hoisting and lowering the load. The hoist used to displacement of the load vertically and horizontally. Moreover the overhead crane can move along its bridge deck (the work of the structure in three-dimensional space) [1, 14, 15]. Hoisting, lowering, and operation of electric/hydraulic motors, mechanical transmissions, etc. can affect on the vibration of the structure and in a consequence can influence on the strength of the construction and operator comfort (if the crane handling station is directly connected to its structure). For this reason, during the designing of this type structures the vibration analyses are important. The problem of vibration of the overhead cranes was analyzed in the papers [7, 8, 13]. In the paper [7] the impact of hoisting (hoist system) on crane vibration was presented. Results of experimental and numerical vibration of bridge cranes have been included. In the papers [8, 13], the vibration studies of the overhead cranes in which the dynamical properties has been taken account were carried out.

In this paper, the beam with additional mass element has been considered. The Bernoulli-Euler theory has been used to formulation and solution of the vibration of the continuous-discrete system. Presented beam-mass system were analyzed by many researchers. Results of numerical calculations concerning free vibrations analysis of beam carrying mass element under different boundary conditions were presented in works [2-4, 10]. Two theories of beam vibrations were compared in [6]. Also non-linear vibrations were analyzed for different boundary conditions and results of numerical simulations and experimental analyzes were presented in papers [9, 10]. In this work presented model can be treated as the simplified bridge crane. The influence of the position of the mass element (hoist and mass of the load) on the free vibrations of the system was analyzed. Numerical simulations and experimental studies were performed for verification of accepted mathematical model. Also the numerical results were presented for sample parameters of bridge cranes.

### Theoretical formulation and solution of the free vibration problem

Scheme of the analyzed single-girder overhead gantry system is shown in Fig. 1. This system consists of a pivotally mounted on both sides girder ( $l_1+l_2$ ) and a hoist (a body mass  $m$  and a mass moment of inertia  $I_b$ ).

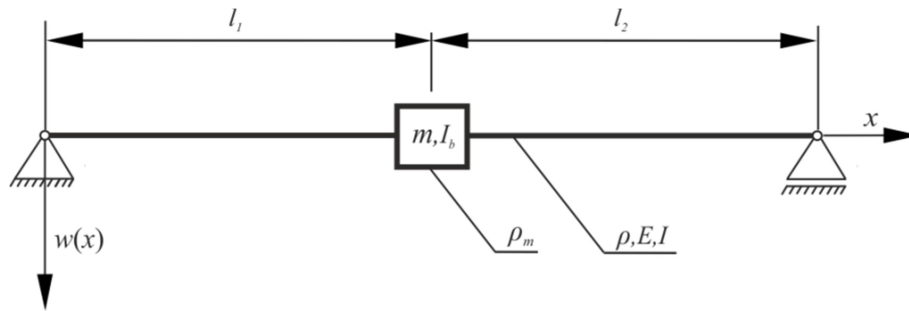


Fig 1. Scheme of the overhead crane

The formulation of the boundary problem with respect to the system's own vibrations was based on the Hamilton principle [4,5]:

$$\int_{t_1}^{t_2} (T - V) dt = 0. \tag{1}$$

Potential and kinetic energy can be written as:

$$V = \frac{1}{2} EI \sum_{i=1}^2 \int_0^{l_i} \left( \frac{\partial^2 w_i(x_i)}{\partial x_i^2} \right)^2 dx_i, \tag{2a}$$

$$T = \frac{1}{2} \rho A \sum_{i=1}^2 \int_0^{l_i} \left( \frac{\partial w_i(x_i, t)}{\partial t} \right)^2 dx_i + \frac{1}{2} m \left( \frac{\partial w_1(x_1, t)}{\partial t} \Big|_{x_1=l_1} \right)^2 + \frac{1}{2} I_b \left( \frac{\partial^2 w_1(x_1, t)}{\partial x_1 \partial t} \Big|_{x_1=l_1} \right)^2 \tag{2b}$$

Geometrical boundary conditions are presented as follow:

$$w_1(0, t) = 0 ; w_2(l_2, t) = 0 ; w_1(l_1, t) = w_2(0, t) \tag{3a-d}$$

$$\frac{\partial w_1(x_1, t)}{\partial x_1} \Big|_{x_1=l_1} = \frac{\partial w_2(x_2, t)}{\partial x_2} \Big|_{x_2=0}$$

Taking into account equations (2a, b) and (3a, b) in Hamilton principle, after completing the necessary mathematical transformations, the equations of motion and the natural boundary conditions have been obtained. After separation of variables, the equations of motion are presented as follow:

$$-EI \frac{d^4 Y_i(x_i)}{dx_i^4} + \rho A \omega^2 Y_i(x_i) = 0. \quad (4)$$

Natural boundary conditions after separation of variables are:

$$\begin{aligned} EI \frac{d^2 Y_1(x_1)}{dx_1^2} \Big|_{x_1=0} = 0 \quad ; \quad -EI \frac{d^2 Y_2(x_2)}{dx_2^2} \Big|_{x_2=l_2} = 0, \\ EI \frac{d^3 Y_1(x_1)}{dx_1^3} \Big|_{x_1=l_1} - EI \frac{d^3 Y_2(x_2)}{dx_2^3} \Big|_{x_2=0} + m \omega^2 Y_1(x_1) \Big|_{x_1=l_1} = 0, \quad (5a-d) \\ -EI \frac{d^2 Y_1(x_1)}{dx_1^2} \Big|_{x_1=l_1} + EI \frac{d^2 Y_2(x_2)}{dx_2^2} \Big|_{x_2=0} + I_b \omega^2 \frac{dY_1(x_1)}{dx_1} \Big|_{x_1=l_1} = 0. \end{aligned}$$

The solution of equations (4) can be written as:

$$Y(x) = A \sin(kx) + B \cos(kx) + C \sinh(kx) + D \cosh(kx), \quad (6)$$

where:  $k = \sqrt[4]{\frac{\rho A \omega^2}{EI}}$ .

Taking into account the solution (6) in the boundary conditions, the system of equations, which the matrix determinant of coefficients equated to zero leads to the transcendental equation and the natural frequency of the system can be determined, is obtained.

### Block diagram of the operation of the numeric program

In this paper, program for the initial calculation of free vibrations of bridge cranes is presented as a block diagram (Fig. 2). The first action is to run the program. The next step is entering the data in form of input parameters. These parameters are:  $E$  - Young modulus,  $\rho$  - density of girder material,  $l$  - girder length,  $l_1$  - hoist distance from crane road,  $\rho_m$  - hoist material density, dimensions of gird-



er cross-sections (for typical crane girders cross-sections),  $m$  – hoist weight and mass of the load,  $I_b$  – mass moment of inertia of the hoist and the load. In the next stage the program calculates:  $I$  – geometrical moment of inertia of the girder,  $A$  – cross-sectional area of the girder. On the basis of Hamilton's principle, matrix of coefficients is created by the program. This matrix is called matrix  $C$ , whose elements are filled on the basis of boundary conditions for  $\omega = 0$ . By the implementation of the variable  $\omega$ , the determinant of matrix  $C$  is calculated. When the value of the determinant of the matrix  $C$  equals 0, the following natural frequencies are obtained. In order to better present the operations performed in the program, the block diagram is presented (see Fig. 2).

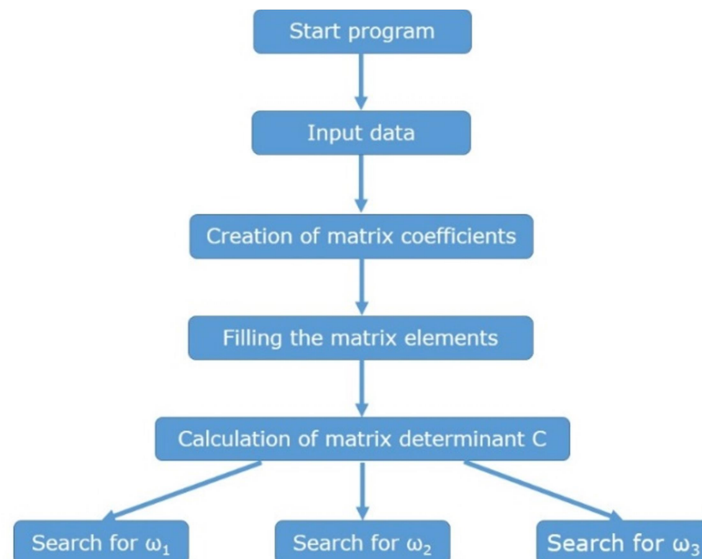


Fig 2. Block diagram for free vibration calculation

## Experimental stand

The experimental studies of free vibration of the analyzed system were conducted on a testing rig WP120 (Fig. 3 – on the left) to stability analysis of slender systems manufactured by GUNT and Brüel & Kjaer vibration analyzer with LABScope software (Fig. 3 – on the right). This stand allows to attach the beams with a certain cross-section in a manner that has been included in the mathematical model.

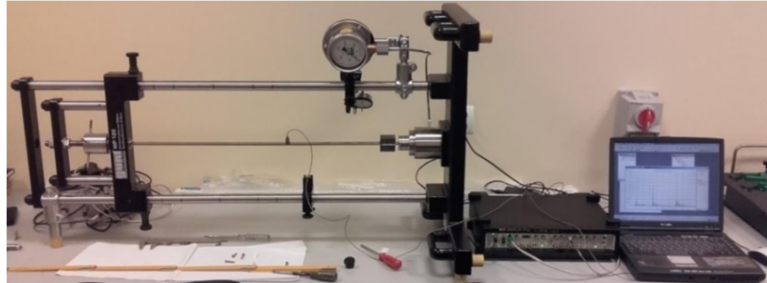


Fig 3. Testing rig for free vibration research

Two different beams and three different mass elements have been analyzed in the experimental studies. The intersection of the beam and mass element is shown in Fig. 4 and the dimensions are given in Table 1.

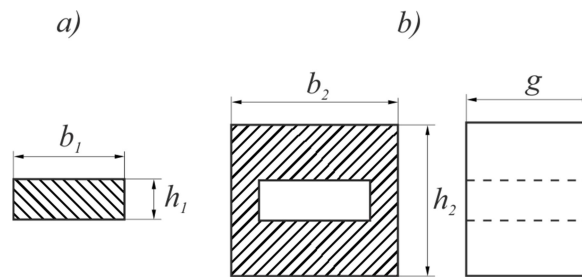


Fig 4. Sections of analyzed a) beam, b) masses

Table 1. Dimensions, properties of beams and masses

<b>Beams</b>					
	$l$ [m]	$b_1$ [m]	$h_1$ [m]	$E$ [Pa]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>B1</b>	0.7	20	4	$2.1 \cdot 10^{11}$	7800
<b>B2</b>	0.5	20	4	$2.1 \cdot 10^{11}$	7800
<b>Mass elements</b>					
	$g$ [m]	$b_2$ [m]	$h_2$ [m]	$E$ [Pa]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>M1</b>	0.04	0.04	0.14	$2.1 \cdot 10^{11}$	7800
<b>M2</b>	0.04	0.04	0.24	$2.1 \cdot 10^{11}$	7800
<b>M3</b>	0.04	0.04	0.34	$2.1 \cdot 10^{11}$	7800

## Numerical and experimental results

On the basis of presented mathematical model and with the help of experimental stand the numerical and experimental studies have been performed. The

experimental results confirmed the correctness of theoretical model. The verified mathematical model has been also used to calculate of free vibration frequencies of the model, which can substitute the bridge crane.

### Experimental verification of the mathematical model

The influence of the change of the position of the mass element (mass and mass moment of inertia) attached to the beam (Fig. 1, 2) on the free vibration frequencies has been shown in Fig. 5 and 6.

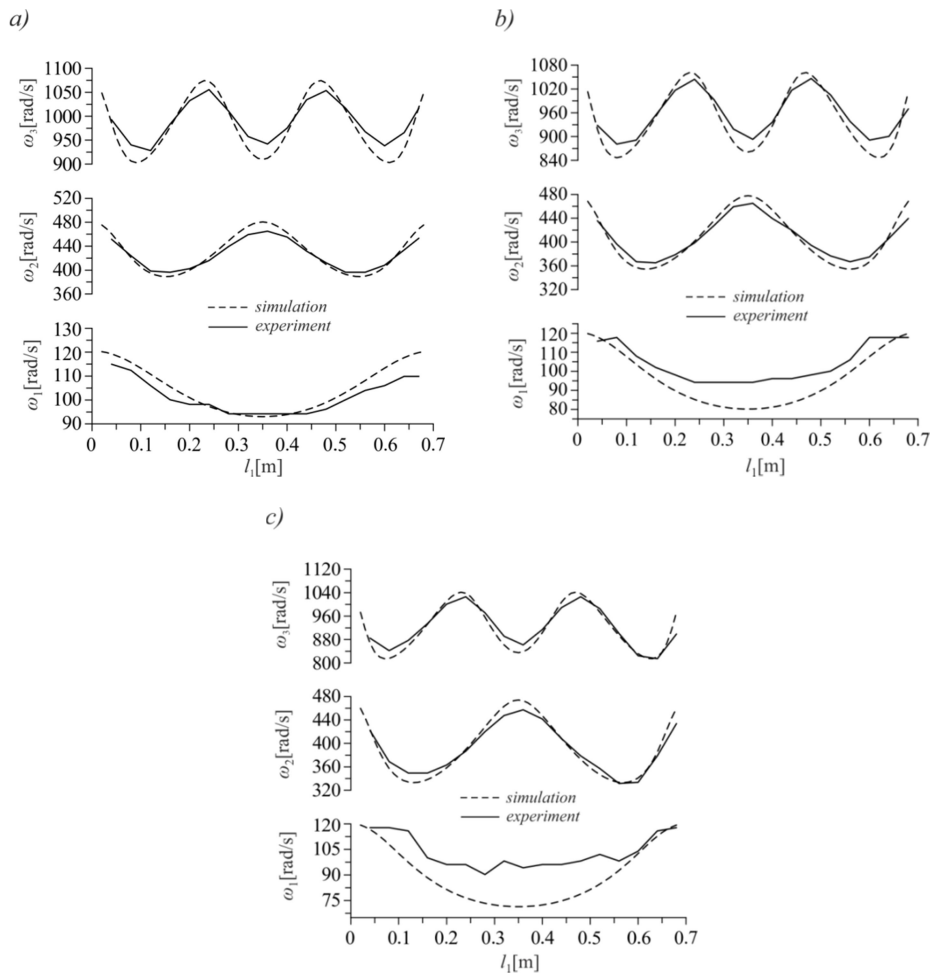


Fig. 5. Influence of change of position of the mass element on values of 1, 2, 3 of the free vibration frequencies for beam B1: a) M1, b) M2, c) M3

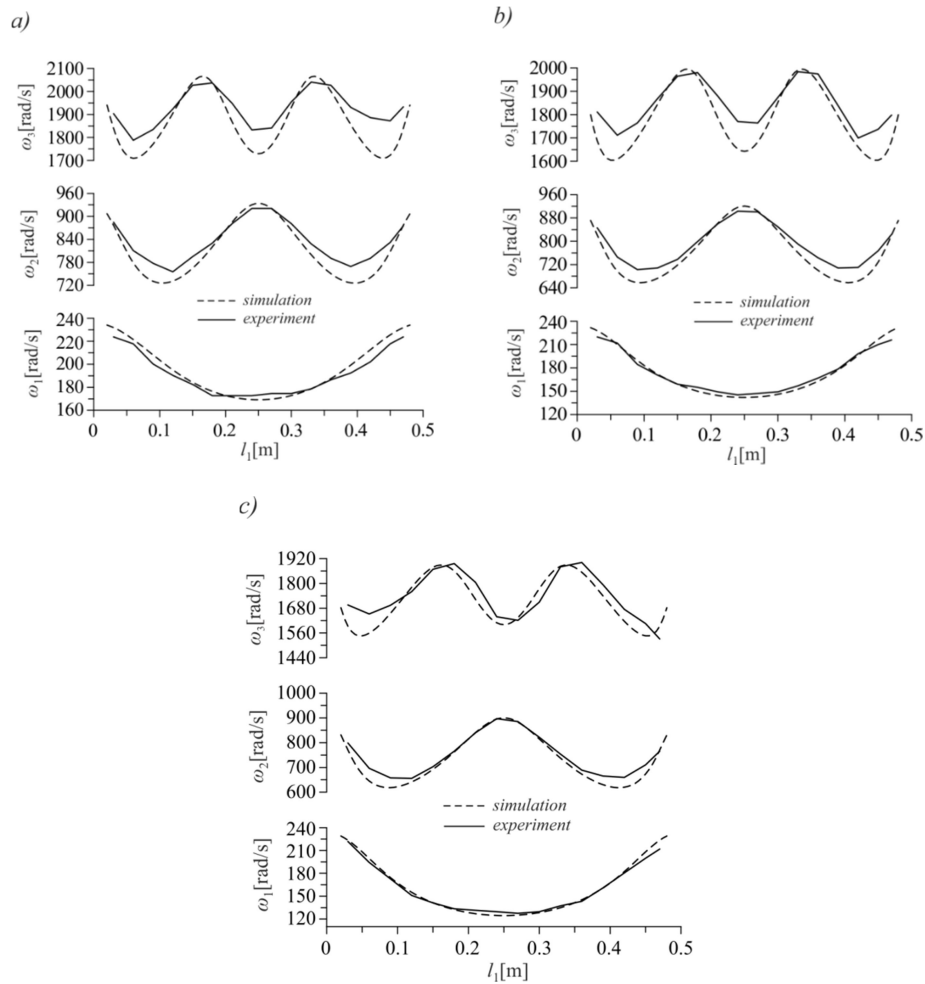


Fig. 6. Influence of the change of position of the mass element to the values of 1, 2, 3 of the free vibration frequencies for beam B2: a) M1, b) M2, c) M3

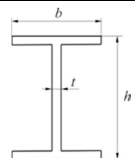
On the basis of presented results, it has been stated that the correlation between numerical and experimental results for the first eigenfrequency is higher for B2. For the second and third frequencies the correlation is similar. The correlation between mathematical model and the real construction was higher for system with smaller slenderness ratio.

Presented mathematical model and prepared numerical program can be used for different vibration problems, for instance the vibrations of the bridge crane can be analyzed.

### Free vibration frequency of the bridge crane

The verified mathematical model has been used to solution of vibration problem of the real bridge crane (the parameters are shown in Table 2).

Table 2. Dimensions, properties of beams in real case

Beams							
	$l$ [m]	$b$ [m]	$h$ [m]	$t$ [m]	$E$ [Pa]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Section
<b>C1</b>	15	0.2	0.5	0.016	$2.1 \cdot 10^{11}$	7800	
<b>C2</b>	7.5	0.1	0.2	0.0085	$2.1 \cdot 10^{11}$	7800	

Results for the real parameters of the girders (C1 and C2) are shown in Figures 8–9.

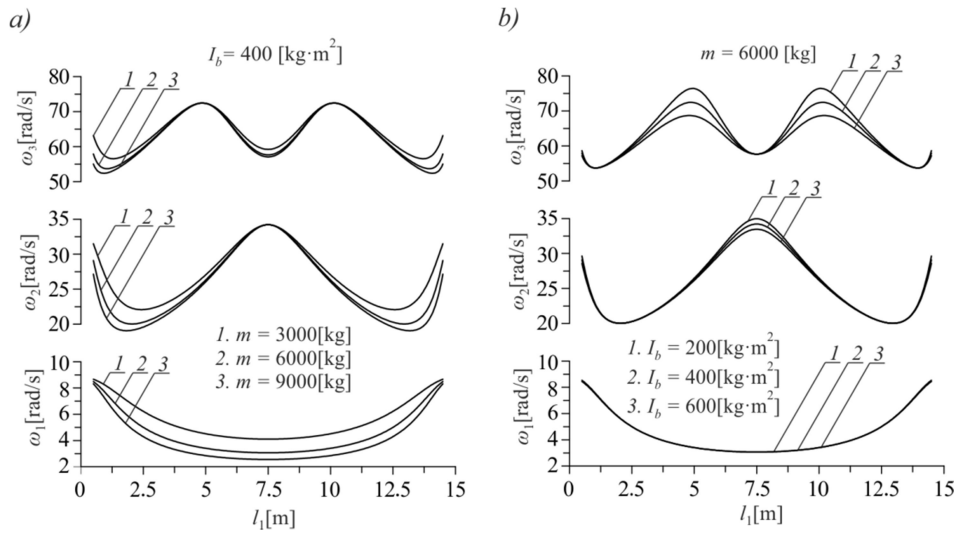


Fig. 8. Influence of change of position of mass element to values of 1, 2, 3 of vibration frequencies for beam C1: a) mass change, b) change of mass moment of inertia

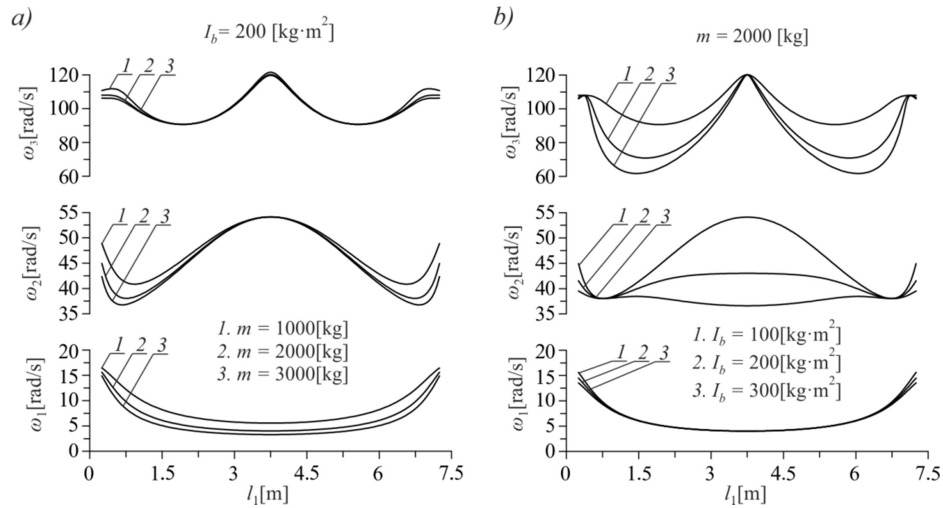


Fig. 9. Influence of change of position mass element to values of 1, 2, 3 of vibration frequencies for beam C2: a) mass change, b) change of mass moment of inertia

It has been observed that the increase of the mass of the element modeling trolley triggers the decrease of the eigenfrequencies, in particular when the trolley is between the nodes of the mode of free vibration frequencies. In the case of the increase of mass moment of inertia, the frequencies decrease, especially in the places close to the mode nodes.

## Summary

The free vibrations of the beams are one of the main problems of the mechanical vibration analyses. Within the scope of this work the formulation and solution of the free vibration problem of the beam with additional mass element have been performed. The accepted theoretical model can substitute the real bridge crane. Numerical and experimental studies on vibration of the analyzed system were performed and the mathematical model was verified. Two beams with different lengths were used due to experimental tests. The effect of the change of position, mass and mass moment of inertia of the hoist on the free vibration frequencies of the system was shown. Numerical calculations were also performed for dimensions of real bridge crane. The carried out numerical program can be used by constructors to pre-determine the eigenfrequency of the bridge cranes (or similar structures), especially if they can be exposed to vibration at specified frequencies.

## References

- [1] Chimiak M., Budowa suwnic i wciągników oraz ich obsługa, Wydawnictwo i Handel Książkami „KaBe”, Krosno, 2009.
- [2] Lau J.H., Fundamental frequency of constrained beam, *Journal of Sound and Vibration* 78, 154-157, 1981,  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-460X\(81\)80165-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-460X(81)80165-4)
- [3] Laura P.A.A., Filipich C., Cortinez V.H., Vibrations of beams and plates carrying concentrated masses, *Journal of Sound and Vibration* 117, 459-465, 1987, DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-460X\(87\)80065-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-460X(87)80065-2)
- [4] Liu W.H., Yeh F.H., Free vibrations of restrained-uniform beam with intermediate masses, *Journal of Sound and Vibration* 117, 555-570, 1987, DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-460X\(87\)80074-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-460X(87)80074-3)
- [5] Low K.H., Comments on Non-linear vibrations of beam-mass system under different boundary conditions, *Journal of Sound and Vibration* 207, 284-286, 1997, DOI: <http://dx.doi.org/10.1006/jsvi.1997.1135>
- [6] Maurizi M.J., Belles P.M., Natural frequencies of the beam-mass element system; comparison of the two fundamental theories of beam vibrations, *Journal of Sound and Vibration* 150, 330-334, 1991,  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0022-460X\(91\)90625-T](http://dx.doi.org/10.1016/0022-460X(91)90625-T)
- [7] Margielewicz J., Haniszewski T., Gaska D., Pypno C., Badania modelowe mechanizmów podnoszenia suwnic, PAN, Katowice, 2013.
- [8] Nowak A., Modelowanie dynamiki jazdy suwnicy pomostowej przy uwzględnieniu zjawiska odbicia, *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Gliwice*, 1995.
- [9] Özkaya E., Pakdemirli M., Öz H.R., Non-linear vibrations of a beam-mass system under different boundary conditions, *Journal of Sound and Vibrations* 199, 679-696, 1997,  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1006/jsvi.1996.0663>
- [10] Srinath L.S., Das Y.C., Vibrations of beams carrying mass, *Transaction of the American Society of Mechanical Engineers, Journal of Applied Mechanics, Series E*, 784-785, 1967,  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.3607787>
- [11] Tomski L. (red.), *Drgania i stateczność układów smukłych*, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Fundacja „Książka Naukowo Techniczna”, Warszawa 2004.
- [12] Tomski L. (red.), *Drgania i stateczność układów dyskretnych*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2006.
- [13] Wojnarowski J., Nowak A., Modelowanie drgań suwnic metodą SES, *Zbiór refer. Konfer. CPBP 02.05, ZN WAT, Warszawa-Jaszowiec* 1988.
- [14] <http://www.zbud.com.pl/index.php?page=produkty&kategoria=40> (data dostępu 10.07.2017)

- [15] <http://www.abuscranes.pl> (data dostępu 10.07.2017)
- [16] [http://chodor-projekt.net/encyclopedia/belka-skoczony-element-preto-  
wy](http://chodor-projekt.net/encyclopedia/belka-skoczony-element-preto-<br/>wy) (data dostępu 10.07.2017)





**Agnieszka Makara<sup>1</sup>, Zygmunt Kowalski<sup>2</sup>, Katarzyna Fela<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Instytut Chemii i Technologii Nieorganicznej*

*Politechnika Krakowska,*

*ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków*

*e-mail: amak@chemia.pk.edu.pl*

<sup>2</sup> *Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią*

*Polskiej Akademii Nauk,*

*ul. Wybickiego 7, 31-261 Kraków*

## ZAGOSPODAROWANIE SUBSTANCJI POFERMENTACYJNEJ W ASPEKTCIE BEZPIECZEŃSTWA EKOLOGICZNEGO

**Streszczenie.** Substancja pofermentacyjna (poferment, dygestat) to produkt uboczny powstający w biogazowniach rolniczych, w procesie beztlenowej fermentacji metanowej biomasy, w ilości 85–95% masy użytych substratów. Agrobiogazownia o mocy 1 MW wytwarza rocznie do 30 000 t pofermentu. Poferment jest najczęściej wykorzystywany jako nawóz, zawierający 2–3% azotu ogólnego. Ponieważ proces fermentacji przyczynia się do niszczenia patogenów, ich ilość w pofermencie jest zdecydowanie niższa niż w surowcu. Charakterystyka substancji pofermentacyjnej wskazuje, iż jest ona źródłem materii organicznej niezbędnej dla prawidłowego funkcjonowania środowiska glebowego oraz zawiera zmineralizowane formy makro- i mikroelementów bezpośrednio przyswajalne przez rośliny. Zagęszczony poferment jest wykorzystywany jako paliwo, czy to bezpośrednio po wysuszeniu, czy granulacji (pelety i brykiety). Pelety z pofermentu posiadają wartość opałową ok. 15 MJ/kg, przy zawartości wilgoci 9,9%. Jednak otrzymanie peletu z osadu pofermentacyjnego, ze względu na duży balast wody, nie jest łatwe. Powstający w wyniku spalania peletów popiół zawierający fosfor i potas może zostać wykorzystany w rolnictwie.

**Słowa kluczowe:** biogazownia, substancja pofermentacyjna, nawożenie, wykorzystanie energetyczne.

## DISPOSAL OF AFTER-FERMENTATION SUBSTANCE IN THE ASPECT OF ECOLOGICAL SAFETY

**Abstract.** The fermentation substance (digestate) is a by-product produced in agricultural biogas plants in the process of anaerobic methane fermentation of biomass in the amount of 85–95% of the mass of substrates used. 1 MW agro biogas plant generates up to 30,000 t of digestate per year. Digestate is most commonly used as fertilizer, containing 2–3% of total nitrogen. As the fermentation process contributes to the destruction of pathogens, their amount in the fermentation is considerably lower than in the raw material. The characteristics of the digestate indicate that it is the source of organic matter necessary for the proper functioning of the soil environment and contains mineralized forms of macro and micronutrients directly absorbed by the plants. Concentrated digestate is used as fuel, either directly after drying or after granulation (pellets and briquettes). The pellets from the post-fermentation have a calorific value of about 15 MJ/kg, with a moisture content of 9.9%. However, obtaining pellets from digestate sludge, due to large water ballast is not cheap. Ash from burned pellets containing phosphorus and potassium can be used in agriculture for fertilization.

**Keywords:** biogas plant, digestate, fertilization, energy use.

### Charakterystyka substancji pofermentacyjnej

Substancja pofermentacyjna to produkt uboczny powstający w biogazowniach rolniczych w procesie beztlenowej fermentacji metanowej masy organicznej (biomasy). Nazywana jest również pofermentem lub dygestatem. Ze względu na różnorodność surowców możliwych do zastosowania w produkcji biogazu, ich pochodzenie oraz stosowane technologie fermentacji, skład oraz właściwości fizykochemiczne pofermentu mogą być zróżnicowane. Przyjmuje się, że ilość wytwarzanej substancji pofermentacyjnej stanowi 85–95% masy użytych substratów, przy czym im więcej łatwo fermentujących substancji organicznych w surowcu, tym mniejsza jej ilość [15, 31, 33]. Poferment składa się przede wszystkim z nieprzefermentowanej pozostałości substancji organicznych, składników mineralnych (w ilościach porównywalnych do ich zawartości w substratach) i biomasy bakterii metanowych. Podstawowymi parametrami charakteryzującymi substancję pofermentacyjną są: zawartość suchej masy, odczyn, zawartość substancji organicznych, azotu, fosforu, wapnia i magnezu, a także metali ciężkich. Substancja pofermentacyjna to zawiesina wodna zawierająca 2–5% suchej masy o pH~7. W fazie ciekłej rozpuszczone są zarówno związki mineralne, jak i organiczne. Zawartość azotu ogólnego w masie pofermentacyjnej waha się od 2% do 3% świeżej masy. Ponieważ w procesie fermentacji beztlenowej azot organiczny ulega w znacznym stopniu amoni-

fikacji, jego dominująca ilość, dochodząca nawet do 85%, to azot amonowy. Wartości te mogą ulegać obniżeniu, gdyż ze wzrostem pH oraz temperatury możliwe jest uwalnianie gazowego amoniaku z roztworu [22, 15]. Główne różnice pomiędzy surową gnojowicą a pofermentem przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Typowy skład chemiczny gnojowicy i pofermentu

Wyszczególnienie	Sucha masa [%]	N całkow. [%]	NH <sub>4</sub> -N [%]	pH
Gnojowica bydłowa	6,0	6,5	5,0	2,8
Gnojowica świńska	4,0	7,0	5,0	3,8
Poferment	2,8	7,5	5,0	4,0

Podczas fermentacji, mineralizacji ulegają także związki fosforu. W pofermencie występuje on w postaci jonu PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, a jego zawartość stanowi 86% fosforu ogólnego i sięga kilkunastu g/kg suchej masy. Fosforany(V) obecne w pofermencie, ze względu na obecność innych jonów, jak np. Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, znajdują się w fazie stałej, tworząc nierozpuszczalne w wodzie związki typu struwitu (MgNH<sub>4</sub>PO<sub>4</sub>) lub fosforanu(V) wapnia (np. hydroksoapatyt, Ca<sub>5</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>OH) [14, 16, 17].

Spośród mikroskładników, substancja pofermentacyjna zawiera najwięcej żelaza, a także Cu, Mn oraz Zn. Stężenia tych pierwiastków w pofermencie są nieznacznie niższe od tych charakteryzujących substraty poddawane fermentacji [23, 21]. Zawartość całkowitego węgla organicznego (OWO) w pofermencie wynosi od kilku do kilkadziesiąt g/dm<sup>3</sup>, zaś biochemiczne zapotrzebowanie na tlen (BZT<sub>5</sub>) dla tego odpadu nie przekracza zwykle 7 g/dm<sup>3</sup>. Ponieważ głównym produktem fermentacji biomasy jest metan, jego generowanie skutkuje obniżeniem stosunku zawartości węgla i azotu w porównaniu do użytego surowca, co jest korzystne w aspekcie wykorzystania pofermentu do celów nawozowych [5, 27, 15]. W tabeli 2 podano ilości biogazu i pofermentu produkowanych z różnych substratów [31].

Proces fermentacji nie tylko powoduje zmiany składu surowca, ale także ma wpływ na jego właściwości fizyczne. Obserwowane jest zmniejszenie lepkości pofermentu w stosunku do lepkości surowca. Jest to efektem zmniejszenia zawartości suchej masy, a ponadto pojawienia się w masie pofermentacyjnej pęcherzyków gazów – CO<sub>2</sub> i CH<sub>4</sub> [15]. Ponadto istotna, zwłaszcza w aspekcie późniejszego wykorzystania tej substancji, jest jej charakterystyka higieniczno-sanitarna, określenie obecności bakterii chorobotwórczych z rodzaju *Salmonella* oraz liczebności żywych jaj pasożytów jelitowych, takich jak: *Ascaris sp.*, *Trichuris sp.*, *Toxocara sp.* [27, 2, 25].

Tabela 2. Ilości biogazu oraz pofermentu uzyskiwanego z gnojowicy i innych substratów

Substraty do procesu fermentacji metanowej	Składniki pofermentu i wskaźniki procesu					
	Sucha masa [%]	Substancja organiczna w suchej masie [%]	Ilość biogazu [Nm <sup>3</sup> ]		Zawartość CH <sub>4</sub> w biogazie [%]	Ilość pofermentu [m <sup>3</sup> /t substratu]
			Z 1 kg suchej substancji organicznej	Z 1 t świeżej masy substratu		
gnojowica bydłęca	8	86	0,280	0,224	55	0,977
gnojowica świńska	6	80	0,400	0,192	60	0,977
obornik	25	80	0,450	0,900	55	0,885
Kiszonka z kukurydzy	32	95	0,520	1,980	53	0,760
Ziarno zboża	86	98	0,700	5,900	55	0,247

Ponieważ proces fermentacji przyczynia się do niszczenia patogenów, ich ilość w masie pofermentacyjnej jest zdecydowanie niższa niż w surowcu. Stopień redukcji zależy tutaj od czasu retencji oraz temperatury procesu. Całkowite usunięcie bakterii, wirusów oraz pasożytów jest możliwe w przypadku procesów termofilnych [4, 2, 23].

### Przetwarzanie i zastosowanie substancji pofermentacyjnej

W UE fermentacja beztlenowa nie zmienia prawnej definicji gnojowicy zwierzęcej; jest ona w przetworzonej formie określana jako odpad, a możliwymi metodami jej usuwania jest użycie jej jako nawozu dla roślin. Fakt, że poferment ma wyższe pH, a także większy jest w nim udział azotu w formie zmineralizowanej, stwarza ryzyko emisji amoniaku. Dlatego też bardzo ważne jest dla pofermentu użycie technologii, które zapobiegają emisji amoniaku, np. składowania zawiesiny w zamkniętych zbiornikach szlamu i iniekcji dogłębowej lub systemu układania w warstwy, możliwie połączonego z zakwaszaniem [8]. Ilość substancji pofermentacyjnej, generowanej w biogazowni, zależy od wielkości zakładu i może dochodzić nawet do kilkudziesięciu tysięcy ton rocznie. Tak duża ilość odpadu może nastęrczać kłopoty związane z jego zagospodarowaniem.

Zgodnie z obowiązującym prawem [28, 24] poferment klasyfikowany jest jako odpad pod nazwą „przefermentowane odpady z beztlenowego rozkładu odpadów zwierzęcych i roślinnych”. Według tej ustawy metodami odzysku o znaczeniu aplikacyjnym dla takiego odpadu są: recykling lub odzysk substancji organicznych, (w tym kompostowanie i inne biologiczne procesy przekształcania); obróbka na powierzchni ziemi przynosząca korzyści dla rolnictwa lub poprawę stanu środowiska lub po przeprowadzeniu separacji pofermentu i wysuszeniu frakcji stałej wykorzystanie głównie jako paliwa lub innego środka wytwarzania energii. Procesy te dobierane są zależnie od składu pofermentu oraz charakterystyki i usytuowania geograficznego obszaru jego zastosowania [4, 12].

Charakterystyka substancji pofermentacyjnej wskazuje, iż jest ona źródłem materii organicznej niezbędnej dla prawidłowego funkcjonowania środowiska glebowego oraz zawiera zmineralizowane formy pierwiastków, makro- i mikroelementów bezpośrednio przyswajalne przez rośliny i dlatego najczęściej stosowanym sposobem utylizacji pulpy pofermentacyjnej jest jej wykorzystanie jako substytutu nawozu [9, 11, 15]. W tabeli 3 porównano wartości nawozowe gnojowicy i pofermentu, a zawartości składników nawozowych w różnych typach pofermentu zamieszczono – w tabeli 4 [32, 33].

Tabela 3. Wartość nawozowa gnojowicy i pofermentu

Substrat	Sucha masa [%]	Składniki odżywcze w świeżej masie [kg/m <sup>3</sup> ]				pH
		N	NH <sub>3</sub> -N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	
Gnojowica	7,5	3,5	2,5	2,5	3,5	7,2
Poferment	6,3	4,4	2,6	1,9	5,0	8,5

Poferment można stosować bezpośrednio, aplikując na pola uprawne, po rozdzieleniu na frakcje lub przetworzeniu na nawozy organiczno-mineralne. Rozwiązanie to wydaje się bezproblemowe, jednak w rzeczywistości, ze względu na obostrzenia narzucone przez ustawodawcę dotyczące dawek, terminów i sposobów aplikacji tego typu nawozów, powoduje wtórne komplikacje związane z koniecznością magazynowania dużych ilości pofermentu, czy to w zbiornikach, czy w lagunach [28].

Ze względu na potrzebę zmniejszenia objętości zbiorników do przechowywania pofermentu stosuje się jego frakcjonowanie na fazę stałą (gęstwą) i ciekłą (odciek), obie możliwe do wykorzystania jako nawóz. Dodatkowymi korzyściami z tego procesu jest polepszenie właściwości nawozowych pofermentu oraz redukcja kosztów transportu bionawozu do miejsca przeznaczenia, aplikacji.

Tabela 4. Zawartość składników nawozowych w różnych typach pofermentu

Skład substratów	Udział [%]	Składniki odżywcze w pofermencie [kg/m <sup>3</sup> ]				SM - sucha masa [%]
		N	NH <sub>3</sub> -N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	
Kiszonka z kukurydzy, 35% SM + gnojowica bydłęca, 8% SM	70 30	5,8	3,8	2,3	9,1	9,0
Kiszonka z kukurydzy, 35% SM + gnojowica świńska, 6% SM	40 60	5,5	3,6	2,6	5,2	6,3
Kiszonka z kukurydzy, 35% SM + gnojowica świńska, 6% SM + ziarno pszenicy, 86,6% SM	85 10 5	7,5	4,9	3,6	10,1	10,5
Kiszonka z kukurydzy, 35% SM + gnojowica bydłęca, 8% SM + kiszonka z traw, 25% SM	40 55 5	5,5	3,6	2,1	8,1	7,5
Gnojowica bydłęca, 8% SM	100	5,0	3,3	1,8	6,5	5,1

Rozdział frakcji odbywa się metodami fizycznymi (sedymentacja, suszenie w szklarniach, filtracja membranowa), mechanicznymi (wirówki, prasy) lub termiczno-ciśnieniowymi (odparowanie) [15, 3, 17]. Odciek zawierający ok. 2% suchej masy, a także znaczne ilości pierwiastków niezbędnych dla prawidłowego rozwoju roślin (N, P, K) w formie jonowej, łatwo przez nie przyswajalnej, wykorzystywany jest w deszczowniach do nawadniania pól, nawadniania przyzmi kompostowych lub jako nawóz. Może być on również traktowany jako ciecz technologiczna stosowana do rozcieńczania substratów w procesach fermentacji lub jako odpad kierowany do oczyszczalni ścieków lub bezpośrednio do cieków wodnych [31, 4, 23].

Oddzielona faza stała składająca się ze strukturalnych części materii organicznej, głównie celulozy i ligniny, zawierająca znaczne ilości związków mineralnych (80–85% P i 20–25% N pochodzących z pofermentu), może być składowana, stosowana jako nawóz czy poddana suszeniu i stanowić substrat do produkcji peletów i brykietów do celów grzewczych, być wykorzystywana jako ściółka dla zwierząt gospodarczych lub białkowy dodatek do pasz [13, 4, 23].

Zagęszczona frakcja pozostałości pofermentacyjnej, zawierająca azot i fosfor wydzielona w separatorze rozdzielającym odgazowaną biomasę na frakcję stałą i ciekłą, po dalszym zagęszczeniu poprzez dodanie dolomitu lub mikroelementów może stanowić nawóz w postaci sypkiej [15].

Bardzo dobrym sposobem na poprawę jakości nawozu przed bezpośrednim zastosowaniem na polach jest jego kompostowanie (autotermiczny i termofilowy rozkład bioodpadów). Wszelkie wahania parametrów podczas pracy biogazowni rolniczej mogą skutkować powstawaniem osadów pofermentacyjnych zawierających niecałkowicie przetworzoną materię organiczną. Nieprzetworzony poferment często charakteryzuje się nieprzyjemnym zapachem, a wprowadzenie go do środowiska może powodować zanieczyszczenie gleby dużą ilością bakterii fermentacji metanowej. Dzięki kompostowaniu przy udziale mikro- i makroorganizmów w obecności tlenu materiał ulega stabilizacji oraz następuje likwidacja patogenów, głównie w fazie termofilnej procesu [6, 4].

Zagęszczona masa pofermentacyjna może być także wykorzystywana na cele energetyczne – bezpośrednio jako wysuszona frakcja bądź poddana granulacji do postaci peletów lub sprasowana pod zwiększonym ciśnieniem jako brykiet [10, 13]. Właściwości powstałego biopaliwa będą warunkowane charakterystyką surowca użytego do produkcji biogazu, zaś opłacalność procesu zależeć będzie m.in. od rodzaju biogazowni, jej lokalizacji, mocy itp. Pelety grzewcze otrzymane z pofermentu posiadają wysoką wartość opałową, ok. 15 MJ/kg, przy zawartości wilgoci 9,9%. Jednak otrzymanie peletu z osadu pofermentacyjnego, ze względu na duży balast wody, nie jest łatwe, wiąże się z wieloma problemami dotyczącymi odwadniania, jak i suszenia materiału [7]. Powstający w wyniku spalania popiół, zawierający skoncentrowane składniki o znaczeniu nawozowym, m.in. fosfor i potas, może zostać wykorzystany rolniczo [4, 23].

Poza wykorzystaniem osadu pofermentacyjnego z biogazowni w rolnictwie oraz energetyce, znaczny udział ogólnego zagospodarowania, bo aż 18%, stanowi składowanie. Ponieważ takie rozwiązanie nie wykorzystuje potencjału nawozowego ani też energetycznego pofermentu, nie jest ono zalecane. Ponadto obowiązujące przepisy zakazujące składowania odpadów o zawartości >5% OWO lub charakteryzujące się 8% stratą prażenia zmuszają do poszukiwania alternatywnych rozwiązań [4, 20]. Obiecującą metodą produkcji biopaliw wydaje się biologiczne suszenie, proces samoczynnego usuwania wody z materiału przy jednoczesnym zachowaniu jego wartości energetycznej. Proces jest skutkiem rozkładu łatwo degradowalnej substancji organicznej, zachodzącego z wydzieleniem ciepła. Efektem tego jest odparowanie wody oraz stabilizacja odpadu. Badania przeprowadzone na mieszaninie masy pofermentacyjnej z Grupowej Oczyszczalni Ścieków w Łodzi ze stałą frakcją organiczną odpadów komunalnych o modelowym składzie dowodzą, że otrzymany produkt

końcowy jest dobrym, możliwym do składowania biopaliwem, którego wartość opałowa wynosi 13,6 kJ/g, zaś ciepło spalania 14,85 kJ/g [7].

## Wykorzystanie energetyczne pofermentu

Zagospodarowanie pofermentu jako nawozu wymaga od 1000 do 5000 ha dla biogazowni o mocy 1 MW. Zachodzi przy tym konieczność magazynowania pofermentu przez około 6 miesięcy w lagunach przykrytych geomembraną lub w specjalnych zbiornikach żelbetonowych, ponieważ nadal zachodzą procesy fermentacyjne. Przechowywanie uwodnionego pofermentu wymaga dodatkowych dużych nakładów inwestycyjnych na wykonanie zbiorników żelbetonowych lub zabezpieczenie dodatkowych terenów na laguny.

Prowadzone są badania mające na celu znalezienie alternatywnych metod wykorzystania pofermentu wg propozycji zakładającej rozfrakcjonowanie pofermentu na frakcję ciekłą i stałą. Według tej koncepcji:

- frakcja ciekła zostałaby zawrócona do komory fermentacyjnej po uprzedniej denitryfikacji (znaczne ograniczenie zużywanej wody) lub użyta jako nawóz ciekły,
- frakcja stała po wstępnym odwodnieniu mechanicznym zostałaby osuszona metodami termicznymi i zgranulowana (magazynowanie długoterminowe, możliwość użycia do celów energetycznych – biopaliwo stałe – lub nawozowych).

Przygotowana i zgranulowana frakcja stała zostałaby wykorzystana do celów energetycznych, wytwarzania paliw II generacji (poprzez zgazowanie lub pirolizę), lub jako paliwo do współspalania (popiół użyty jako nawóz).

Odwadnianie pofermentu metodami mechanicznymi (taśmowa prasa filtracyjna, wirówka dekantacyjna) pozwala osiągnąć maksymalną zawartość suchej masy sięgającą około 30%. Metody mechaniczne nie pozwalają na usunięcie wilgoci związanej. Z 1 t pofermentu można uzyskać po odwodnieniu i osuszeniu około 1350 MJ energii. Przy wykorzystaniu najbardziej sprawnej suszarni do odparowania 700 kg wody potrzeba 1692 MJ, co daje ujemny bilans energetyczny na osuszanie pofermentu (wymagane byłoby bardziej sprawne osuszanie pofermentu). Spalenie osuszonego pofermentu daje około 70% energii potrzebnej na osuszenie. W biogazowniach występuje nadmiar ciepła z kogeneracji, który może zostać wykorzystany do instalacji osuszania pofermentu, ale w pierwszej kolejności do podgrzewania komór fermentacyjnych. Dzięki odwadnianiu możliwy jest recykling wody procesowej.

Wytwarzany nawóz stały, w postaci wysuszonego pofermentu, można magazynować lub wykorzystać do celów energetycznych. Duża zawartość popiołu w pofermencie eliminuje możliwość jego spalania bezpośredniego w kotłach rusztowych (najbardziej rozpowszechnionych w energetyce zawodowej) ze



względu na możliwość wystąpienia problemów ze szlakowaniem, oraz zgazowania w reaktorach ze złożem stałym. Istnieje natomiast możliwość współspalania lub zgazowania. Możliwe jest też bezpośrednie jego użycie w reaktorach zgazowania lub spalania w złożu fluidalnym, gdzie problemy ze szlakowaniem nie występują. W tabeli 5 zamieszczono wyniki badań karbonizatu oraz przetwarzania pirolitycznego pofermentu.

Tabela 5. Wyniki badań karbonizatu z przetwarzania pirolitycznego pofermentu

Próbka	Wilgotność [%]	Ciepło spalania [GJ/t]	Wartość opałowa [GJ/t]	Węgiel związany [% s.m.]	Części lotne [% s.m.]	Popiół [% s.m.]
Poferment przed pirolizą	7,95	16,820	15,288	14,67	58,60	26,72
	7,81	16,895	15,384	14,65	58,45	26,90
	7,79	16,860	15,356	14,78	58,98	26,25
Poferment po procesie pirolizy	3,25	14,049	13,513	30,26	20,09	49,64
	3,28	14,091	13,549	30,21	20,32	49,47
	3,29	14,040	13,497	30,34	20,12	49,54

Zagęszczona do zawartości 15–20% suchej masy masa pofermentacyjna może być także stosowana do produkcji peletów do celów grzewczych, które przy wilgotności 9,9% mają wartość opałową 15 MJ/kg. Nadwyżka energii cieplnej z biogazowni może być stosowana do suszenia frakcji stałej pofermentu, umożliwiając uzyskanie produktu o dobrych parametrach fizycznych i zwiększonej koncentracji składników pokarmowych. Granulacja z kolei frakcji stałej oraz zastosowanie dodatków mineralnych pozwalają otrzymywać granulaty znajdujące zastosowanie w produkcji rolniczej i ogrodniczej.

### Aspekty środowiskowe stosowania substancji pofermentacyjnej

Najczęstszym sposobem utylizacji substancji pofermentacyjnej jest jej użycie jako substytutu nawozu. W porównaniu z nieprzefermentowaną (surową) gnojowicą, będącą obecnie podstawowym substratem wykorzystywanym w biogazowniach rolniczych, zawiera ona składniki pokarmowe w formach mineralnych pozwalających na lepsze wykorzystanie ich przez rośliny. Istotnym parametrem charakteryzującym te substancje jest stosunek węgla do azotu, decydujący o szybkości mineralizacji (rozkładu) substancji organicznych. Dla gnojowicy stosunek ten wynosi 6,8:1, zaś dla pofermentu mieści się w zakresie od

15:1 do 25:1 i w konsekwencji współczynnik wykorzystania substancji organicznej z gnojowicy, kształtujący się na poziomie 48%, po procesie fermentacji wzrasta do 75–80% dla otrzymanego pofermentu. Ponadto duży udział azotu amonowego (do 90%) w azocie ogólnym, podczas gdy w surowcu udział ten jest zdecydowanie mniejszy (dla gnojowicy wynosi ok. 48,8%, zaś dla obornika 10–15%), czyni go produktem o szybkim działaniu plonotwórczym [5, 29, 11]. Taka charakterystyka chemiczna substancji pofermentacyjnej nie tylko uzasadnia jej nawozowe wykorzystanie, ale także ma korzystny wpływ na środowisko. Azot obecny w nawozie w formie amonowej ulega w glebie tzw. sorpcji wymiennej, przez co jest mniej podatny na wymywanie do wód, w przeciwieństwie do azotu azotanowego [12].

Powstawanie pofermentu w procesie produkcji biogazu w indywidualnym gospodarstwie rolnym jest zatem wartością dodaną tej technologii. Pozwala na uzdatnienie nawozów naturalnych stosowanych jako surowce w procesie (obornik, gnojowica) oraz zmniejsza zapotrzebowanie na nawozy mineralne, a to z kolei skutkuje obniżeniem kosztów prowadzenia produkcji roślinnej w gospodarstwie [29, 12].

Ważnym efektem stosowania nawożenia substancją pofermentacyjną jest również ograniczenie emisji gazów cieplarnianych [19]. Przy tradycyjnym gospodarowaniu obornikiem i gnojowicą dochodzi bowiem do ich emisji. Spośród gazów cieplarnianych na uwagę zasługuje tu przede wszystkim metan. Niebezpieczeństwo emisji tego gazu jest ważne, ponieważ jest on 21-krotnie bardziej szkodliwy dla środowiska naturalnego niż dwutlenek węgla, powodując nasilenie efektu cieplarnianego. Problem dotyczy zarówno składowania, jak i rolniczego wykorzystania odchodów zwierzęcych. Składowany obornik i magazynowana gnojowica przy braku efektywnego napowietrzania (w warunkach beztlenowych) mogą być źródłem silnych emisji metanu, wytwarzanego przez bakterie mezofilowe lub termofilowe. Nieprawidłowe użycie gnojowicy lub obornika jako nawozu, zwłaszcza w warunkach głębokiego przykrycia go zwiążą, wilgotną glebą odcinającą dostęp powietrza, może być także źródłem emisji tego gazu [26]. Poza metanem ważnym gazem cieplarnianym emitowanym przez gnojowicę jest podtlenek azotu. Procesami odpowiedzialnymi za jego powstawanie są mikrobiologiczna nityfikacja i denityfikacja azotu, które zachodzą podczas magazynowania gnojowicy [18, 26].

Emisja gazów cieplarnianych do atmosfery zachodzi także w przypadku stosowania nawozów mineralnych (zwłaszcza azotowych i fosforowych). Przy intensywnym nawożeniu upraw rolnych nawozami sztucznymi w europejskich warunkach klimatycznych występuje tzw. emisja glebowa  $\text{NO}_x$  z niewykorzystanych przez rośliny związków azotu. Należy także zwrócić uwagę na emisję związaną z procesem wytwarzania nawozów sztucznych. Zastąpienie więc nawozów naturalnych, gnojowicy i obornika, jak i mineralnych pofermentem

pozwała w znacznym stopniu zmniejszyć emisję gazów cieplarnianych do atmosfery [30, 1].

Dużym problemem wsi i gospodarstw rolnych jest fetor gnojowicy, obornika i odchodów zwierzęcych, zarówno składowanych, jak i wywożonych na pola jako nawóz, który może unosić się w okolicy przez wiele dni.

Do najważniejszych związków odpowiedzialnych za tworzenie odorów podczas chowu zwierząt gospodarskich zalicza się amoniak, siarkowodór, diacetyl, p-krezol, indol, fenole, merkaptany, skatole, aminy, siarczki metylu. Dlatego też emisja odorów nie tylko pogarsza dobrostan ludzi, ale jest też poważnym zagrożeniem dla ich zdrowia. Fermentacja metanowa wymienionych odpadów pozwala zredukować emisję tych gazów, neutralizując zarazem ich uciążliwość. Jeśli biogazownia jest właściwie zaprojektowana i eksploatowana, surowiec zostaje do końca „przefermentowany”, otrzymany wówczas poferment ma mało wyczuwalny, słaby, neutralny zapach (może to być zapach ziemi, humusu). Redukcja odorów o ponad 80% w stosunku do nieprzefermentowanych nawozów naturalnych jest istotna dla magazynowania pofermentu oraz przy jego aplikowaniu na pola [26].

Poferment jest lepszym nawozem niż gnojowica czy obornik nie tylko dlatego, że nie emituje praktycznie odorów i daje plony o 20% większe, ale również z tego powodu, że nie ma w nim nasion chwastów. Ma to znaczenie ekonomiczne, gdyż pozwala zmniejszyć zużycie chemicznych środków chwastobójczych i herbicydów [12].

## Podsumowanie

Substancja pofermentacyjna (poferment, dygestat) to produkt uboczny powstający w biogazowniach rolniczych w procesie beztlenowej fermentacji metanowej biomasy w ilości 85–95% masy użytych substratów. Ze względu na swoje właściwości z powodzeniem może być stosowana jako wartościowy i tani nawóz łączący pozytywne cechy nawozów naturalnych (źródło materii organicznej), jak i mineralnych (źródło makro- i mikroelementów w formach mineralnych). Wykorzystanie go na gruntach rolnych pozytywnie wpływa na wielkość uzyskiwanych plonów i jednocześnie poprawia bilans materii organicznej w glebie.

Biogazownie, wykorzystując do produkcji biogazu produkty uboczne z przetwórstwa rolno-spożywczego czy odchody zwierzęce, mogą nie tylko służyć pozyskiwaniu energii elektrycznej i ciepłej, ale także zmniejszyć zagrożenia związane z oddziaływaniem tych substancji na środowisko. Agrobiogazownia o mocy 1 MW wytwarza rocznie do 30 000 t pofermentu. Zagęszczony poferment jest wykorzystywany jako paliwo, czy to bezpośrednio po wysuszeniu, czy po granulacji (pelety i brykiety). Pelety z pofermentu posiadają

wartość opałową ok. 15 MJ/kg, przy zawartości wilgoci 9,9%. Jednak otrzymanie peletu z osadu pofermentacyjnego, ze względu na duży balast wody, nie jest łatwe. Powstający w wyniku spalania peletów popiół zawierający fosfor i potas może zostać wykorzystany rolniczo. W porównaniu z surową gnojowicą, będącą obecnie podstawowym substratem wykorzystywanym w biogazowniach rolniczych, otrzymywanie pofermentu eliminuje patogeny, eliminuje praktycznie emisję odorów i gazów cieplarnianych, zmniejsza ryzyko zanieczyszczenia wód gruntowych i powierzchniowych. Tym samym efekty ekologiczne produkcji i stosowania pofermentu są znaczące.

## Literatura

- [1] Askri A., Laville P., Trémier A., Houot S., *Influence of origin and post-treatment on greenhouse gas emissions after anaerobic digestate application to soil*, Waste Biomass Valorization, 2, 7, 2016, s. 293–306, DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12649-015-9452-6>
- [2] Babae A., Shayegan J., Roshani A., *Anaerobic slurry co-digestion of poultry manure and straw: effect of organic loading and temperature*, Journal of Environmental Health Sciences & Engineering, 15, 11, 2013, s. 1–6, DOI: <http://dx.doi.org/10.1186/2052-336X-11-15>
- [3] Baryła-Paśnik M., Piekarski W., Piecak A., *Logistyka dystrybucji i magazynowania odpadów pofermentacyjnych pod kątem kosztów wytwarzania bionawozu*, Logistyka, 6, CD 1, 2014, s. 30–33.
- [4] Czekala W., Pilarski K., Dach J., Janczak D., *Analiza możliwości zagospodarowania pofermentu z biogazowni*, Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna, 4, 2012, s. 13–15.
- [5] Czuba R., *Nawożenie mineralne roślin*, Wyd. ZCh Police SA, 1996.
- [6] Deng L., Zhen P., Chen Z., & Mahmood, Q., *Improvement in post-treatment of digested swine wastewater*, Bioresource Technology, 99, 8, 2008, s. 3136–3145, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2007.05.061>
- [7] Domińczyk-Kuderko A., Krzystek L., Ledakowicz S., Pogoda M., *Biologiczne suszenie mieszaniny masy pofermentacyjnej z biogazowni i organicznej frakcji stałych odpadów komunalnych*, Inżynieria i Aparatura Chemiczna, 4, 2015, s. 150–151.
- [8] Foged H.L., Frandsen T.Q., Christensen M.T., Poulsen M., *Livestock manure to energy*, Status. Technologies and Innovation in Denmark, Agro Business Park A/S, 2012.

- [9] Fuchs J.G., Baier U., Berner A., Mayer J., Schleiss K., *Effects of digestate on the environment and on plant production - results of a research project*, In Proceedings of ECN/ORBIT e.V. Workshop 2008 The future for Anaerobic Digestion of Organic Waste in Europe, Weimar, Germany, 2008.
- [10] Khanal S.K., *Anaerobic biotechnology for bioenergy production: principles and applications*, Blackwell Pub. Co, 2008.
- [11] Koszel M., Lorencowicz E., *Agricultural use of biogas digestate as a replacement fertilizers*, Agriculture and Agricultural Science Procedia, 7, 2015, s. 119–124, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.12.004>
- [12] Kowalczyk-Juśko A., Szymańska M., *Poferment nawozem dla rolnictwa*, Wyd. Fundacja na rzecz Rozwoju Polskiego Rolnictwa, Warszawa, 2015.
- [13] Kratzeisen M., Starcevic N., Martinov M., Maurer C., Müller J., *Applicability of biogas digestate as solid fuel*, Fuel, 89, 2010, 2544–2548.
- [14] Lin H., Gan J., Rajendran A., Reis C.E.R., Hu B., *Phosphorus removal and recovery from digestate after biogas production*, [w:] Biernat K. (red.), *Biofuels – Status and Perspective*, 2015, s. 517–546, DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/60474>
- [15] Łucka I.A., Kołodziej A.U., Szymańska M., Pilarski K., *Rolnicze wykorzystanie masy pofermentacyjnej z biogazowni rolniczej*, [w:] Jasiulewicz M. (red.), *Wykorzystanie biomasy w energetyce, aspekty ekonomiczne i ekologiczne*, Polskie Towarzystwo Ekonomiczne, Koszalin, 2011, s. 277–304.
- [16] Makara A., *Przetwarzanie gnojowicy świńskiej i jej separacja metodą filtracyjną*, Wydawnictwo IGSMiE PAN, Studia, Rozprawy, Monografie, 199, Kraków 2016.
- [17] Makara A., Kowalski Z., *Innovative bio-products for agriculture, Pigmanure utilization and treatment*, New York, Nova Science Publisher, 2016.
- [18] Mantovi P., Fumagalli L., Beretta G.P., i in., *Nitrate leaching through the unsaturated zone following pig slurry applications*, Journal of Hydrology, 316, 2005, 195–212.
- [19] Marañón E., Salter A., Castrillón L., Heaven S., & Fernández-Nava Y., *Reducing the environmental impact of methane emissions from dairy farms by anaerobic digestion of cattle waste*, Waste Management, 34, 2011, 1745–1751, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2011.03.015>
- [20] Paavola T., Rintala J., *Effects of storage on characteristics and hygienic quality of digestates from four co-digestion concepts of manure and bio-waste*, Bioresource Technology, 99, 2008, 7041–7050, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2008.01.005>

- [21] Palm O., *The quality of liquid and solid digestate from biogas plants and its application in agriculture*, In Proceedings of ECN/ORBIT e.V. Workshop 2008, The future for Anaerobic Digestion of Organic Waste in Europe, Weimar, Germany, 2008.
- [22] Parkin G. F., Owen W.F., *Fundamentals of anaerobic digestion of wastewater sludge's*, Journal of Environmental Engineering, 1986, 867–920, DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1986\)112:5\(867\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1986)112:5(867))
- [23] Pontus K., *Osad pofermentacyjny oraz jego wykorzystanie*, *Ekoenergetyka- biogaz*; [w:] Cenian A., Gołaszewski J., Noch T. (red.), *Badania, technologie, prawo i ekonomika w rejonie Morza Bałtyckiego*, s. 108–117, Wydanie w ramach Bałtyckiego Forum Biogazu IV, Gdańsk, 2014.
- [24] Rozporządzenie Ministra Środowiska z 9 grudnia 2014 r. w sprawie katalogu odpadów.
- [25] Sahlström L., *A review of survival of pathogenic bacteria in organic waste used in biogas plants*, *Bioresource Technology*, 87, 2003, s. 161–166, DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524\(02\)00168-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00168-2)
- [26] Smurzyńska A., Dach J., Dworecki Z., Czekala W., *Emisje gazowe podczas gospodarki gnojowicą*, *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, 1, 19, 2016, s. 109–125,
- [27] Ton V.D., Duy N.V., *Studying on pig manure treatment to minimize environmental pollution and use bioenergy*, *International Journal of Environmental and Rural Development*, 1-2, 2010, s. 73–77.
- [28] Ustawa o nawozach i nawożeniu 10 lipca 2007, Dz.U. 2007, Nr 147, poz. 1033.
- [29] Vaneeckhaute C., Meers E., Michels E., Buysse J., Tack F.M.G., *Ecological and economic benefits of the application of bio-based mineral fertilizers in modern agriculture*, *Biomass and Bioenergy*, 49, 2013, s. 239–248, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.12.036>
- [30] Walsh J.J., Jones D.L., Edwards-Jones G., Williams A.P., *Replacing inorganic fertilizer with anaerobic digestate may maintain agricultural productivity at less environmental cost*, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 175, 2012, s. 840–845, DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/jpln.201200214>
- [31] Węglarzy K., Podkówa W (red.) *Agro biogazownia*, Wyd. Zakład Doświadczalny Instytutu Zootechniki PIB, Grodziec Śląski, 2010.
- [32] Węglarzy K., Stekla J., *Agrobiogazownie w ochronie środowiska naturalnego*, *Wiadomości Zootechniczne*. XLVII, 3, 262, 2009, s. 59–67.
- [33] Węglarzy K., Skrzyżala I., Pellar A., *Agricultural biogas plant in Kostkowice*, First experiences. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 56, 4, 2011, 189-192.



Andrzej Ślęzak<sup>1</sup>, Izabella Ślęzak-Prochazka<sup>2</sup>, Kornelia M. Batko<sup>3</sup>,  
Aleksandra Zyska<sup>1</sup>, Weronika Gawrys<sup>1</sup>, Jacek Józwiak<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Biomedical Processes and Systems,

Institute of Health and Nutrition Sciences,

Częstochowa University of Technology,

Armia Krajowa al. 36b, 42 200 Częstochowa, Poland

<sup>2</sup>Biotechnology Centre, Silesian University of Technology,

Silesian University of Technology,

Bolesław Krzywousty str. 8, 44 100 Gliwice, Poland

<sup>3</sup>Department of Business Informatics,

University of Economics,

Bogucicka 3B, 40 287 Katowice, Poland,

e-mail: aslezak52@gmail.com

## ANALYTICAL METHOD FOR DETERMINING ANTROPOMETRIC PARAMETERS IN BODY MASS REDUCTION PROCESS IN THE ASPECT OF HEALTH SAFETY

**Abstract.** In this study, for the first time we developed a mathematical model showing that the reduction in parameters such as total body mass, total fat mass, visceral fat mass, waist circumference, hip circumference and body mass index (BMI) can be described using exponential equations. Constants  $k_t$ ,  $k_f$ ,  $k_{\bar{v}}$ ,  $k_{BMI}$ ,  $k_p$ ,  $k_b$  that occur in particular equations characterize individual features related to these anthropometric parameters. The presented model was verified using experimental data obtained by analysis of body composition. These individuals were overweight in the initial moment of the experiment and eliminated or limited easily digestible products containing sugar from their diet. We showed that there is a critical time, when each individual achieved normal values of body mass index, fat mass, visceral fat mass, waist circumference, hip circumference, and waist-hip ratio. This critical time ranged between 35 and 46 weeks.

**Keywords:** Overweight reduction, mathematical model, bioelectric impedance method, overweight reduction coefficient, low-sugar diet, health security.

## ANALITYCZNA METODA OKREŚLANIA PARAMETRÓW ANTROPOMETRYCZNYCH W PROCESIE REDUKCJI MASY CIAŁA W ASPEKCIE BEZPIECZEŃSTWA ZDROWIA

**Streszczenie:** W tym badaniu jako pierwsi opracowaliśmy model matematyczny pokazujący, że zmniejszenie parametrów, takich jak całkowita masa ciała, całkowita masa tłuszczu, trzewna masa tłuszczowa, obwód talii, obwód bioder i wskaźnik masy ciała (BMI), można opisać za pomocą równania wykładniczego. Stałe  $k_t$ ,  $k_f$ ,  $k_{f_v}$ ,  $k_{BMI}$ ,  $k_p$ ,  $k_b$  występujące w poszczególnych równaniach charakteryzują poszczególne cechy związane z tymi parametrami antropometrycznymi. Przedstawiony model zweryfikowano za pomocą danych eksperymentalnych uzyskanych poprzez analizę składu ciała. Osoby badane miały nadwagę w początkowym momencie eksperymentu i wyeliminowały lub ograniczyły z diety łatwo przyswajalne produkty zawierające cukier. Pokazaliśmy krytyczny czas, kiedy każdy człowiek osiąga normalne wartości wskaźnika masy ciała, masy tłuszczu, masy trzewnej, obwodu talii, obwodu bioder i stosunku talii do bioder. Ten krytyczny czas waha się od 35 do 46 tygodni.

**Słowa kluczowe:** redukcja nadwagi, model matematyczny, metoda impedancji bioelektrycznej, współczynniki redukcji nadwagi, dieta niskocukrowa, bezpieczeństwo zdrowotne.

**Abbreviations:**  $m_t$ , total body mass;  $m_f$ , total fat mass;  $m_{f_v}$ , visceral fat mass;  $BMI$ , body mass index;  $l_p$ , waist circumference;  $l_b$ , hips circumference;  $WHR$ , wist-hip ratio.

### Introduction

Nourishment is the source of the major driving force of every living organism that enables whole organism as well as its elements to do the useful work such as daily physical and intellectual activity [16]. Overeating leads to weight gain and obesity that significantly increases risk of developing life-threatening conditions such as type II diabetes, chronic cardiovascular disease, stroke, certain types of cancer, gall stones, calcification osteoarthritis and gout [15, 6, 7, 11]. According to World Health Organization, 2014 39% of the world's adult population were overweight in and 13% were obese [20]. This phenomenon is expanding and is considered one of the most important health problems of 21-st century in all age groups of the human population [17]. Moreover, obesity is considered to be the mother of all diseases and dysfunctions [8]. Therefore, body mass reduction is an important activity from the point of view of health safety.

Mechanism of obesity can be described by several concepts that include caloric imbalance, metabolic-hormonal imbalance and genetic disorder. According to the caloric imbalance concept, obesity is the result of an distortion in the energy balance between energy intake, accumulation and expenditure [19]. The con-



cept of the metabolic-hormonal imbalance imply that excessive accumulation of fat in adipocytes is caused by stimulation of insulin secretion as a results of diet rich in high-processed carbohydrates [5, 18]. Genetic contribution to obesity include multiple gene alterations rather than one specific gene mutation [5, 12]. Thus, both the environmental and genetic factors contribute to obesity.

To analyze epidemiological studies of eating disorders, it is important to determine basic anthropometric parameters describing composition of the human body [3, 9]. This studies can be made at the following levels: global (total body mass, height, body surface area, volume, waist and hips circumference), organ and tissue (muscle mass, fat and bone mass), cellular (cellular mass, extracellular space), molecular (fat, water, protein, minerals) and atomic (10 most important elements: oxygen, carbon, hydrogen, nitrogen, calcium, phosphorus, potassium, sulfur, sodium, chlorine) [2, 1]. To evaluate overweight and obesity at the global level in epidemiological studies indicators are often used such as body mass index (BMI) or waist-hip ratio (WHR) [9, 10]. For a normal body weight BMI is comprised between 18.5 and 24.9 kg/m<sup>2</sup>, for overweight between 25 and 29.9 kg/m<sup>2</sup>, and obesity occurs when BMI ≥ 30 kg/m<sup>2</sup>. WHR represents one of the five indicators of metabolic syndrome and it is used as an index of adipose tissue. The value of the WHR index for women of normal weight is (WHR)<sub>w</sub> < 0.8, and for men (WHR)<sub>m</sub> < 1. Body composition on the organ and tissue level can be analyzed using bioelectrical impedance method [10, 14].

The overweight and light obesity reduction process may be described by mathematical models showing time dependence of quantitative reduction of well established anthropometric parameters. To our knowledge there is no mathematical model applied to body mass reduction described in the literature. In this paper we present a mathematical model showing that reduction process of basic anthropometric parameters such as total body mass ( $m_t$ ), fat mass ( $m_f$ ), visceral fat mass ( $m_{fv}$ ), waist ( $l_p$ ) and hips ( $l_b$ ) circumference can be described by exponent equations. We also confirm the model with experimental data. The study aim to show how elimination or limitation of carbohydrate-rich products affect the value of the anthropometric parameters. Additionally, the obtained model is compared to Michaelis-Menten model that is often applied in biochemical studies.

## Materials and Methods

### *Mathematical model*

Each of the anthropometric indicators related to the state of the human body at a given timepoint and various physiological conditions (age, obesity, etc.) can be described in the general form:

$$X = X_a + X_e \quad (1)$$

where:  $X$  – anthropometric indicator related to the state of the human body at a given timepoint,  $X_a$  – anthropometric indicator related to an acceptable state of the human body,  $X_e$  – excess of the anthropometric indicator. These indicators may be: total body mass ( $m_t$ ), fat mass ( $m_f$ ), BMI, visceral fat mass ( $m_{fv}$ ), water mass ( $m_w$ ), waist ( $l_p$ ) and hips ( $l_b$ ) circumference, WHR, etc.

The human body consists of water, fat, muscle, bone and viscera and that a quantitative measure of these components is their mass. Therefore, the total body mass can be expressed by the equation:

$$m_t = m_f + m_w + m_m + m_o + m_v + m_s \quad (2)$$

where  $m_f$  – fat mass,  $m_w$  – water mass,  $m_m$  – muscle mass,  $m_o$  – bone mass, and  $m_v$  – organ mass (heart, liver, brain, intestines, stomach etc.),  $m_s$  – fascia mass. Fat mass is the main component that changes during weight gain.

For normal body mass ( $m_a$ ), BMI fulfil condition  $18,5 \text{ kg/m}^2 < \text{BMI} < 24.9 \text{ kg/m}^2$ , therefore the most appropriate body mass index would be in the middle of this range,  $\text{BMI} = 21.7 \text{ kg/m}^2$ . It should be noted that a fraction of irreducible fat in adipose tissue is necessary as it plays important physiological role. For this study, we assumed that the normal values of anthropometric parameters ( $m_a, l_{pa}, l_{ba}$ ) was obtained when  $\text{BMI} \leq 24.9 \text{ kg/m}^2$ . Total fat mass in the human body ( $m_f$ ) is the sum of the normal fat mass ( $m_{fa}$ ) and excessive fat mass ( $m_{fr}$ ). Both normal ( $m_{fa}$ ) and excessive ( $m_{fr}$ ) fat masses include visceral part ( $m_{fav}$ ), ( $m_{fap}$ ) and remaining ( $m_{frv}$ ) and ( $m_{frp}$ ). This can be written in the form

$$m_f = m_{fa} + m_{fr} = m_{fav} + m_{fap} + m_{frv} + m_{frp} \quad (3)$$

where  $m_{fa} = m_{fav} + m_{fap}$  and  $m_{fr} = m_{frv} + m_{frp}$ .

This means that the normal body mass ( $m_a$ ) can be presented by the formula

$$m_a = m_{fa} + C = m_{fav} + m_{fap} + C \quad (4)$$

where  $C = m_m + m_o + m_v + m_s$ .

Therefore, the Equation (2) can be written in the following form

$$m_t = m_a + m_{fr} \quad (5)$$

For overweight, waist circumference ( $l_p$ ) is the sum of normal waist circumference ( $l_{pa}$ ) and its excess that is caused by accumulation of fat ( $l_{pf}$ )

$$l_p = l_{pa} + l_{pf} \quad (6)$$

Similarly, hip circumference ( $l_b$ ) is the sum of normal hip circumference ( $l_{ba}$ ) and its excess that is caused by accumulation of fat ( $l_{bf}$ )

$$l_b = l_{ba} + l_{bf} \quad (7)$$

Macroscopic manifestation of excessive accumulation of fat in adipocytes is an increased fat mass and thus total body weight, whereas macroscopic manifestation of removal of fat from the adipocytes is reduced fat mass and thus total

body weight. Considering the Eq. (2), the mass reduction process can be analyzed by analysis of the reduction of fat in adipose tissue. It is impossible to predict which adipocytes will remove fat in the process of weight loss, yet adipocytes, reduction speed of a generalized anthropometric parameter ( $X_j$ ) can be written as

$$\frac{dX_e}{dt} = -k_e X_e \quad (8)$$

where ( $dX_e/dt$ ) – reduction speed of anthropometric parameter  $X_e$ ,  $k_e$  – reduction constant of anthropometric parameter characteristic for each individual (1/s).  $X_e$  can be substituted with the total body weight ( $m_e$ ), fat mass ( $m_f$ ), visceral fat mass ( $m_{fv}$ ), waist circumference ( $l_p$ ) or hip circumference ( $l_b$ ).

The solution to this differential equation is the expression

$$X_e = X_{e0} \exp[-k_e(t - t_0)] \quad (9)$$

where  $X_{e0}$  – value of an anthropometric parameter at the initial moment i.e. at overweight condition ( $t_0$ ),  $X_e$  – value of an anthropometric parameter after a time ( $t$ ) different than the initial moment (in condition of lack of overweight or obesity).

Differentiating the Eq. (9) after time, we obtain

$$\frac{dX_e}{dt} = -k_e X_{e0} \exp[-k_e(t - t_0)] \quad (10)$$

This equation can be written in the alternative to the Eq. (10) form as

$$R_e = R_{e0} \exp[-k_e(t - t_0)] \quad (11)$$

where:  $R_e = dX_e/dt$  – reduction speed of anthropometric parameter,  $R_{e0} = k_e X_{e0}$  – reduction speed of anthropometric parameter at the initial moment.

The Eq. (11) shows that the constant of anthropometric parameter reduction  $k_e$  determines reduction rate of anthropometric parameter  $R_e$  that is decreasing with time  $t$ . By logarithm of both sides of Eq. (11) and applying the appropriate algebraic transformations we obtain

$$k_e = \frac{1}{t - t_0} \ln \frac{R_{e0}}{R_e} \quad (12)$$

#### Measurement procedure

The experimental study involved 4 healthy individuals, 2 men and 2 women and started in September 2014. Participants eliminated from their diet products containing corn syrup, sweets, alcohol, refined carbohydrates (white flour), sucrose, fruits rich in fructose (plums, pears, grapes), and reduced to a minimum starch-rich vegetables (potatoes, beans). They followed a regime of having 4-5 meals a day between 7 a.m. and 6 p.m. Participation in the study was

voluntary. Participants decided to change diet mainly for aesthetic and not medical reasons.

Sex, age, height ( $h$ ), total body mass ( $m_t$ ), BMI, waist circumference ( $l_p$ ) hip circumference ( $l_b$ ) and WHR of individuals marked 1, 2, 3, 4 at the start of experiment are presented in Table 1.

Tab. 1. Anthropomorphic indicators at the initial timepoint ( $t_0$ ) sex, age, height ( $h$ ) and total body mass ( $m_t$ ), BMI (body mass index), waist circumference ( $l_p$ ), hips circumference ( $l_b$ ), WHR (wist-hip ratio).

Individual	Sex	Age (years)	$h$ (m)	$m_t$ (kg)	BMI (kg/m <sup>2</sup> )	$l_p$ (m)	$l_b$ (m)	WHR
1	M	62	1.85	113.0	33.02	1.06	1.15	0.92
2	M	41	1.82	104.8	31.64	1.02	1.12	0.91
3	W	41	1.65	89.6	32.91	0.98	1.14	0.86
4	W	36	1.66	81.8	29.68	0.99	1.14	0.87

BMI was calculated based on formula  $BMI = m_t/h^2$  kg/m<sup>2</sup> and WHR based on the formula  $WHR = l_p/l_b$ . As shown in the Table 1, the subjects 1–3 show light obesity, and the subject 4 overweight. All participants were equipped with ergonomic circumference measuring tape SECA 201 (Seca gmbh, Hamburg, Germany), Microtoise 2.20 (Girodmedical, Nantes, France) and body composition analyzer TANITA BC 420 SMA (Tanita Corporation, Tokyo, Japan) and were instructed in the measuring procedures. Waist circumference ( $l_p$ ) and hips circumference ( $l_b$ ) were measured to the nearest 1 mm using ergonomic circumference measuring tape SECA 201. The standing body height (stature) was measured to the nearest 1 mm using a Microtoise 2.20. Each measurement was done in triplicate and arithmetic average of these measurements was used. Body composition was analyzed by measuring bioelectrical impedance using TANITA BC 420 SMA analyzer [10, 14]. The analyzer cooperate with GMON programme (Tanita Corporation, Tokyo, Japan) and provides data such as total body mass ( $m_t$ ), fat mass ( $m_f$ ), total body water or water mass ( $m_w$ ), muscle mass ( $m_m$ ), bone mass ( $m_o$ ), and visceral fat mass ( $m_{fv}$ ). Total body mass and muscle mass were measured to the nearest 100 g, fat mass and water mass to the nearest 0.1%. Measurements were performed by participant every Saturday, i.e., at week intervals for 54 weeks at their place of residence. All measurements were performed in the morning ( $\sim 7^{00}$ ), in the vertical body position, without clothes and jewelry, 30 minutes after urination, before breakfast. Intense physical activity was avoided at least 12 hours before the measurement.

### Curve fitting

For measurements of  $m_t$ ,  $m_f$ ,  $m_{fv}$ , BMI,  $l_p$  and  $l_b$ , a first-order exponential decay curve was fitted into data points using Origin Software 6.1 (OriginLab Co, Northampton, MA, USA). The equation obtained for the fitted curves can be written in a general form:

$$X = X_a + A_{e0} \exp(-k_e t) \quad (13)$$

where:  $X_a$  – normal value of the generalized anthropometric parameter,  $A_{e0} = X_0 - X_a$  – amplitude of reduction of generalized anthropometric parameter,  $k_e$  – constant of reduction of generalized anthropometric parameter,  $t$  – time. The constants  $X_a$ ,  $A_{e0}$  and  $k_e$  are parameters for the fitted curves.

The fitted curves calculated based on Eq. (13) are shown in graphs as full lines for reduction of  $m_t$ ,  $m_f$ ,  $m_{fv}$ , BMI,  $l_p$ ,  $l_b$  parameters. Eq. (13) is presented in a corresponding form for each analyzed parameter in the figure legends.

Constant of reduction of generalized anthropometric parameter ( $k_e$ ) was calculated separately for  $m_t$ ,  $m_f$ ,  $m_{fv}$ , BMI,  $l_p$ ,  $l_b$  parameters using equations obtained from curves fitted to set of data points for each individual. This curve fitting resulted in the certain constants  $k_t$ ,  $k_f$ ,  $k_{fv}$ ,  $k_{BMI}$ ,  $k_p$  and  $k_b$  for measured parameters.

## Results and Discussion

This paper presents the measurement results of the total body mass ( $m_t$ ), fat mass ( $m_f$ ), visceral fat mass ( $m_{fv}$ ), waist circumference ( $l_p$ ), hip circumference ( $l_b$ ) for an individual 1 ( $\square$ ), 2 ( $\circ$ ), 3 ( $\diamond$ ) and 4 ( $\triangle$ ) obtained during 54 weeks. In addition, we calculated BMI and WHR for each individual and timepoint. The average results of measurements of water mass ( $m_w$ ), muscle mass ( $m_m$ ), bone mass ( $m_o$ ) are listed in Table 2. The measurements shown in Table 2 indicate that the total water mass ( $m_w$ ), the total muscle mass ( $m_m$ ) and the total bone mass ( $m_o$ ) fluctuate around the average values. It can therefore be assumed that the total water mass ( $m_w$ ), total muscle mass ( $m_m$ ) and total bone mass ( $m_o$ ) are constant within the measurement uncertainty. Given that we can simplify Eq. (2) to the form

$$m_t = m_f + C \quad (14)$$

where  $C = m_m + m_o + m_v + m_s = \text{const}$ . A constant  $C$  is different for each individual (Table 2).  $C$  is similar for the two men ( $C_1 \approx C_2$ ) and the two women ( $C_3 \approx C_4$ ) and  $C_1 \approx C_2 > C_3 \approx C_4$ .

Tab. 2. Mean values of the water mass ( $m_w$ ), muscle mass ( $m_m$ ), bone mass ( $m_o$ ) determined by bioelectrical impedance for four individuals

Individual	mass (kg) of			C (kg)
	water ( $m_w$ )	muscles ( $m_m$ )	bones ( $m_o$ )	
1	51.24±0.92	19.75±0.30	3.68±0.10	74.67±0.44
2	50.84±0.74	19.76±0.19	3.62±0.06	74.22±0.33
3	35.76±0.77	12.23±0.19	2.56±0.07	50.55±0.34
4	33.44±0.36	11.22±0.17	2.50±0.02	47.16±0.18

Reduction of total body mass was shown in Fig. 1 as nonlinear dependence  $m_t = f(t)$ . For the individual 1 ( $\square$ ), there was a 28.6 kg decrease in the total body mass that constituted 25.3% of initial  $m_t$ , for the individual 2 ( $\circ$ ) there was 23.6 kg decrease that was 23.6% of initial  $m_t$ , for the individual 3 ( $\diamond$ ) there was a 24.8 kg decrease that was 27.7% of initial  $m_t$ , while for the individual 4 ( $\triangle$ ), there was a 14.7 kg decrease that was 18.0% of initial  $m_t$  in 54 weeks ( $t_k$ ). In the beginning the rate of body mass reduction was substantially faster than in the end of the experiment.

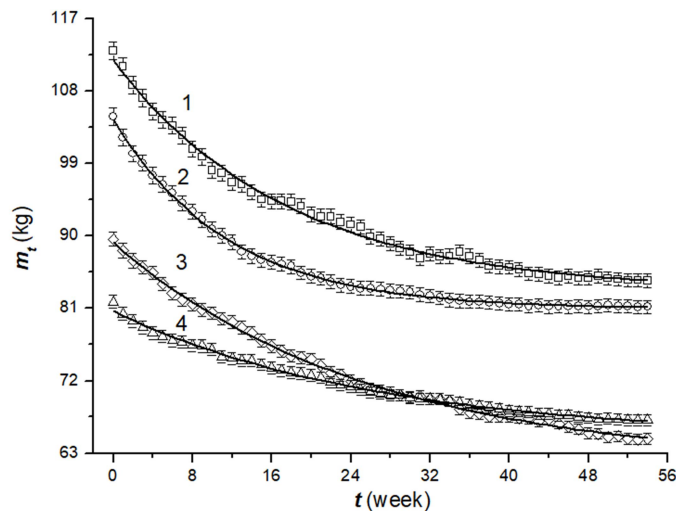


Fig. 1. Dependence  $m_t = f(t)$  for the individual 1 ( $\square$ ), 2 ( $\circ$ ), 3 ( $\diamond$ ) and 4 ( $\triangle$ ). Solid lines 1-4 illustrate the results of the calculations of the total body mass ( $m_t$ ) based on the equation  $m_t = m_{ta} + A_0 \exp(-k_t t)$ . For the individual 1  $m_{ta} = 83.14 \pm 0.27$  kg,  $A_0 = 28.68 \pm 0.29$  kg,  $k_t = (5.70 \pm 0.02) \times 10^{-2}$  (week) $^{-1}$  ( $\chi^2 = 0.329$ ,  $R^2 = 0.995$ ). For the individual 2  $m_{ta} = 80.88 \pm 0.06$  kg,  $A_0 = 23.57 \pm 0.12$  kg,  $k_t = (8.64 \pm 0.01) \times 10^{-2}$  (week) $^{-1}$  ( $\chi^2 = 0.047$ ,  $R^2 = 0.999$ ). For the individual 3  $m_{ta} = 61.44 \pm 0.29$  kg,  $A_0 = 27.70 \pm 0.24$  kg,  $k_t = (3.87 \pm 0.01) \times 10^{-2}$  (week) $^{-1}$  ( $\chi^2 = 0.107$ ,  $R^2 = 0.998$ ). For the individual 4  $m_{ta} = 64.91 \pm 0.24$  kg,  $A_0 = 15.75 \pm 0.20$  kg,  $k_t = (3.77 \pm 0.01) \times 10^{-2}$  (week) $^{-1}$  ( $\chi^2 = 0.066$ ,  $R^2 = 0.996$ ).

At the starting point of the experiment, the BMI was in the obesity range for individuals 1-3 and in overweight range for individual 4. Reduction of BMI shown in Fig. 2 as nonlinear dependence  $BMI = f(t)$  was calculated using total body mass measurement shown in Figure 1 and height measurements listed in Table 1. From these curves it results that a decline in BMI was  $8.36 \text{ kg/m}^2$  for the individual 1 ( $\square$ ),  $7.12 \text{ kg/m}^2$  for the individual 2 ( $\circ$ ),  $9.11 \text{ kg/m}^2$  for the individual 3 ( $\diamond$ ) and  $5.31 \text{ kg/m}^2$  for the individual 4 ( $\triangle$ ). All 4 individuals reached normal body mass with  $BMI < 24.9 \text{ kg/m}^2$  by the end of experiment.

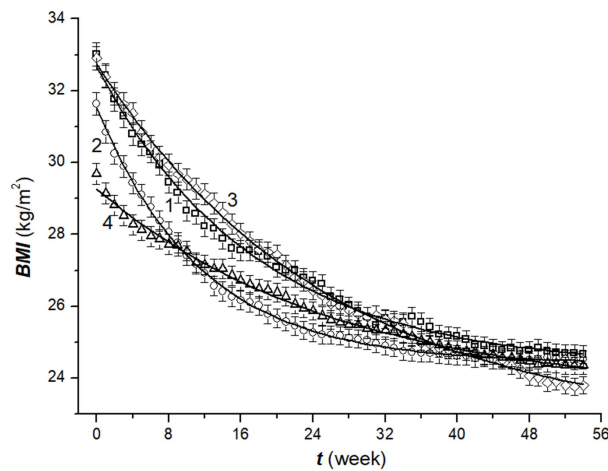


Fig. 2. Dependence  $BMI = f(t)$  for the individual 1 ( $\square$ ), 2 ( $\circ$ ), 3 ( $\diamond$ ) and 4 ( $\triangle$ ) calculated based on formula  $BMI = m/h^2$  ( $\text{kg/m}^2$ ) and the test results shown in Fig. 1 and listed in Table 1. Solid lines 1-4 illustrate the results of the BMI calculations based on equation  $BMI = (BMI)_a + A_{BMI0} \exp(-k_{BMI}t)$ . For the individual 1  $(BMI)_a = 24.29 \pm 0.08 \text{ kg/m}^2$ ,  $A_{BMI0} = 8.38 \pm 0.09 \text{ kg/m}^2$ ,  $k_{BMI} = k_t = (5.70 \pm 0.02) \times 10^{-2} (\text{week})^{-1}$  ( $\chi^2 = 0.329$ ,  $R^2 = 0.995$ ). For the individual 2  $(BMI)_a = 24.42 \pm 0.02 \text{ kg/m}^2$ ,  $A_{BMI0} = 7.11 \pm 0.03 \text{ kg/m}^2$ ,  $k_{BMI} = k_t = (8.64 \pm 0.01) \times 10^{-2} (\text{week})^{-1}$  ( $\chi^2 = 0.047$ ,  $R^2 = 0.999$ ). For the individual 3  $(BMI)_a = 22.58 \pm 0.11 (\text{kg/m}^2)$ ,  $A_{BMI0} = 10.17 \pm 0.09 \text{ kg/m}^2$ ,  $k_{BMI} = k_t = (3.87 \pm 0.01) \times 10^{-2} (\text{week})^{-1}$  ( $\chi^2 = 0.107$ ,  $R^2 = 0.998$ ). For the individual 4  $(BMI)_a = 23.55 \pm 0.09 \text{ kg/m}^2$ ,  $A_{BMI0} = 5.72 \pm 0.07 \text{ kg/m}^2$ ,  $k_{BMI} = k_t = (3.77 \pm 0.01) (\text{week})^{-1}$  ( $\chi^2 = 0.066$ ,  $R^2 = 0.996$ ).

Reduction of total fat mass was shown as a nonlinear dependence  $m_f = f(t)$  in Fig. 3. The dependence  $m_f = f(t)$  indicates that the total fat mass dropped  $26.6 \text{ kg}$  (71.5% of initial  $m_f$ ) for the individual 1 ( $\square$ ),  $19.0 \text{ kg}$  (72.2% of initial  $m_f$ ) for the individual 2 ( $\circ$ ),  $21.8 \text{ kg}$  (60.2% of initial  $m_f$ ) for the individual 3 ( $\diamond$ ) and  $12.8 \text{ kg}$  (38.9% of initial  $m_f$ ) for the individual 4. Next, we calculated reduction of total visceral fat mass shown in Figure 4 as a nonlinear dependence  $m_{fv} = f(t)$ . The dependence  $m_{fv} = f(t)$  indicates that the total visceral fat decreased  $11.2 \text{ kg}$  (71.3% of initial  $m_{fv}$ ) for the individual 1 ( $\square$ ),  $7.8 \text{ kg}$  (70.9% of initial  $m_{fv}$ ) for the individual 2 ( $\circ$ ),  $4.8 \text{ kg}$  (60.0% of initial  $m_{fv}$ ) for the individual 3 ( $\diamond$ ) and  $2.7 \text{ kg}$  (38.6% of initial  $m_{fv}$ ) for the individual 4 ( $\triangle$ ). For each individual, the percentage of reduction for total fat mass and visceral fat mass was similar.

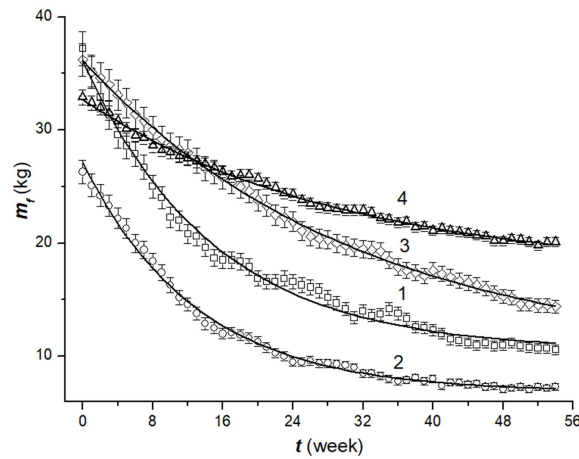


Fig. 3. Dependence  $m_f = f(t)$  for the individual 1 ( $\square$ ), 2 ( $\circ$ ), 3 ( $\diamond$ ) and 4 ( $\triangle$ ). Solid lines 1-4 illustrate the results of the calculations of total fat mass ( $m_f$ ) based on the equation  $m_f = m_{fa} + A_{f0} \exp(-k_f t)$ . For the person 1  $m_{fa} = 10.50 \pm 0.25$  kg,  $A_{f0} = 25.62 \pm 0.35$  kg,  $k_f = (7.14 \pm 0.03) \times 10^{-2} (\text{week})^{-1}$  ( $\chi^2 = 0.457$ ,  $R^2 = 0.991$ ). For the individual 2  $m_{fa} = 6.81 \pm 0.11$  kg,  $A_{f0} = 20.33 \pm 0.19$  kg,  $k_f = (7.75 \pm 0.02) \times 10^{-2} (\text{week})^{-1}$  ( $\chi^2 = 0.126$ ,  $R^2 = 0.996$ ). For the individual 3  $m_{fa} = 9.64 \pm 0.38$  kg,  $A_{f0} = 26.50 \pm 0.32$  kg,  $k_f = (3.17 \pm 0.01) \times 10^{-2} (\text{week})^{-1}$  ( $\chi^2 = 0.085$ ,  $R^2 = 0.998$ ). For the individual 4  $m_{fa} = 17.43 \pm 0.27$  kg,  $A_{f0} = 15.27 \pm 0.22$  kg,  $k_f = (3.40 \pm 0.01) \times 10^{-2} (\text{week})^{-1}$  ( $\chi^2 = 0.056$ ,  $R^2 = 0.996$ ).

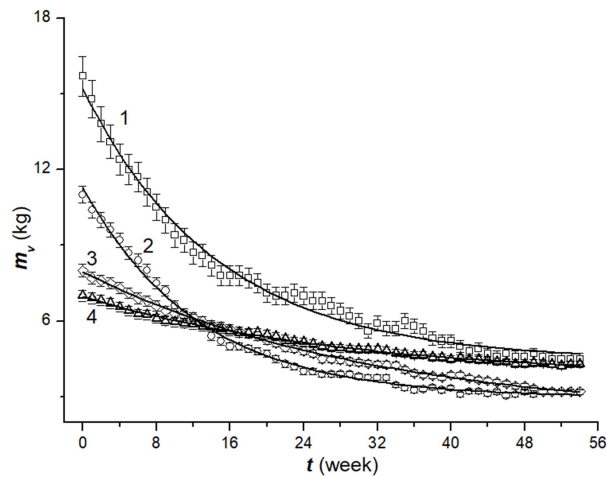


Fig. 4. Dependence  $m_v = f(t)$  for the individual 1 ( $\square$ ), 2 ( $\circ$ ), 3 ( $\diamond$ ) and 4 ( $\triangle$ ). Solid lines 1-4 illustrate the results of the calculations of visceral fat mass ( $m_v$ ) based on the equation  $m_v = m_{fva} + A_{fv0} \exp(-k_{fv} t)$ . For the individual 1  $m_{fva} = 4.43 \pm 0.11$  kg,  $A_{fv0} = 10.74 \pm 0.15$  kg,  $k_{fv} = (6.80 \pm 0.02) \times 10^{-2} (\text{week})^{-1}$  ( $\chi^2 = 0.086$ ,  $R^2 = 0.990$ ). For the individual 2  $m_{fva} = 2.96 \pm 0.04$  kg,  $A_{fv0} = 8.31 \pm 0.07$  kg,  $k_{fv} = (8.01 \pm 0.01) \times 10^{-2} (\text{week})^{-1}$  ( $\chi^2 = 0.020$ ,  $R^2 = 0.996$ ). For the individual 3  $m_{fva} = 2.15 \pm 0.09$  kg,  $A_{fv0} = 5.80 \pm 0.07$  kg,  $k_{fv} = (3.21 \pm 0.01) \times 10^{-2} (\text{week})^{-1}$  ( $\chi^2 = 0.005$ ,  $R^2 = 0.998$ ). For the individual 4  $m_{fva} = 3.71 \pm 0.06$  kg,  $A_{fv0} = 3.25 \pm 0.05$  kg,  $k_{fv} = (3.41 \pm 0.01) \times 10^{-2} (\text{week})^{-1}$  ( $\chi^2 = 0.003$ ,  $R^2 = 0.996$ ).



Fig. 5 shows that time dependence of waist circumference ( $l_p$ ) is nonlinear and can be presented as  $l_p = f(t)$ . The difference in waist circumference between the start and the end of experiment was 0.14 m for the individual 1 ( $\square$ ), 0.15 m for the individual 2 ( $\circ$ ), 0.115 m for the individual 3 ( $\diamond$ ) and 0.08 m for the individual 4 ( $\triangle$ ). The reduction of initial waist circumference ranged from 14.7% for individual 2 to 8.0% for individual 4. Next, the results of time dependence of hips circumference ( $l_b$ ) presented in Fig. 6 show that that dependence  $l_b = f(t)$  is nonlinear. The decrease in hips circumference for each individual is as follows: 0.15 m for the individual 1 ( $\square$ ), 0.09 m for the individual 2 ( $\circ$ ), 0.1 m for the individual 3 ( $\diamond$ ) and 0.08 m for the individual 4 ( $\triangle$ ). Thus, reduction of initial hips circumference ranged from 13% for individual 1 to 7% for individual 4. A comparison of the test results shown in Figure 5 and 6 indicated that stabilization value of the  $l_b$  occurred earlier than the stabilization of the  $l_p$  for all individuals. For the individual 1, 3 and 4, normal  $l_p$  appeared after  $t_{c1} = 48$  weeks and for the individual; 2 for  $t_{c2} \geq 40$  weeks. For all four individuals, normal  $l_b$  appeared at similar timepoint of  $t_{c1} = t_{c2} = t_{c3} = t_{c4} \geq 16$  weeks.

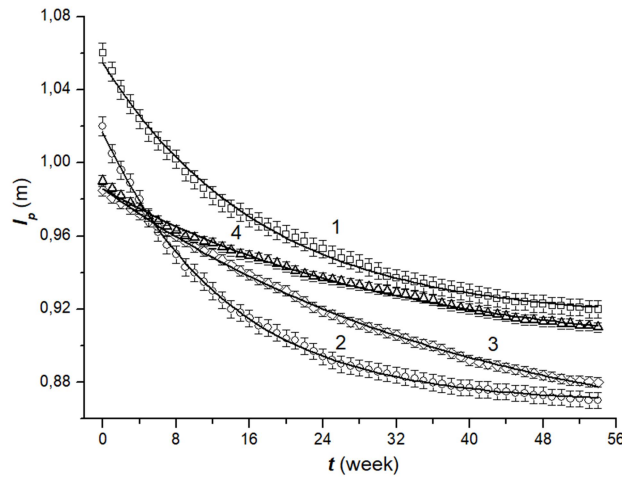


Fig. 5. Dependence  $l_p = f(t)$  for the individual 1 ( $\square$ ), 2 ( $\circ$ ), 3 ( $\diamond$ ) and 4 ( $\triangle$ ). Solid lines 1-4 illustrate the results of the calculations of waist circumference ( $l_p$ ) based on the equation  $l_p = l_{pa} + A_{p0} \exp(-k_p t)$ . For the individual 1  $l_{pa} = 0.920 \pm 0.004$  m,  $A_{p0} = 0.140 \pm 0.001$  m,  $k_p = (5.757 \pm 0.001) \times 10^{-2}$  (week) $^{-1}$  ( $\chi^2 = 0.044$ ,  $R^2 = 0.998$ ). For the individual 2  $l_{pa} = (0.870 \pm 0.001)$  m,  $A_{p0} = (0.150 \pm 0.001)$  m,  $k_p = (7.303 \pm 0.002) \times 10^{-2}$  (week) $^{-1}$  ( $\chi^2 = 0.01$ ,  $R^2 = 0.999$ ). For the individual 3  $l_{pa} = (0.880 \pm 0.001)$  m,  $A_{p0} = (0.105 \pm 0.001)$  m,  $k_p = (2.473 \pm 0.001) \times 10^{-2}$  (week) $^{-1}$  ( $\chi^2 = 0.001$ ,  $R^2 = 0.999$ ). For the individual 4  $l_{pa} = (0.911 \pm 0.002)$  m,  $A_{p0} = (0.080 \pm 0.001)$  m,  $k_p = (3.119 \pm 0.001) \times 10^{-2}$  (week) $^{-1}$  ( $\chi^2 = 0.001$ ,  $R^2 = 0.996$ ).

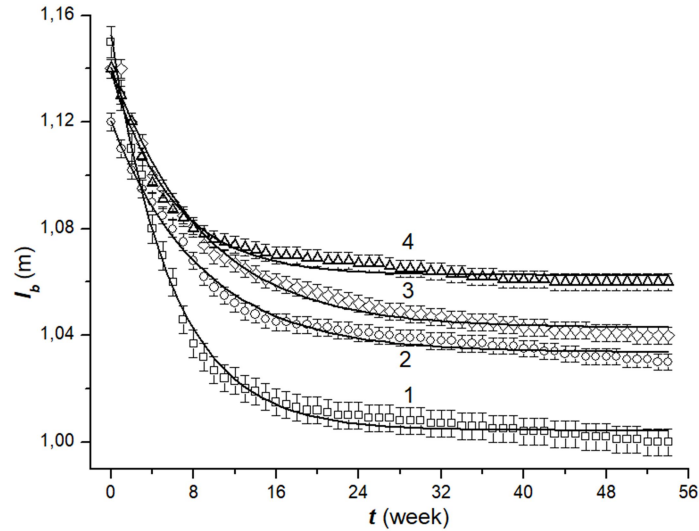


Fig. 6. Dependence  $l_b = f(t)$  for the individual 1 ( $\square$ ), 2 ( $\circ$ ), 3 ( $\diamond$ ) and 4 ( $\triangle$ ). Solid lines 1-4 illustrates the results of the calculations of hips circumference ( $l_b$ ) based on the equation  $l_b = l_{ba} + A_{b0} \exp(-k_b t)$ . For the individual 1  $l_{ba} = 1.000 \pm 0.001$  m,  $A_{b0} = 0.1483 \pm 0.0019$  m,  $k_b = (16.990 \pm 0.001) \times 10^{-2}$  (week) $^{-1}$  ( $\chi^2 = 0.001$ ,  $R^2 = 0.994$ ). For the individual 2  $l_{ba} = 1.030 \pm 0.001$  m,  $A_{b0} = 0.0868 \pm 0.0013$  m,  $k_b = (157.602 \pm 0.29) \times 10^{-2}$  (week) $^{-1}$  ( $\chi^2 = 0.001$ ,  $R^2 = 0.991$ ). For the individual 3  $l_{ba} = 1.0401 \pm 0.0001$  m,  $A_{b0} = 0.0977 \pm 0.0016$  m,  $k_b = (11.349 \pm 0.003) \times 10^{-2}$  (week) $^{-1}$  ( $\chi^2 = 0.001$ ,  $R^2 = 0.989$ ). For the individual 4  $l_{ba} = 1.061 \pm 0.001$  m,  $A_{b0} = 0.0076 \pm 0.0018$  m,  $k_b = (16.802 \pm 0.001) \times 10^{-2}$  (week) $^{-1}$  ( $\chi^2 = 0.001$ ,  $R^2 = 0.979$ ).

Fig. 7 shows dependence  $\text{WHR} = f(t)$  for the person 1 ( $\square$ ), 2 ( $\circ$ ), 3 ( $\diamond$ ) and 4 ( $\triangle$ ), calculated based on the results of  $l_p = f(t)$  and  $l_b = f(t)$  shown in Figs. 5 and 6. Curves 1, 3 and 4 in this figure demonstrate that the WHR initially increases, and for  $t_{10}=10$  weeks, reaches the maximal value  $\text{WHR} = 0.97$  (curve 1),  $\text{WHR} = 0.89$  (curves 3 and 4), and then decrease linearly to a fixed value  $\text{WHR} = 0.92$  (curve 1),  $\text{WHR} = 0.84$  (curve 3) and  $\text{WHR} = 0.85$  (curve 4). Exponential decrease in WHR is observed only for curve 2, where WHR decreases from  $\text{WHR} = 0.91$  (for  $t_0=0$ ) to  $\text{WHR} = 0.84$  (for  $t_k=54$  weeks). The Lorenz curves to curves 1, 3 and 4 were fitted. From Fig. 7 it results that a clear stabilization of WHR occurred after  $t_{c1}=t_{c2} \geq 28$  weeks for individuals 1 and 2. For individuals 3 and 4 the WHR values tend to decrease in the direction of stability, but did not reach a normal value within 54 weeks. In addition, a comparison of the results shown in Figs. 5 and 7 indicates that stabilization of WHR is coupled to the stabilization of the  $l_p$  for all individuals.

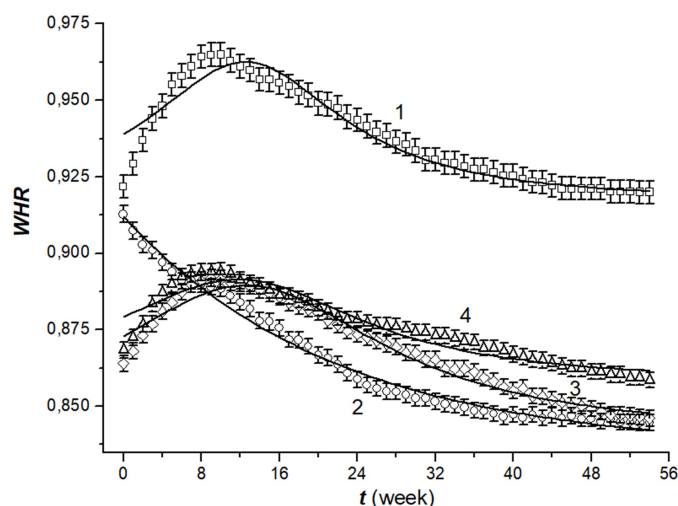


Fig. 7. Dependence  $WHR = f(t)$  for the individual 1 ( $\square$ ), 2 ( $\circ$ ), 3 ( $\diamond$ ) and 4 ( $\triangle$ ) calculated based on the test results of  $l_p = f(t)$  and  $l_b = f(t)$  listed in Fig. 5 and 6 and equation  $WHR = l_p \times l_b^{-1}$ . Solid lines 1-4 illustrate the results of the curve fitting: the Lorenz curve (curve 1) (area – 1.761, center – 12.57, width – 24.4, offset – 0.92 and height – 0.046,  $\chi^2 = 0.728$ ,  $R^2 = 0.934$ ), the exponent (curve 2)  $WHR = (WHR)_a + A_{WHR0} \exp(-k_{WHR}t)$ ,  $(WHR)_a = 0.836 \pm 0.001$  m,  $A_{WHR0} = 0.0764 \pm 0.0013$  m,  $k_{WHR} = (0.0457 \pm 0.0029) \times 10^{-2}$  (week) $^{-1}$  ( $\chi^2 = 0.0001$ ,  $R^2 = 0.988$ ), the Lorenz curve (curve 3) (area – 2.71, center – 12.55, width – 35.06, offset – 0.84 and height – 0.049,  $\chi^2 = 0.0001$ ,  $R^2 = 0.971$ ), the Lorenz curve (curve 4) (area – 1.67, center – 11.82, width – 31.31, offset – 0.86 and height – 0.034,  $\chi^2 = 0.0001$ ,  $R^2 = 0.925$ ).

The course of the curves that are demonstrated in Figs. 1-7 shows that there is a critical time ( $t_{ci}$ ,  $i=1, 2, 3, 4$ ), different for the individual curves, after which normal values of body weight ( $m_{ia}$ ) (Fig. 1), BMI ( $BMI_a$ ) (Fig. 2), fat mass ( $m_{fa}$ ) (Fig. 3), visceral fat mass ( $m_{fa}$ ) (Fig. 4) waist circumference ( $l_{pa}$ ) (Fig. 5) hips circumference ( $l_{ba}$ ) (Fig. 6) and WHR ( $WHR_a$ ) (Fig. 7) were achieved. For the curves 1 and 4, which are presented in Figs. 1-4, this critical time is  $t_{c1} = t_{c4} = 44$  weeks, for the curve 2 –  $t_{c2} = 35$  weeks, and for the curve 3 –  $t_{c3} = 46$  weeks.

Results shown in Figs. 1-6 demonstrate that constants  $k_t$ ,  $k_f$ ,  $k_{fv}$ ,  $k_{BMI}$ ,  $k_p$  and  $k_b$  characterized individual features that corresponded to the rate of the reduction of macroscopic parameters, such as total body mass ( $m_t$ ), fat mass ( $m_f$ ), visceral fat mass ( $m_{fv}$ ), BMI, waist circumference ( $l_p$ ) and hips circumference ( $l_b$ ), respectively. Table 3 demonstrate that constants  $k_t$ ,  $k_{BMI}$ ,  $k_f$ ,  $k_{fv}$  and  $k_{pi}$  can be determined for each individual and these constants fulfil the following condition (within the uncertainty of measurement)

$$k_t = k_{BMI} = k_f = k_{fv} = k_p = k_i \quad (15)$$

where  $i = 1, \dots, 4$ .

Tab. 3. Values of reduction constants of total body mass ( $k_t$ ), BMI ( $k_{BMI}$ ), fat mass ( $k_f$ ), visceral fat mass ( $k_{fv}$ ), waist circumference ( $k_p$ ), hips circumference ( $k_b$ ),  $k_i$  – the arithmetic mean of the  $k_t$ ,  $k_f$ ,  $k_{fv}$  and  $k_{pi}$  for individual 1, 2, 3 and 4.

Individual $i$	$k_t = k_{BMI}$ $\times 10^2$ ((week) <sup>-1</sup> )	$k_f \times 10^2$ ((week) <sup>-1</sup> )	$k_{fv} \times 10^2$ ((week) <sup>-1</sup> )	$k_{pi} \times 10^2$ ((week) <sup>-1</sup> )	$k_i \times 10^2$ ((week) <sup>-1</sup> )	$k_{bi} \times 10^2$ ((week) <sup>-1</sup> )
1	5.70	7.14	6.82	5.76	6.15±0.33	16.99
2	8.64	7.75	8.05	7.30	7.72±0.27	157.60
3	3.87	3.17	3.20	2.47	2.94±0.27	11.35
4	3.77	3.40	3.39	3.20	3.36±0.11	16.80

The condition presented above is the result of coupling the reduction processes of total body mass with reduction of BMI, total fat mass, visceral fat mass and waist circumference. Furthermore,  $k_2 > k_1 > k_4 > k_3$ , wherein  $k_2$  is insignificantly greater than  $k_1$  and  $k_4$  is insignificantly greater than  $k_3$ , whereas  $k_2$  and  $k_1$  are 2 fold greater than  $k_4$  and  $k_3$ . Therefore, this condition can be written as  $k_2 \approx k_1 > k_4 \approx k_3$ . Individuals 1 and 2 are men, whereas 3 and 4 are women, therefore  $k$  constants value is strongly linked to a sex of the individuals. In contrast, various relationships between the coefficients  $k_i$  and  $k_{bi}$  did not depend on a gender of the subjects. It can merely be written that  $k_i < k_{bi}$  ( $i = 1, \dots, 4$ ). This relationship indicates that there was no coupling between the processes of reduction of total body mass with reduction of BMI, total fat mass, total visceral fat mass and waist circumference with the process of reduction of hips circumference.

The results presented in this paper show that described nutrition regime resulted in reduction of fat mass (total and visceral), which is revealed as reduction of total body mass, as well as waist and hips circumference. Fat mass decreased exponentially. It seems that the coefficient  $k_e$  which occurs in the Eq. (13) is a measure of inter-individual variability and its value is  $\sim 2$  fold higher for men than for women (Table 3). In addition, it can be noted that the  $k_p$  coefficient calculated based on the measurements of waist circumference ( $l_p$ ) has a similar value (within the measurement uncertainty) as coefficients  $k_f$ ,  $k_m$  and  $k_{fv}$ . Therefore, the measurements of waist circumference correspond well with the measurements of total body mass, fat mass and visceral fat mass.

To describe the process of removing substrate of the human body Michaelis-Menten equation is often used [13, 4]. For processes of reduction anthropometric parameters considered in the paper the equation we will write in the form

$$\frac{dX_e}{dt} = -\frac{v_{\max} X_e}{K_m + X_e} \quad (16)$$

where  $v_{\max} = (dX_e/dt)_{\max}$  – maximal reduction speed of anthropomorphic parameter  $X_e$ ,  $K_m$  – Michaelis-Menten constant, which quantifies the anthropometric parameter value at which the rate of the reduction process of this parameter is equal to half of the  $v_{\max}$ .

To discuss the usefulness of the Eq. (16) to describe the process of reducing  $X_e$ , is enough to compare the Eqs. (9) and (16) and check whether there is a relationship

$$k_e = \frac{v_{\max}}{K_m + X_e} \quad (17)$$

The results described in paper indicate that a process of reduction anthropometric parameters is coupled to the reduction of fat mass ( $m_f$ ), contained in a non-uniformly flattened adipose tissue. Accordingly, the analysis of Eq. (17) we can be limited to calculation of  $k_f$ , assuming  $v_{\max} = v_{f\max} = (dm_f/dt)_{\max}$ ,  $K_m = K_{mf}$  oraz  $X_e = m_{fa}$ . In order to determine  $v_{f\max}$  and  $K_{mf}$  we use the experimental results shown in Fig. 3 and the method of Lineweaver-Burk [Moody et al. 1974; Han and Lavenspiel 1988]. Lineweaver-Burk method is based on the linear curve fitting in the experimental dependence described with  $\Delta t/(X_{e0} - X_e) = f(1/X_e)$  equation to acquire values of  $1/K_m$  and  $1/v_{\max}$  from the fitted curve. To obtain  $k_e$  the values of  $K_m$  and  $v_{\max}$  are considered in Eq. (17).

The results of the calculations of  $v_{f\max}$ ,  $K_{mf}$  and  $k_{ec}$  are summarized in Table 4. The table shows that for the individual 1  $k_{fc} = 0.49k_f$ , for the individual 2  $k_{fc} = 0.65k_f$ , for the individual 3  $k_{fc} = 0.94k_f$  and for the individual 4  $k_{fc} = 0.2k_f$ . Hence it follows that only for the individual 3 it can be assumed that  $k_{fc} \approx k_f$ . For the rest of the participants  $k_{fc} < k_f$ , wherein for the individual 4  $k_{fc} \ll k_f$ . It means that using Michaelis-Menten type equation to describe the process of reducing the fat content in the human fat tissue is problematic.

Tab. 4. Values of maximal reduction speed of fat mass ( $v_{f\max}$ ), Michaelis-Menten constant ( $v_{f\max}$ ), normal fat mass ( $m_{fa}$ ), reduction constant of fat mass ( $k_{fc}$ ) calculated based on Eq. (17), reduction constant of fat mass ( $k_f$ ) for individual 1, 2, 3 and 4.

Individual <i>i</i>	$v_{f\max}$ (kg (week) <sup>-1</sup> )	$K_{mf}$ (kg)	$m_{fa}$ (kg)	$k_{fc} \times 10^2$ ((week) <sup>-1</sup> )	$k_f \times 10^2$ ((week) <sup>-1</sup> )	$k_{fc}/k_f$
1	2.92	73.14	10.50	3.49	7.14	0.49
2	8.44	160.0	6.81	5.06	7.75	0.65
3	3.20	98.07	9.64	2.97	3.17	0.94
4	0.52	59.03	17.43	0.68	3.40	0.20

Low-sugar diet leads to reduction of anthropometric parameters such as total body mass, total fat mass, visceral fat mass, waist and hip circumference. Applied diet and a proper eating regime satisfied the hunger. Importantly, the reduction of anthropometric parameters is long-lasting. In this study, the normal body mass was defined as body mass, for which BMI is lower than  $24.9 \text{ kg/m}^2$ . However, achieving  $\text{BMI} < 24.9 \text{ kg/m}^2$  does not necessarily mean that the persons achieved body mass accepted by the individual and/or a doctor. The mass reduction may be continued for both aesthetic and the health purposes. Our results show that body mass and other anthropometric parameters decline substantially slower when they reach normal values.

## Conclusions

1. Anthropometric parameters decline according to the equation of exponent. There is a critical time ( $t_{ci}$ ), when normal body mass with  $\text{BMI} < 24.9 \text{ kg/m}^2$  is achieved. It ranges between 35 weeks  $\leq t_c \leq 46$  weeks for the four individuals.
2. The reduction of anthropometric parameters can be described by constants  $k_t$ ,  $k_f$ ,  $k_{fv}$ ,  $k_{BMI}$ ,  $k_p$  and  $k_b$ , that are present in the particular exponent equations that correspond to the rate of the reduction of macroscopic parameters, such as total body mass ( $m_t$ ), fat mass ( $m_f$ ), visceral fat mass ( $m_{fv}$ ), BMI, waist circumference ( $l_p$ ) and hips circumference ( $l_b$ ), respectively. The values of constants  $k_t$ ,  $k_{BMI}$ ,  $k_f$ ,  $k_{fv}$  and  $k_p$  are equal and characteristic for each of the four individuals.

## Acknowledgment

This study was supported by National Science Centre, Poland [DEC-2012/05/B/ST6/03472].

## References

- [1] Duren D.L., Sherwood R.J., Czerwinski S.A., Lee M., Choh A.C., Siervogel R.M., Chumlea W.C., Body composition methods: comparisons and interpretation, [in.] *Journal of Diabetes Science and Technology*, Vol. 2, 2008, p. 1139–1146, DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/193229680800200623>
- [2] Ellis K.J., Human body composition: in vivo methods, [in.] *Physiological Reviews*, Vol. 80, 2000, p. 649–680, DOI: <http://dx.doi.org/10.1152/physrev.2000.80.2.649>

- 
- [3] Flegal K.M., Carroll M.D., Kit B.K., Ogden C.L., Prevalence of obesity and trends in the distribution of body mass index among US adults, 1999–2010, [in.] *JAMA*, Vol. 307, 2012, p. 491–497, DOI: <http://dx.doi.org/10.1001/jama.2012.39>
- [4] Han K., Lavenspiel O., Extended monod kinetics for substrat, product and cell inhibition, [in.] *Biotechogy and Bioengineering*, Vol. 32, 1988, p. 430–437, DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/bit.260320404>
- [5] Heindel J.J., Newbold R., Schug T.T., Endocrine disruptors and obesity, [in.] *Nature Reviews Endocrinology*, Vol. 11, 2015, p. 653–661; DOI: <http://dx.doi.org/10.1038/nrendo.2015.163>
- [6] Johnson R.J., Segal M.S., Sautin Y., Nakagawa T., Feig D.I., Kang D-H., et al., Potential role of sugar (fructose) in the epidemic of hypertension, obesity and the metabolic syndrome, diabetes, kidney disease, and cardiovascular disease, [in.] *The American Journal of Clinical Nutrition*, Vol. 86, 2007, p. 899–906.
- [7] Johnson R.J., Stenvinkel P., Martin S.L., Jani A., Sánchez-Lozada L.G., Hill J.O., Lanaspa M.A., Redefining metabolic syndrome as a fat storage condition based on studies of comparative physiology, [in.] *Obesity*, Vol. 21, 2013, p. 659–664, DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/oby.20026>
- [8] Kishore B.K., Obesity: the mother of all diseases, <http://www.atlantadunia.com/Dunia/health/Articledetail.aspx?q=4> [accessed 26.01.18]
- [9] Krakauer N.Y., Krakauer J.C., A new body shape index predicts mortality hazard independently of body mass index, [in.] *PLoS One*, Vol. 7, 2012, p. e39504, DOI: <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0039504>
- [10] Kyle U.G., Bosaeus I., De Lorenzo A.D., Deurenberg P., Elia M., Gómez J.M., Heitmann B.L., et al. (2004): Bioelectrical impedance analysis-part I: review of principles and methods. *Clin. Nutr.* 23, 1226–1243, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.clnu.2004.06.004>
- [11] Liu H., Huang D., McArthur D.L., Boros L.G., Nissen N., Heaney A.P., Fructose induces transketolase flux to promote pancreatic cancer growth, [in.] *Cancer Research*, Vol. 70, 2010, p. 6368–6376.
- [12] Liu Y.J., Araujo S., Recker R.R., Deng H.W., Molecular and genetic mechanisms of obesity: implications for future management, *Current Molecular Medicine*, Vol. 3, 2003, 325–340, DOI: <http://dx.doi.org/10.2174/1566524033479735>
- [13] Moody F.G., Ridders L.F., Aldrete J.S., Estimation of the funtianol reverse of human liver, [in.] *Annales of Surgery*, Vol. 180, 1974, 592–598, DOI: <http://dx.doi.org/10.1097/00000658-197410000-00024>

- 
- [14] Ritchie J.D., Miller C.K., Smiciklas-Wright H., Tanita foot-to-foot bioelectrical impedance analysis system validated in older adults, [in.] *Journal of American Dietetic Association*, Vol. 5, 2005, p. 1617–1619, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jada.2005.07.011>
- [15] Sánchez-Lozada L.G., Tapia E, Jiménez A., Bautista P., Cristóbal M., Nepomuceno T., et al., Fructose-induced metabolic syndrome is associated with glomerular hypertension and renal microvascular damage in rats, [in.] *Am. J. Physiol. Renal. Physiol.* Vol. 292, 2007, p. 423–429, DOI: <http://dx.doi.org/10.1152/ajprenal.00124.2006>
- [16] Shermer M., How science can inform ethics and champion sentient beings, [in.] *Scientific American*, Vol. 312, 2015, p. 16.
- [17] Swinburn B.A., Sacks G., Hall K.D., McPherson K., Finegood D.T., Moodie M.L., Gortmaker S.L., The global obesity pandemic: shaped by global drivers and local environments, *Lancet*, Vol. 378, 2011, p. 804–814, DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736\(11\)60813-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736(11)60813-1)
- [18] Taubes G., Which one will make you fat? [in.] *Scientific American*, Vol. 309, 2013, p. 60–65, DOI: <http://dx.doi.org/10.1038/scientificamerican0913-60>
- [19] Vandevijvere S., Carson C.C., Hall K.D., Umali E., Swinburn B.A., Increased food energy supply as a major driver of the obesity epidemic: a global analysis, [in.] *Bulletin of the World Health Organisation*, Vol. 93, 2015, p. 446–456, DOI: <http://dx.doi.org/10.2471/BLT.14.150565>
- [20] World Health Organisation. Fact sheets: Obesity and overweight, <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs311/en> [accessed 26.01.19].





Aleksander Gańsiorski<sup>1</sup>, Zdzisław Posyłek<sup>1</sup>, Andrzej Roman<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Wydział Elektryczny,*

*Politechnika Częstochowska,*

*aleja Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa*

<sup>2</sup>*Instytut Techniki i Systemów Bezpieczeństwa,*

*Akademia im. Jana Długosza,*

*aleja Armii Krajowej 13/15, 42-200 Częstochowa*

**SYMULACJA NUMERYCZNA RZECZYWISTEJ BATERII  
KONDENSATOROWEJ PRACUJĄCEJ W UKŁADACH  
WIELKIEJ CZĘSTOTLIWOŚCI W ZASTOSOWANIU  
DO FALOWNIKÓW.  
CZĘŚĆ I. KONDENSATORY DLA BATERII WIELKIEJ  
CZĘSTOTLIWOŚCI**

**Streszczenie.** W części I pracy pokazano rzeczywiste problemy związane z zastosowaniem kondensatorów wielkiej częstotliwości w układach rezonansowych falowników oraz przedstawiono kondensator jako element obwodu. Pokazano historyczne początki budowy pierwszych kondensatorów oraz pierwsze ich zastosowania w Częstochowie. Omówiono również sposób budowy i wielkości materiałowe stosowane do produkcji pojedynczych kondensatorów, zwłaszcza wykonanych z tworzyw, łączonych w baterie dla układów wielkiej częstotliwości stosowanych w wykonawczych (roboczych) układach rezonansowych falowników.

**Słowa kluczowe:** kondensator, wielka częstotliwość, układ rezonansowy falowników.

**NUMERICAL SIMULATION OF THE ACTUAL CAPACITOR  
BANK WORKING IN HIGH FREQUENCY SYSTEMS  
FOR USE IN INVERTERS.  
PART I. CAPACITORS FOR HIGH FREQUENCY BANKS**

**Summary.** Part I of the paper shows the real problems associated with the use of high-frequency capacitors in resonance systems of inverters and the capacitor is shown as a

circuit element. The historical beginnings of the construction of the first capacitors and the first historical applications in Czestochowa are shown. The method of construction and material sizes used for the production of single capacitors, especially plastic, are combined in banks for high frequency circuits used in executive (working) resonant systems of inverters.

**Keywords:** capacitors, high frequency, resonant systems of inverters.

## Wstęp

Falowniki są to urządzenia służące do przekształcania prądu stałego na prąd przemienny o częstotliwości dostosowanej do właściwości odbiornika energii, a niezwiązanej z częstotliwością sieci zasilającej, przy czym energię prądu stałego falownik pobiera z prostownika sieciowego. Stosowane są one powszechnie między innymi w technice ultradźwiękowej, grzejnictwie indukcyjnym, napędach elektrycznych, układach przetwarzania napięć. Z jednej strony poszukuje się takich rozwiązań technicznych dla tych urządzeń, które są proste w konstrukcji, sprawne w działaniu i funkcjonalne, a z drugiej strony odbiorcy chcą otrzymać produkt niezawodny, tani w eksploatacji i dobrze dostosowany do ich potrzeb. Wykorzystując zjawisko rezonansu po stronie roboczej, unika się generowania zakłóceń od wyższych harmonicznych po stronie zasilania. Podwyższając częstotliwości przełączeń, uzyskuje się polepszenie jakości przekształcania energii i poprawę własności dynamicznych przekształtnika. Lepsze możliwości przekazywania energii elektrycznej daje rezonansowy układ szeregowy i dlatego jest on częściej stosowany. Ponieważ częstotliwości pracy falowników zbliżone są do dolnego pasma fal radiowych, dlatego jako zasadę przyjęto, aby nie osiągała ona częstotliwości pośredniej 455 [kHz], stosowanej w radiotechnice [4].

Aby uzyskać maksymalne prądy i jak najmniejsze straty mocy w falownikach stosuje się obwód rezonansowy szeregowy, zawierający skupione elementy indukcyjne i pojemnościowe. W czasie wieloletnich badań okazało się, że elementem najczęściej ulegającym awarii w części wykonawczej falownika jest zespół baterii kondensatorów wysokiej częstotliwości, pracujący w trudnych warunkach. Od lat poszukuje się takich rozwiązań technicznych i technologicznych aby usunąć ten podstawowy mankament falowników, jakim są powtarzające się uszkodzenia baterii kondensatorów w wykonawczym roboczym układzie rezonansowym. Tym zagadnieniom została poświęcona niniejsza praca.

## Kondensator jako element obwodu elektrycznego

Kondensatory są to elementy elektryczne, których parametrem użytkowym jest pojemność  $C$  wyrażana w faradach [F]. W ogólnym, najprostszym przypadku stanowi on układ dwóch powierzchni przewodzących, zwanych *okładkami*, odizolowanych od siebie dielektrykiem. Kondensator służy do gromadzenia ładunków elektrycznych, przy czym w wyniku doprowadzenia napięcia stałego na jego okładkach pojawiają się ładunki równe co do wartości, lecz o przeciwnych znakach. Zmiany napięcia doprowadzonego do kondensatora powodują zmiany ładunku na okładkach kondensatora, w wyniku tego przez kondensator przepływa prąd elektryczny. Pojemność kondensatora określają: rozmiary przewodzących powierzchni (okładek), przenikalność dielektryczna:

$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$  [F/m] (gdzie  $\varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9}$  [F/m] – przenikalność elektryczna próżni;  $\varepsilon_r$  – względna przenikalność elektryczna) oraz grubość materiału dielektrycznego wypełniającego przestrzeń między tymi okładkami [1]. Proces, w czasie którego zachodzi gromadzenie się ładunku, nazywany jest ładowaniem kondensatora. Trwa on do momentu, w którym potencjał pomiędzy okładkami osiągnie taką wartość, jak napięcie ładowania. Ładunek pojedynczej okładki nazywany jest ładunkiem kondensatora. Doprowadzenie do okładek rzeczywistego kondensatora, napięcia harmonicznego lub o przebiegu odkształconym od sinusoidy powoduje przepływ przez kondensator prądu zmieniającego swoją wartość i kierunek, co może być przyczyną jego nagrzewania się. Kondensator, przy przepływie prądu przemiennego, stanowi reaktancję pojemnościową  $X_c$  wyrażaną w omach [ $\Omega$ ], zależną od odwrotności pulsacji  $\omega = 2\pi f$  (gdzie  $f$  to częstotliwość w hercach [Hz]) i odwrotności pojemności  $C$  [1].

Przenikalność dielektryczna ujawnia się, gdy atomy materiału dielektrycznego umieszczone w polu elektrycznym ulegają polaryzacji w wyniku odkształcenia orbit elektronów na zewnętrznych powłokach na skutek działania pola elektrycznego. Powstają tak zwane dipole, które mogą się obracać i przyjmują ten sam kierunek, jaki ma w danej chwili pole elektryczne generowane przez okładki kondensatora. Przy szybkich zmianach pola elektrycznego dipole obracają się równie szybko, co powoduje grzanie się dielektryka tworzącego kondensator [2]. Wytrzymałością elektryczną dielektryka kondensatora nazywa się maksymalną wartość natężenia pola elektrycznego, która jeszcze nie niszczy własności izolacyjnych dielektryka. Znacząca część parametrów kondensatora uzależniona jest od temperatury oraz częstotliwości i napięcia, dlatego w zależności od dopuszczalnego zakresu temperatury, częstotliwości pracy oraz wartości stosowanego napięcia należy wybierać kondensator z odpowiednim dielektrykiem.

W celu osiągnięcia potrzebnej wartości pojemności, w zależności od tego, jakie kondensatory produkowane przemysłowo są w dyspozycji, można je łączyć na różne sposoby w baterie, mające wiele praktycznych zastosowań w elektrotechnice, energoelektronice, energetyce i telekomunikacji.

### Biblijny kondensator, budowa pierwszych kondensatorów

Wybitny polski inżynier elektryk, profesor i doctor honoris causa Politechniki Warszawskiej Janusz Lech Jakubowski (ur. 1905 r.; zm. 2000 r.) przypuszczał, wypowiadając to również publicznie, że opisana w Biblii Arka Przymierza (Rys. 1) była pierwszym kondensatorem elektrycznym [9].



Rys. 1. Wyobrażenie Arki Przymierza (pochodzenie rysunku: Wikipedia, wolna encyklopedia).

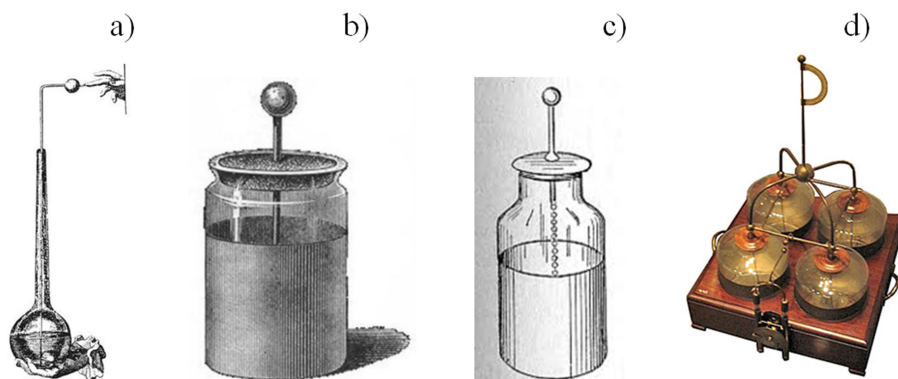
Przepis na budowę Arki Przymierza był następujący [8, Stary Testament, Księga Wyjścia, Przepisy o zorganizowaniu kultu, Przybytek i jego sprzęty. Arka, Rozdział 25, 10-15, 17-22]: (10) *I uczynią arkę z drzewa akacjowego; jej długość będzie wynosiła dwa i pół łokcia; jej wysokość półtora łokcia i jej szerokość półtora łokcia.* (11) *I pokryjesz ją szczerym złotem wewnątrz i zewnątrz, i uczynisz na niej dokoła złote wieńce.* (12) *Odlejesz do niej cztery pierścienie ze złota i przymocujesz je do czterech jej krawędzi: dwa pierścienie do jednego jej boku i dwa do drugiego jej boku.* (13) *Rozkażesz zrobić drążki z drzewa akacjowego i pokryjesz je złotem.* (14) *I włożysz drążki te do pierścieni po obu bokach arki celem przenoszenia jej.* (15) *Drążki pozostaną w pierścieniach arki*

*i nie będą z nich wyjmowane. I dalej podano, jak powinna wyglądać przeblagalnia z aniołami (cherubami) umieszczona na pokrywie Arki Przymierza: (17) I uczynisz przeblagalnię ze szczerego złota [...] (18) dwa też cheruby wykujesz ze złota. Uczynisz zaś je na obu końcach przeblagalni. (19) Jednego cheruba uczynisz na jednym końcu, a drugiego cheruba na drugim końcu przeblagalni. Uczynisz cheruby na końcach górnych. (20) Cheruby będą miały rozpostarte skrzydła ku górze i zakrywać będą swymi skrzydłami przeblagalnię, twarze zaś będą miały zwrócone jeden ku drugiemu. I ku przeblagalni będą zwrócone twarze cherubów. (21) Umieścisz przeblagalnię na wierzchu arki, w arce zaś złożysz Świadectwo, które dam tobie. (22) Tam będę się spotykał z tobą i sponad przeblagalni i spośród cherubów, które są ponad Arką Świadectwa, będę z tobą rozmawiał o wszystkich nakazach, które dam za twoim pośrednictwem Izraelitom.* Złota blacha wnętrza skrzyni stanowiła jedną, a złota blacha na zewnątrz – drugą okładkę kondensatora. Suche drewno akacjowe izolujące okładziny, aby utrzymać ciężar złotej blachy, miało dużą grubość i dlatego tak powstały kondensator można było naładować do wysokiego napięcia. Po połączeniu blachy wewnętrznej z przewodzącym podłożem znajdującym się wokół izolowanej od podłoża Arki, elektryzacji dokonywano prawdopodobnie za pomocą polerowania fragmentami futra (przez kapłanów) zewnętrznej powierzchni skrzyni, przy czym sandały z grubą drewnianą podeszwą dobrze izolowały ich od przewodzącej powierzchni podłogi. Dotknięcie Arki Przymierza mogło być śmiertelnie groźne dla osób niewtajemniczonych. O skuteczności działania Arki Przymierza opowiada historia synów Aarona, którzy ofiarowali inny ogień, niż był im nakazany – ze śmiertelnym skutkiem [8, Stary Testament, Księga Kapłańska, Przestępstwo Synów Aarona. Dodatkowe Przepisy, Śmierć Nadaba i Abihu, Rozdział 10. 1–2]: (1) *Nadab i Abihu, synowie Aarona, wzięli każdy swoją kadzielnicę, nabrali do niej ognia, włożyli na niego kadzidło i ofiarowali przed Panem ogień inny, niż był im nakazany. (2) Wtedy ogień wyszedł od Pana i pochłonął ich. Umarli przed Panem.* Innym przykładem jest historia 250 mężów zbuntowanych przeciw władzy Mojżesza [8, Stary Testament, Księga Liczb, Ukaranie buntowników, Rozdział 16, 35], na których: (35) *Wtedy wypadł ogień od Pana i pochłonął dwustu pięćdziesięciu mężów, którzy ofiarowali kadzidło.* W obu pokazanych przypadkach ukarani gromadzą się wokół *przeblagalni*, przynoszą kadzidła z niewłaściwym ogniem i pojawia się ogień, który pochłania ludzi używających w pobliżu Arki Przymierza tych kadzideł.

Kondensator był pierwszym elementem obwodu elektrycznego zbudowanym przez człowieka, ale na początek trzeba było stworzyć źródło produkujące ładunki elektryczne. Niemiecki fizyk, wynalazca i budowniczy Otto von Guericke (ur. 1602 r., zm. 1686 r.), w latach 1646–1676 burmistrz Magdeburga, w 1662 roku skonstruował maszynę elektrostatyczną, będącą rodzajem prostego generatora elektrostatycznego, działającego na zasadzie indukcji elektrostatycznej. Maszyna była zbudowana z topionej siarki uformowanej w kulę

umieszczoną między deskami, którą można było obracać połączoną z nią korbą. Pocieranie za pomocą odpowiedniej rękojeści obracającej się kuli elektryzowało ją, a kula przyciągała lekkie przedmioty: jak papier, słomki, łodygi traw, małe cząsteczki złota, płatki srebra. Za pomocą lnianej nici, nie dłuższej od trzech stóp, dotykającej kuli, właściwość ta mogła być przekazywana na odległość. Był to pierwszy przypadek celowego przekazywania ukierunkowanej energii elektrycznej (w zasadzie elektrostatycznej) na odległość [10]. Maszynę tę wkrótce zmodernizowano. Angielski inżynier i wynalazca James Wimshurst (ur. 1832 r.; zm. 1903 r.) skonstruował powszechnie dziś używaną w pokazach fizyki szkolnej maszynę elektrostatyczną, składającą się z dwóch tarcz izolacyjnych, obracanych w przeciwnych kierunkach. Na zewnętrznych stronach tych tarcz nałożono metalowe segmenty, które ulegały elektryzacji. Na osi obrotu tarcz, po obu stronach, umocowano metalowe pręty, zaopatrzone na końcach w metalowe szczotki, które w czasie ruchu dotykały segmentów. Na wysokości poziomej średnicy tarcz umocowano metalowe pręty, opatrzone ostrzami (nazywanymi *grzebieniami*), które były zwrócone do obu tarcz, lecz ich nie dotykały. Ostrza te zbierały ładunki, doprowadzone do iskiernika. Iskiernik stanowiły dwie kulki na prętach metalowych. Podczas obracania tarcz powstawały ładunki, zbierane przez grzebienie i przenoszone do iskiernika. Po wystąpieniu nadmiaru ładunków, między kulkami iskiernika powstawała duża różnica potencjałów, powodująca przeskok iskry [10].

Niemiecki duchowny, prawnik, uczonek Ewald Jürgen Georg von Kleist (ur. 1700 r., zm. 1748 r.), w latach 1722–1747 dziekan katedry w Kamieniu Pomorskim, był wynalazcą *butelki Kleista*” (niem. *die Kleistische Flasche*), którą zbudował już w październiku 1745 roku (rys. 2a, 2b). Ewald von Kleist po postawieniu na cynowym talerzu naelektryzowanej szklanki wody i dotknięciu talerza doznał silnego uderzenia, a to nasunęło mu myśl o kondensowaniu ładunku. Po licznych doświadczeniach, 11 października 1745 roku przeprowadził udaną próbę z naczyniem ze szkła wypełnionym wodą i zatkanym korkiem, który był przebity na wylot miedzianym prętem zakończonym kulką [7]. Butelkę ładowano elektrycznie, na przykład pocierając pręt i kulkę ręką lub jedwabiem. Poprzez pręt oraz wodę ładunek dostawał się do środka naczynia i gromadził się na jego wewnętrznej ścianie. Pojemność elektryczną butelki można było znacznie zwiększyć, pokrywając szkło od zewnątrz i wewnątrz znanym już wtedy staniolem (cynfolią). Sukcesywne badania wynalazcy prowadzone na prowincji, w oddaleniu od stolic państw i ośrodków naukowych, w czasie trwającej w Niemczech wojny, były mało znane i na ogół Ewald von Kleist nie jest wymieniany jako pierwszy odkrywca kondensatora.



Rys. 2. a) *butelka Kleista* – rysunek wykonany ręką odkrywcy, b) *butelka Kleista* ze szkłem oblepionym cynfolią, c) *butelka lejdejska*, d) bateria butelek lejdejskich. (pochodzenie rysunków: Wikipedia, wolna encyklopedia).

O dokonanym odkryciu Ewald von Kleist poinformował listownie swojego kolegę z czasów gimnazjalnych, diakona w kościele św. Jana w Gdańsku, Pawła Świetlickiego (ur. 1699 r.; zm. 1756 r.), członka miejscowego Towarzystwa Przyrodniczego. Z kolei Paweł Świetlicki zainteresował wynalazkiem innego gdańszczanina, Daniela Gralatha (ur. 1708r.; zm. 1767 r.), także członka Towarzystwa Przyrodniczego. D. Gralath nawiązał kontakt z Ewaldem von Kleistem i samodzielnie rozpoczął budowę *butelki Kleista*, a następnie powtórzył doświadczenie 5 marca 1746 roku i opisał te eksperymenty oraz wyjaśnił działanie urządzenia. Zmierzył również siłę działającą między naładowanymi okładkami butelki, na 40 lat przed badaniami Charles Augustina de Coulomba (ur. 1736 r.; zm. 1806 r.) [10]. Wadą odkryć Daniela Gralatha było to, że zwykle ograniczał się do jakościowego opisu zjawisk, pomijając ich opis ilościowy, czyli nie potrafił badanych przez siebie zjawisk opisywać za pomocą wzorów fizycznych i matematycznych. Badania prowadził w Gdańsku, w siedzibie Towarzystwa Przyrodniczego, w Zielonej Bramie. W swojej trzypomowej książce *Historia elektryczności* (kolejne tomy opublikowane zostały w latach 1747, 1754 i 1756) omawiającej historię badań nad elektrycznością od starożytnych Greków do swoich czasów, zawarł wyjaśnienie – zasadę działania *butelki Kleista*. Napisał również bibliografię wszystkich dzieł poświęconych elektrostatyce pt. *Biblioteka elektryczna*.

W styczniu 1746 roku duński matematyk, filozof, lekarz i astrolog, profesor miejscowego uniwersytetu Pieter (Petrus) van Musschenbroek (ur. 1692 r., zm. 1761 r.) i jego asystent laboratoryjny Andreas Cuneus (ur. 1712 r., zm. 1778 r.) w Leyden w Holandii wynaleźli kondensator zwany *butelką lejdejską* (*Leyden jar*). Wynalazek dokonany został przypadkiem podczas ładowania elektrycznej butelki z wodą, którą mokrą ręką trzymał wynalazca, otrzymując bardzo

mocny udar (porażenie) z przeskokiem iskry elektrycznej (Rys. 2c). Zrealizowana *butelka lejdejska* była to szklana butelka, której powierzchnie – wewnętrzna i zewnętrzna – pokryte były izolowaną folią metalową, stanowiącą okładki kondensatora. Przez korek w naczyniu był spuszczonej do butelki łańcuszek, co umożliwiało napełnianie butelki ładunkiem elektrycznym za pomocą wirującej maszyny elektrostatycznej. Wkrótce okazało się, że doświadczenia z udziałem *butelki lejdejskiej* są niebezpieczne dla życia badaczy. Cywilizowany świat za pomocą listów został poinformowany o odkryciu profesora i dlatego nazwa wynalazku związana została z Leyden, miastem drugiego wynalazcy Pietera van Musschenbroeka. [10].

Pojemność *butelki lejdejskiej* wynosi zwykle od kilkuset do kilku tysięcy pikofarad, a napięcie przebicia sięga do 20 kilowolt. W celu zwiększenia pojemności użytkowej tych kondensatorów, *butelki lejdejskie* były łączone w baterie umieszczane zwykle w drewnianych skrzynkach (Rys. 2d).

W 1749 roku angielski lekarz i fizyk, badacz elektryczności William Watson (ur. 1715 r.; zm. 1787 r.) za pomocą zmodyfikowanej *butelki lejdejskiej* z sukcesem przetransmitował energię elektryczną po drucie przeciągniętym nad Tamizą i po przeciwnej stronie rzeki wywołał iskrę elektryczną.

*Butelka lejdejska* okazała się prawdziwą sensacją w międzynarodowej społeczności naukowej i w badaniach była stosowana do końca XIX wieku. Przykładem niech będzie amerykański polityk, drukarz, uczonec, filozof oraz wolnomularz Benjamin Franklin (ur. 1706 r.; zm. 1790 r.). Prowadząc w 1752 roku badania nad piorunami, „złapał” prąd z błyskawicy do butelki lejdejskiej i dowiódł, że piorun jest powiązany z wyładowaniami elektrycznymi w atmosferze [10].

*Butelka lejdejska* choć skomplikowana w budowie i niebezpieczna w obsłudze była zapowiedzią powstania współczesnego kondensatora i była pierwszym krokiem do okiełznania elektryczności. Jednak natura i właściwości elektryczności pozostawały dla naukowców niejasne do roku 1897, kiedy fizyk angielski, laureat Nagrody Nobla z 1906 roku, Joseph John Thomson (ur. 1856 r.; zm. 1940 r.) odkrył elektron.

## **Pierwsze celowe zastosowanie kondensatorów w Częstochowie**

Pierwszą szkołą wyższą, funkcjonującą na terenie Częstochowy od 1671 roku, były *Studia Generali* (uniwersytet) prowadzone na Jasnej Górze, a ukierunkowane przede wszystkim na kształcenie paulinów. W 1674 roku Uniwersytet Jasnogórski otrzymał takie same prawa, jakie miały uniwersytety i akademie publiczne. Uniwersytet ten funkcjonował w murach klasztoru jasnogórskiego do 1918 roku [3].



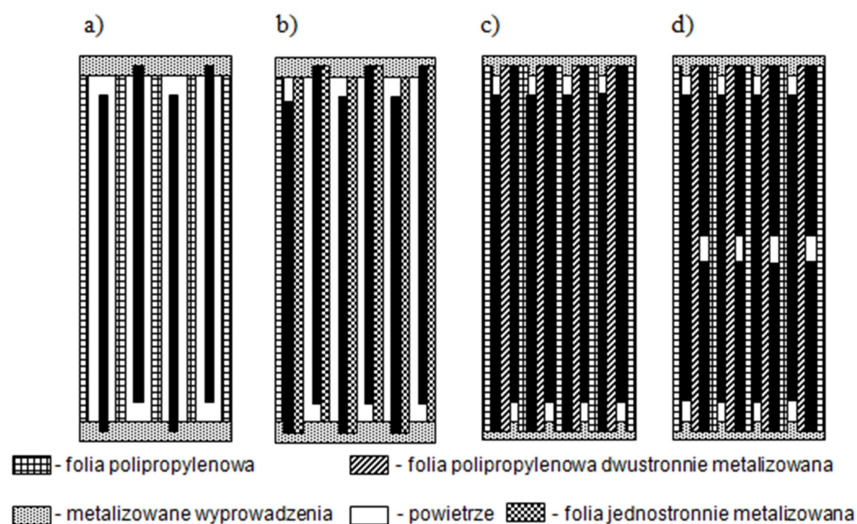
Klasztor jasnogórski usytuowany jest na około osiemdziesięciometrowym wapiennym wzniesieniu. Wieża sanktuarium jasnogórskiego, odbudowana w 1717 roku po wielkim pożarze z 16 lipca 1690 roku, miała wtedy wysokość około 89 metrów, podstawę kamienną do wysokości około 37 metrów, wyżej konstrukcję z belek drewnianych oszalowanych deskami. Drewniany hełm (wtedy najwyższej wieży w kraju) obity był blachą ołowianą z metalową kulą, na kuli umieszczono zaś metalowego kruka trzymającego w dziobie ser (znak zakonu paulinów) na jej szczycie. Będąc, od lat w dobrej komitywie z paulinami jasnogórskimi, na jesieni roku 1778, pijar ks. Józef Herman Osiński (ur. 1738 r.; zm. 1802 r.) przywiózł do Częstochowy gruby drut żelazny, baterię butelek lejdejskich w drewnianej skrzyni oraz mierniki. Założył *konduktor*, czyli gromochron (piorunochron), na szczycie wieży sanktuarium, nad metalową kulą i krukiem, i do wiosny roku 1779, przy udziale studentów Uniwersytetu Jasnogórskiego, prowadził badania ładowania baterii butelek lejdejskich w dni burzowe. Studenci Uniwersytetu Jasnogórskiego do określenia stanu naładowania baterii butelek lejdejskich stosowali elektroskopy własnej konstrukcji. Samą instalację piorunochronną podobno wykonano z użyczonego materiału i nie miała ona charakteru trwałego [3].

## Kondensatory w układach wielkiej częstotliwości

W energoelektronicznych układach wielkiej częstotliwości wykorzystywane są kondensatory niepolaryzowalne (to znaczy, że biegunowość podłączenia nie odgrywa roli). Zależnie od potrzeb stosowane są następujące typy kondensatorów: tworzywowe, mikowe i ceramiczne. Od kondensatorów tworzących takie układy energoelektroniczne najczęściej oczekuje się niskich strat w obszarze przenoszonych częstotliwości przez cały okres pracy, dużej liniowości charakterystyki (izolatory używane do budowy takich kondensatorów powinny być liniowe) oraz wysokiej stabilności termicznej. W przypadku kondensatorów używanych we współczesnych obwodach wielkiej częstotliwości istotne są również ich wymiary i kształt oraz generowane przez nie straty energii elektrycznej na promieniowanie elektromagnetyczne.

**Kondensatory tworzywowe** wykonane są z foliowego dielektryka (tworzywa sztucznego), najczęściej polipropylenu, poliestru albo polistyrenu, rzadziej poliwęglanu lub teflonu. Okładki w kondensatorach foliowych wykonuje się z cienkich folii aluminiowych bądź cynkowych, a dla kondensatorów metalizowanych – z cienkiej warstwy aluminium powstałej w wyniku próżniowego naparowania jednostronnie lub dwustronnie na folię dielektryczną. Zaletą metalizacji jest to, że przy przebiciu elektrycznym naparowany metal wyparowuje wokół miejsca przebicia i w ten sposób nie dochodzi do ewentualnego zwarcia. Powstała w wyniku procesu technologicznego taśma jest w kondensatorach

zwickowych zwijana, a w kondensatorach wielowarstwowych układana systematycznie w kolejne warstwy. Istnieje wiele różnych technik wykonywania kondensatorów, na rys. 3 pokazano przekroje wybranych z nich [6].



Rys. 3. Przedstawione schematycznie przekroje wybranych typów zwijkowych kondensatorów a) z folią metalową, b) z folią polipropylenową jednostronnie metalizowaną, c) z folią polipropylenową dwustronnie metalizowaną, d) z folią dwustronnie metalizowaną przy szeregowym połączeniu pojemności (widoczna przerwy w metalizacji na środkowej poziomej osi kondensatora)

W układach wielkiej częstotliwości istotne znaczenie ma wykonanie doprowadzeń. We wcześniejszych konstrukcjach kondensatorów foliowych doprowadzenia były wykonywane przewodem dołączonym do jednego z końców folii metalizowanej lub metalowej. Obecnie w tego typu kondensatorach na boki zwiniętych rulonów z folii metalowej metodą metalizacji natryskowej nanosi się kontakty metalowe (tak wykonane kondensatory zostały pokazane na rys. 3). Wykonane w ten sposób wyprowadzenia mają znacznie mniejsze wartości rezystancji i indukcyjności. Środkowa, wewnętrzna część kondensatora jest obszarem o częstej awaryjności, a występujące uszkodzenia spowodowane są zwykle oddziaływaniami termicznymi. Aby wyeliminować skutki tych oddziaływań, stosuje się specjalne rozwiązania konstrukcyjne kondensatorów. Na rysunku 3d pokazano rozwiązanie techniczne kondensatora, w którym zwoje są tak nawinięte, że dwa uzwojenia połączone są szeregowo. Szczelina, czyli obszar bez folii metalowej, pozwala na dobrą wymianę ciepła z otoczeniem, co zapewnia przedłużoną żywotność kondensatora w środowisku pracy wielkiej częstotliwości (rys. 4).



Rys. 4. Rozwinięta folia rzeczywistego kondensatora z rysunku 2d, widoczne dwa foliowe zwoje metalowe i szczelina powietrzna między nimi oraz szeroki zwój z folii metalowej o krawędziach nie dotykających pionowych i poziomych kontaktów metalowych

Wyprodukowany kondensator obudowany jest zwykle tworzywem sztucznym (w postaci taśmy lub kubka). Kondensatory foliowe wykonuje się również z dielektrykiem uwarstwionym (podwójnym) złożonym z folii i bibułki kondensatorowej (kondensatory foliowo-papierowe). Czasem taki kondensator umieszcza się w aluminiowej lub stalowej obudowie, którą uszczelnia się żywicą fenolową lub epoksydową.

Do zasadniczych grup obecnie stosowanych kondensatorów tworzywowych należą: kondensatory polistyrenowe, poliestrowe, poliwęglanowe i polipropylenowe. Porównanie podstawowych wartości tych materiałów podano w tablicy 1 [5].

Tablica 1. Podstawowe parametry elektryczne wybranych materiałów dielektrycznych [5]

Rodzaj dielektryka	Względna przenikalność dielektryczna $\epsilon_r$	Współczynnik stratności $tg\delta$	Dopuszczalne natężenie pola elektrycznego E [kV/mm]
Powietrze	1,00058	<0,0001	3,5÷5
Papier impregnowany	3,5÷6	<0,002	30÷50
Szkło	10	<0,003	120÷140
Polipropylen	2,2	<0,0002	350
Poliester	3,3	<0,005	200
Poliwęglan	2,8	<0,001	150
Polistyren	2,6	<0,0002	100
Polifenyl	3,3	<0,0002	250
Ceramika	5÷50000	<6-12	4÷20
Mika	4÷8	<0,0004	120÷130

W kondensatorach z folią metalizowaną stosowanym dielektrykiem jest cienka folia izolacyjna, wykonana z różnych materiałów. Do najczęściej stosowanych należą: polipropylen, poliester oraz rzadziej poliwęglan. Do grupy coraz częściej stosowanych nowoczesnych materiałów dielektrycznych należy siarczek polifenyłu (PPS). W kondensatorze o niezmiennych wymiarach zastosowanie dielektryków o wzrastającej wartości względnej przenikalności dielektrycznej  $\epsilon_r$  spełnia dualną rolę, zwiększa pojemność kondensatora oraz podnosi jego wytrzymałość elektryczną. Jednak nie każdy materiał może być zastosowany w określonym typie kondensatorów. Należy również dodać, że wzrost współczynnika przenikalności dielektrycznej  $\epsilon_r$  folii zmniejsza zwykle rezystancję skrośną tego materiału oraz obniża jego wytrzymałość napięciową.

Poniżej scharakteryzowano najistotniejsze właściwości dielektryków stosowanych przy wytwarzaniu kondensatorów foliowych [5]. **Polipropylen** jest najbardziej popularnym materiałem stosowanym do budowy kondensatorów prądu zmiennego wielkiej częstotliwości. Jest trudny w obróbce mechanicznej oraz metalizacji. Jego głównymi zaletami są: niska stratność ( $tg\delta$ ), duża wytrzymałość elektryczna propylenu na przebicie, wysoka stabilność parametrów w czasie i niska absorpcja dielektryczna. **Poliester** jest także popularnym materiałem dielektrycznym. Jest łatwy w obróbce mechanicznej i metalizacji. Można z niego uzyskać bardzo cienkie folie, o grubości rzędu 1 [ $\mu\text{m}$ ]. Natomiast ma znaczną wartość strat dielektrycznych ( $tg\delta$ ), małą rezystancję izolacji oraz mniejszą wytrzymałość elektryczną i występowanie znaczącej absorpcji dielektrycznej. Do jego zalet należy wysoka dopuszczalna temperatura pracy. **Poliwęglan** umożliwia wytwarzanie cienkich folii, jest łatwy w obróbce i metalizacji. Współczynnik strat dielektrycznych przyjmuje relatywnie duże wartości. Posiada niską wytrzymałość napięciową przy wysokiej temperaturze pracy. **Polifenył (PPS)** cechuje się dużą odpornością na wysokie temperatury oraz bardzo niską stratnością, posiada dobrą stabilność parametrów w czasie. Jego podstawową wadą jest niska wytrzymałość elektryczna, co powoduje, że folie kondensatorowe muszą być grubsze, a tym samym kondensatory muszą mieć większe wymiary.

Do budowy różnych układów energoelektronicznych wielkiej częstotliwości z grupy kondensatorów tworzywowych stosowane są najczęściej kondensatory polipropylenowe. Wyróżniają się one dużą stabilnością pojemności, dużą wytrzymałością elektryczną izolacji, małym tangensem kąta stratności, małym stałym ujemnym temperaturowym współczynnikiem pojemności oraz możliwością uzyskania wąskich tolerancji produkcyjnych pojemności. Mają dość niską dopuszczalną maksymalną temperaturę pracy, wynoszącą  $+70^\circ\text{C}$ . Polipropylen daje się łatwo przerabiać na folie, a sama folia musi być poddana wstępnej obróbce, aby można ją było metalizować. Kondensatory polipropylenowe u wielu producentów noszą oznaczenie: z elektrodami z folii metalowej – KP, z elektrodami metalizowanymi – MKP. Kondensatory polipropylenowe w porówna-

niu z kondensatorami poliestrowymi i polistyrenowymi, są bardziej stabilne, mają mniejszą stratność i zbliżony zakres maksymalnej temperatury pracy.

**Kondensatory ceramiczne** w energoelektronicznych układach wielkiej częstotliwości są rzadko stosowane.

**Kondensatory mikowe** są stosunkowo drogie, produkowane są w zakresie pojemności od 1 [pF] do 0,1 [ $\mu$ F], obecnie, ze względu na swoje duże wymiary, rzadko stosowane w energoelektronicznych przemysłowych układach wielkiej częstotliwości [6]. Kondensatory mikowe, budowane są z jednej lub z kilku płytek miki z nałożonymi elektrodami metalowymi, często wykonanymi ze srebra, gdyż kondensatory te nie podlegają nagrzewaniu się przy wysokich częstotliwościach. Mika jest minerałem kopalnym występującym w Rosji, Kanadzie i Indiach, gdzie jego jakość i czystość, a tym samym przydatność do produkcji kondensatorów jest szczególnie dobra. Ma znakomite właściwości dielektryczne, jest niepalna oraz odporna na temperaturę, czynniki chemiczne i starzenie się. Ten twardy minerał po wydobyciu ze złoża ma formę tabliczkowych kryształów o pokroju pseudoheksagonalnym, dzięki dobrej łupliwości łatwo rozdzielających się na cienkie płaskie płytki, stosowane do budowy kondensatorów. Charakteryzują się niewielką wartością tangensa kąta stratności ( $tg\delta$ ) i minimalnymi zmianami pojemności wraz ze zmianami temperatury. Właściwości elektryczne, takie jak: duża rezystancja izolacji, niewielka wartość tangensa kąta stratności dielektrycznej oraz stabilność temperaturowego współczynnika pojemności, są lepsze niż nowoczesnych kondensatorów tworzywowych oraz ceramicznych. Mimo stosunkowo dużych wymiarów, kondensatory mikowe stosuje się w militarnych układach wielkiej częstotliwości, tam gdzie wymagana jest niska stratność oraz wysoka stabilność częstotliwościowa i temperaturowa, a także ściśle określony temperaturowy współczynnik zmian pojemności. Należy dodać, że w przypadku układów przemysłowych, w których istotne znaczenie ma miniaturyzacja urządzeń, zamiast kondensatorów mikowych stosuje się kondensatory tworzywowe.

## Literatura

- [1] Bierne kondensatory, seria: Elementy elektroniczne, Wydawnictwo A & Z, 1995, stron 154, ISSN 1234-1053.
- [2] Chełkowski A.; Fizyka dielektryków, Wydanie 3 zmienione, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1993, stron 395, ISBN 83-01-11245-X.
- [3] Gąsiorowski A.; Oświetlenie miasta Częstochowy do roku 1927, Piorunochrony, Telegrafy, Telefony (Prąd stały), s. 616-648, w: Monografia II Kongresu Elektryki Polskiej, T.2, Centralny Ośrodek Szkolenia i Wydawnictw, Warszawa 2016, stron 784, ISBN 978-83-61163-67-1.

- [4] Gąsiorowski A., Posytek Z.; Rezonansowy falownik prądowy pracujący z trzecią harmoniczną obwodu wzbudzenia, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 12 (rocznik 91) 2015, s. 95-98, ISSN 0033-2097.
- [5] Józwiak K.; Metody oceny jakości kondensatorów foliowych, Praca doktorska, Politechnika Gdańska, Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki, Gdańsk 2011, stron 149
- [6] Katalog ELFA Nr 56/2008, wyd. ELFA Elektronika, Warszawa 2008, stron 2006.
- [7] Nowakowski R., Szymczak P., Moszyńska I.; Ewald Jürgen von Kleist – człowiek i jego dzieło, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe* Nr 4/2016 (112), s. 1-6, ISSN 0239-3646.
- [8] *Pismo Święte Starego i Nowego testamentu Biblia*, Tysiąclecie, Wydanie V, Wydawnictwo Pallottinum, Warszawa-Poznań 2016, stron 1470, ISBN: 978-83-7014-419-7.
- [9] Weinfeld S.; *Poczet wielkich elektryków*, Nasza Księgarnia, Warszawa 1968, s. 218.
- [10] Wróblewski A. K.; *Historia fizyki, od czasów najdawniejszych do współczesności*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2006, stron 620, ISBN 83-01-14635-4.



Aleksander Gańsiorski<sup>1</sup>, Zdzisław Posyłek<sup>1</sup>, Andrzej Roman<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Wydział Elektryczny,*

*Politechnika Częstochowska,*

*aleja Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa*

<sup>2</sup>*Instytut Techniki i Systemów Bezpieczeństwa,*

*Akademia im. Jana Długosza,*

*aleja Armii Krajowej 13/15, 42-200 Częstochowa*

**SYMULACJA NUMERYCZNA RZECZYWISTEJ BATERII  
KONDENSATOROWEJ PRACUJĄCEJ W UKŁADACH  
WIELKIEJ CZĘSTOTLIWOŚCI W ZASTOSOWANIU  
DO FALOWNIKÓW.**

**CZĘŚĆ II. MODELE ELEKTRYCZNE RZECZYWISTYCH  
KONDENSATORÓW TWORZĄCYCH BATERIE.  
I SYMULACJA PRACY WYBRANYCH POŁĄCZEŃ  
ELEMENTÓW TYCH BATERII**

**Streszczenie.** W części II pracy przedstawiono stosowane modele elektryczne rzeczywistych kondensatorów od prostych do bardziej skomplikowanych oraz dokonano wyboru modelu pięcioelementowego, niezbyt skomplikowanego, ale odzwierciedlającego w sposób najprostszy w swoim schemacie istotę problematyki obwodów wielkiej częstotliwości. Zastosowano wybrany model do utworzenia baterii równolegle połączonych pięciu kondensatorów, działanie baterii zostało opisane równaniami, które były podstawą do przeprowadzenia symulacji numerycznej. Symulacja pokazała zachowanie się elementarnych rzeczywistych kondensatorów wchodzących w skład baterii w funkcji częstotliwości i pozwoliła na wyciągnięcie wniosków. Wszelkie pomiary praktyczne zostały wykonane w Laboratorium Badawczym Elektrycznym Wydziału Elektrycznego Politechniki Częstochowskiej.

**Słowa kluczowe:** kondensator, obwody wielkiej częstotliwości, symulacja numeryczna, pomiary praktyczne.

**NUMERICAL SIMULATION OF THE ACTUAL CAPACITOR  
BANK WORKING IN HIGH FREQUENCY SYSTEMS  
FOR USE IN INVERTERS  
PART II. ELECTRICAL MODELS OF THE ACTUAL  
CAPACITORS FORMING THE BANKS AND SIMULATING  
THE OPERATION OF SELECTED CONNECTIONS OF THE  
COMPONENTS OF THESE BANKS**

**Summary.** Part II of the paper presents the applied electrical models of real capacitors from simple to more complex and has chosen a five-element model that is not too complicated but reflects the essence of the problem of high frequency circuits in the simplest way. The selected model was used to create a bank in parallel with five capacitors connected, the bank was described by the equations that were the basis for the numerical simulation. The simulation showed the behavior of the elementary real capacitors in the bank as a function of frequency and allowed to extract and record the conclusions. All practical measurements were performed at the Electrical Testing Laboratory of the Czestochowa University of Technology.

**Keywords:** capacitors, high frequency circuits, numerical simulation, practical measurements.

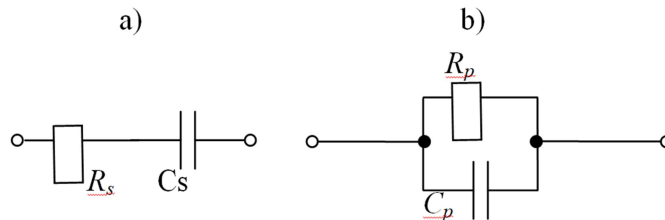
### Schematy zastępcze rzeczywistych kondensatorów

Stosowane elektryczne schematy zastępcze kondensatorów mają różny stopień złożoności, od najprostszego, szeregowego lub równoległego połączenia rezystancji i pojemności, aż po bardzo rozbudowane schematy składające się z kilku lub nawet kilkunastu elementów o parametrach stałych lub zależnych od częstotliwości pracy. W analizie obwodów elektrycznych częstotliwości sieciowej zwykle korzysta się z prostych modeli rzeczywistego kondensatora: modelu równoległego (rys. 1a) albo modelu szeregowego (rys. 1b). W modelach tych rezystancja (szeregowa lub równoległa) reprezentuje straty doprowadzeń oraz upływność dielektryka. Tangens kąta stratności  $\delta$  dla modelu szeregowego i modelu równoległego określają odpowiednio poniższe zależności:

$$\operatorname{tg} \delta = \omega C_s R_s ; \operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega R_p C_p} \quad (1)$$

gdzie:  $R_s, C_s$  - rezystancja i pojemność szeregową,  $R_p, C_p$  - rezystancja i pojemność równoległą (paralelną),  $\omega = 2\pi f$  - pulsacja,  $f$  [Hz] - częstotliwość.





Rys. 1. Proste schematy zastępcze rzeczywistego kondensatora dla częstotliwości sieciowej: a) schemat szeregowy, b) schemat równoległy

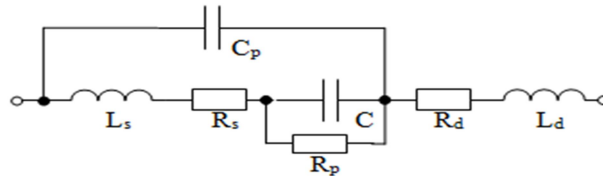
Mimo coraz lepszych parametrów produkowanych współcześnie kondensatorów stosowanych w układach elektronicznych i energoelektronicznych, przyjmowanie idealizowanych schematów z rysunku 1 do projektowania układów o wyższych częstotliwościach pracy zawierających kondensatory znacząco obniża jakość rzeczywistego odwzorowania [1]. Szczególnie jest to istotne przy projektowaniu wielowarstwowych obwodów drukowanych.

Do najlepiej odwzorowujących stan faktyczny rzeczywistego kondensatora w obwodach wielkiej częstotliwości należą modele uwzględniające indukcyjności (reaktancje indukcyjne), które wraz ze wzrostem częstotliwości powodują zmniejszanie się wartości częstotliwości rezonansowych wewnętrznych kondensatora i wpływają na rzeczywistą wartość impedancji.

W odniesieniu do kondensatorów wielkiej częstotliwości bierze się pod uwagę trzy podstawowe, znaczące wielkości pasożytnicze:

- prądy upływu (*leakage*), wynikające przeważnie z nieidealności izolacji (rzeczywistego dielektryka), przyczyniającej się do przepływu ładunku elektrycznego pomiędzy okładzinami kondensatora,
- rezystancje pasożytnicze powiązane w największym stopniu z rezystancją przewodów, elektrod i strat mocy występujących w dielektryku,
- indukcyjności pasożytnicze.

Jako rozpatrywany dalej schemat zastępczy kondensatora (rys. 2) wybrano ten zasugerowany w pracy [2]. Schemat składa się z indukcyjności  $L_s$ , rezystancji zastępczej  $R_s$  oraz rezystancji strat dielektrycznych  $R_p$ , równoległej pojemności pasożytniczej  $C_p$ , a także przede wszystkim z pojemności właściwej  $C$  [2]. Dodatkowo występują rezystancja  $R_d$  oraz indukcyjność  $L_d$  doprowadzeń. Należy również dodać, że rezystancje  $R_p$ ,  $R_s$  oraz  $R_d$  uważane są w kondensatorach wielkiej częstotliwości za główne wielkości pasożytnicze powodujące niepotrzebne straty mocy, przeważnie w postaci wydzielania się ciepła, a co za tym idzie – samonagrzewanie się kondensatorów.



Rys. 2. Schemat zastępczy kondensatora dla wielkiej częstotliwości przyjęty do rozważań w dalszej części pracy [2]

Indukcyjność  $L_d$  uzależniona jest od długości drutowych doprowadzeń, przyjmuje się, że wynosi ona około 12 [nH/cm długości doprowadzeń]. Rezystancja doprowadzeń  $R_d$  jest niewielka i zwykle jest pomijana. Indukcyjność  $L_s$  uzależniona jest od budowy kondensatora (zwijki, płytki, itp.), a wartości jej zwykle wynoszą od kilku do kilkudziesięciu nanohenrów. Rezystancja zastępcza  $R_s$  zależy od właściwości użytych materiałów oraz budowy kondensatora. W skład jej wchodzi również rezystancje przejścia. Zwykle rezystancja ta wynosi około 0,1 [ $\Omega$ ]. Rezystancja  $R_p$  jest rezystancją powodowaną przez prąd upływu kondensatora i uzależniona jest od konduktywności dielektryka oraz rezystancji izolacji, i waha się w granicach od  $10^3$  do  $10^6$  [ $M\Omega$ ] [2], i ma znaczenie jedynie przy zastosowaniach niskoczęstotliwościowych kondensatorów to jest poniżej 1 [kHz]. Pojemność pasożytnicza równoległa  $C_p$  powstaje na skutek obecności doprowadzeń oraz płytek stykowych i wynosi od 0,1 [pF] do kilkuset pikofaradów. W zakresie częstotliwości do 1 [MHz] w schemacie zastępczym kondensatora wielkiej częstotliwości wielkości  $R_s$ ,  $C_p$ ,  $L_s$ ,  $L_d$  często są pomijane.

Przy pominięciu rezystancji  $R_p$  oraz rezystancji i indukcyjności doprowadzeń odpowiednio  $R_d$  oraz  $L_d$  zależność na impedancję  $Z$  schematu zastępczego kondensatora, pokazanego na rys. 2, ma postać [2]:

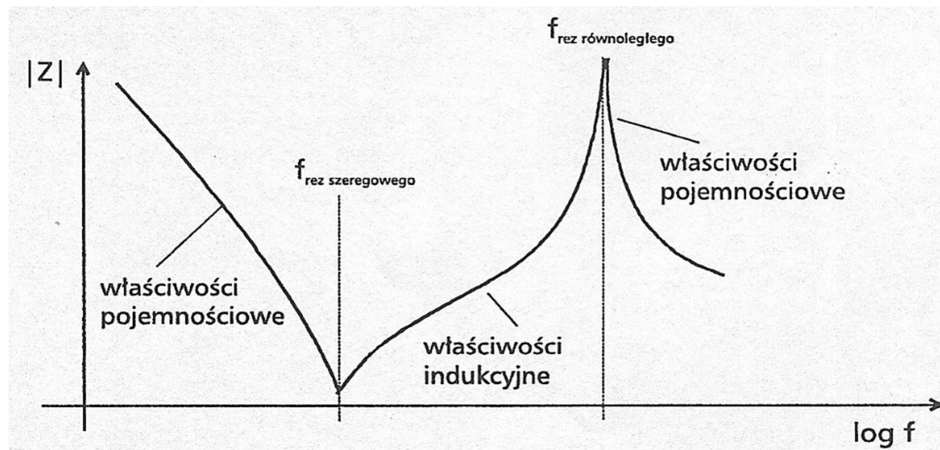
$$Z = \frac{1}{j2\pi f C_p + \frac{1}{R_s + j2\pi f L_s + \frac{1}{j2\pi f C}}} \quad (2)$$

Impedancja ta jest funkcją częstotliwości  $f$  [Hz]. Z części mianownika powyższej zależności można wyprowadzić warunki dla rezonansu szeregowego i równoległego, choć łatwiej je wykazać po przyjęciu pewnych uproszczeń i pominięciu indukcyjności  $L_d$ , na podstawie rys. 2. Rezonans szeregowy wystąpi przy szeregowym połączeniu  $C$  i  $L_s$ , natomiast rezonans równoległy przy równo-

ległym połączeniu  $L_s$  i  $C_p$ . Po określeniu impedancji  $Z$  takiego schematu zastępczego kondensatora, warunki występowania rezonansu szeregowego i równoległego. pozwalają na określenie dwóch częstotliwości rezonansowych, odpowiednio: szeregowej i równoległej:

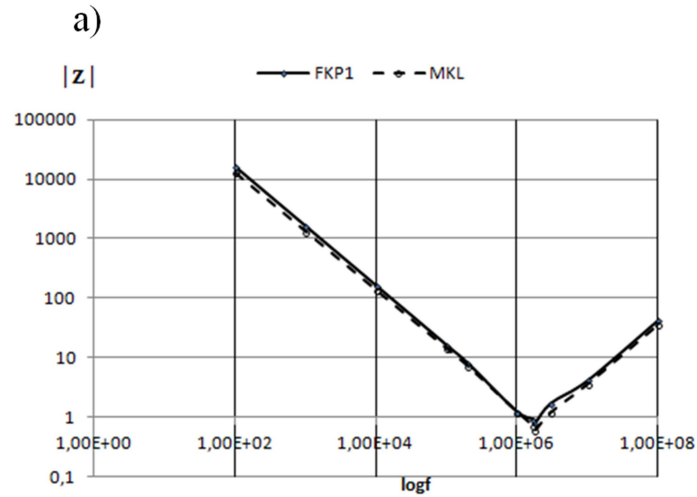
$$f_{\text{rez. szereg.}} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{CL_s}}, \quad f_{\text{rez. równoleg.}} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{C_p L_s}} \quad (3)$$

Przebieg i charakter impedancji najłatwiej przedstawić na wykresie modułu impedancji  $|Z|$  w funkcji logarytmu częstotliwości  $\log f$  (rys. 3).

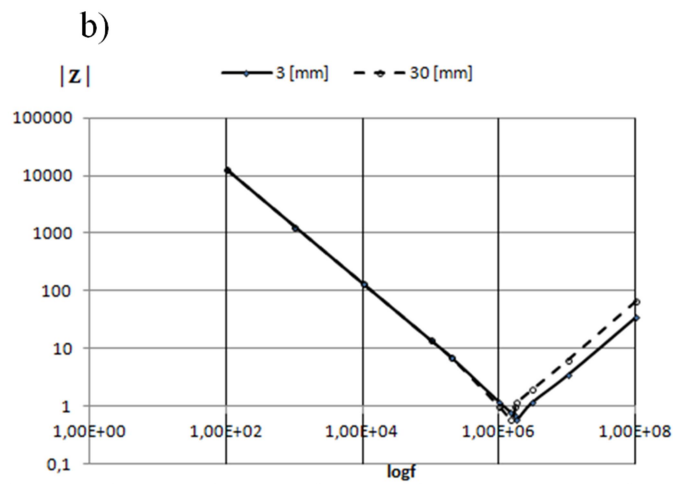


Rys. 3. Orientacyjna charakterystyka częstotliwościowa modułu impedancji modelu kondensatora w funkcji logarytmu częstotliwości [2]. Zaznaczono częstotliwości rezonansowe: szeregową i równoległą

W czasie pomiarów praktycznych kondensatorów tworzywowych z folią dwustronnie metalizowaną przy szeregowym połączeniu pojemności prowadzonych w Laboratorium Badawczym Elektrycznym Wydziału Elektrycznego Politechniki Częstochowskiej określono moduł impedancji  $|Z|$  w funkcji logarytmu częstotliwości  $\log f$  dla dwóch różnych kondensatorów o tej samej pojemności i dla takich samych kondensatorów, ale o różnej długości wyprowadzeń, określając przebieg krzywych w okolicach punktu rezonansu szeregowego. To ograniczenie zakresu pomiarów wynikało z zakresu częstotliwości, do których rozważane kondensatory są stosowane w układach falownikowych.



Rys. 4a. Wykres zmierzonego modułu impedancji  $|Z|$  dla kondensatorów 0,1 [ $\mu\text{F}$ ] typu: FKP1 firmy WIMA i MKL firmy Siemens przy długości wyprowadzeń 3 [mm]. Częstotliwość rezonansowa szeregową  $f_{\text{rez.szeregową}}$  dla kondensatora FKP1 wynosi 1,74 [MHz], a dla kondensatora MKL wynosi 1,87 [MHz]



Rys. 4b. Wykres pomierzonego modułu impedancji  $|Z|$  dla kondensatora o pojemności 0,1 [ $\mu\text{F}$ ] typu MKL firmy Siemens o różnych długościach wyprowadzeń (3 [mm] i 30 [mm]). Częstotliwość rezonansowa szeregową  $f_{\text{rez.szeregową}}$  dla kondensatora dla długości wyprowadzeń 3 [mm] wynosi 1,87 [MHz], a dla długości wyprowadzeń 30 [mm] spada i wynosi 1,48 [MHz]. Pomiary wykonane zostały w Laboratorium Badawczym Elektrycznym Wydziału Elektrycznego Politechniki Częstochowskiej.

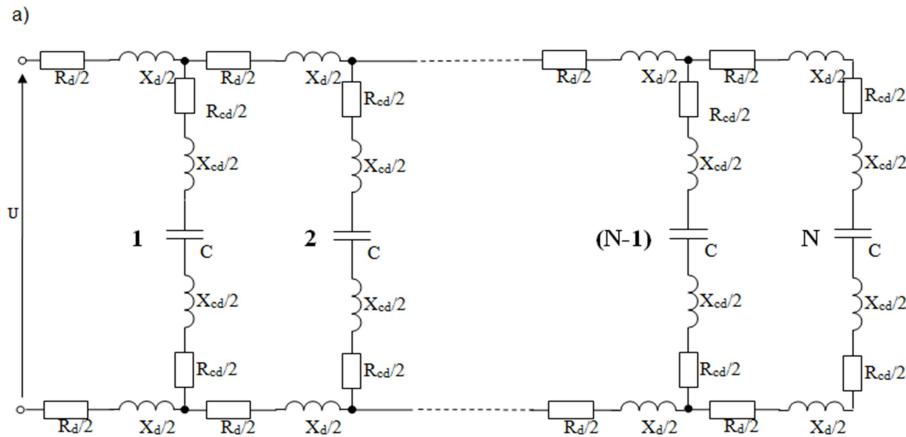
Dwa kondensatory o tej samej pojemności i takiej samej długości wyprowadzeń, wykonane przez różne wiodące firmy, miały bardzo podobny przebieg charakterystyki i zbliżoną wartość częstotliwości rezonansowej szeregowej (rys. 4a). Natomiast kondensatory tej samej firmy, tego samego typu, o tej samej wartości pojemności, ale o różnych długościach doprowadzeń wynoszących 30 [mm] i 3 [mm] (rys. 4b) miały znacząco różne częstotliwości rezonansu szeregowego, a stosunek tych rezonansów dla długości większej do mniejszej wyniósł 0,79. Ta wartość świadczy o tym, jak istotne są długości doprowadzeń do kondensatora i że nieuwzględnianie tego problemu może pociągać za sobą trudne do przewidzenia stany awaryjne rezonansowej baterii kondensatorów w układzie falownika.

### Układ drabinkowy kondensatorów połączonych równolegle

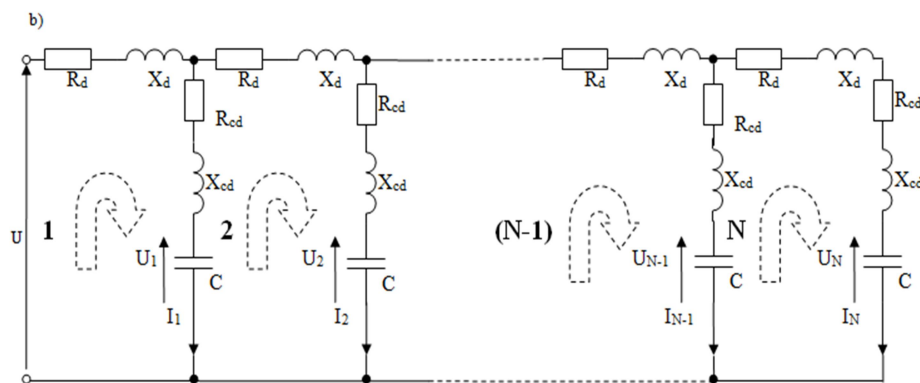
Weźmy pod uwagę obwód elektryczny, przedstawiony na rysunku 5a, jest on złożony z  $N$  kondensatorów połączonych równolegle i zasilanych napięciem przemiennym  $U$ , a swoją konfiguracją trochę przypomina układy drabinkowe rozpatrywane dla stanów nieustalonych w pracy [1]. Każdy kondensator w takim układzie drabinkowym ma taką samą pojemność przedstawioną w postaci reaktancji  $X_C$ , a doprowadzenia napięcia do kondensatora są realizowane za pomocą odcinków drutu o rezystancji  $R_d$  i reaktancji indukcyjnej  $X_d$ . Przyjęto, że doprowadzenia energii do zacisków każdego kondensatora realizowane są za pomocą odcinków drutów o wartości rezystancji  $R_{Cd}$  oraz indukcyjności  $L_{Cd}$  reprezentowanej przez reaktancję indukcyjną  $X_{Cd}$ . Schematycznie taki układ uproszczony połączeń przedstawiono na rysunku 5b. Określmy reaktancje dla częstotliwości  $f$ :

$$X_d = j2\pi fL_d; \quad X_{Cd} = j2\pi fL_{Cd}; \quad X_C = \frac{1}{j2\pi fC} \quad (4)$$

Stosując metodę prądów oczkowych, można napisać równania i określić prądy oczkowe (oznaczenie prądu  $I$ ), a następnie napięcia na kondensatorach z doprowadzeniami i na samej pojemności.



Rys. 5a. Układ drabinkowy rzeczywistych kondensatorów połączonych równolegle drutami z uwzględnieniem doprowadzeń



Rys. 5b. Schemat obliczeniowy takiego układu drabinkowego

Równania metody prądów oczkowych dla układu z rysunku 5 b przyjmują postać:

- dla pierwszego oczka

$$I_1[R_d + R_{cd} + j(X_{cd} + X_d - X_C)] - I_2[R_{cd} + j(X_{cd} - X_C)] = U \quad (5)$$

- dla oczek od  $n$  równego od 2 do  $N-1$ :

$$I_n[R_d + 2R_{cd} + j(2X_{cd} + X_d - 2X_C)] - I_{n-1}[R_{cd} + j(X_{cd} - X_C)] - I_{n+1}[R_{cd} + j(X_{cd} - X_C)] = 0 \quad (6)$$

- dla końcowego oczka ( $n = N$ ):

$$I_N [R_d + 2R_{Cd} + j(2X_{Cd} + X_d - 2X_c)] - I_{N-1} [R_{Cd} + j(X_{Cd} - X_c)] = 0 \quad (7)$$

Po określeniu prądów oczkowych, napięcia  $U_n$  na całym kondensatorze z przewodami doprowadzającymi oraz  $U_{cn}$  na samym kondensatorze bez doprowadzeń wynoszą odpowiednio:

- dla ostatniego kondensatora  $n=N$ :

$$U_N = [R_{Cd} + j(X_{Cd} - X_c)] I_N; \quad (8)$$

$$U_{cN} = -jX_c I_N \quad (9)$$

- dla pozostałych kondensatorów: dla  $n$  wynoszącym od 1 do  $N-1$ :

$$U_n = [R_{Cd} + j(X_{Cd} - X_c)] (I_n - I_{n+1}); \quad (10)$$

$$U_{cn} = -jX_c (I_n - I_{n+1}). \quad (11)$$

## Symulacja komputerowa

Przeprowadzono symulację komputerową dla baterii 5 kondensatorów połączonych równolegle o znanych wymiarach i parametrach doprowadzeń pokazanych na rysunkach. Do symulacji komputerowej przyjęto układy:

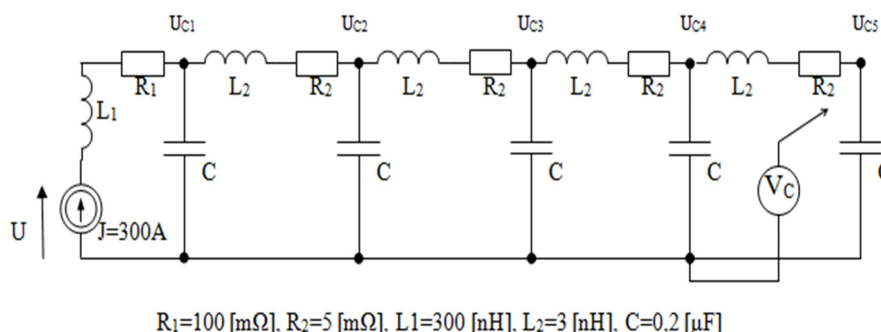
- kondensatory umieszczone obok siebie przy krótkich wyprowadzeniach od kondensatorów,
- kondensatory odsunięte od siebie przy długich wyprowadzeniach od kondensatorów,
- kondensatory umieszczone obok siebie przy długich wyprowadzeniach od kondensatorów.

Dla każdego z analizowanych układów przyjęto jednakową wartość rezonansowego prądu przemiennego zasilania wynoszącą  $I=300$  [A], niezależnie od rozważanej częstotliwości. Utrzymanie stałej wartości prądu zasilania wpływa na wartość napięcia zasilania. Reaktancje występujące w analizowanych obwodach określone są dla każdej częstotliwości z zależności (4). Symulację komputerową przeprowadzono dla kilku różnych częstotliwości  $f$  z zakresu od 25 [kHz] do 600 [kHz]. W kolejnych tablicach dla wszystkich rozważanych przypadków podano wyniki obliczeń, przez określenie modułów napięć na zasi-

laniu  $U$  oraz moduły spadków napięć  $U_{Ck}$  ( $k=1,2,3,4,5$ ; gdzie  $k$  – numer elementu liczony od zasilania napięciem  $U$ ) na poszczególnych elementach pojemnościowych baterii.

### Kondensatory umieszczone obok siebie przy krótkich wprowadzeniach od kondensatorów

Obliczenia zostały wykonane dla schematu oraz wielkości rezystancji, indukcyjności i pojemności kondensatorów podanych na rysunku 6.



Rys. 6. Schemat obwody przyjęty do analizy

Wyniki obliczeń przedstawiono w tabelicy 1.

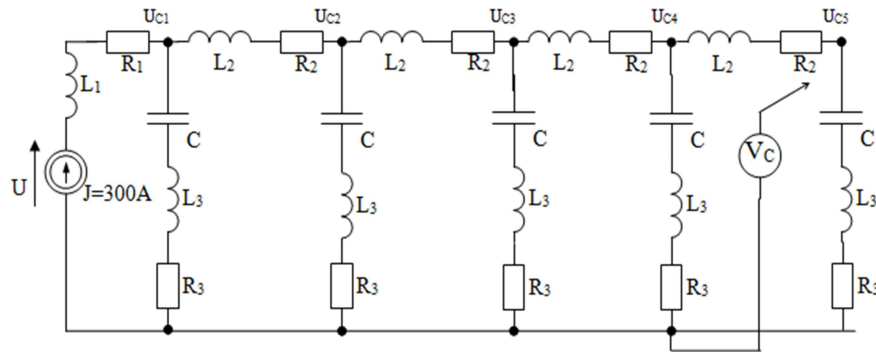
Tablica 1. Wyniki otrzymanej symulacji komputerowej

F [kHz]	$V_{C1}$ [V]	$V_{C2}$ [V]	$V_{C3}$ [V]	$V_{C4}$ [V]	$V_{C5}$ [V]	U [V]
25	1890	1890	1890	1890	1890	1870
44	1070	1070	1070	1070	1070	1050
130	360,0	361,7	363,0	363,8	364,2	287,5
280	163,2	166,6	169,2	171	171,8	32,3
400	110,3	115,3	119,1	121,6	122,9	123,2
600	67,1	74,6	80,4	84,4	86,4	279,1



### Kondensatory odsunięte od siebie przy długich wyprowadzeniach

Analiza numeryczna została wykonana dla schematu i wielkości rezystancji, indukcyjności i pojemności kondensatorów podanych na rysunku 7.



$$R_1=100 \text{ [m}\Omega\text{]}, R_2=15 \text{ [m}\Omega\text{]}, R_3=40 \text{ [m}\Omega\text{]}, L_1=300 \text{ [nH]}, L_2=8 \text{ [nH]}, L_3=3 \text{ [nH]}, C=0,2 \text{ [}\mu\text{F]}$$

Rys. 7. Schemat obwodu przyjęty do analizy

Wyniki symulacji komputerowej przedstawiono w tabelicy 2.

Tablica 2. Wyniki otrzymanej symulacji komputerowej

F [kHz]	$U_{C1}$ [V]	$U_{C2}$ [V]	$U_{C3}$ [V]	$U_{C4}$ [V]	$U_{C5}$ [V]	U [V]
25	1890	1890	1890	1890	1890	1867
44	1070	1070	1070	1070	1070	1043
130	352,2	358,7	362,5	366,5	367,3	279,7
280	145,2	158,3	168,4	175,2	178,7	37,8
400	83,2	102,7	118,1	128,6	134,2	150,3
600	20,2	51,7	79,1	99,4	109,6	326,7

### Kondensatory umieszczone obok siebie przy długich wyprowadzeniach od kondensatorów

Obliczenia zostały wykonane dla schematu pokazanego na rysunku 7 dla następujących wielkości rezystancji, indukcyjności i pojemności kondensatorów:  $R_1=100 \text{ [m}\Omega\text{]}$ ,  $R_2=5 \text{ [m}\Omega\text{]}$ ,  $R_3=40 \text{ [m}\Omega\text{]}$ ,  $L_1=300 \text{ [nH]}$ ,  $L_2=3 \text{ [nH]}$ ,  $L_3=30 \text{ [nH]}$ ,  $C=0,2 \text{ [}\mu\text{F]}$ . Wyniki obliczeń przedstawiono w tabelicy 3.

Tablica 3. Wyniki otrzymanej symulacji komputerowej

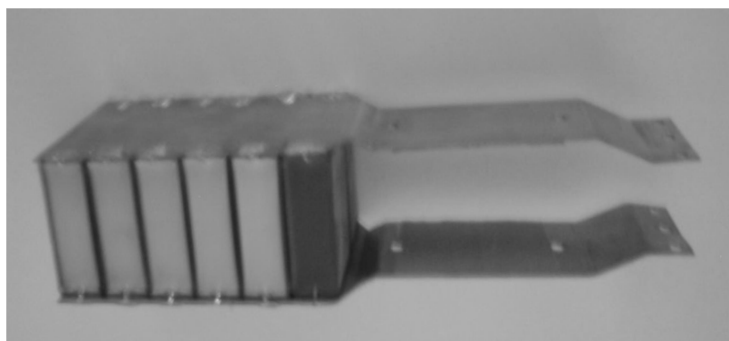
F [kHz]	U <sub>C1</sub> [V]	U <sub>C2</sub> [V]	U <sub>C3</sub> [V]	U <sub>C4</sub> [V]	U <sub>C5</sub> [V]	U [V]
25	1890	1890	1890	1890	1890	1870
44	1070	1070	1070	1070	1070	1045
130	358,6	360,3	361,4	362,3	362,7	286,1
280	160,1	163,4	166,5	167,7	168,6	31,8
400	105,8	110,7	114,3	117,6	118,8	127,5
600	60,1	67,7	73,6	77,8	79,6	286,4

## Wnioski

Sposób połączeń rzeczywistych kondensatorów w baterię złożoną z kilku kondensatorów w sposób istotny wpływa nie tylko na pojemność budowanego układu, ale również na rozkład napięć na poszczególnych jednostkowych pojemnościach składowych. Do badań przyjęto układ drabinkowy (równoległy) połączeń 5 modeli takich samych rzeczywistych kondensatorów. W każdym przypadku wraz ze wzrostem częstotliwości wartość modułu napięcia na każdym z kondensatorów maleje, co występuje na skutek wzrostu reaktancji indukcyjnych i zmniejszania się reaktancji pojemnościowych w schematach zastępczych rzeczywistych kondensatorów.

Do częstotliwości około 44 [kHz] spadki modułów napięć od U<sub>C1</sub> do U<sub>C5</sub> na elementach baterii kondensatorów praktycznie są takie same, natomiast dla częstotliwości 130 [kHz] nieznacznie wzrastają w stronę kondensatora najbardziej odległego od źródła zasilania. Powyżej tej częstotliwości następuje wyraźny wzrost modułu napięcia wraz ze wzrostem numeru kondensatora. Dla częstotliwości 400 [kHz] stosunek modułu U<sub>C5</sub> do U<sub>C1</sub> wynosi odpowiednio: dla przypadku a) 1,11, dla przypadku b) 1,61 oraz dla przypadku c) 1,12, natomiast dla częstotliwości 600 [kHz] stosunek ten wynosi odpowiednio: dla przypadku a) 1,29, dla przypadku b) 5,43 oraz dla przypadku c) 1,32. Moduł napięcia zasilania U, wraz ze wzrostem częstotliwości, do częstotliwości 130 [kHz] – maleje, dla częstotliwości 280 [kHz] osiąga wartość minimalną (wielokrotnie mniejszą od wartości modułów napięć na elementach obliczonych) i dalej dla rosnących częstotliwości zaczyna przekraczać moduły wartości napięć obliczonych na elementach. Wydaje się, że zjawisko minimalnej wartości modułu U dla częstotliwości 280 [kHz] spowodowane jest rezonansami wewnętrznymi występującymi dla tej częstotliwości w modelowanych bateriach kondensatorowych. Z otrzymanych

wyników należy wyciągnąć wniosek, że dużą zgodność modułów napięć na poszczególnych kondensatorach otrzymuje się dla przypadku a) – to jest dla kondensatorów umieszczonych obok siebie przy krótkich wyprowadzeniach od kondensatorów. Wydaje się, że praktycznym rozwiązaniem takiej baterii kondensatorów byłoby ścisłe połączenie pojedynczych kondensatorów o kontaktach metalowych naniesionych metodą metalizacji do dwóch płyt miedzianych (o dobrej przewodności) z pominięciem doprowadzeń. Praktyczny przykład rozwiązania tego problemu pokazano na rysunku 8.



Rys. 8. Przykładowy widok baterii kondensatorów złożonej z 6 takich samych pojemności umieszczonych blisko jedna od drugiej pomiędzy niskooporowymi listwami miedzianymi

W celu otrzymania idealizowanej baterii kondensatorów dąży się do tego, aby napięcie na każdym elementarnym kondensatorze były jednakowe, zarówno co do wartości, jak i fazy, gdyż w przypadku różnych napięć na połączonych równolegle kondensatorach, przy dużych prądach może nastąpić przekroczenie dopuszczalnej temperatury pracy jednego z kondensatorów składowych i jego destrukcją co powoduje zmianę częstotliwości rezonansowej, zwykle pociągająca za sobą zniszczenie kolejnych kondensatorów w baterii lub wystąpienie zwarcia elementów wykonawczych. Uwzględnienie występujących efektów termicznych, efektu zbliżenia przewodników (czyli występowania efektów elektromagnetycznych pomiędzy elementami przewodzącymi kondensatorów blisko usytuowanych w przestrzeni baterii) wymagałoby szerszych badań teoretycznych oraz praktycznych i zostało w tej pracy pominięte.

**Literatura**

- [1] Cholewicki T., Elektryczne linie długie i układy drabinkowe niejednorodne, Małe Monografie PWN, Warszawa 1974, stron 132.
- [2] Lutz M., Nedtwig J., Certyfikat CE w zakresie kompatybilności elektromagnetycznej, Podręcznik praktyczny, Wyd. Alfa-Weka, Warszawa (listopad) 1998, strony nienumerowane.



**Vitalii Kashytskyi, Oksana Sadova, Mykola Melnychuk, Petro Savchuk,  
Inna Boiarska**

*Lutsk National Technical University  
75 Lvivska, st. Lutsk 43018, Ukraine*

## RESEARCH OF THE COMPOSITION AND STRUCTURE OF PROTECTIVE FILMS SELF-GENERATED ON THE TRIBO SURFACES OF THE EPOXY COMPOSITE MATERIALS

**Summary.** The article presents the results of the study of the chemical composition and structure of the protective copper films formed on the tribo surfaces of epoxy composites. Epoxy composites are reinforced with copper oxide particles and discrete carbon fibres. The distribution of chemical elements in the cross section of the epoxy composite is presented. The correlation between the chemical composition of the epoxy composite and the structure of the protective films, formed as a result of a selective transfer during the friction, is established.

**Keywords:** epoxy composite, friction interaction, chemical composition, structure, protective film, discrete carbon fibres.

## BADANIE STRUKTURY I SKŁADU CHEMICZNEGO WARSTW GENEROWANYCH NA POWIERZCHNI WYBRANYCH KOMPOZYTÓW EPOKSYDOWYCH W OBSZARZE TARCIA W PARACH KINEMATYCZNYCH TYPU KOMPOZYT-STAL

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki badania składu chemicznego i morfologii warstw wierzchnich pojawiających się w strefach tarcia ślizgowego na kompozytach epoksydowych zbrojonych włóknem węglowym. Przedstawi ono rozkład pierwiastków chemicznych w przekroju kompozytu i w obszarze warstwy powstającej w procesach tribologicznych. Określono korelacje pomiędzy składem wymienionych wyżej warstw a składem chemicznym kompozytu.

**Słowa kluczowe:** kompozyt epoksydowy, interakcja cierna, skład chemiczny, struktura, warstw wierzchnich, włókna węglowe.

## **Introduction**

As a result of physicochemical transformations in the process of frictional interaction, occurs the structural transformation of composites tribo layers with the formation of secondary products in the form of a protective film. The formation of the film is connected with structural self-organization and depends on the conditions in which frictional interaction occurs [1, 2].

The contradiction in views on nature and the mechanism of selective transfer of material in the process of frictional interaction is explained to the lack of sufficient quantity experimental data about the influence of individual factors on the formation of film on tribo surface. The determination of the patterns and mechanisms of formation of protective films on the contact surfaces requires the study of the structure and properties of the surface layers, the morphology of the transfer products, the evaluation of the influence of the temperature-times and load-speed parameters. Therefore, the simulation and analytical description of the process of generation and frictional behaviour of film, as well as finding methods for control of the frictional transfer of material determine the range of the main tasks of studying the friction processes and wear of polymer composites on epoxy resin based [3-6].

The increase of duration of the friction interaction (at moderate speed and specific loads) for most epoxy composites provides a reduction in the intensity of wear due to the selective transfer of the recovered copper from the tribo surface of the epoxy composite to the steel surface of the counter body. Because of this effect a protective film on the tribo surfaces of epoxy composites and counter body begins to form. Film layers are easily slipped, destroyed and restored in the process of tribo interaction [3, 7]. On the tribo surface of the epoxy composites, the formation of the fragments of the protective film occurs in places of localization of copper oxide particles. The morphology of these particles is determined by the composition of the epoxy composite material [8]. The process of copper recovery and its intense transfer to the counter body is fixed for epoxy composites with a higher content of copper oxide powder. As a result occurs stabilization of the frictional interaction process, which is accompanied by reduce in the intensity of wear [9-14].

The purpose of the work is to analyse the structure of the tribo surface of the epoxy composites and to establish correlation relations between the chemical composition and the intensity of wear of the developed epoxy composites.

## Experimental

As the matrix of the developed epoxy, composite materials were used epoxydian resin ED-20 and the low-temperature hardener polyethylene polyamine. The following fillers were used for reinforce of epoxy polymers: fluoroplastic powder, graphite in the form of flakes, copper oxide powder (CuO), discrete carbon fibres.

The structuring of the epoxy composites lasted for 24 hours under normal conditions, followed by heat treatment in step mode: 50 °C and 100 °C with exposure 1 hour, followed by 120 °C with exposure 4 hours.

Determination of wear resistance was carried on a friction machine SMC-2 under the scheme "disk - block" in conditions of friction lubricating free. The mass of samples was determined on analytical laboratory scales of the type AVIV S / 3-3 with an accuracy of 0.0001 g.

The investigation of microstructure of tribo surface of the epoxy composites was performed on an optical microscope (Axio Lab A1). Chemical and morphological analysis was performed on a raster electron microscope (EVO 50).

## Results and discussion

The analysis of the surface layer in the tribocontact zone was to identify the structural elements and to determine the size of the fragments of the formed protective films on the surface of the epoxy composite. To identify the structure of tribolayer was chosen epoxy composite material filled with copper oxide powder and discrete carbon fibres.

At points 1 and 2 (Fig. 1) high carbon value was fixed (43.87% and 47.56%, respectively) (Table. 1). At the given points, the content of oxygen is the highest. These areas can be identified as fragments of the epoxy polymer matrix. The copper content is relatively small and amounts to 33.81% and 30.25% respectively. These points to the redistribution of copper atoms, which fell on the investigated areas from the tribo surface of counter body because of a selective transfer.

Points 3 and 4 are found on particles of copper oxide powder. This corresponds to the obtained value of high copper concentration 60.83% and 62.56% respectively. Oxygen content is low. Carbon content is the lowest among the studied points. This indicates of the presence of macromolecules of epoxy polymer on the surface of particles of copper oxide powder. They are fell on the study surface as a result of the frictional interaction or were impregnated during the formation of the system. Groups of macromolecules of epoxy polymer are easily fixed in the volume of copper oxide particles, because these particles have high porosity (Fig. 2).

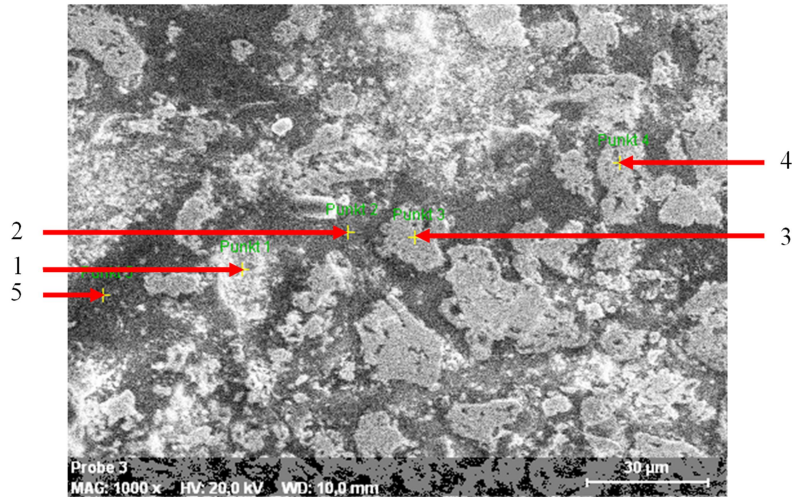


Fig. 1. Microstructure of tribo surface of epoxy composite filled with discrete carbon fiber and copper oxide powder

Point 5 corresponds to the highest carbon content (56.71%) and the lowest copper content (24.47%). Oxygen content is in intermediate value compared to other points. The presence of other chemical elements is accidental on the friction surface, where they can get from counter body or products of wear. The concentration of these elements is low, so their influence on tribotechnical researches can be ignored.

Table 1. Chemical analysis of tribo surface of the epoxy composite material

Points	Chemical elements, %					
	C	O	Cu	Si	Cl	Fe
<b>Point 1</b>	43,87	21,16	33,81	0,22	0,36	0,58
<b>Point 2</b>	47,56	20,99	30,25	0,24	0,31	0,65
<b>Point 3</b>	20,13	17,93	60,83	0,22	0,19	0,69
<b>Point 4</b>	21,39	14,86	62,56	0,23	0,27	0,68
<b>Point 5</b>	56,71	17,59	24,47	0,32	0,25	0,66



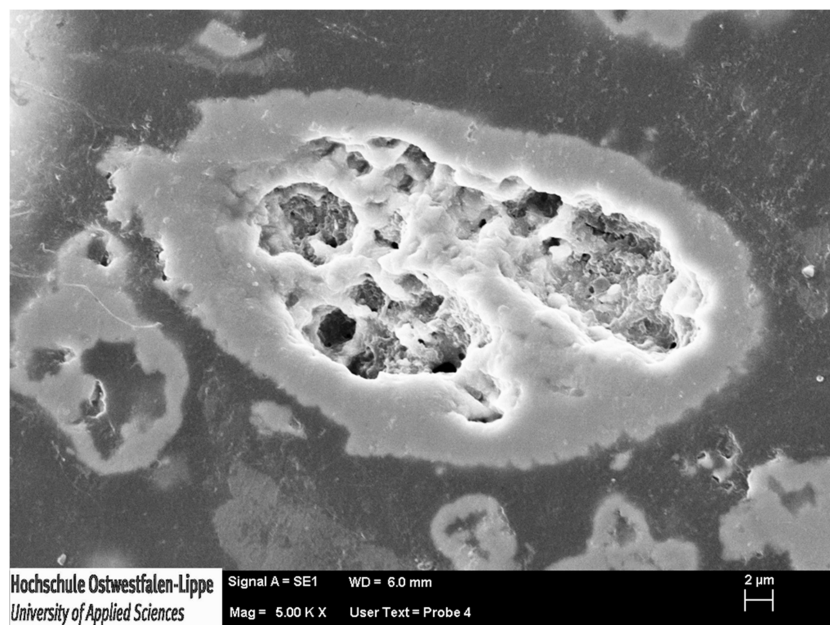
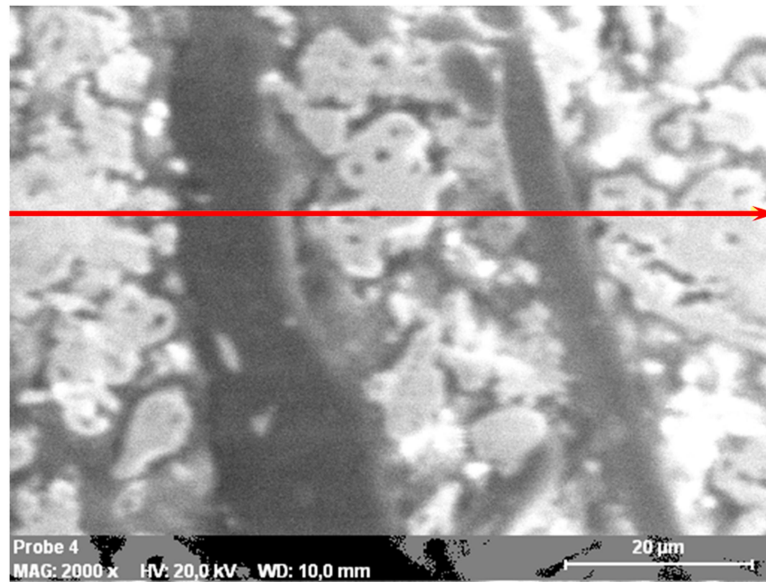


Fig. 2. The microstructure of the particle of copper oxide powder,  $\times 5000$

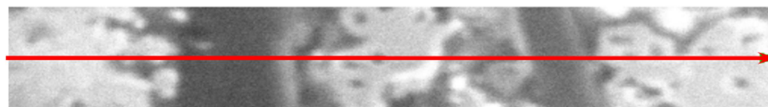
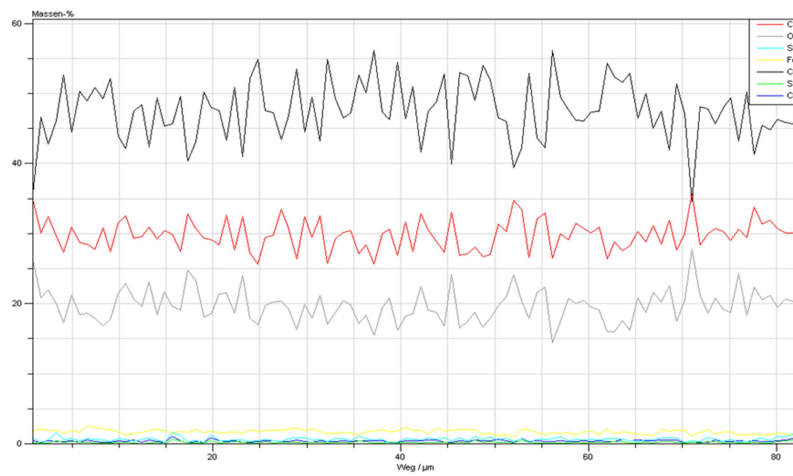
The carbon content on the surface of the epoxy composite material (Fig. 3), filled with copper oxide powder and carbon fiber, ranges within 26...36% and oxygen ranges within 19...28%. Copper is present in the largest quantity of 34...56%, which is primarily due to the high content of copper oxide powder (200 mass part) in the epoxy composite material.

The dependence of the concentration of carbon, oxygen and copper in the surface tribolayer of the epoxy composite material is interesting. Carbon with copper oxide restores copper with the following removal of carbon in the monoxide form. Therefore, for these chemical elements is characteristic the inverse mechanism of redistribution, in which the growing of copper concentration is accompanied by decreasing of carbon and oxygen concentration.

It has been experimentally established that for moderate modes of triboload (forces of the pressure  $P=1.5$  MPa,  $V=2.3$  m/s), the low wear intensity has epoxy composites of the original composition with optimal content of graphite, fluoroplastic powder, discrete carbon fibre and copper oxide powder (5,4 mass part). Studies at a higher speed sliding  $V=3.6$  m/s have shown that the wear intensity increases several times, especially for composites with graphite free. Under this load regime, the temperature in the contact zone is very high, which leads to thermal destruction of the epoxy polymer matrix.



a



b

Fig. 3. The change of the chemical composition along the vector on the surface of the epoxy composite material: (a) microstructure of the surface; (b) change of the chemical composition

Epoxy composites containing graphite have a higher wear resistance because graphite is the solid lubricant and is more resistant to elevated temperatures. With an increasing of specific load up to 2 MPa with sliding speed  $V=3.6$  m/s the content of copper oxide powder performs main function. The intensity of wear increases almost in 3 times for the epoxy composite of the original composition with 5.4 mass part of copper oxide powder. The intensity of wear increases almost in 1.5 times for the epoxy composite of a similar composition with a high content of copper oxide powder (200 mass part).

The epoxy composites of the origin composition on the tribo surface have a small area of copper film of 12.09% (Fig. 4, a), which is due to the low content of copper oxide powder ( $\text{CuO} = 5.4$  mass parts) (Fig. 4, b). For a composite filled with graphite, fluoroplastic powder, copper oxide powder (200 mass parts) and discrete carbon fiber, the protective film is formed in the form of small fragments (Fig. 4, c). These fragments are evenly distributed on the tribo surface of the epoxy composite. These fragments represent thin layers of copper atoms on the surface of particles of copper oxide (Fig. 4, g). These layers are formed as a result of copper recovery from copper oxide. The increasing of copper film is complicated, because graphite and fluoroplast prevent the fixation of the transferred particles of copper on the tribo surface of the epoxy composite.

The elevated temperatures that occur during the friction interaction contribute to the oxidation and reduction reactions on the surface of the epoxy composites in the tribocontact zone. There is a local recovery of copper from particles of copper oxide ( $\text{CuO}$ ) during their interaction with carbon. Then the particles of the recovered copper from the surface of the epoxy composites and are transferred to surface of counter body and connected to it with the formation of adhesive bonds. During the frictional interaction, there is also a reverse process of transfer of copper atoms to the surface of the epoxy composite material in places of localization of particles of copper oxide powder. These particles are centres of formation and growth of fragments of protective copper film. Therefore, the process of forming of fragments of a copper film with a larger area is more intense for epoxy composites with a higher content of copper oxide powder. For epoxy composites filled with copper oxide powder (200 mass parts) and discrete carbon fibre, the area of the copper film is larger (21.84%), which is confirmed by decreasing in the intensity of wear by 13-15%.

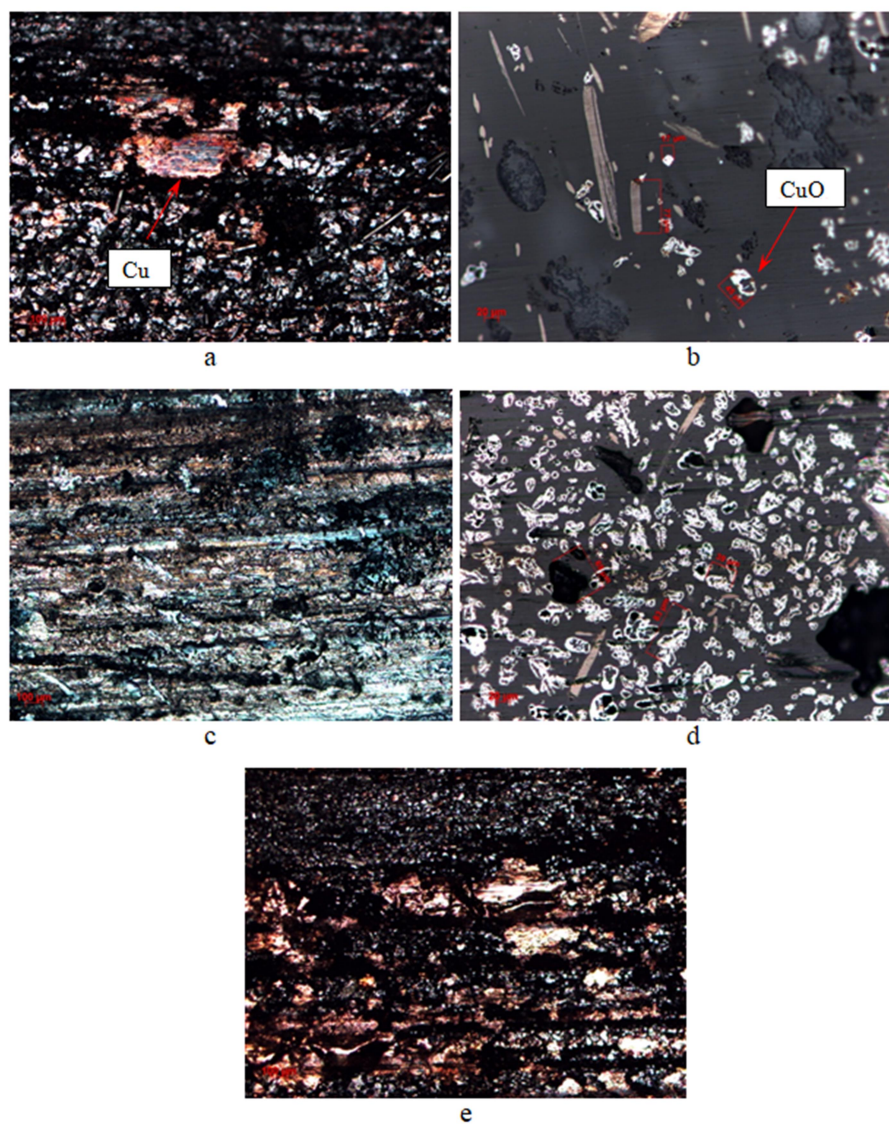


Fig. 4. The structure of the tribo surface of the epoxy composites (a, c, e) and microstructure of the epoxy composites (b, d) is filled: (a, b) with copper oxide powder (5.4 mass part), fluoroplastic powder, graphite in the form of flakes, carbon fibre; (c, d) with copper oxide powder (200 mass part), fluoroplastic powder, graphite in the form of flakes, carbon fibre; (e) with copper oxide powder (200 mass part), carbon fibre

## Conclusion

High copper concentration (up to 62.56%) on the tribological surface of the epoxy composite indicates on the presence of fragments of a copper film. As a result of long-term tribotechnical research, the intensity of wear of epoxy composites is reduced by 2.1...3.2 times, which indicates the ability of the material to self-organizing of structure during frictional interaction. Developed epoxy composite materials can be operated in conditions of static load and lubricating free in the range of modes of triboload: with a sliding speed of up to 2 m/s (forces of the pressure  $P=1.5...1.8$  MPa), with a sliding speed of up to 4 m/s (forces of the pressure  $P=1,2...1,5$  MPa), with sliding speed up to 5 m/s (forces of the pressure  $P=0.9...1.2$  MPa).

## Literature

- [1] Friedrich K. Effects of various fillers on the sliding wear of polymer composites / K. Friedrich, Z. Zhang, A.K. Schlarb // *Composites science and technology*. – December 2005. – Vol. 65, Issues 15-16. – P. 2329-2343, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.05.028>
- [2] Friedrich K. Composite materials series: advances in composite tribology / K. Friedrich. – 1993. – Vol. 8. – 773 p.
- [3] Sawczuk P. Współczesne trendy rozwoju badań w zakresie tarcia i zużycie materiałów / P. Sawczuk, O. Sadova, V. Kaszyckyj // *PRO FUTURO*. – Łódź, 2013. – № 2 (1). – P. 188-198.
- [4] Lancaster J.K. Polymer-based bearing materials: The role of fillers and fibre reinforcement / J.K. Lancaster // *Tribology*. – December 1972. – Volume 5, Issue 6. – P. 249-255, DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0041-2678\(72\)90103-0](http://dx.doi.org/10.1016/0041-2678(72)90103-0)
- [5] Золоторева В.В. Исследование истирания эпоксидных композиций / В.В. Золоторева, В.А. Липская, Ю.С. Кочеггин // *Матеріали 25-ї міжнародної науково-практичної конференції*. – Київ: УІЦ “Наука. Техніка. Технологія”. – 2005. – С. 312-314.
- [6] Friedrich K. Composite materials series: friction and wear of polymer composites / K. Friedrich. – 1996. – Vol. 1. – 457 p.
- [7] Kashytskyi V. Examining a mechanism of generating the fragments of protective film in the tribological system «epoxycomposite – steel» / V. Kashytskyi, O. Sadova, O. Liushuk, O. Davydiuk, S. Myskovets. – *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – P. 10-16.

- 
- [8] Sadova O. L. Technological aspects of provide structural stability of tribological epoxy composites / O. L. Sadova, V. P. Kashytskyu, P. P. Savchuk // Powder metallurgy: its current status and future, april 22-25, 2014. – Kiev. – 2014. – P. 72.
- [9] Кашицький В.П. Трибологічні процеси та структурні перетворення в поверхневих шарах полімеркомпозитів при навантаженні тертям / В.П. Кашицький, П.П. Савчук, О.Л. Садова // Проблеми трибології – Хмельницьк, 2011. – №4 (62). – С. 103-107.
- [10] Механізм вибіркового перенесення з точки зору резонансного потенціалу за Нечаєвим / [А.П. Ранський, Н.О. Діденко. Т.С. Тітов, І.І. Безвозюк] // Наукові праці ВНТУ. – 2010. – № 4.
- [11] Тагер А.А. Фізико-хімія полімерів / А.А. Тагер. – [4-е изд.]. – М.: Научный мир, 2007. – 576 с.
- [12] Поляков А.А. Трение на основе самоорганизации / А.А. Поляков, Ф.И. Рузанов. – М.: Наука, 1992. – 135 с.
- [13] Савкин В.Г. Адгезия и перенос материала при трении полимеров / В.Г. Савкин, В.А. Смуругов // Трение и износ. – 1983. – Т. 4. – №1. – С. 34-39.
- [14] Buckley D.H. Surface effects in adhesion, friction, wear, and lubrication / D.H. Buckley. – 1981. – 631 p.