ROZPRAWY NAUKOWE I ZAWODOWE PAŃSTWOWEJ WYŻSZEJ SZKOŁY ZAWODOWEJ W ELBLĄGU

Zeszyt 27



Elbląg 2018

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO WYDAWNICTWA PWSZ W ELBLĄGU
dr hab. inż. Jerzy Łabanowski, prof. nadzw.

REDAKTOR NAUKOWY
dr inż. Jerzy Buriak
dr Agata Rychter

PROJEKT OKŁADKI
Marek Lisewski

WYDANO ZA ZGODĄ REKTORA PWSZ W ELBLĄGU

© Copyright by Wydawnictwo PWSZ w Elblągu

ISSN 1895-8117

Wydawnictwo Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej w Elblągu
82-300 Elbląg, ul. Wojska Polskiego 1, tel. 55 629 05 55
Wydanie I. Nakład 120 egz., format B5.

SPIS TREŚCI

Jan Sikora	Obliczanie charakterystyk hydrodynamicznych łożysk poprzecznych według ISO-7902	5
Cezary Orlikowski	„Puzzle" wielowrotnikowe – modelowanie układów fizycznych w dydaktyce	23
Stanisław Kwitnewski Anna Rehmus-Forc	Badania właściwości fizycznych maty akrylowej (senosan® AM1800TopX) w połączeniu z płytą MDF	37
Piotr Korzeniowski Sara Staszewska	Metoda obliczania nośności słupów zespolonych według założeń normy EC4 w świetle badań eksperymentalnych	49
Andrzej Olchawa Dominika Iskra-Świercz Stanisław Kwitnewski Tomasz Dąbrowski	Ocena możliwości zastosowania kondensatora płaskiego do pomiaru przenikalności elektrycznej ośrodka porowatego piasek kwarcowy–powietrze	65
Tadeusz Marcinkowski Marek Kierończyk	Ograniczanie emisji amoniaku z wybranych mineralnych nawozów azotowych z wykorzystaniem inhibitora ureazy NBPT	75
Maciej Czyżak Robert Smyk	On the modulo reduction by the Montgomery method	83
Jacek Paluszak	Strojenie głębokich sieci neuronowych	91
Joachim Domsta	On a Big-Bang-less modification of the Newtonian Susskind universe. The case of finite mass with spherically symmetrical distribution	101
Stefan Sokołowski	Animowana grafika oparta na prawach ruchu – – komputerowe wspomaganie nauki fizyki	115
Daria Rybarczyk	Wykorzystanie bezzałogowych statków powietrznych w systemach bezpieczeństwa morskiego	131
Henryk Olszewski Wiktoria Wojnicz Eliza Drobniewska Dorota Olszak Paweł Ożga	Bezdotykowe określanie parametrów wytrzymałościowych próbek biomechanicznych przy wykorzystaniu fotogrametrii bliskiego zasięgu	143

Karol Kabecki
Aleksandra Meuś
Daria Rybarczyk
System do analizy i wizualizacji parametrów energii wytwarzanej przez elektrownie 153

Jarosław Niedojadło
Nowy system praktyk zawodowych na studiach o profilu praktycznym zaproponowany przez PWSZ w Elblągu 163

Jan Sikora

OBLICZANIE CHARAKTERYSTYK HYDRODYNAMICZNYCH ŁOŻYSK POPRZECZNYCH WEDŁUG ISO-7902

W artykule opisano metodę wyznaczania podstawowych charakterystyk hydrodynamicznych łożysk poprzecznych według norm ISO 7902-1,2,3, obowiązujących od 1998 roku. Przedstawiono algorytm obliczeń umożliwiający sprawdzenie, czy przy założonych parametrach ograniczających w łożysku można uzyskać tarcie płynne przy alternatywnych warunkach wymiany generowanego ciepła. Analizę zilustrowano przykładem obliczeniowym. Wyniki obliczeń metodą ISO porównano z wynikami obliczeń według innych znanych metod. Sformułowano wnioski dotyczące pracochłonności obliczeń i uzyskanych efektów.

Wprowadzenie

Analizę obliczeniową łożysk ślizgowych pracujących w zakresie tarcia płynnego przeprowadza się za pomocą metod opartych na hydrodynamicznej teorii smarowania, której podstawowym równaniem jest równanie Reynoldsa. Równanie to dla dwuwymiarowego przepływu nie posiada ogólnego rozwiązania, natomiast dla wielu szczególnych rodzajów łożysk można uzyskać rozwiązania przybliżone. Wyniki obliczeń przedstawia się zwykle w postaci bezwymiarowych charakterystyk, które przyjmują jednakowe wartości dla łożysk konstrukcyjnie podobnych. W przypadku cylindrycznych łożysk poprzecznych warunki konstrukcyjnego podobieństwa są spełnione, jeżeli:

- łożyska są podobne pod względem geometrycznym, to znaczy posiadają taki sam kąt opasania Ω czopa przez panew i taki sam stosunek $\frac{B}{D}$, czyli długości łożyska do jego średnicy,
- położenie i charakter zmian wektora obciążenia względem czynnej części panwi są takie same,
- kryterium podobieństwa hydrodynamicznego, wyrażone w postaci bezwymiarowej zmiennej, przyjmuje tę samą wartość.

W zależności od metody obliczeniowej, kryterium podobieństwa hydrodynamicznego może stanowić:

- liczba Sommerfelda w postaci[1]

$$S = \frac{\eta \cdot n''}{\bar{p} \cdot \psi^2} \tag{1}$$

- jej przekształcenie traktowane jako bezwymiarowe obciążenie łożyska

$$So = \frac{1}{2\pi S} = \frac{\bar{p} \cdot \psi^2}{\eta \cdot \omega} \tag{2}$$

- liczba Ocvirka O_N, nazywana również liczbą obciążenia (*load numer* lub *load factor*), stanowiąca iloczyn trzech bezwymiarowych wielkości charakteryzujących łożysko

$$O_N = \frac{\bar{p}}{\eta \cdot n''} \cdot \left(\frac{D}{B}\right)^2 \cdot \psi^2 \tag{3}$$

Kryterium podobieństwa hydrodynamicznego łączy główne parametry dyspozycyjne konstruktora. Skoro tylko wielkości w nią wchodzące zostaną dobrane, wszystkie inne charakterystyki łożyska, wyrażone w formie bezwymiarowej, będą jednoznacznie ustalone, na przykład: położenie czopa w panwi, straty tarcia, przepływ smaru, rozkład ciśnienia w warstwie smaru, współczynnik tarcia itd. Obliczenie łożyska hydrodynamicznego polega zatem na wyznaczeniu tych charakterystyk dla konkretnej wartości liczby kryterialnej na podstawie znanego rozwiązania równania Reynoldsa dla łożyska, które spełnia wymienione wyżej warunki podobieństwa z łożyskiem stanowiącym przedmiot analizy. Tak funkcjonują wszystkie znane metody obliczania łożysk hydrodynamicznych poprzecznych oparte na rozwiązaniu równania Reynoldsa metodą numeryczną, przy uwzględnieniu szeregu założeń upraszczających. Najważniejsze z tych założeń dotyczą:

- kształtu szczeliny smarowej – czop i panew przyjmowane są najczęściej jako cylindryczne o osiach równoległych, krzywizna powierzchni tarcia jest pomijalnie mała w stosunku do grubości filmu olejowego,
- własności smaru – zakłada się ciecz newtonowską, pomija siły bezwładności działające na smar, lepkość przyjmuje się jako stałą w całej szczelinie smarowej, określoną dla średniej temperatury smaru,
- warunków brzegowych przy całkowaniu numerycznym równania Reynoldsa,
- rodzaju przepływu w szczelinie smarowej – przyjmuje się, iż jest on laminarny, a warstewki graniczne przylegają ściśle do powierzchni tarcia.

Istotną cechą dynamiczną łożyska jest kierunek i charakter zmian obciążenia. Znane z literatury metody obliczeniowe: Raimondiego i Boyda [1] oraz DuBoisa i Ocvirka [2], dotyczą łożysk obciążonych statycznie. Odnosi się to również do metody obliczeniowej według ISO [3-5], praktycznie nieznanej w kraju, której opis jest przedmiotem niniejszego artykułu. Analiza łożysk obciążonych dynamicznie jest znacznie bardziej skomplikowana i w zasadzie wymaga indywidualnego traktowania każdego przypadku.

[1] Oznaczenia wielkości występujących we wzorach podano w podpunkcie 1.1.

1. Metoda obliczeń według ISO-7902

1.1. Oznaczenia

Dla ułatwienia korzystania z normy ISO 7902 [3-5] w artykule zachowano oryginalne oznaczenia wielkości występujących w analizie obliczeniowej i indeksy stanowiące skrót od stosownych nazw w języku angielskim, na przykład: indeks *B* (*bearing*) oznacza panew, indeks *J* (*journal*) – czop wału, *eff* (*effective*) – efektywny, skuteczny, *en* (*enter*) – wejściowy, *ex* (*exit*) – wylotowy itd. Oznaczenia wielkości występujących w obliczeniach i ich jednostki podano w tabeli 1 oraz w treści zadania w podpunkcie 1.3. Niektóre wielkości zaznaczono na rysunkach 1 i 2, przedstawiających schematycznie przekrój poprzecznego łożyska ślizgowego.

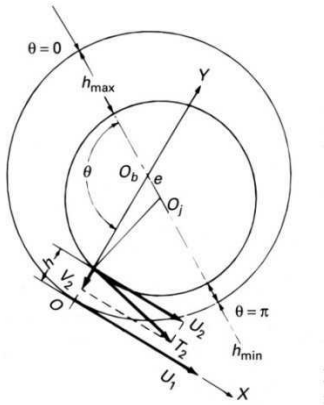
Tabela 1. Symbole i ich znaczenie według ISO-7902

Symbol	Znaczenie	Jednostka
A	Powierzchnia obudowy emitująca ciepło	m^2
B	Nominalna długość łożyska	m
C	Luz łożyskowy	m
$C_{R,eff}$	Efektywny luz łożyskowy promieniowy	m
D	Nominalna średnica łożyska (wewnętrzna średnica panwi)	m
d_L	Średnica otworu dopływowego oleju	m
e	Ekscentryczność czopa	m
f	Współczynnik tarcia	–
F	Obciążenie łożyska	N
h	Lokalna grubość filmu olejowego	μm
h_{lim}	Dopuszczalna minimalna grubość filmu olejowego	μm
h_{min}	Minimalna grubość filmu olejowego	μm
k_A	Współczynnik przejmowania ciepła	W/m^2K
N_J lub n''	Prędkość obrotowa czopa	obr/s
p	Lokalne ciśnienie w filmie olejowym	Pa
$\bar{p}$	Średnie ciśnienie w filmie olejowym (naciski obliczeniowe)	Pa
p_{en}	Ciśnienie zasilania	Pa
$\bar{p}_{lim}$	Maksymalne dopuszczalne naciski obliczeniowe	Pa
P_{th}	Strumień cieplny	W
$P_{th,amb}$	Ciepło oddawane do otoczenia	W
$P_{th,f}$	Strumień cieplny odpowiadający stratom tarcia	W
$P_{th,L}$	Ciepło odprowadzane ze smarem	W
Q	Natężenie przepływu smaru	m^3/s
Q_3	Natężenie wypływu smaru wskutek ciśnienia w filmie	m^3/s
Q_3^*	Współczynnik natężenia wypływu smaru Q_3	m^3/s
Q_p	Natężenie wypływu smaru wskutek ciśnienia zasilania	m^3/s
Q_p^*	Współczynnik natężenia wypływu smaru Q_p	m^3/s
Re	Liczba Reynoldsa	–
T_{amb}	Temperatura otoczenia	°C
T_B	Temperatura łożyska	°C
$T_{B,0}$	Wstępnie założona temperatura łożyska	°C
$T_{B,1}$	Obliczona temperatura łożyska (w danej iteracji)	°C
T_{en}	Temperatura smaru na dopływie do łożyska	°C
T_{ex}	Temperatura smaru na wypływie z łożyska	°C
T_{eff}	Efektywna (średnia) temperatura smaru w łożysku	°C

T_{lim}	Maksymalna dopuszczalna temperatura łożyska	ºC
U	Liniowa prędkość obwodowa ($_B$ panwi, $_J$ czopa)	m/s
α_l	Liniowy współczynnik rozszerzalności cieplnej	K^{-1}
β	Kąt między linią środków O_B i O_J a kierunkiem obciążenia	deg
ε	Ekscentryczność względna	–
η	Lepkość dynamiczna oleju	Pa·s
η_{eff}	Efektywna lepkość dynamiczna oleju (odpowiadająca T_{eff})	Pa·s
ξ	Współczynnik oporów w nieobciążonej części filmu	–
φ	Współrzędna kątowa w kierunku obwodowym	deg
ψ	Względny luz łożyskowy	–
ψ_{eff}	Efektywny względny luz łożyskowy	–
ω	Prędkość kątowa	rad/s
Ω	Kąt opasania łożyska	deg
θ_{max}	Współrzędna kątowa największego ciśnienia w filmie	deg

1.2. Podstawy teoretyczne

Metoda obliczeń hydrodynamicznych ślizgowych łożysk poprzecznych, ujęta w normach ISO 7902-1, 2, 3, dotyczy wyznaczania charakterystyk statycznie obciążonego łożyska poprzecznego o skończonej długości. Podstawą obliczeń są wyniki numerycznego rozwiązania równania różniczkowego Reynoldsa w uproszczonej postaci, odpowiadającej sytuacji kinematycznej przestawionej na rysunku 1. Oprócz założeń podanych w części wstępnej do artykułu przyjęto, że nie występuje ruch środka czopa w kierunku prostopadłym do powierzchni panwi łożyska. Eliminuje to jeden z członów prawej strony równania Reynoldsa.



Rysunek 1. Składowe obwodowych prędkości powierzchni czopa i panwi w łożysku poprzecznym

W łożysku przedstawionym na rysunku 1, wskutek przesunięcia środków czopa i panwi powstaje zbieżna szczelina smarowa, w której występuje korzystny rozkład ciśnienia smaru. Układ współrzędnych prostokątnych, w których wyprowadza się równanie Reynoldsa, można związać z dowolnym punktem na powierzchni panwi lub czopa. Na rysunku początek układu, punkt O, leży na powierzchni panwi. Oś Y przechodzi przez środek panwi O_B, prostopadła do niej oś X jest styczna do

powierzchni panwi, zaś oś Z jest równoległa do osi łożyska (pokrywa się z tworzącą cylindrycznej powierzchni panwi).

W ogólnym przypadku w łożysku poprzecznym wirować mogą zarówno czop, jak i panew – stąd dwa wektory prędkości obwodowych: U_1 panwi i T_2 czopa są styczne do powierzchni walcowych odpowiednich elementów. Wektor U_1 pokrywa się z osią X. Wektor T_2 tworzy z osią X kąt, którego tangens wynosi $\frac{\partial h}{\partial x}$, a cosinus jest w przybliżeniu równy 1. Stąd jego składowe $U_2 \cong T_2$ i $V_2 = U_2 \frac{\partial h}{\partial x}$. Po podstawieniu do równania Reynoldsa otrzymuje się postać:

$$\frac{1}{6\eta}\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(h^3 \frac{\partial p}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(h^3 \frac{\partial p}{\partial z}\right)\right] = (U_1 - U_2)\frac{\partial h}{\partial x} + 2V_2 \tag{4}$$

gdzie $(U_1 - U_2)\frac{\partial h}{\partial x} + 2V_2 = (U_1 - U_2)\frac{\partial h}{\partial x} + 2U_2 \frac{\partial h}{\partial x} = (U_1 + U_2)\frac{\partial h}{\partial x}$

a zatem przy oznaczeniach przyjętych w normie ISO 7902:

$$\frac{1}{6\eta}\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(h^3 \frac{\partial p}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(h^3 \frac{\partial p}{\partial z}\right)\right] = \left(U_B + U_J\right)\frac{\partial h}{\partial x} = U \frac{\partial h}{\partial x} \tag{5}$$

gdzie $U = U_B + U_J$. W przypadku, gdy tylko czop wiruje

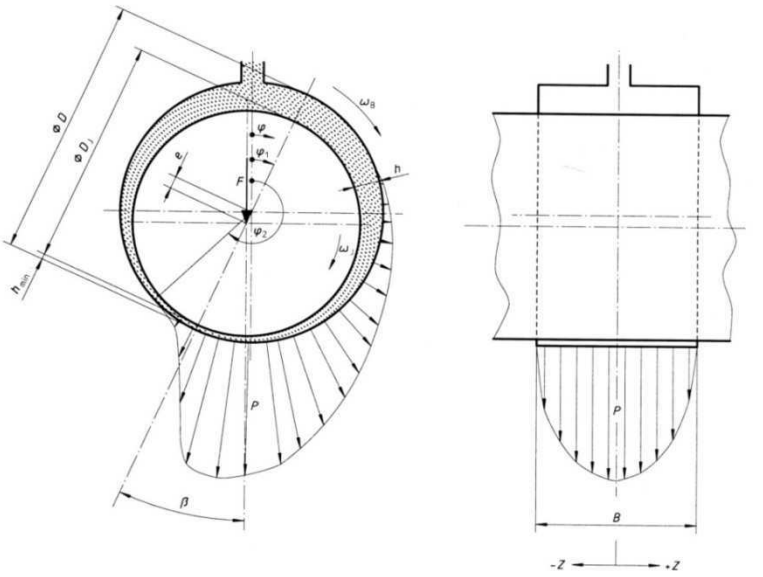
$$\frac{1}{6\eta}\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(h^3 \frac{\partial p}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(h^3 \frac{\partial p}{\partial z}\right)\right] = U_J \frac{\partial h}{\partial x} \tag{6}$$

Identyczny wynik otrzymuje się przy związaniu układu współrzędnych z punktem leżącym na powierzchni czopa i osią X styczną do niej. Przy opracowywaniu metody ISO całkowano numerycznie równanie (5), któremu odpowiada rozkład ciśnienia w warstwie smaru przedstawiony na rysunku 2 dla łożyska pełnego (o kącie opasania $\Omega = 360^o$).

Współczesne łożyska ślizgowe poprzeczne są znacznie węższe niż stosowane wcześniej. Stosunek długości do średnicy zawiera się zwykle w przedziale $0{,}25 \leq \frac{B}{D} \leq 1$. Ponieważ w wąskim (krótkim) łożysku drogi przepływu oleju w kierunku osiowym i obwodowym znacznie się różnią, przepływ oleju w kierunku osi Z staje się dominującym składnikiem całego przepływu, a rozkład ciśnienia w filmie olejowym (jak na rys. 2) jest bardziej stromy niż w kierunku obwodowym, czyli $\frac{\partial p}{\partial z} > \frac{\partial p}{\partial x}$. Pozwala to pominąć pierwszy człon po lewej stronie równania Reynoldsa i sprowadzić je do stosunkowo łatwej do całkowania postaci:

$$\frac{\partial}{\partial z}\left(h^3 \frac{\partial p}{\partial z}\right) = 6\eta U \frac{\partial h}{\partial x} \tag{7}$$

Podejście takie, odmienne od przyjętego w metodach ISO lub Raimondiego i Boyda [1], znane jest w literaturze jako rozwiązanie Ocvirka lub teoria łożyska krótkiego (*short-bearing theory*) [2].

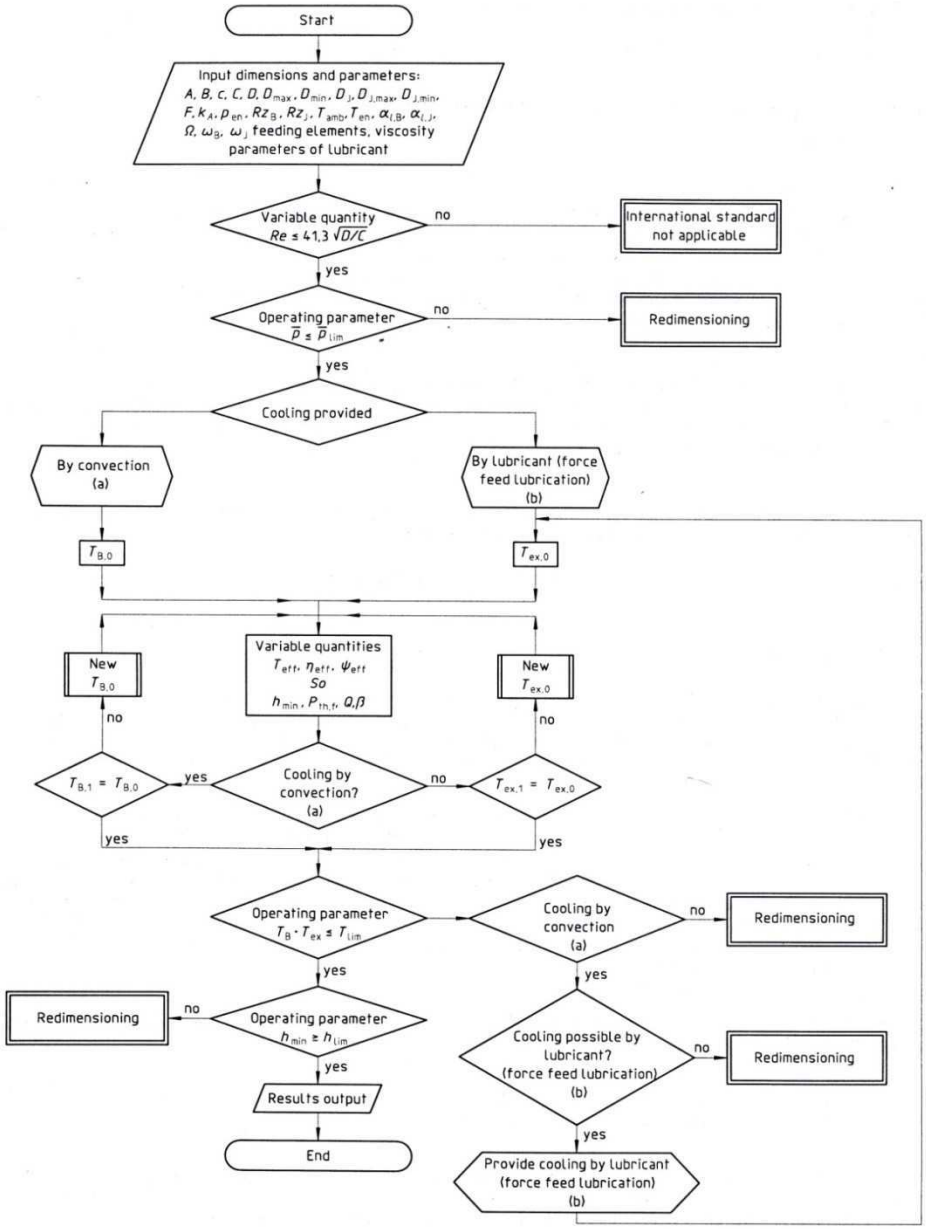


Rysunek 2. Rozkład ciśnienia w filmie olejowym w łożysku o kącie opasania Ω=360º (według [3])

Wyniki numerycznego całkowania równania Reynoldsa w metodzie ISO opracowano w postaci zbioru wykresów, na których podano związki wielkości bezwymiarowych, charakteryzujących łożysko w funkcji liczby Sommerfelda So. Pozwalają one obliczać szukane parametry w dowolnym, jednolitym układzie jednostek. Wykresy wykonano dla wartości kąta opasania Ω = 360º, 180º, 120º i 60º oraz dla $\frac{B}{D}$ = 0,25; 0,50; 0,75; 1; 1,25 i 1,5. Zamieszczono je w normie ISO 7092-2 [4].

Procedurę obliczeniową ISO przedstawiono w wersji oryginalnej na rysunku 3, jako schemat blokowy kolejnych operacji obliczeniowych i decyzji podejmowanych w celu przeprowadzenia wymaganych iteracji. Sposób postępowania najłatwiej prześledzić na przykładzie konkretnych obliczeń, co pokazano w następnym punkcie.

Obliczenia łożyska mogą być prowadzone w dwóch zasadniczych kierunkach. Jeden to sprawdzenie warunków pracy łożyska w przypadku, gdy znane są z góry wszystkie wielkości tworzące liczbę Sommerfelda So. Drugi przypadek to wyznaczenie parametrów dyspozycyjnych (zwykle luzu łożyskowego ψ lub lepkości smaru w warunkach roboczych) tak, aby wielkości zapewniające poprawne działanie łożyska (minimalna grubość filmu olejowego i maksymalna temperatura smaru) nie przekraczały dopuszczalnych wartości granicznych h_{lim} i T_{lim}. Wytyczne do przyjmowania wartości granicznych podano w normie ISO 7902-3 [5]. Dotyczą one, poza podanymi wielkościami, maksymalnych wartości nacisków obliczeniowych $\bar{p}_{lim}$ – ze względu na wytrzymałość materiału panwi.



Rysunek 3. Schemat blokowy działań w metodzie obliczeniowej ISO (według [3])

1.3. Przykład obliczeniowy

Obliczyć najmniejszą grubość filmu olejowego i inne charakterystyki łożyska o wymiarach $D = 100$ mm i długości panwi $B = 50$ mm, obciążonego statycznie siłą $F = 25\,000$ N, przy prędkości obrotowej $N_J = 25$ obr/s ($n_J = 1500$ obr/min). Istnieje

podejrzenie, że podane warunki operacyjne mogą się okazać krytyczne z uwagi na obciążenie cieplne łożyska. Oprawa łożyska, o powierzchni zewnętrznej $A = 0{,}28$ m^2, i panew wykonane są jako monolit ze stopu aluminiowego AlSn (taka konstrukcja spotykana jest na przykład w pompach zębatych), natomiast wał wykonany jest ze stali. Olej ISO VG 100 doprowadzany jest otworem o średnicy $d_L = 5$ mm, umieszczonym po nieobciążonej stronie łożyska (jak na rys. 2). Należy sprawdzić, czy możliwe jest bezpieczne działanie łożyska bez dodatkowego zewnętrznego chłodzenia (wymiana ciepła wyłącznie przez konwekcję). Temperatura zewnętrzna wynosi $T_{amb} = 30$ ºC. Maksymalna dopuszczalna temperatura łożyska to $T_{lim} = 80$ ºC. W przypadku jej przekroczenia należy zastosować zewnętrzne chłodzenie oleju, co wymaga zasilania łożyska pod ciśnieniem. Zakłada się, że w takiej sytuacji olej o temperaturze na dopływie $T_{en} = 50$ ºC będzie doprowadzany do łożyska z nadciśnieniem $p_{en} = 5 \cdot 10^5$ Pa.

Dane dodatkowe:

- tolerancje otworu panwi $\emptyset 100_{0}^{+0{,}022}$mm,
- tolerancje średnicy czopa $\emptyset 99_{+0{,}022}^{+0{,}040}$mm,
- wysokość chropowatości panwi $R_{zB} = 3{,}2$ µm,
- wysokość chropowatości czopa $R_{zJ} = 1{,}0$ µm,
- współczynnik rozszerzalności cieplnej panwi $\alpha_{lB} = 23 \cdot 10^{-6}$ K^{-1},
- współczynnik rozszerzalności cieplnej wału $\alpha_{lJ} = 11 \cdot 10^{-6}$ K^{-1},
- współczynnik przejmowania ciepła $k_A = 20$ W/(m^{2}K),
- ciepło właściwe (objętościowe) oleju $\rho c = 1{,}8 \cdot 10^6$ J/(m^{3}K)
- gęstość oleju w temperaturze 60 ºC $\rho = 900$ kg/m^3
- charakterystyka lepkościowa oleju ISO VG 100 (według rys. 4),
- lepkość dynamiczna w temperaturze 60 ºC $\eta = 0{,}037$ Pa · s.

Dopuszczalne wartości graniczne (przyjęte według zaleceń podanych w [5]):

- maksymalne dopuszczalne naciski obliczeniowe $\bar{p}_{lim} = 7$ MPa (dla stopów AlSn),
- maksymalna dopuszczalna temperatura łożyska $T_{lim} = 80$ ºC,
- dopuszczalna minimalna grubość filmu olejowego $h_{lim} = 9$µm (wobec przyjętych R_{zB} i R_{zJ}).

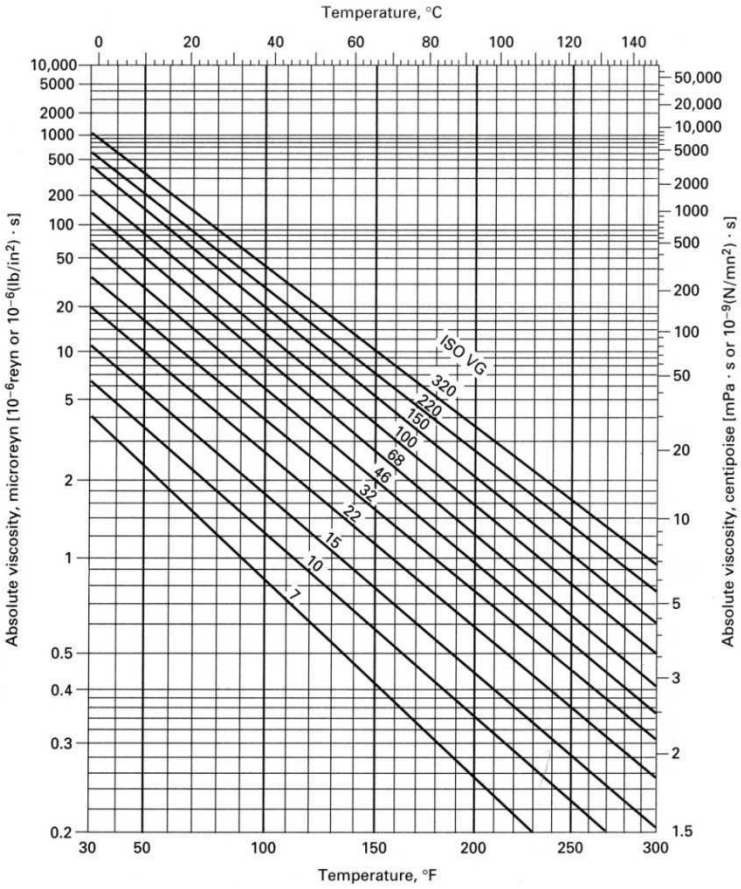
Obliczenia łożyska przeprowadzono zgodnie z algorytmem na rysunku 3, przy czym na początku założono, że średnia (efektywna) temperatura pracy łożyska wynosi $T_{B,0} = T_{eff} = 60$ ºC.

- Średni względny luz łożyskowy $\bar{\psi}$ (pomiar w temperaturze 20ºC)

$$\psi_{max} = \frac{D_{max} - D_{J,min}}{D} = \frac{100{,}022 - 99{,}022}{100} = 0{,}001$$

$$\psi_{min} = \frac{D_{min} - D_{J,max}}{D} = \frac{100{,}0 - 99{,}040}{100} = 0{,}0006$$

$$\bar{\psi} = 0{,}5(\psi_{max} + \psi_{min}) = 0{,}5(0{,}001 + 0{,}0006) = 0{,}0008 \qquad (8)$$



Rysunek 4. Charakterystyki lepkościowe olejów mineralnych ISO VG (według [6])

- Zmiana luzu w temperaturze pracy łożyska

$$\Delta\psi = \left(\alpha_{l,B} - \alpha_{l,J}\right)\left(T_{eff} - 20°\text{C}\right) = (23-11)\cdot 10^{-6} \cdot (60-20) = 0{,}48 \cdot 10^{-3}$$

- Efektywny luz łożyskowy (w temperaturze pracy łożyska)
  - względny $\psi_{eff} = \bar{\psi} + \Delta\psi = 0{,}0008 + 0{,}00048 = 1{,}28 \cdot 10^{-3}$ (9)
  - promieniowy: $C_{R,eff} = 0{,}5 D \psi_{eff} = 0{,}5 \cdot 100 \cdot 1{,}28 \cdot 10^{-3} = 0{,}064$ mm (10)
- Sprawdzenie warunków ograniczających stosowanie metody ISO
  - przepływ laminarny: $Re = \frac{\rho U_J C_{R,eff}}{2\eta} \leq 41{,}3\sqrt{\frac{D}{C_{R,eff}}}$ (11)

$$Re = \frac{900 \cdot \pi \cdot 100 \cdot 10^{-3} \cdot 25 \cdot 1{,}28 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0{,}037} = 12{,}23$$

$$Re = 12{,}23 < 41{,}3\sqrt{\frac{100}{0{,}064}} = 1632{,}5$$

– naciski obliczeniowe: $\bar{p} = \frac{F}{DB} = \frac{25000}{0{,}1 \cdot 0{,}05} = 5 \cdot 10^6\text{Pa} < \bar{p}_{lim} = 7 \cdot 10^6\text{Pa}$ (12)

- Prędkość kątowa czopa

$$\omega_J = 2 \cdot \pi \cdot N_J = 2 \cdot \pi \cdot 25 = 157{,}1 \text{ rad/s} \quad (13)$$

- Liczba Sommerfelda So

$$So = \frac{F\psi_{eff}^2}{DB\eta_{eff}\omega_J} = So\left(\epsilon, \frac{B}{D}, \Omega\right) \quad (14)$$

$$So = \frac{25000 \cdot 1{,}28^2 \cdot 10^{-6}}{100 \cdot 10^{-3} \cdot 50 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}037 \cdot 157{,}1} = 1{,}409 \quad (15)$$

- Ekscentryczność względna (rys. 5 – wykres 11 z normy 7902-2 [4])

$$\varepsilon = f\left(So, \frac{B}{D}, \Omega\right) = 0{,}77 \quad (16)$$

- Minimalna grubość filmu olejowego

$$h_{min} = 0{,}5D\psi_{eff}(1 - \varepsilon) = 0{,}5 \cdot 100 \cdot 1{,}28 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - 0{,}77) = 14{,}7 \text{ µm} \quad (17)$$

- Względny współczynnik tarcia, uwzględniający straty tarcia w zbieżnej i rozbieżnej części szczeliny smarowej (rys. 6)

$$\frac{f'}{\psi_{eff}} = f\left(So, \frac{B}{D}, \Omega\right) = 3{,}52 \quad (18)$$

- Współczynnik tarcia

$$f' = \frac{f'}{\psi_{eff}} \cdot \psi_{eff} = 3{,}52 \cdot 1{,}28 \cdot 10^{-3} = 4{,}51 \cdot 10^{-3} \quad (19)$$

- Moc tarcia generowana w łożysku

$$P_{th,f} = Ff'\frac{D}{2}\omega_J = 25000 \cdot 4{,}51 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0{,}1}{2} \cdot 157{,}1 = 887 \text{ W} \quad (20)$$

- Strumień ciepła odprowadzany do otoczenia przez konwekcję (przez obudowę i wał)

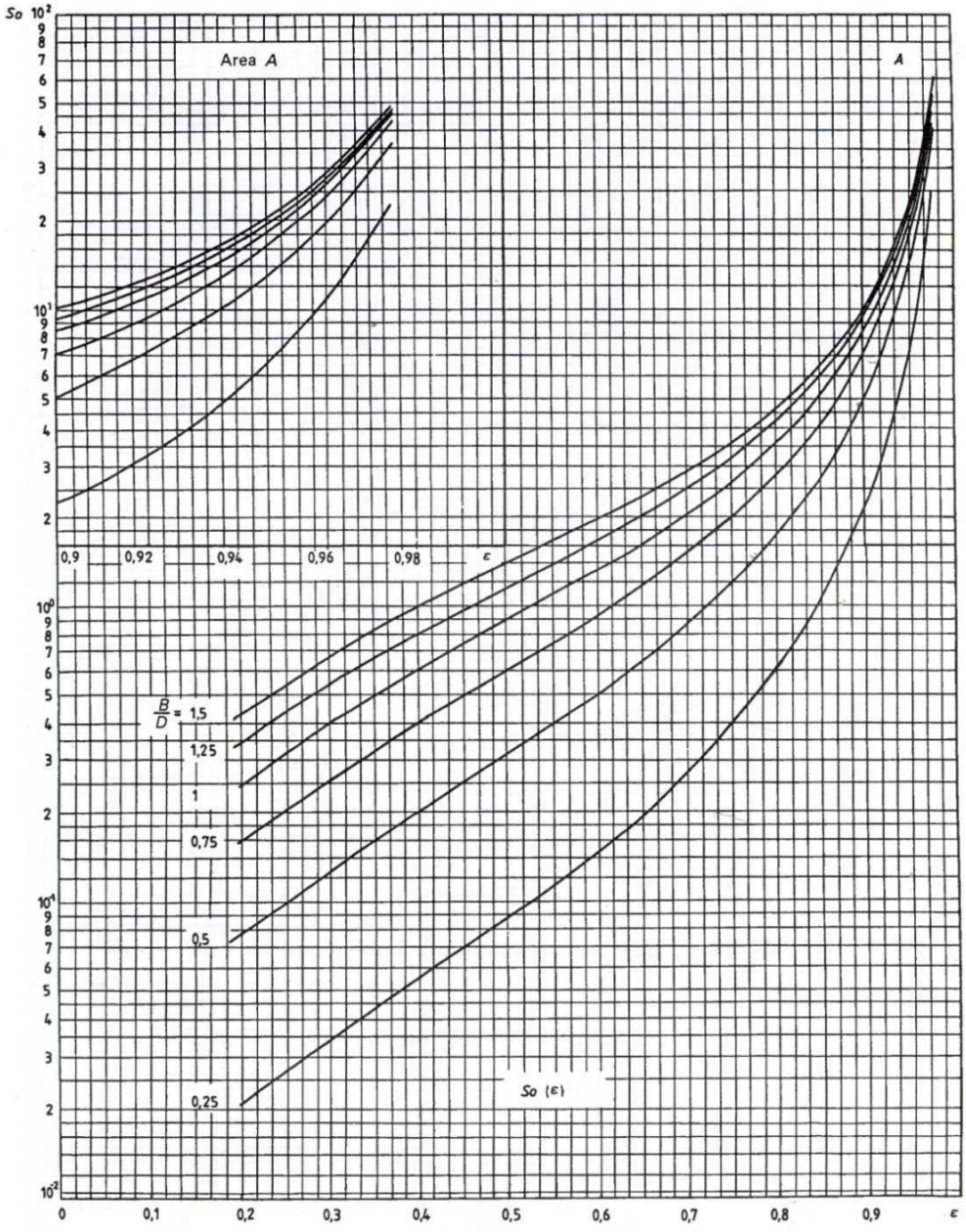
$$P_{th,amb} = k_A A(T_B - T_{amb}) = P_{th,f} \quad (21)$$

- Temperatura łożyska oszacowana na podstawie bilansu cieplnego (21)

$$T_{B,1} = \frac{P_{th,f}}{k_A A} + T_{amb} = \frac{887}{20 \cdot 0{,}28} + 30 = 188{,}4\text{°C} \quad (22)$$

Ponieważ $T_{B,1} > T_{B,0}$, należy skorygować wstępne założenie o temperaturze łożyska:

$$T_{B,0} = 60°\text{C}$$



Rysunek 5. Liczba Sommerfelda So jako funkcja ekscentryczności względnej ε dla Ω =360° [4]

- Poprawione założenie dotyczące temperatury łożyska rozpoczyna nowy krok iteracyjny

$$T_{B,0}^{i+1} = T_{B,0}^{i} + 0{,}2\left(T_{B,1}^{i} - T_{B,0}^{i}\right) = 60 + 0{,}2(188{,}4 - 60) = 85{,}7\text{°C} \quad (23)$$

Kolejne iteracje prowadzi się do momentu, gdy różnica między założoną temperaturą $T_{B,0}^{i}$ i obliczoną temperaturą łożyska $T_{B,1}^{i}$ będzie mniejsza niż 1°C. Tak wyznaczoną temperaturę T_B i odpowiadające jej charakterystyki łożyska uznaje się za oszacowane wystarczająco dokładnie. W analizowanym przykładzie wykonano sześć iteracji. Wyniki kolejnych obliczeń zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Obliczanie łożyska poprzecznego według ISO-7902 przy chłodzeniu konwekcyjnym

Zmienna	Jednostki	Etap iteracji					
		1	2	3	4	5	6
$T_{B,0}$=T_{eff}	°C	60	85,7	92,3	94,9	95,8	96,3
η_{eff}	Pa·s	0,037	0,016	0,012	0,0113	0,011	0,0108
ψ_{eff}	–	$1{,}28 \cdot 10^{-3}$	$1{,}59 \cdot 10^{-3}$	$1{,}66 \cdot 10^{-3}$	$1{,}70 \cdot 10^{-3}$	$1{,}701 \cdot 10^{-3}$	$1{,}705 \cdot 10^{-3}$
So	–	1,41	5,03	7,31	8,36	8,46	8,56
ε	–	0,77	0,90	0,92	0,93	0,935	0,940
h_{min}	µm	14,7	8,2	6,6	6,00	5,8	5,6
f'/ψ_{eff}	–	3,55	1,60	1,30	1,16	1,14	1,13
P_f	W	887	499	422	387	381	377
T_B	°C	188,3	119,1	105,3	99,1	98,0	97,2
$T_{B,0}$	°C	85,7	92,3	94,9	95,1	96,3	

W szóstym etapie obliczeń różnica między założoną temperaturą $T_{B,0}$ i obliczoną temperaturą łożyska T_B jest mniejsza niż 1°C, co pozwala uznać oszacowanie temperatury łożyska za wystarczająco dokładne. Ponieważ $T_B > T_{lim}$, rozpraszanie ciepła przez konwekcję nie wystarcza. Należy zatem przeanalizować wariant zasilania łożyska pod ciśnieniem, z zewnętrznym chłodzeniem przepływającego oleju. Obliczenia przeprowadzono według schematu blokowego na rysunku 3.

- Założenie wstępne temperatury $T_{ex,0}$ oleju wypływającego z łożyska

$$T_{ex,0} = T_{en} + 20\text{°C} = 50 + 20\text{°C} = 70\text{°C} \quad (24)$$

- Efektywna temperatura oleju

$$T_{eff} = 0{,}5(T_{en} + T_{ex,0}) = 0{,}5 \cdot (50 + 70) = 60\text{°C} \quad (25)$$

- Efektywna lepkość dynamiczna oleju (rys. 4)

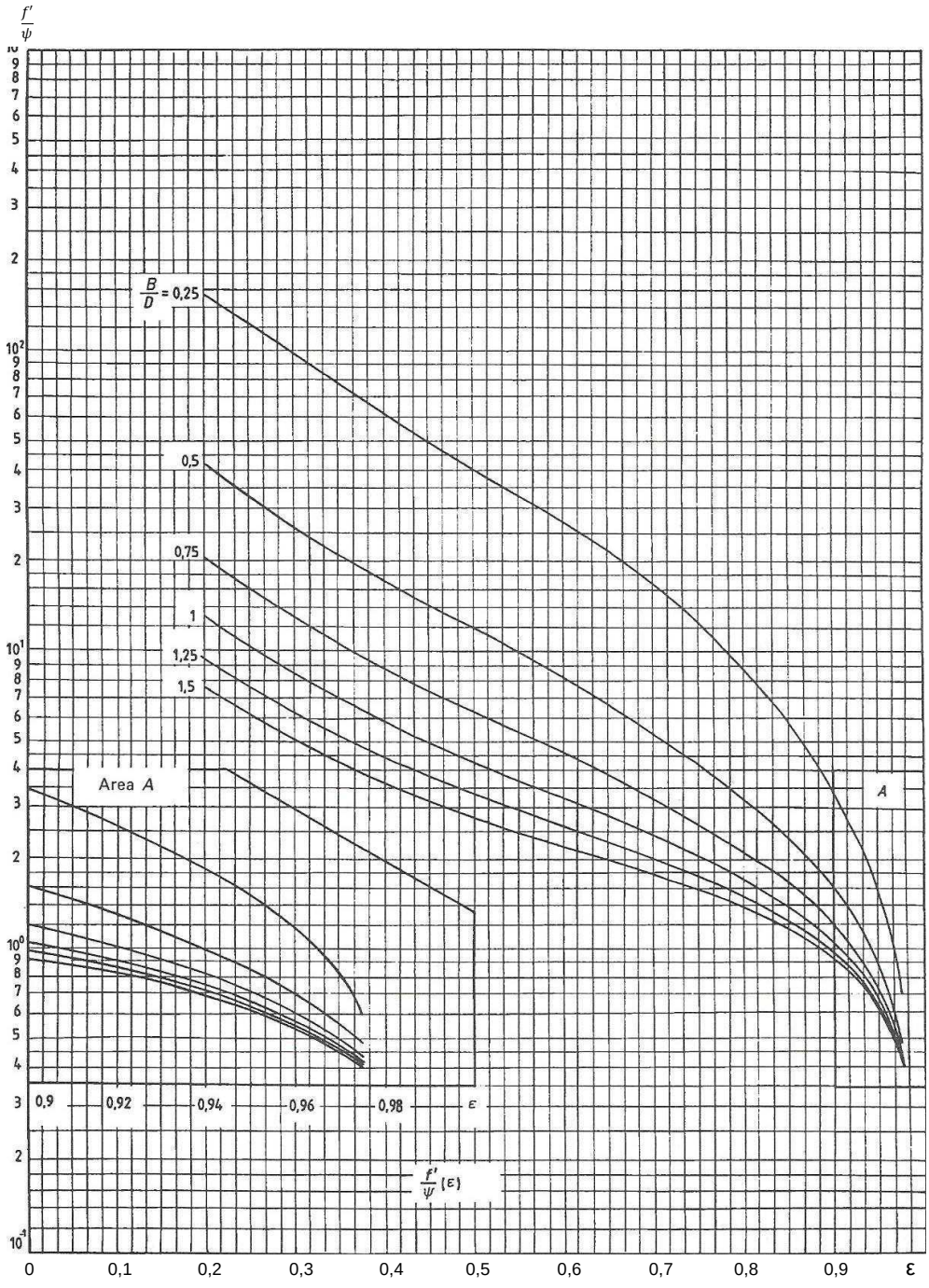
$$\eta_{eff} = 0{,}037\ \text{Pa} \cdot \text{s} \quad (26)$$

- Efektywny względny luz łożyskowy (według wzoru (9))

$$\psi_{eff} = 1{,}28 \cdot 10^{-3} \quad (27)$$

- Liczba Sommerfelda (według (15))

$$So = 1{,}409 \quad (28)$$



Rysunek 6. Względny współczynnik tarcia $\frac{f'}{\psi}$ jako funkcja ekscentryczności względnej ε dla Ω=360° [4]

- Ekscentryczność względna (według (16))

$$\varepsilon = f\left(So, \frac{B}{D}, \Omega\right) = 0{,}77 \tag{29}$$

- Minimalna grubość filmu olejowego (według (17))

$$h_{min} = 14{,}7\ \mu\text{m} \tag{30}$$

- Względny współczynnik tarcia (według (18))

$$\frac{f'}{\psi_{eff}} = f\left(So, \frac{B}{D}, \Omega\right) = 3{,}52 \tag{31}$$

- Współczynnik tarcia (według (19))

$$f' = 4{,}51 \cdot 10^{-3} \tag{32}$$

- Moc tarcia generowana w łożysku (według (20))

$$P_{th,f} = 887\ \text{W} \tag{33}$$

- Natężenie wypływu oleju z panwi wywołane ciśnieniem w filmie smarowym

$$Q_3 = D^3 \psi_{eff} \omega_J Q_3^* \ \text{(wzór (8) w [3])}, \tag{34}$$

gdzie współczynnik $Q_3^* = 0{,}0915$ odczytano z wykresu 41 w [4], stąd

$$Q_3 = 100^3 \cdot 10^{-9} \cdot 1{,}28^{-3} \cdot 157{,}1 \cdot 0{,}0915 = 18{,}40 \cdot 10^{-6}\text{m}^3/\text{s} \tag{35}$$

- Natężenie wypływu oleju wywołane ciśnieniem zasilania

$$Q_P = \frac{D^3 \psi_{eff} p_{en}}{\eta_{eff}} Q_P^* \ \text{(wzór (9) w [3])}, \tag{36}$$

gdzie współczynnik $Q_P^* = Q_P^*\left(\varepsilon, \frac{B}{D}, \Omega, \frac{d_L}{B}\right) = 0{,}128$ obliczono według wzoru (4) w [4], stąd

$$Q_P = \frac{100^3 \cdot 10^{-9} \cdot 1{,}28^{-3} \cdot 10^{-9} \cdot 5 \cdot 10^5}{0{,}037} \cdot 0{,}128 = 3{,}63 \cdot 10^{-6}\text{m}^3/\text{s} \tag{37}$$

- Całkowite natężenie przepływu oleju przez łożysko

$$Q = Q_3 + Q_P = (18{,}40 + 3{,}63) \cdot 10^{-6} = 22{,}03 \cdot 10^{-6}\ \text{m}^3/\text{s} \tag{38}$$

- Ciepło odprowadzane przez olej

$$P_{th,L} = \rho c Q (T_{ex} - T_{en}) = P_{th,f} \tag{39}$$

- Temperatura wypływającego oleju oszacowana na podstawie bilansu cieplnego (39):

$$T_{ex,1} = \frac{P_{th,f}}{\rho c Q} + T_{en} = \frac{887}{1{,}8 \cdot 10^6 \cdot 22{,}03 \cdot 10^{-6}} + 50 = 72{,}4\text{°C} \tag{40}$$

  $T_{ex,1}$ różni się od założonej $T_{ex,0} = 70$°C o więcej niż 1°C, stąd należy obliczyć nową wartość $T_{ex,0}$ w następnym kroku obliczeniowym (iteracji).
- Poprawiona wartość temperatury smaru na wypływie

$$T_{ex,0}^{i+1} = 0{,}5(T_{ex,0}^{i} + T_{ex,1}^{i}) = 0{,}5 \cdot (70 + 72{,}4) = 71{,}2\text{°C} \tag{41}$$

W analizowanym przypadku okazało się, że wystarczył tylko jeden dodatkowy etap iteracyjny, aby uzyskać założoną dokładność obliczeń. Wyniki obliczeń dla obu etapów zestawiono w tabeli 3. Wartości liczbowe w ostatniej kolumnie stanowią oszacowanie podstawowych charakterystyk analizowanego łożyska. Jak widać, zarówno h_{min}, jak i $T_B = T_{ex}$ są wystarczająco odległe od założonych wartości granicznych.

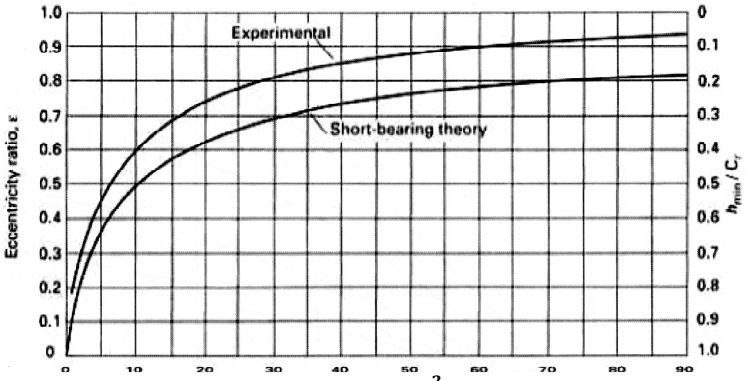
Tabela 3. Obliczanie łożyska poprzecznego metodą zgodną z ISO-7902 przy założeniu odprowadzania ciepła przez olej podawany pod ciśnieniem

Zmienna	Jednostki	Krok iteracji	
		1	2
T_{en}	°C	50	50
$T_{ex,0}$	°C	70	71,2
T_{eff}	°C	60	60,6
η_{eff}	Pa·s	0,037	0,036
ψ_{eff}	–	$1{,}28 \cdot 10^{-3}$	$1{,}29 \cdot 10^{-3}$
So	–	1,409	1,471
ε	–	0,77	0,79
h_{min}	μm	14,7	13,5
f'/ψ_{eff}	–	3,55	3,40
P_f	W	887	861
Q_3	m^3/s	$18{,}40 \cdot 10^{-6}$	$18{,}64 \cdot 10^{-6}$
Q_p	m^3/s	$3{,}63 \cdot 10^{-6}$	$3{,}94 \cdot 10^{-6}$
Q	m^3/s	$22{,}03 \cdot 10^{-6}$	$22{,}58 \cdot 10^{-6}$
$T_{ex,1}$	°C	72,37	71,18
$T_{ex,0}$	°C	71,2	

2. Porównanie wyników obliczeń łożyska różnymi metodami

Charakterystyki łożyska wyznaczone metodą ISO porównano z wynikami obliczeń metodą Raimondiego i Boyda oraz DuBoisa i Ocvirka (według teorii łożyska krótkiego). Tę ostatnią metodę zmodyfikowano zgodnie z informacją podaną w [7], zalecającą przyjmowanie wartości ekscentryczności względnej ε na podstawie eksperymentalnie wyznaczonej zależności $\varepsilon = f(O_N)$, przedstawionej na rysunku 7. Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 4. Wszystkie obliczenia

przeprowadzono dla danych wyjściowych (pierwsze cztery wiersze w tab. 4), ustalonych w przykładzie rozwiązanym metodą ISO.



$$O_N = \frac{\bar{p}}{\eta \cdot n''} \cdot \left(\frac{D}{B}\right)^2 \cdot \psi^2$$

Rysunek 7. Ekscentryczność względna w funkcji liczby Ocvirka O_N [7]

Tabela 4. Charakterystyki łożyska obliczone różnymi metodami

Zmienna	Jednostki	Metoda ISO [3-5]	Raimondi – Boyd [1]	Teoria krótkiego łożyska [2,7]
T_{en}	°C	50	50	50
T_{eff}	°C	60,6	60,6	60,6
η_{eff}	Pa·s	0,036	0,036	0,036
ψ_{eff}	–	$1{,}29 \cdot 10^{-3}$	$1{,}29 \cdot 10^{-3}$	$1{,}29 \cdot 10^{-3}$
Liczba kryterialna	–	$So = 1{,}471$	$S = 0{,}108$	$N_L = 37$
ε	–	0,79	0,76	0,84
h_{min}	**µm**	**13,5**	**15,5**	**10,3**
f'	–	0,00438	0,0048	0,0044
P_f	W	861	936,6	865,6
Q	m^3/s	$22{,}58 \cdot 10^{-6}$	$21{,}36 \cdot 10^{-6}$	$21{,}28 \cdot 10^{-6}$
T_{ex}	°C	**71,2**	**74,1**	**72,6**
p_{max}	**Pa**	–	**$13{,}6 \cdot 10^6$**	**$19{,}75 \cdot 10^6$**
θ_{max}	deg	–	15,7	15,7
β	deg	34	36,1	26,9

Jak wynika z danych w tabeli, wszystkie metody obliczeniowe wykazały, że w analizowanym łożysku nie przekroczono granicznych wartości parametrów określających warunki bezpiecznej pracy, to znaczy: $h_{min} > h_{lim}$ oraz $T_{ex} < T_{lim}$. Stwierdzono natomiast różnice pomiędzy oszacowanymi wartościami tych parametrów, szczególnie istotne w przypadku minimalnej grubości filmu olejowego (ponad 20%). Najbardziej zachowawcza okazała się metoda krótkiego łożyska ($h_{min} = 10{,}5$ µm), co oznacza, że przy konstruowaniu nowego łożyska, opartym o kryterium najmniejszej dopuszczalnej grubości filmu, konstruktor może liczyć na największy margines bezpieczeństwa, przy którym nie nastąpi przerwanie warstwy smaru podczas niespodziewanego zwiększenia obciążenia, nieuwzględnionego

w założeniach. Stwierdzenie to potwierdza również porównanie wartości największego ciśnienia w filmie – w metodzie krótkiego łożyska wartość ta jest większa niż w metodzie Raimondiego i Boyda. Wartości drugiego wyznaczanego parametru – temperatury łożyska T_{ex} – różnią się nieznacznie (o 2÷4%), co można uznać za mieszczące się w granicach błędu obliczeniowego.

Metoda obliczeniowa według ISO daje wyniki oszacowania h_{min} lokujące się pomiędzy pozostałymi metodami. Istotnym mankamentem tej metody jest brak oszacowania wartości i współrzędnej kątowej maksymalnego ciśnienia w filmie olejowym. Wielkości te, wyznaczane w pozostałych procedurach, są przydatne w niektórych sytuacjach, na przykład przy doborze materiału na warstwę powierzchniową panwi. Do zalet metody ISO można natomiast zaliczyć rozbudowaną analizę przepływu oleju w łożyskach o bardziej złożonej geometrii powierzchni panwi (rowki i kieszenie smarowe, rowki obwodowe itp.) niż w analizowanym przykładzie. Zagadnienia te, szczegółowo przedstawione w [4], pominięto w niniejszym opracowaniu.

Na podstawie przykładu przedstawionego w artykule można stwierdzić, że metoda obliczeń według ISO jest bardziej pracochłonna niż pozostałe procedury. Najmniej wysiłku wymaga obliczanie charakterystyk łożysk według teorii krótkiego łożyska, chociaż daje ona pewne niedoszacowanie obliczanych parametrów. Niemniej jednak ta procedura obliczeniowa jest najczęściej prezentowana w zachodnich podręcznikach akademickich z branży mechanicznej.

Przedstawione powyżej rozważania można traktować jedynie jako przyczynek do porównania przytoczonych metod obliczania łożysk hydrodynamicznych, ponieważ dotyczą szczególnego, arbitralnie wybranego łożyska. Pełne porównanie wymagałoby bardzo rozbudowanych obliczeń łożysk o parametrach B/D i kątach opasania Ω w całym zakresie ich zmienności, co wykracza poza ramy niniejszego opracowania. W artykule zamierzono przedstawić samą metodę obliczeń, w zasadzie nieznaną – ponieważ w aktualnie istniejących podręcznikach akademickich i poradnikach inżynierskich w ogóle się o niej nie wspomina.

Obecnie, w dobie masowego udostępnienia komputerów, obliczenia łożysk prowadzone z wykorzystaniem wspomnianych w artykule procedur rachunkowych straciły nieco na znaczeniu. Zwykle stosowane są wówczas, gdy nie ma dostępu do profesjonalnych programów komputerowych. Wśród tych ostatnich na szczególną uwagę zasługuje program o nazwie firmowej ADIAB, bazujący na adiabatycznym modelu cieplnym łożyska, opracowany w Instytucie Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku przez J. Kicińskiego [8]. Umożliwia on obliczanie współczynników sztywności i tłumienia filmu smarowego nowoczesną, zmodyfikowaną metodą perturbacji [9], co znacznie skraca czas obliczeń. Program ten, opracowany przez J. Siwka w bardzo przyjaznej dla użytkownika i atrakcyjnej graficznie postaci [10], pozwala na szybkie pozyskanie głównych charakterystyk statycznych i dynamicznych dla dowolnej geometrii szczeliny smarowej i dowolnych warunków pracy łożyska. Dysponentem tej wersji programu jest Katedra Konstrukcji Maszyn i Pojazdów na Wydziale Mechanicznym Politechniki Gdańskiej.

Literatura

1. Raimondi A. A., Boyd J., *A solution for the finite journal bearing and its application to analysis and design – I, II, III*, „ASLE Trans." 1958; vol. 1, s. 159-209.
2. DuBois G.B., Ocvirk F.C., *The Short Bearing Approximation for Plain Journal Bearings*, „Trans. ASME" 1955; vol. 77, s. 1173-1178.
3. ISO 7902-1:1998, *Hydrodynamic plain journal bearings under steady-state conditions – Circular cylindrical bearings* – Part 1: Calculation procedure.
4. ISO 7902-2:1998, *Hydrodynamic plain journal bearings under steady-state conditions – Circular cylindrical bearings* – Part 2: Functions used in the calculation procedure.
5. ISO 7902-2:1998, *Hydrodynamic plain journal bearings under steady-state conditions – Circular cylindrical bearings* – Part 3: Permissible operational parameters.
6. DuBois G.B., Ocvirk F.C., Wehe R.L., *Experimental investigation of eccentricity ratio, friction, and oil flow of long and short journal bearings with load number charts*, National Advisory Committee for Aeronautics, Washington 1955.
7. Burr A.H., Cheatham J.B., *Mechanical analysis and design*, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs 1995.
8. Kiciński J., *Hydrodynamiczne poprzeczne łożyska ślizgowe*, Wydawnictwo Instytutu Maszyn Przepływowych PAN, Gdańsk 1996.
9. Kiciński J., *Teoria i badania hydrodynamicznych poprzecznych łożysk ślizgowych*, Ossolineum, Wrocław 1994.
10. Siwek J., *Obliczanie poprzecznych łożysk ślizgowych. Opis programu „ADB_NEW3"*. Gdańsk 1998 (opracowanie wewnętrzne Katedry Konstrukcji Maszyn i Pojazdów Politechniki Gdańskiej).

CALCULATION OF CHARACTERISTICS OF HYDRODYNAMIC JOURNAL BEARINGS ACCORDING TO ISO-7902

Abstract: *In the article a method of calculation of hydrodynamic journal bearing essential characteristics has been described. The procedure is based on ISO 7902-1, -2, -3 standards which are obligatory from 1998. A computation algorithm in the form of a flow-chart is presented. It enables to check whether a fluid friction in the bearing can be achieved under various conditions of heat exchange. An analysis is illustrated with calculation example. The results of ISO computation method are compared with results of other analytical procedures. Conclusions concerning the work consumption and achieved effects have been drawn.*

Cezary Orlikowski

„PUZZLE" WIELOWROTNIKOWE – MODELOWANIE UKŁADÓW FIZYCZNYCH W DYDAKTYCE

W pracy zaprezentowano metodę budowy modeli matematycznych w postaci schematów blokowych dla układów złożonych pod względem natury fizycznej. Podział badanego układu na wielowrotniki, a także energetyczny opis oddziaływań między nimi umożliwiają budowę złożonego modelu przez proste łączenie modeli podstawowych elementów składowych. Wykorzystano tu metodykę grafów wiązań, jednak sposób realizacji został radykalnie uproszczony, w związku z czym zaproponowane podejście może okazać się skutecznym narzędziem dydaktycznym w zakresie modelowania układów fizycznych.

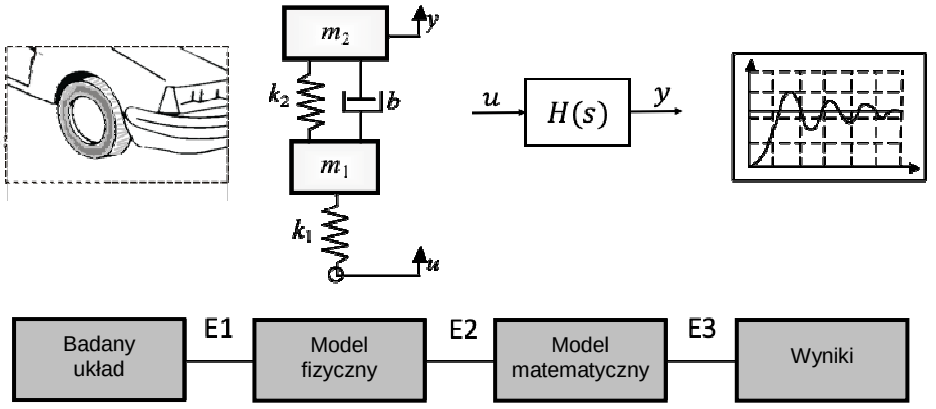
Wprowadzenie

Przyczynkiem do rozważań dotyczących metodologii modelowania układów fizycznych pod kątem wykorzystania w dydaktyce były zajęcia z przedmiotu „podstawy automatyki i robotyki" prowadzone na kierunku studiów Mechanika i Budowa Maszyn. Automatyka, obecnie nierozerwalnie kojarzona z mechatroniką, jest dziedziną multidyscyplinarną, również ze względu na to, że wymaga analizy układów o różnej naturze fizycznej. Wynika to z faktu, iż w układach automatyki, oprócz obiektu sterowania, występują człony pomiarowe, wykonawcze i urządzenia sterujące. We współczesnych układach mechatronicznych mamy więc do czynienia z elementami i podukładami mechanicznymi, płynowymi, cieplnymi, elektrycznymi i elektronicznymi. Nowo uruchomiona specjalność „techniki komputerowe" w budowie maszyn dostarczyła kolejnego impulsu do opracowania rozwiązania łączącego zastosowanie numerycznych metod obliczeniowych z czytelną i względnie prostą metodyką przygotowania danych wejściowych do symulacji komputerowej.

Projektowanie układów regulacji i sterowania jest obecnie realizowanie z zastosowaniem specjalistycznych programów komputerowych (np. Matlab–Simulink [1]). Tak realizowane obliczenia wymagają jednak przygotowania danych w postaci modeli matematycznych analizowanych układów fizycznych. Na rysunku 1 przedstawiono schemat typowego procesu modelowania układów fizycznych. Proces ten można podzielić na trzy etapy:

- E1 – modelowanie fizyczne, czyli przyjmowanie założeń upraszczających odnośnie do zakresu zjawisk, które należy uwzględnić w analizie, oraz stopnia szczegółowości ich rozważania,

- E2 – budowa modelu matematycznego opisującego działanie rozważanego układu w zakresie uwzględnionym w przyjętym modelu fizycznym. Postać modelu matematycznego powinna być dopasowana do stosowanych narzędzi obliczeniowych,
- E3 – obliczenia, czyli rozwiązywanie równań opisujących badany układ fizyczny.



Rysunek 1. Schemat procesu analizy układu fizycznego

Etapy 1 i 2, w odróżnieniu od etapu 3, na ogół nie poddają się algorytmizacji (a w konsekwencji komputeryzacji) i muszą być przeprowadzane przez inżyniera. Możliwość zastosowania wydajnych i zaawansowanych współczesnych technik komputerowych nie zwalnia zatem z konieczności budowy modeli matematycznych (w istocie – odpowiednich równań). Wymaga to umiejętności budowy modeli fizycznych, czyli analizy zjawisk fizycznych występujących w badanym układzie, dokonania niezbędnych (ale dopuszczalnych) uproszczeń (idealizacji) w taki sposób, aby problem został możliwie prosto rozwiązany, jednak bez pominięcia cech istotnych z punktu widzenia celu prowadzonej analizy. Niezbędna jest zatem tutaj dogłębna znajomość i rozumienie analizowanych zjawisk. Bez tego nie ma możliwości poprawnego sformułowania problemu, a więc przygotowania danych do obliczeń komputerowych, a następnie właściwej oceny i interpretacji otrzymanych wyników, również w kontekście możliwych błędów wynikających ze stosowania metod numerycznych. Kwestię tę dobrze ilustruje angielskie powiedzenie: „*Garbage in, garbage out*". Nieznajomość charakteru zjawisk fizycznych uniemożliwia ocenę poprawności otrzymanych wyników. Z powodu przybliżonych, z założenia, obliczeń numerycznych w większości systemów symulacji komputerowych dostępnych jest wiele algorytmów całkowania numerycznego, z których należy wybrać odpowiedni do danego zadania. Oprócz konieczności rozumienia zjawisk fizycznych występujących w rozważanym układzie bardzo istotną rolę odgrywa umiejętność matematycznego opisu tych zjawisk. Możliwość zastosowania metod systematyzujących ten proces jest cenna z praktycznego punktu widzenia.

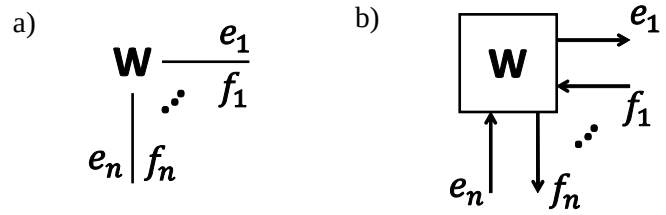
Wymienione powyżej kwestie są również ważne w dydaktyce. W ramach przedmiotu „podstawy automatyki i robotyki" do analizy i projektowania układów automatyki wykorzystuje się m.in. program Matlab–Simulink. Dane wejściowe do obliczeń wprowadzane są w nim w postaci schematu blokowego (model w postaci graficznej) analizowanego układu. Prosty i wygodny sposób budowania schematów blokowych w edytorze Simulinka nie zwalnia jednak z konieczności opracowania modeli matematycznych w postaci transmitancji operatorowych przypisanych poszczególnym blokom schematu. Wyprowadzenie transmitancji członów jest najtrudniejszym etapem modelowania – wymaga wcześniejszego wyprowadzenia równań (różniczkowych) opisujących rozważany układ. Trudności te nasilają się w przypadku analizy układów złożonych o zróżnicowanej naturze fizycznej. Doświadczenie pokazuje, że w najlepszym przypadku studenci studiów I stopnia znają metody opisu poszczególnych elementarnych zjawisk oddzielnie w układach mechanicznych, płynowych, elektrycznych, cieplnych itd. Opis jednorodnych fizycznie, ale bardziej złożonych układów nastręcza często wielu kłopotów i niepewności w postępowaniu. Operowanie na styku podukładów zróżnicowanych fizycznie jest już najczęściej dla nich zadaniem samodzielnie niewykonalnym.

Wspomniane wyżej trudności związane z konstruowaniem modelu matematycznego można w Simulinku ominąć, stosując biblioteki Simscape [2]. Budowa modelu do obliczeń komputerowych polega wtedy na łączeniu graficznych symboli elementów składowych modelu fizycznego. Drugi etap procesu analizy (rys. 1) jest wtedy realizowany komputerowo. Wymaga to jednak przyswojenia złożonej metodologii modelowania z zastosowaniem Simscape. Ponadto wydaje się, że pomijanie etapu układania równań opisujących badany układ nie jest właściwe, z dydaktycznego punktu widzenia, na studiach I stopnia.

W niniejszym opracowaniu zaproponowano podejście, które, jak się wydaje, pozwoli na znaczne zmniejszenie trudności związanych z budową modeli matematycznych niezbędnych w podstawowym pakiecie Simulink. Przyjęto następujące założenia dotyczące konstruowania modeli złożonych (w tym zróżnicowanych fizycznie) układów:

- dekompozycję złożonego układu na możliwie najprostsze komponenty,
- wyprowadzenie modeli matematycznych podstawowych elementów występujących w układzie,
- agregację elementarnych modeli części składowych zgodnie ze strukturą złożonego układu fizycznego.

Taką sformalizowaną (strukturalną) metodą konstruowania modeli matematycznych złożonych układów jest metoda grafów wiązań [3, 4]. Wykorzystuje się w niej pojęcie wielowrotnika i wrót energetycznych (rys. 2). Każdym wrotom energetycznym przyporządkowana jest para wielkości fizycznych *e*, *f*, których iloczyn stanowi moc przekazywaną we wrotach. Operowanie parą wielkości (sygnałów) *e*, *f* oraz usystematyzowanym pojęciem porządku przyczynowego (w każdych wrotach energetycznych jeden z sygnałów jest „wejściem", drugi „wyjściem") stwarza możliwość strukturalnego modelowania, a więc budowania całego modelu z „kawałków" (to samo podejście zastosowano w Simscape).



Rysunek 2. Wielowrotnik: a) w postaci grafu wiązań, b) w postaci schematu blokowego

Metoda grafów wiązań spełnia wyżej wymienione założenia metody modelowania strukturalnego. Rosenberg [4] zwrócił uwagę na istotne aspekty dydaktyczne tej metody. Jej stosowanie wymaga jednak przyswojenia specyficznej metodologii, na co, niestety, nie ma miejsca w programie studiów. Dostrzegając istotne zalety sformalizowanej metody grafów wiązań, zaproponowano podejście, które wykorzystuje opis energetyczny oddziaływań umożliwiający modelowanie strukturalne, ale bez konieczności znajomości i stosowania pełnej metodologii i formalizmu grafów wiązań.

Zaproponowane podejście sprowadza się do prostej i intuicyjnej metody schematów blokowych, z którymi studenci zapoznają się w ramach przedmiotu „podstawy automatyki i robotyki". Transformacja grafów wiązań w inne modele graficzne (w szczególności schematy blokowe) jest przedmiotem prac [5, 6].

Punktem wyjścia jest opracowanie biblioteki wielowrotników – graficznej postaci modeli matematycznych elementarnych podukładów mechanicznych, elektrycznych, płynowych, cieplnych. Zbudowanie modeli matematycznych takich najprostszych członów może być wykonane przez studentów z pełnym zrozumieniem fizycznej i matematycznej strony zagadnienia przy wykorzystaniu elementarnej wiedzy z podstawowych dyscyplin technicznych. Wykorzystując następnie własności wielowrotnika i energetycznego opisu oddziaływań pomiędzy wielowrotnikami, możliwe jest konstruowanie modelu „kawałkami". Warto przy tym podkreślić, że nie zachodzi tu potrzeba formalnego wprowadzania pojęć wielowrotnika i porządku przyczynowego.

Wspomniana biblioteka powinna zawierać elementarne modele we wszystkich możliwych formach przyczynowości całkowej, czyli modele, w których występuje operacja całkowania (w modelu z przyczynowością różniczkową występuje operacja różniczkowania). W ramach wykładu z automatyki studenci zapoznają się m.in. z własnościami członu całkującego (tłumiącego składowe wysokiej częstotliwości) i różniczkującego (wzmacniającego składowe wysokiej częstotliwości). Znajomość tych własności nabiera dodatkowego znaczenia w kontekście dokładności obliczeń numerycznych.

W kolejnych punktach przedstawiono przykładowy zbiór (bibliotekę) elementarnych wielowrotników oraz modele przykładowych „złożonych" układów fizycznych utworzonych metodą składania. Konstruowanie modelu złożonego układu odbywa się na podstawie jego modelu fizycznego i polega na łączeniu

modeli członów składowych zgodnie ze strukturą modelu fizycznego. W wielu przypadkach wymaga to wyboru (dopasowania) wersji wielowrotników o odpowiedniej (pasującej) przyczynowości. Możliwe są też sytuacje trudniejsze:

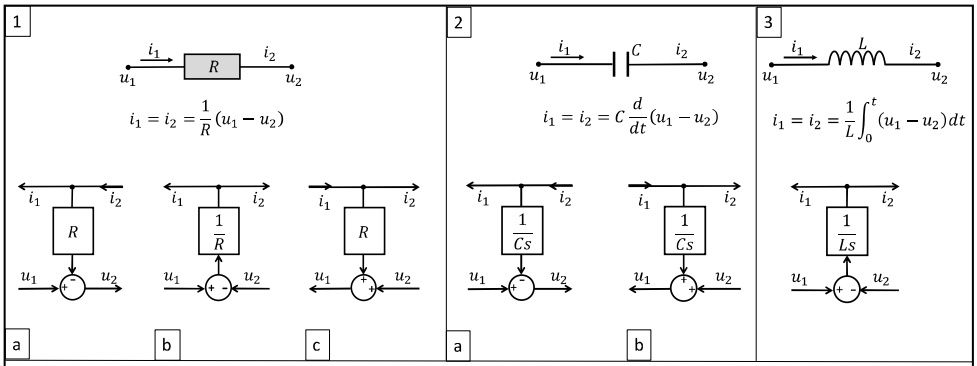
- brak możliwości dopasowania wielowrotników – np. bezpośrednie połączenie modeli dwóch elementów sprężystych. Konieczne jest wtedy zastosowanie jednego elementu zastępczego (ewentualnie zastosowanie modelu z przyczynowością różniczkową),
- połączenia prowadzące do pętli algebraicznych. Obliczenia nie mogą być wówczas realizowane i wtedy również (ale tylko w niektórych przypadkach) można zastosować modele zastępcze.

Innym ważnym zagadnieniem w metodzie wielowrotników, oprócz przyczynowości, jest kierunek przepływu energii. W tym przypadku użycie konwencji zastosowanej w modelach członów elementarnych i uważna analiza znaków w węzłach sumujących w budowanym modelu pozwalają na skuteczne unikanie błędów.

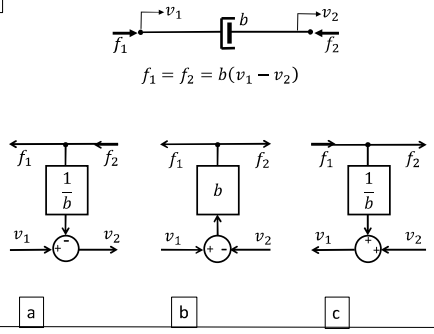
Zaprezentowana metoda stanowi modyfikację wcześniejszych prób autora [7, 8] związanych z problemem skutecznej edukacji w zakresie modelowania układów fizycznych. Kolejne zmiany w podejściu do rozwiązania tego problemu wynikają z doświadczeń wskazujących na potrzebę daleko idących uproszczeń i zrezygnowania ze sformalizowanego ujęcia i opisu algorytmu.

1. Biblioteka modeli elementów podstawowych

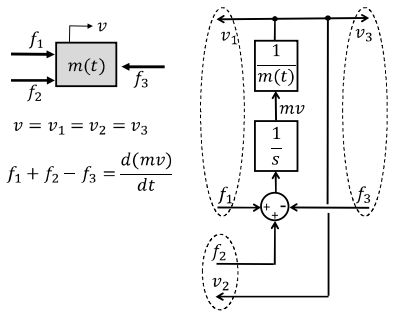
Na rysunku 3 zamieszczono modele piętnastu elementarnych członów fizycznych: elektrycznych, mechanicznych (ruch translacyjny i obrotowy), płynowych i cieplnych. Modele występują we wszystkich możliwych akceptowalnych formach przyczynowości (unikanie różniczkowania).



4

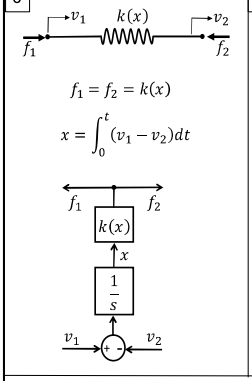


5

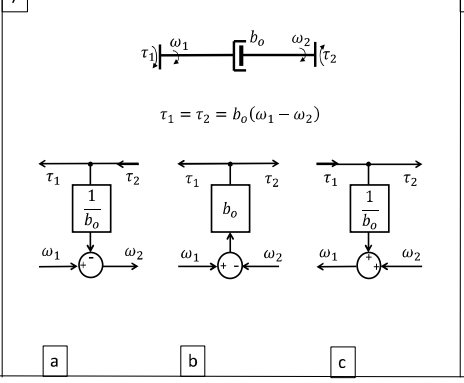


Elementy mechaniczne: *b – współczynnik tarcia płynnego, k – współczynnik sztywności, m – masa, f – siła, v – prędkość.*

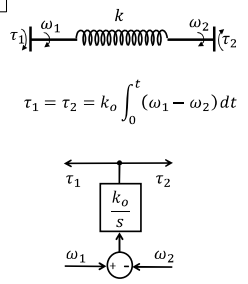
6



7

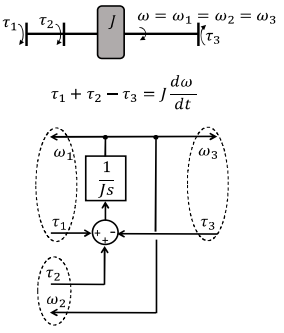


8

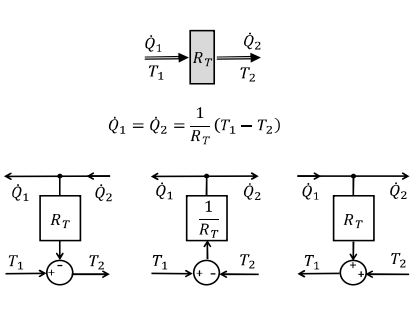


Elementy mechaniczne (cd): *k – współczynnik sztywności (ruch translacyjny) , x – przemieszczenie, ω – prędkość kątowa, τ – moment siły, b_o – współczynnik tarcia płynnego (ruch obrotowy), k_o – współczynnik sztywności (ruch obrotowy)*

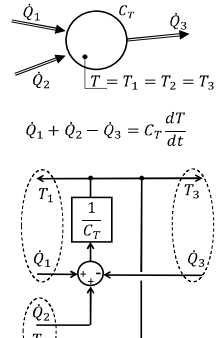
9



10

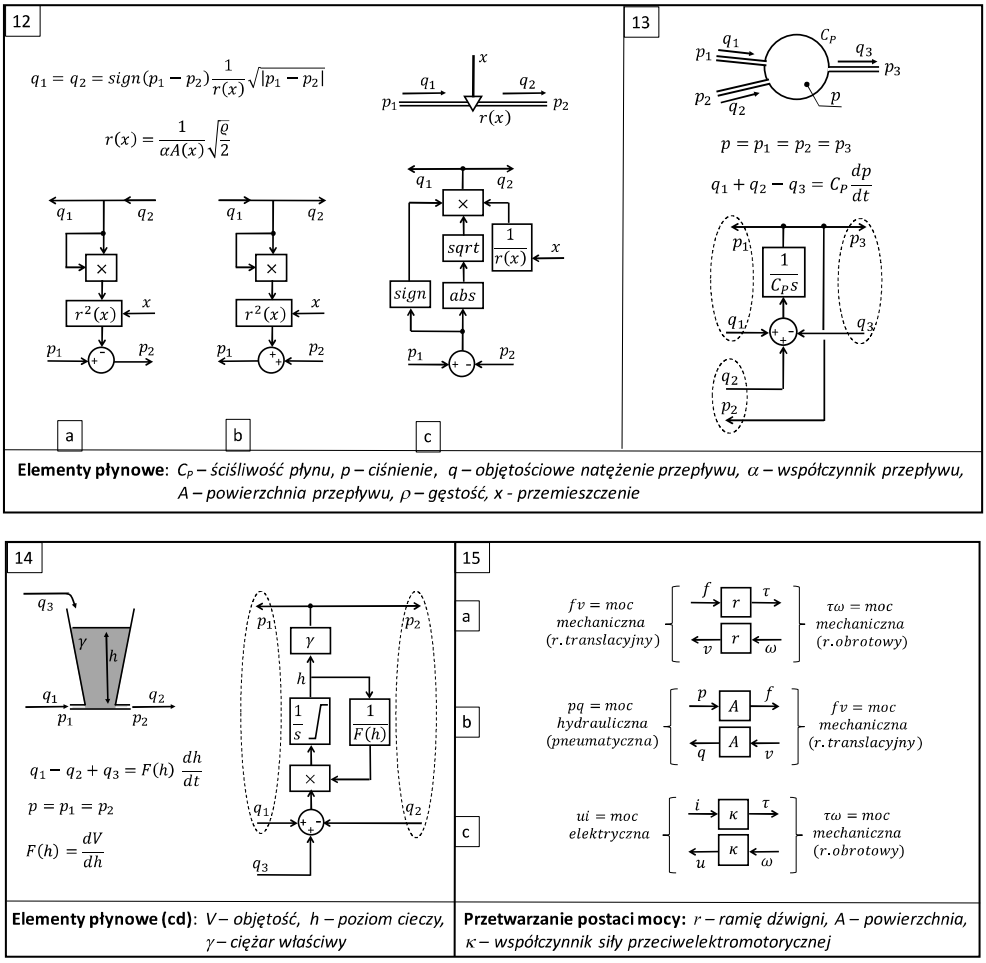


11



Elementy mechaniczne (cd):
J – masowy moment bezwładności

Elementy cieplne: *C_T – pojemność cieplna, R_T – rezystancja cieplna, T – temperatura, $\dot{Q}$ - strumień ciepła*

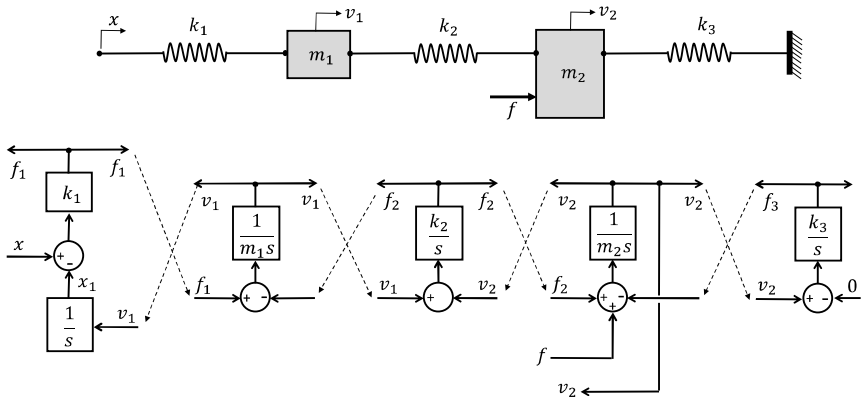


Rysunek 3. Podstawowe wielowrotniki

2. Modele wybranych układów fizycznych

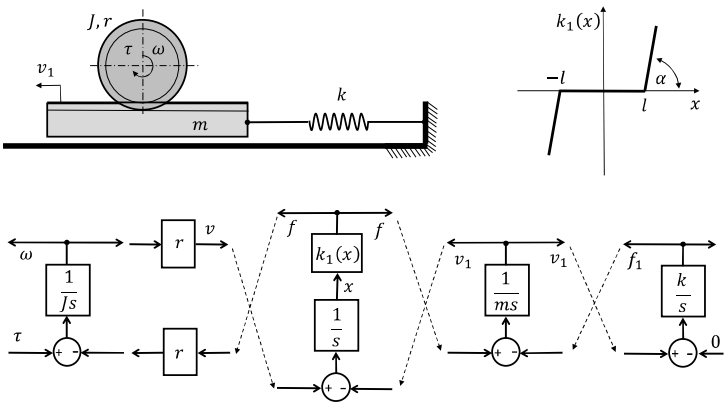
Poniżej przedstawiono modele ośmiu przykładowych „złożonych" układów fizycznych skomponowanych z wielowrotników znajdujących się na rysunku 3. Budowane w ten sposób modele matematyczne mogą służyć do komputerowo wspomaganego badania własności takich układów lub do zastosowania ich jako modeli obiektów sterowania w procesie komputerowego doboru algorytmów sterowania z zastosowaniem programu Simulink. Zawarte w prezentowanych w pracy schematach blokowych elementy mają swoje odpowiedniki w zbiorze dostępnych w Simulinku narzędzi, jednak zastosowane w tym opracowaniu przedstawienie graficzne niektórych bloków różni się od tych występujących w Simulinku.

Przykład 1. Mechaniczny układ wielomasowy (rys. 4). Jest to najprostsze (dla studentów kierunku mechanicznego) z prezentowanych poniżej zagadnień. Ilustruje sposób realizacji wymuszeń siłowych i kinematycznych oraz kwestię kierunku przepływu energii (co w praktyce sprowadza się do właściwego określenia znaków w węzłach sumujących). Do budowy modelu wykorzystano elementy 5 (m = const.) i 6 (k = const.) z rysunku 3.



Rysunek 4. Mechaniczny układ wielomasowy

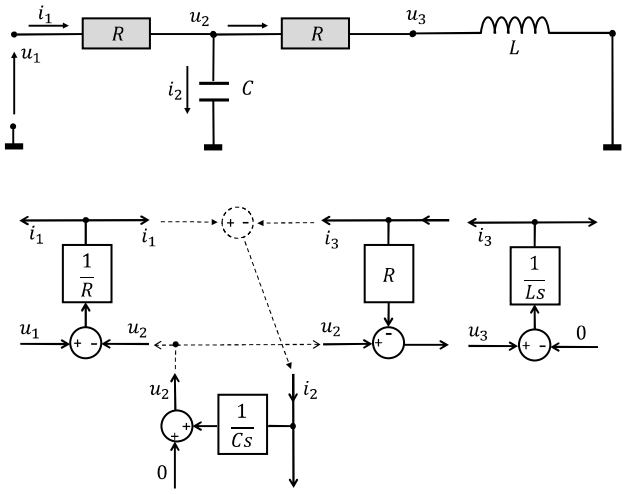
Przykład 2. Przekładnia z luzem (rys. 5). W modelu wykorzystano elementy 5, 6, 9, 15a. Odpowiednio dobrana nieliniowa charakterystyka sprężyny pozwala na modelowanie luzu międzyzębnego ($-l$, $+l$) oraz sztywności (k_z = tg α) pary współpracujących zębów. W podobny sposób można budować modele zderzaków ograniczających ruch elementów w układach mechanicznych.



Rysunek 5. Przekładnia z luzem

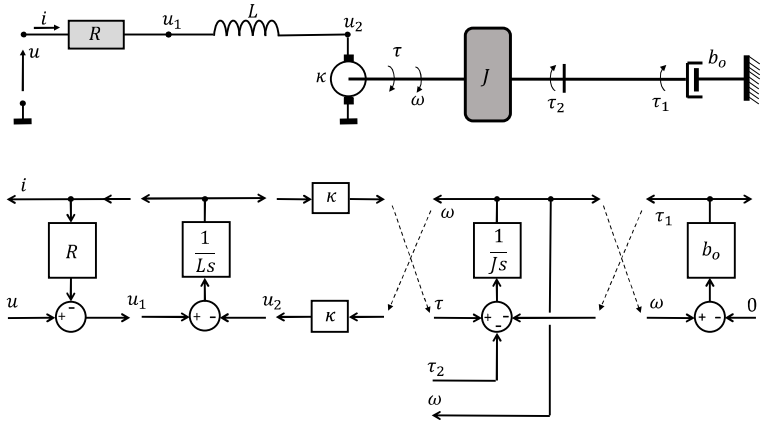
Przykład 3. Układ elektryczny (rys. 6). Do zbudowania modelu układu zastosowano elementy 1a, 1b, 2b, 3, umożliwiające ich połączenie. Topologia układu fizycznego jest odwzorowana w jego modelu. Węzeł sumujący schematu

blokowego odwzorowuje przyjęte kierunki przepływu prądu elektrycznego w węźle rozgałęziającym układu fizycznego. W prezentowanym ujęciu świadomie zrezygnowano z ogólnego przedstawienia fizycznych węzłów rozgałęziających. Są konstruowane doraźnie jako elementy struktury połączeń wielowrotników właściwych z rysunku 3.



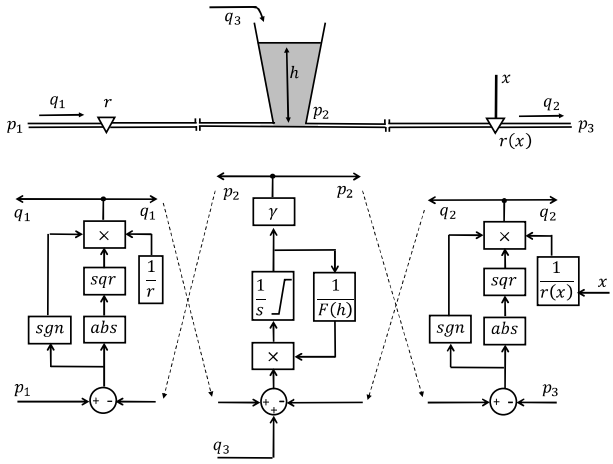
Rysunek 6. Układ elektryczny

Przykład 4. Silnik elektryczny prądu stałego (rys. 7). Model pokazuje podział układu na część elektryczną i mechaniczną oraz przekształcanie energii (mocy) elektrycznej na mechaniczną i odwrotnie. Doskonale także ilustruje występujące w układzie oddziaływania. Do zbudowania modelu zastosowano elementy: 1, 3, 15c, 9, 7. Zbudowany model silnika może służyć (po dodaniu regulatora i sprzężenia zwrotnego) do projektowania i badania serwomechanizmów położenia stosowanych jako układy pozycjonowania w maszynach CNC i w robotach (przykład 9).



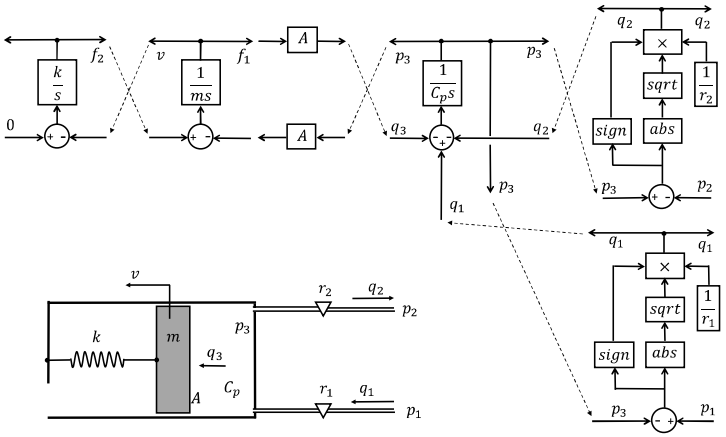
Rysunek 7. Silnik elektryczny prądu stałego

Przykład 5. Zbiornik ze zwężką stałą i zaworem (rys. 8). Przykład ten ilustruje względnie prosty sposób otrzymania modelu nieliniowego układu wieloczłonowego składającego się ze zbiornika o zmiennym przekroju i oporów hydraulicznych nieliniowych, w tym jednego sterowanego przemieszczeniem. Do zbudowania modeli członów elementarnych występujących w przykładowym układzie wystarczające są podstawowe wiadomości z mechaniki płynów. Ich wykorzystanie w sposób proponowany w pracy pozwala na łatwe otrzymywanie modeli złożonych układów technicznych. Złożoność graficznego modelu zaworu jest pozorna, gdyż stanowi odpowiednik prostego równania. Dostępne w Simulinku funkcje nieliniowe umożliwiają uzyskanie dowolnej zależności $A(x)$ występującej w $r(x)$.



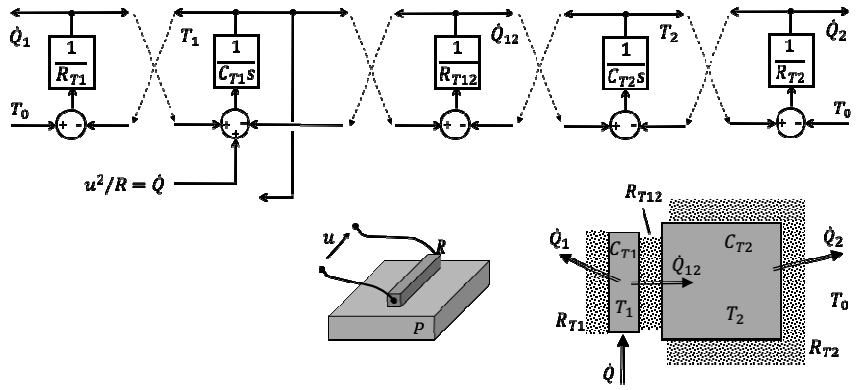
Rysunek 8. Układ płynowy

Przykład 6. Układ mechaniczno-płynowy (rys. 9). Jest to prosty przykład silnika hydraulicznego (pneumatycznego) jednostronnego działania sterowanego ciśnieniem p_1. W prezentowanym modelu zastosowano człony elementarne 5, 6, 12c, 13, 15b.



Rysunek 9. Układ mechaniczno-płynowy

Przykład 7. Układ cieplny (rys. 10) – składający się z rezystora (R) nagrzewającego płytkę (P). W modelu fizycznym uwzględniono pojemności cieplne obydwu elementów oraz przekazywanie strumienia energii cieplnej pomiędzy tymi elementami i do otoczenia. Wykorzystano modele elementarne 10b i 11.

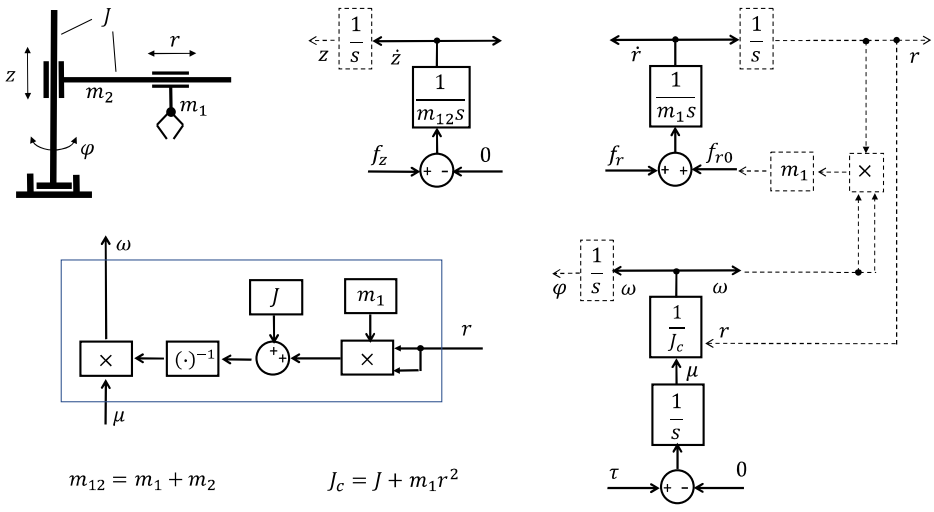


Rysunek 10. Układ cieplny

Przykład 8. Uproszczony schemat manipulatora OPP (rys. 11) – o zmiennych konfiguracyjnych φ, r, z. Oś z jest osią niezależną, natomiast dwie pozostałe są sprzężone dynamicznie. Równania ruchu dla manipulatora są bowiem następujące:

$$f_z = (m_1 + m_2)\frac{d^2z}{dt^2}, \quad \tau = \frac{d}{dt}[(J + m_1 r_2)\omega], \quad f_r = m_1\frac{d^2r}{dt^2} - m_1 r\omega^2$$

gdzie: m –masa, J – masowy moment bezwładności, r, z – przemieszczenia, ω – prędkość kątowa, φ – przemieszczenie kątowe, f – siła, τ – moment sił.



Rysunek 11. Manipulator OPP

Pełny model napędów trzech osi można uzyskać, łącząc model z rysunku 11 z trzema modelami silnika elektrycznego z rysunku 7. Pojawi się tu problem przyczynowości, zatem bezwładności silników i elementów manipulatora należy dodać z uwzględnieniem ich redukcji wynikającej z zastosowanego przełożenia. Po dołączeniu pętli sprzężenia zwrotnego oraz regulatorów uzyskuje się interesujący przykład układu sterowania.

Podsumowanie

Zaproponowana metoda modelowania układów fizycznych łączy w sobie zalety podejścia właściwego metodzie grafów wiązań, a więc podejścia strukturalnego z bezpośrednią, naturalną i intuicyjną metodą schematów blokowych. Zastosowana metodologia i szczegółowe rozwiązania zostały oparte na założeniu możliwie najdalej idących uproszczeń w zakresie opisu formalnego. Przyjęta formuła ma swoje źródło w dotychczasowym doświadczeniu dydaktycznym autora i będzie w dalszym ciągu weryfikowana praktycznie. Potwierdzenie skuteczności zaproponowanego podejścia powinno zaowocować publikacją w formie podręcznika akademickiego, w którym będzie można zaprezentować w szerszym kontekście rozważane zagadnienie modelowania matematycznego.

Literatura

1. Mrozek B., Mrozek Z., *Matlab i Simulink. Poradnik użytkownika*, Helion, Gliwice 2017.
2. Szabłowski S., *Modelowanie fizyczne układów mechatronicznych w środowisku Simulink-Simscape*, „Dydaktyka Informatyki" 2017, nr 12.
3. Karnopp D.C., Margolis D.L., Rosenberg R.C., *System dynamics. A unified approach*, New York 1990.
4. Rosenberg R.C., *Reflection on engineering systems and bond graphs*, „Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control. Transactions ASME" 1993, vol. 115.
5. Fakri A., Rocaries F., Carriere A., *A simple method for the conversion of bond graph models in representation by block diagram*, International Conference on Bond Graph Modelling ICBGM'97, Phoenix. „SCS Publ., Sim. Series" 1997, vol. a9, no. 1.
6. Orlikowski C., *Modelowanie, analiza i synteza układów dynamicznych z zastosowaniem grafów wiązań*, Gdańsk 2005 (Seria Monografie nr 55).
7. Orlikowski C., *Structured modelling by application of Simulink*, „Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki PG" 1999, z. 13.
8. Orlikowski C., *Algorytm konstruowania modeli matematycznych złożonych układów dynamicznych dla programu Simulink*, „Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej" 2002, z. 18.

MULTIPORT "PUZZLES" – MODELING OF PHYSICAL SYSTEMS IN DIDACTICS

Abstract: *In the paper a methodology for modeling of complex, multidomain physical systems is presented and discussed. The proposed method is based on bond graph approach. However, some important formal simplifications have been introduced. The result is a method which will help students to model and understand behavior of complex engineering systems.*

Stanisław Kwitnewski
Anna Rehmus-Forc

BADANIA WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNYCH MATY AKRYLOWEJ (senosan® AM1800TopX) W POŁĄCZENIU Z PŁYTĄ MDF

Badania właściwości fizycznych maty akrylowej w połączeniu z płytą MDF wykonano w zakresie badań wytrzymałości na zginanie oraz twardości powierzchni metodą Rocwella (HRB). Wyniki badań wskazują, że płyty MDF wykończone matą akrylową cechują się większą wytrzymałością na zginanie oraz większymi wartościami twardości powierzchni. Gwarantem uzyskania tych właściwości jest odpowiedni proces technologiczny łączenia płyt MDF z matą akrylową. Z przeprowadzonych badań wynika, że mata akrylowa użyta do wykończenia płyt MDF może być nie tylko materiałem poprawiającym walory estetyczne, ale może odgrywać znaczącą rolę jako element konstrukcyjny.

Wprowadzenie

Współczesny rozwój każdej gałęzi przemysłu wymaga wdrażania nowoczesnych technik i technologii, a w konsekwencji wprowadzenia na rynek nowych bądź ulepszonych produktów. Jak wskazuje raport KPMG [1], Polska należy do światowych liderów pod względem wartości produkcji oraz eksportu mebli. Zauważa się dużą dynamikę w polskim przemyśle meblowym związaną z dostosowaniem się polskich producentów mebli do światowych trendów konsumenckich. Wiedza o działaniach innowacyjnych i zaawansowanych technologiach w branży drzewno-meblarskiej nabiera dużego znaczenia, gdyż poszczególne jego gałęzie zaopatrują wiele dziedzin gospodarki w niezbędne materiały i wyroby [2]. Na regionalnym, krajowym i zagranicznym rynku wyrobów i produktów końcowych sektora drzewno-meblarskiego, oprócz trendów rynkowych, niezwykle ważne są trendy o charakterze techniczno-technologicznym, do których należą:

- dążenie do uzyskania produktów o nowych i udoskonalonych właściwościach fizykochemicznych oraz lepszych parametrach jakościowo-wytrzymałościowych czy parametrach użytkowych,
- nasilanie się zjawiska substytucji materiałowej,
- dążenie do uzyskania produktów zapewniających odpowiednie walory estetyki,
- dążenie do oszczędności surowca, energii i nakładów pracy.

Spośród wyżej wymienionych trendów technologicznych za najważniejszy uznaje się dążenie do uzyskania produktów i wyrobów o nowych i udoskonalonych właściwościach. Obecnie i w przyszłości poszukiwane będą przez odbiorców

produkty o ulepszonych cechach i właściwościach, takich jak: wytrzymałość, estetyka i walory użytkowania, zgodność z zasadami i wymogami ekologii, odporność na zjawiska atmosferyczne, właściwości izolacyjne, łatwość montażu, bezpieczeństwo.

Na podstawie dotychczasowych doświadczeń można jednoznacznie stwierdzić, że technologia i design są integralnie ze sobą związane. Ten duet inicjuje innowacje – dotyczą one innowacyjnych sposobów wdrażania nowych produktów, innowacyjnych strategii zarządzania, innowacyjnych technologii czy metod badawczych. Duet pozwalający na innowacyjną konkurencję, długotrwałe strategie rozwoju marki, trendów i nowatorskie koncepcje, wzrost konkurencyjności [3, 4], wsparcie zrównoważonego ekorozwoju.

1. Charakterystyka płyt MDF

Płyta MDF jest tworzywem drewnopochodnym wykonanym przez sprasowanie przy udziale temperatury włókien lignocelulozowych (najczęściej drzewnych, ale również z roślin jednorocznych) z klejem [5]. Jako spoiwa używa się najczęściej żywic aminowych (mocznikowo-formaldehydowych, melaminowo-mocznikowo-formaldehydowych). Jest to materiał o jednorodnej gęstości i składzie surowcowym w całym przekroju, dzięki czemu wykazuje doskonałą obrabialność mechaniczną w procesie skrawania. Płyty MDF posiadają gładką powierzchnię, co umożliwia zastosowanie szerokiej gamy lakierów oraz okładzin. Często nazwy MDF używa się w stosunku do rodziny płyt pilśniowych formowanych na sucho.

Odmianami płyty MDF są płyty LDF i HDF. Nazwy LDF i HDF oznaczają różną gęstość tworzywa. Płyta LDF to płyta włóknista o niskiej gęstości (znana również jako L-MDF), zaś płyta HDF to płyta włóknista o wysokiej gęstości.

Płyty typu MDF posiadają strukturę jednowarstwową, tzn. wytworzone są z cząstek jednego rodzaju. Taka budowa pozwala wykorzystywać płyty do produkcji frontów meblowych, gdzie zachodzi konieczność obróbki frezowaniem szerokich powierzchni. Znane są sposoby wytwarzania płyt typu MDF na prasach kalandrowych, jednak najczęściej produkuje się je w technologii prasowania płaskiego. Płyta MDF stanowi idealny substytut dla naturalnego drewna, przy czym nie zawiera ona żadnych strukturalnych niedoskonałości zwykle spotykanych w drewnie, takich jak sęki czy pęknięcia.

Płyty MDF produkowane są w trzech odmianach:

- MDF (*medium density fibreboard*) – płyta średniogęsta od 650 kg/m^3 do 800 kg/m^3, z włókien drzewnych. Ze względu na walory powierzchni nadaje się do uszlachetniania poprzez pokrywanie cienkimi filmami melaminowymi, lakierowanie oraz oklejanie sztuczną i naturalną okleiną,

- LDF (*low density fibreboard*) – płyta z włókien drzewnych, charakteryzująca się zmniejszoną gęstością poniżej 650 kg/m^3,
- HDF (*hight density fibreboard*) – płyta z włókien drzewnych, charakteryzująca się dużą twardością i podwyższoną gęstością powyżej 750 kg/m^3.

1.1. Płyta MDF pokryta matą akrylową

Płyta MDF z powłoką akrylową to doskonała propozycja na polskim rynku meblarskim. Powłoka jest nanoszona na płytę MDF techniką oklejania na gorąco. Akryle powoli zaczynają wypierać lakiery i folie. Akryl meblowy może być wykorzystywany w projektach mebli kuchennych, łazienkowych, pokojowych oraz wystawowych. Głębia połysku (tzw. efekt szkła) elementów pokrytych akrylem jest nie do osiągnięcia w przypadku lakieru. Blask koloru jest bardzo głęboki. Powłoka akrylu daje możliwość uzyskania efektu połysku, który jest niepowtarzalny. Wytrzymałość na zarysowania powierzchni akrylowej, jak podają producenci, jest wysoka. Jeśli pojawią się zarysowania, należy je wypolerować. Powierzchnie akrylowe są również odporne na odbarwienia. Bardzo ważny jest fakt, że w przypadku akrylu nie występuje tzw. efekt oksydacji, a więc utlenienia frontu. Oznacza to, że z czasem powierzchnia akrylu nie zmieni koloru. Akryl jest wyjątkowo łatwy do utrzymania w czystości. Nawet jeśli na skutek nieodpowiedniej pielęgnacji zmatowieje, nadal jest łatwy w czyszczeniu. Trzeba jednak pamiętać o okresie leżakowania, to znaczy o okresie po zdjęciu folii ochronnej z płyty akrylowej, po którym mata uzyskuje pełne właściwości. Producenci mat akrylowych deklarują, że klienci nie powinni obawiać się, że postawienie na nich gorącego naczynia spowoduje odbarwienie czy inne zniszczenie. Akryl jest wyjątkowo wytrzymały na wysoką temperaturę. Istotną dla użytkownika zaletą akrylu jest też jego powtarzalność. Oznacza to, że po kilku latach eksploatacji mebli pokrytych matą akrylową bez problemu można dokupić kolejny mebel, który jako nowy nie będzie odróżniał się kolorystycznie. Jak już wspomniano wyżej, akryl, w przeciwieństwie do lakieru, nie odbarwia się, nowo zamówiony element będzie miał więc taki sam kolor jak powierzchnia starszego mebla. Fronty akrylowe w połączeniu z innymi przyjaznymi materiałami, takimi jak np. drewno, tworzą współcześnie najmodniejsze aranżacje.

Wszystkie wymienione wyżej cechy sprawiają, że producenci mebli, reagując na bieżące trendy i wymagania rynkowe, coraz częściej sięgają po niestandardowe produkty, jakimi z pewnością są matowe fronty akrylowe o nowoczesnym i eleganckim designie. Wybierając bowiem tego typu produkty, trafiają w gusta najbardziej wymagających klientów, dla których ważna jest nie tylko cena, ale i nowoczesność proponowanych rozwiązań.

Powyższe informacje pochodzą z broszur reklamujących maty akrylowe. Jak widać, klient dostaje tylko informacje jakościowe o produkcie. Aby poszukiwać możliwości nowych zastosowań mat akrylowych w połączeniu z płytą MDF,

należy przeprowadzić wiele badań ilościowych [7, 8] mogących wyznaczać nowe kierunki zastosowań tego produktu.

2. Proces łączenia maty akrylowej (senosan® AM1800TopX) z płytą MDF

Przygotowanie odpowiednich próbek do badań zrealizowano w ramach współpracy autorów publikacji z przedsiębiorcą branży meblarskiej. Połączenie badanej maty akrylowej (senosan® AM1800TopX) z płytą MDF wykonano w warunkach rzeczywistej produkcji tego typu elementów. Wykorzystując własny park maszynowy i możliwości technologiczne, współpracujące z autorami pracy przedsiębiorstwo wykonało połączenie badanej maty akrylowej z płytą MDF w następującym procesie technologicznym:

- etap 1 – czyszczenie płyty MDF z zanieczyszczeń,
- etap 2 – podgrzewanie wstępne płyty w temperaturze ok. 120°C,
- etap 3 – nakładanie kleju poliuretanowego maszyną walcową na płytę MDF. Proces ten wymaga podgrzania kleju poliuretanowego do temperatury ok. 140°C. Do nakładania kleju wykorzystuje się prasę walcową wyposażoną w dwa walce,
- etap 4 – podgrzewanie kleju na płycie w komorze o temperaturze ok. 120°C do temperatury nałożonego kleju,
- etap 5 – nakładanie mat akrylowych na płytę przez specjalne podajniki,
- etap 6 – docisk maty akrylowej do płyty MDF za pomocą prasy walcowej,
- etap 7 – odkładanie gotowego produktu na czas 5 dni w celu ostygnięcia.

3. Badania wytrzymałości na zginanie maty akrylowej (senosan® AM1800TopX) w połączeniu z płytą MDF

Badania wytrzymałościowe przeprowadzono zgodnie z metodyką opisaną w normie PN-EN 310 Płyty drewnopochodne – Oznaczanie modułu sprężystości przy zginaniu i wytrzymałości na zginanie [10].

3.1. Maszyna wytrzymałościowa

Do badań wytrzymałości próbek na zginanie użyto maszyny wytrzymałościowej typu HT-2402. Jest to uniwersalna maszyna wytrzymałościowa stosowana w różnych branżach przemysłu: samochodowym, metalowym, drzewnym, sporto-

wym itp. Maszyna pozwala na badania w zakresie statycznego pomiaru rozciągania, ściskania i zginania.

Parametry techniczne użytej do badań maszyny wytrzymałościowej:

- typ – HT-2402 50 kN,
- dokładność – 1%,
- jednostki siły – N, kN, g, kg,
- jednostki przemieszczenia – mm, cm,
- maksymalna odległość między szczękami – 780 mm,
- dokładność szybkości – 1%,
- efektywna szerokość testu standardowego – 575 mm,
- zakres ruchu belki – 1250 mm,
- napęd – silnik elektryczny o mocy 1200 W.

3.2. Próbki do badań

Do badań użyto prostokątnych próbek o wymiarach a = 300 mm ± 1 mm, b = 50 mm ± 1 mm. Grubość badanych próbek mierzona w trzech miejscach dla każdej próbki wynosiła h = 16 mm ± 0,5 mm dla próbek wykonanych z samej płyty MDF oraz h = 17,5 mm ± 0,5 mm dla próbek wykonanych z płyty MDF oklejonej badaną matą akrylową. Przygotowano próbki do badań w dwóch wariantach w celu określenia względnej zmiany wytrzymałości na zginanie badanych próbek.

Wybrano następujący podział badanych próbek:

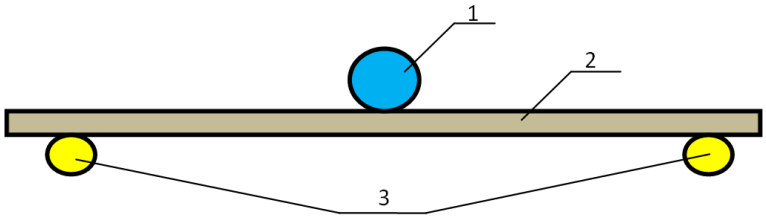
- próbki wykonane tylko z płyty MDF,
- próbki wykonane z płyty MDF wykończone matą akrylową (senosan® AM1800TopX) o grubości 0,7 mm.

Wszystkie próbki poddano jednodniowemu okresowi leżakowania, czyli pozbawiono badane powierzchnie folii ochronnej na 24 godziny przed rozpoczęciem badań.

3.3. Metoda badań

Próbkę do badań wytrzymałości na zginanie umieszczono poziomo na dwóch okrągłych podporach, między którymi ustawiono odległość l = 280 mm. Próbkę układano w taki sposób, że mata akrylowa znajdowała się w górnej części próbki. Zdaniem autorów pracy tego typu konstrukcje warstwowe w nowych zastosowaniach będą zwykle obciążane od strony, po której znajduje się element dekoracyjny, czyli mata akrylowa. Obciążenie w czasie całego badania przenoszono ze stałą prędkością tak, aby zniszczenie próbki nastąpiło w czasie t = 60 s ± 30 s. Obciążenie przykładano w środku próbki prostopadle do jej powierzchni. Główną wartością uzyskiwaną z maszyny wytrzymałościowej było

maksymalne obciążenie (F_{max}), przy którym nastąpiło zniszczenie/przełamanie próbki. Schemat metody badań wytrzymałości na zginanie zamieszczono na rysunku 1.



Rysunek 1. Schemat metody badań wytrzymałości na zginanie według normy PN – EN 310.
1 – poziomy walec przenoszący obciążenie, 2 – badana próbka, 3 – poziome walce (tzw. podpory)

Po odczytaniu maksymalnej siły nacisku F_{max} przykładanej w środku badanej próbki (poziomy walec przenoszący obciążenie), przy której następuje zniszczenie próbki wytrzymałość na zginanie f_o według normy PN-EN 310, wyznaczamy z poniższej zależności:

$$f_0 = \frac{3 \cdot F_{max} \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} \tag{1}$$

gdzie:

f_o – wytrzymałość na zginanie [MPa],
F_{max} – siła, przy której nastąpiło zniszczenie próbki [N],
l – odległość między podporami [mm],
b – szerokość badanej próbki [mm],
h – wysokość badanej próbki [mm].

Przeprowadzone badania należy uznać za wstępne próby oszacowania przydatności płyt MDF wykończonych matą akrylową w niestandardowych zastosowaniach. Tego typu badania nie rozstrzygają zagadnień związanych m.in. z izotropowością badanej konstrukcji, jednak nie było to głównym celem przeprowadzonych badań.

3.4. Wyniki badań

Średnie wyniki wytrzymałości na zginanie ($\overline{f_0}$) i odchylenie standardowe (SD) pozwalają podsumować badania wytrzymałości na zginanie. Dla samej płyty MDF otrzymujemy następujący wynik:

$\overline{f_0}$ = 34,8 MPa
SD = 1,1 MPa,

natomiast dla płyty MDF oklejonej matą akrylową:

$\overline{f_0}$ = 36,3 MPa
SD = 1,3 MPa.

Wyniki badań wytrzymałości na zginanie przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki badań wytrzymałości na zginanie płyt MDF oraz płyt MDF pokrytych matą akrylową

Pomiar	Próbki wykonane z płyty MDF			Próbki wykonane z płyty MDF pokryte matą akrylową (senosan® AM1800TopX)		
	F_{max} [N]	Czas badania [s]	Wytrzymałość na zginanie f_o [MPa]	F_{max} [N]	Czas badania [s]	Wytrzymałość na zginanie f_o [MPa]
1	1044	56	**34,26**	1380	71	**37,85**
2	1068	60	**35,04**	1342	73	**36,81**
3	1122	63	**36,81**	1277	61	**35,03**
4	1049	53	**34,42**	1317	69	**36,12**
5	1063	56	**34,88**	1362	81	**37,35**
6	1025	55	**33,63**	1267	87	**34,75**

Jak wskazują powyższe wyniki, próbki wykonane z płyt MDF pokryte w opisanym procesie technologicznym matą akrylową wykazują większą wytrzymałość na zginanie, co może być argumentem do poszukiwania nowych zastosowań płyt MDF w połączeniu z matą akrylową. Mata akrylowa naklejana na płytę MDF klejem poliuretanowym, oprócz wykazywanych przez producentów mat walorów estetycznych, staje się również materiałem poprawiającym właściwości wytrzymałościowe.

4. Badania twardości maty akrylowej (senosan® AM1800TopX) w połączeniu z płytą MDF

Do badań twardości mat akrylowych z licznych metod pomiarowych, takich jak Vickersa, Brinella, Shore'a czy Barcola itd., wybrano sposób badania twardości metodą Rockwella w skali B, co przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 6508-1 [11]. Wytypowano tę metodę ze względu na dostępność urządzenia pomiarowego oraz prostotę i szybkość jej wykonania.

4.1. Próbki do badań

Do badań użyto prostokątnych próbek o wymiarach a = 100 mm ± 1 mm, b = 100 mm ± 1 mm. Grubość badanych próbek mierzona w trzech miejscach dla każdej próbki wynosiła h = 16 mm ± 0,05 mm. Ze względu na fakt, że badania twardości twardościomierzem Rockwella przeznaczone są głównie do określania twardości metali, przygotowano próbki do badań w trzech wariantach w celu określenia względnej zmiany twardości powierzchni badanych próbek. Wybrano następujący podział badanych próbek:

- próbki wykonane tylko z płyty MDF,
- próbki wykonane z płyty MDF wykończone tradycyjną metodą foliowania powierzchni,
- próbki wykonane z płyty MDF wykończone badaną matą akrylową (senosan® AM1800TopX) o grubości 0,7 mm.

Wszystkie próbki poddano jednodniowemu okresowi leżakowania, czyli pozbawiono badane powierzchnie folii ochronnej na 24 godziny przed rozpoczęciem badań.

4.2. Metoda pomiaru twardości

Pomiar twardości metodą Rockwella w skali B polega na wciśnięciu wgłębnika (kula stalowa o średnicy 1,588 mm) obciążeniem wstępnym F_0 = 98,07 N, które powoduje przebicie przez wgłębnik obszaru chropowatości i niejednorodności warstwy wierzchniej badanej próbki. Wgłębnik przemieszcza się na głębokości h_0, co jest poziomem odniesienia. Następnie dodaje się obciążenie główne Fg = 882,6 N. Wgłębnik wciskany siłą wypadkową F = 980,7 N, która jest wyrażona wzorem $F = F_0 + Fg$, przemieszcza się na głębokość h_g, licząc od poziomu odniesienia. Po upływie 5 sekund zdejmuje się obciążenie główne Fg. Wgłębnik cofa się o wartość h_w, która przedstawia odkształcenie sprężyste. Wartość h liczona od poziomu odniesienia do poziomu aktualnego położenia wgłębnika ($h = h_g - h_w$) stanowi podstawę do określania twardości wg Rockwella. Jeśli h = 0, to materiał badany jest idealnie sprężysty – wgłębnik cofną się do położenia odniesienia po zdjęciu obciążenia głównego. Jeśli $h = h_g$, to materiał jest idealnie plastyczny – wgłębnik nie wykonał ruchu wstecznego. Miarą twardości jest różnica pomiędzy umowną wielkością K a wartością h wyrażoną w jednostkach odkształcenia trwałego równego 0,002 mm. Wartość K dla kulki stalowej wynosi 130.

Zaleta metody Rockwella w skali B polega na możliwości wykonywania pomiarów twardości materiałów miękkich, ponadto jest to metoda prosta i szybka.

W czasie badań zadbano, aby odległość środków odcisków od siebie nie była mniejsza od 4-krotnej średnicy odcisku, natomiast minimalna odległość między środkiem odcisku a krawędzią próbki nie była mniejsza od czterech średnic odcisku. Badania twardości wykonano na powierzchniach wykończonych tradycyjną metodą foliowania płyt MDF lub na powierzchniach wykończonych matą akrylową.

4.3. Wyniki badań

Wyniki przedstawione w tabeli 2 pozwalają formułować następujące wnioski:

- sama płyta MDF i płyta MDF pokryta folią posiadają podobną wartość twardości w skali Rockwella (HRB),

- płyta MDF wykończona tradycyjną metodą foliowania powierzchni charakteryzuje się tym, że pomiary twardości w różnych punktach próbki są mocno zróżnicowane. Maksymalna wartość twardości dla foliowanej płyty MDF wynosi 60 HRB, a minimalna 45 HRB. Warto podkreślić, że pięć pomiarów wykonano na próbce o wymiarach 100 mm × 100 mm. Świadczy to o dużej niejednorodności takiego materiału w zakresie twardości,
- płyta MDF wykończona matą akrylową (senosan® AM1800TopX) posiada znacznie wyższe wartości twardości w skali HRB. Średni wynik twardości w skali Rockwella wynosi 68,4 HRB, gdzie wcześniejsze standardowe produkty nie przekraczały wartości 54 HRB,
- wyznaczone wartości twardości w skali Rockwella dla płyt MDF wykończonych badaną matą akrylową posiadają 5-krotnie mniejszy rozrzut wokół wartości średniej w porównaniu z wynikami dla płyty MDF wykończonej folią. Odchylenie standardowe średniej wartości twardości dla płyt MDF wykończonych badaną matą akrylową oscylowało na poziomie 1,2 HRB,
- odpowiednio naniesiona warstwa kleju w procesie klejenia maty akrylowej na płytę MDF pozbawiona pęcherzyków powietrza w swojej objętości ma ogromny wpływ na jakość finalnego produktu. Jak widać z powyższych wyników, odpowiedni proces technologiczny klejenia maty akrylowej z płytą MDF może ujednolicić produkt w zakresie twardości na całej powierzchni finalnego produktu. Mata akrylowa w połączeniu z odpowiednim procesem klejenia jej z płytą MDF może zniwelować dużą niejednorodność powierzchni samej płyty MDF w zakresie twardości powierzchni,

Powyższe wyniki badań sugerują, że dobrej jakości maty akrylowe mogą być nie tylko elementem nowoczesnego wzornictwa, ale przy zachowaniu odpowiedniego procesu technologicznego klejenia tych powłok do płyt MDF mogą odgrywać istotną rolę konstrukcyjną [9].

Wyniki badań twardości mat akrylowych przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki badań twardości płyt MDF, płyt MDF wykończonych tradycyjną folią oraz płyt MDF w połączeniu z matą akrylową. Wyniki zamieszczone w tabeli należy tylko i wyłącznie traktować paralelnie, względnie i nie mogą być one odnoszone do innych badań

Pomiar	Twardość (HRB) dla próbki wykonanej tylko z płyty MDF	Twardość (HRB) dla próbki wykonanej z płyty MDF wykończone tradycyjną metodą foliowania powierzchni	Twardość (HRB) dla próbki wykonanej z płyty MDF wykończone matą akrylową (senosan® AM1800TopX)
1	58	56	67
2	50	42	69
3	60	58	68
4	53	50	70
5	45	55	68
Średni wynik	**53,2**	**52,2**	**68,4**
Odchylenie standardowe	**6,1**	**6,5**	**1,2**

Podsumowanie

W pracy przedstawiono wyniki badań dotyczących właściwości fizycznych płyt MDF w połączeniu z matą akrylową (senosan® AM1800TopX). Jakkolwiek mat akrylowych o wysokim połysku do wykańczania frontów używa się w Polsce od kilku lat, należy poszukiwać nowych możliwości zastosowania połączenia mat akrylowych z płytą MDF.

W ramach pracy przeprowadzono próby twardości maty akrylowej (senosan® AM1800TopX) na podłożu płyty MDF. Wyniki badań wskazują, że płyta MDF wykończona badaną matą akrylową posiada znacznie wyższe wartości twardości w skali HRB. Średni wynik twardości w skali Rockwella wynosi 68,4 HRB, podczas gdy wcześniejsze standardowe produkty nie przekraczały wartości 54 HRB. Wartości twardości w skali Rockwella dla płyty MDF wykończonej matą akrylową posiadają 5-krotnie mniejszy rozrzut wokół wartości średniej w porównaniu z wynikami dla płyty MDF wykończonej folią. Odpowiedni proces technologiczny klejenia maty akrylowej z płytą MDF może ujednolicić produkt w zakresie twardości na całej powierzchni finalnego produktu. Otrzymane wyniki badań sugerują, że mata akrylowa (senosan® AM1800TopX) może być nie tylko elementem nowoczesnego wzornictwa, ale również może odgrywać ważną rolę konstrukcyjną.

Potwierdzono, że płyta MDF w połączeniu z matą akrylową posiada wyższe własności wytrzymałościowe o prawie 2 jednostki, co daje wzrost o ponad 5% własności wytrzymałościowych na zginanie.

Przeprowadzone badania należy uznać za wstępne próby oszacowania przydatności płyt MDF wykończonych matą akrylową w niestandardowych zastosowaniach.

Literatura

1. Raport KPMG, *Rynek meblarski w Polsce*, 2017.
2. Ratajczak E., *Innowacyjność sektora drzewnego w Polsce*, Instytut Technologii Drewna, Poznań 2009.
3. Ulbrych M., *Przemysł meblarski w Polsce i jego międzynarodowa pozycja konkurencyjna*, „Ekonomia Międzynarodowa" 2016, nr 13.
4. Flejterski S., *Istota i mierzenie konkurencyjności międzynarodowej*, „Gospodarka Planowa" 1984, nr 9.
5. Nicewicz D., *Płyty pilśniowe MDF*, Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2006.
6. Kokociński W., *Drewno pomiary właściwości fizycznych i mechanicznych*, Katedra Nauki o Drewnie, Akademia Rolnicza, Poznań 2004.
7. Ciszewski A., Radomski T., Szummer A., *Materiałoznawstwo*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009.

8. Lis A., Lis P., *Charakterystyka wytrzymałości drewna jako jego podstawowej właściwości mechanicznej*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej. Budownictwo" 2013, z. 19.
9. Dzięgielewski S., Smardzewski J., *Meblarstwo projekt i konstrukcja*, WSiP, Poznań 1995.
10. PN-EN 310, Płyty Drewnopochodne – Oznaczanie modułu sprężystości przy zginaniu i wytrzymałości na zginanie.
11. PN-EN ISO 6508-1, Pomiar twardości sposobem Rockwella.

TESTING THE PHYSICAL PROPERTIES OF ACRYLIC FILM (senosan® AM1800TopX) COMBINED WITH MDF

Abstract: *Tests of the physical properties of acrylic film combined with MDF concerned flexural strength and surface hardness, the latter being tested according to Rockwell method (HRB). The test results indicate that MDF with acrylic film finish shows greater flexural strength and higher values of surface hardness. The guarantee for obtaining these properties is a proper technological process of combining MDF with acrylic film. The test results prove that the acrylic film, used for finishing MDF, may not only be a material which improves the aesthetic qualities but also plays an important role as a structural element.*

Piotr Korzeniowski
Sara Staszewska

METODA OBLICZANIA NOŚNOŚCI SŁUPÓW ZESPOLONYCH WEDŁUG ZAŁOŻEŃ NORMY EC4 W ŚWIETLE BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

W pracy przeprowadzono weryfikację poprawności i oceny bezpieczeństwa metody normowej przyjętej w EC 4 obliczania nośności słupów zespolonych CFST. Analizy dokonano na podstawie wybranych z literatury i własnych wyników badań eksperymentalnych 280 słupów zespolonych. Wyznaczono parametry rozkładu statystycznego, takie jak wartość średnia, odchylenie standardowe, współczynnik zmienności oraz wartość gwarantowana z prawdopodobieństwem 95%. Na postawie uzyskanych wyników dokonano oceny bezpieczeństwa metody normowej.

1. Syntetyczny przegląd badań eksperymentalnych dotyczących słupów CFST

Jako jedni z pierwszych badania słupów CFST przeprowadzili Klöppel i Goder [1] w latach 1954-1956 w Darmstad (Niemcy). Są to pierwsze tak obszerne i znaczące badania eksperymentalne w tym zakresie. Przebadano wtedy w prasie ok. 100 rur stalowych wypełnionych betonem.

Kolejne badania przeprowadzili Roik i Schwalbenhofer w 1989 roku w Niemczech [2]. Dotyczyły one zachowania pokrytycznego słupów zespolonych. Badano dwa rodzaje słupów: obetonowane kształtowniki oraz słupy typu CFST. Zostały one wykonane z tych samych materiałów. Podczas badań eksperymentalnych sprawdzano zachowanie słupów pod wpływem działania obciążeń wyjątkowych. Porównując wyniki, stwierdzono, że słupy typu CFST mają przewagę nad obetonowanymi kształtownikami. Roik, Bode i Bergmann [3] byli autorami pierwszych wytycznych do projektowania słupów zespolonych. Zajmowali się także reologią słupów CFST. Wymienieni wyżej badacze przeprowadzili w trzech miastach w Niemczech badania dotyczące pełzania i skurczu betonu. Sprawdzali wtedy zachowanie słupów CFST pod wpływem długotrwałego obciążenia.

Kilpatrick i Rangan opisali w swojej pracy wpływ smukłości słupów i mimośrodu obciążenia na nośność słupów CFST [4].

Badania przeprowadzone przez Kilpatricka i Rangana [5] w 1999 roku w Australii dotyczyły wpływu przyczepności między stalową rurą i betonowym rdzeniem na zachowanie słupów. Podczas badań na słupach w zmniejszonej skali porównano trzy stopnie przyczepności: minimalną, częściowo zwiększoną oraz

maksymalną. Okazało się, że przyczepność między stalą a betonem nie ma wpływu na nośność słupów CFST, jednak autorzy badań zastrzegli, że wyniki te mogą być spowodowane zastosowaniem próbek o zmniejszonej skali.

Autorem kolejnych badań był Johansson [6, 7], który w 2000 roku na Uniwersytecie Chalmers w Szwecji badał wpływ sposobu przyłożenia obciążenia na zachowanie słupów CFST. Analizie poddano cztery kategorie słupów: sama stalowa rura, słup CFST obciążony przez płaszcz stalowy, słup CFST obciążony przez cały przekrój i słup CFST obciążony przez rdzeń betonowy. Badano zarówno słupy smukłe, jak i krępe. Po badaniach słupów krępych stwierdzono, że sposób przyłożenia obciążenia nie wpływa znacząco na nośność. Najkorzystniejszą nośność pokrytyczną wykazano w przypadku słupów CFST obciążonych przez rdzeń betonowy.

W Polsce badaniami słupów CFST zajmowali się w latach 60. W. Merunowicz, S. Matyszewski, S. Domański i M. Sandowicz. W późniejszych latach tematyką tą zajęli się J. Juchniewicz i P. Dawidowicz. Od 2004 roku tematyką słupów CFST zajmują się na Politechnice Gdańskiej P. Korzeniowski, M. Abramski i J. Kondrat.

2. Wyznaczanie nośności słupów CFST według EC 4

2.1. Warunki stosowania metody uproszczonej według EC4

Do obliczenia nośności omawianych w tej pracy słupów zastosowano metodę uproszczoną przewidzianą w PN-EN 1994-1-1 [8], przydatną do obliczania słupów o dwóch osiach symetrii i stałym przekroju poprzecznym na całej długości.

Aby stosować metodę uproszczoną, należy według [8] spełnić dodatkowe warunki:

- smukłość względna powinna spełniać warunek:

$$\lambda \leq 2{,}0 \tag{1}$$

gdzie:

$$\lambda = \sqrt{\frac{N_{pl,Rk}}{N_{cr}}} \tag{2}$$

$N_{pl,Rk}$ – charakterystyczna nośność plastyczna przekroju (patrz wzór 19),
N_{cr} – sprężysta krytyczna siła normalna (patrz wzory 17 i 18),

- stosunek udziału stali powinien spełniać warunek:

$$0{,}2 \leq \delta \leq 0{,}9 \tag{3}$$

gdzie:

$$\delta = \frac{A_a f_y}{N_{pl,Rd}} \tag{4}$$

A_a – pole przekroju rury stalowej,
f_y – średnia granica plastyczności stali,
$N_{pl,Rd}$ – nośność plastyczna przekroju na ściskanie,

- dla rur o przekroju kołowym wartość *d/t* nie powinna przekraczać wartości maksymalnej:

$$\max\left(\frac{d}{t}\right) = 90 \cdot \frac{235}{f_y} \tag{5}$$

d – średnica rdzenia betonowego,
t – grubość stalowego płaszcza.

Jeśli *d/t* nie przekracza wartości maksymalnej, można pominąć wpływ miejscowego wyboczenia.

2.2. Sprawdzanie nośności słupów CFST według EC4

Nośność teoretyczną słupów CFST N_{Rd} wyznacza się, wykorzystując współczynnik wyboczeniowy χ oraz nośność plastyczną przekroju na ściskanie $N_{pl,Rd}$. Nośność słupa CFST ściskanego osiowo wyznacza się ze wzoru 6:

$$\frac{N_{Rd}}{\chi N_{pl,Rd}} \leq 1{,}0 \tag{6}$$

gdzie:
N_{Rd} – nośność teoretyczna słupa,
$N_{pl,Rd}$ – nośność plastyczna przekroju na ściskanie,
χ – współczynnik redukcyjny.

Przekształcając wzór 6 i zastępując wartości obliczeniowe wartościami średnimi, autorzy prezentowanej pracy obliczeniową nośność słupów CFST $N_{Rm,cal}$ wyrazili w postaci:

$$N_{pl,Rd} = \chi \cdot N_{pl,Rm} \tag{7}$$

Sposób wyznaczania nośności plastycznej przekroju na ściskanie i współczynnika redukcyjnego przedstawiono w dalszej części pracy.

Rozpatrywane w tej pracy słupy są to okrągłe rury wypełnione betonem, dlatego można przyjmować do obliczeń wzrost wytrzymałości betonu spowodowany ograniczeniem odkształceń. Wzrost wytrzymałości betonu przyjmuje się dla elementów ściskanych, gdy:
- smukłość względna nie przekracza wartości 0,5,
- stosunek mimośrodu siły do średnicy słupa $e/d < 0{,}1$.

Występującą we wzorze 7 nośność plastyczną $N_{pl,Rm}$ na ściskanie obliczono ze wzoru 8, zastępując we wzorze 6.33 normy [8] wartości obliczeniowe f_{yd}, f_{cd}, f_{sd} wartościami średnimi f_{ym}, f_{cm}, f_{sm}

$$N_{pl,Rm} = \eta_o A_a f_{ym} + A_c f_{cm}\left(1+\eta_c \frac{t}{d}\cdot\frac{f_{ym}}{f_{cm}}\right) + A_s f_{sm} \tag{8}$$

gdzie:

A_s – pole przekroju zbrojenia,
A_c – pole przekroju betonu,
f_{cm} – średnia wytrzymałość betonu na ściskanie,
f_{ym} – średnia granica plastyczności stali,
f_{sm} – średnia granica plastyczności zbrojenia,

- dla elementów osiowo ściskanych ($e = 0$) zgodnie z [8]:

$$\eta_o = \eta_{ao} \tag{9}$$

$$\eta_c = \eta_{co} \tag{10}$$

$$\eta_{ao} = 0{,}25 \cdot (3 + 2\lambda) \le 1{,}0 \tag{11}$$

$$\eta_{co} = 4{,}9 - 18{,}5\lambda + 17\lambda^2 \ge 0 \tag{12}$$

- dla elementów spełniających warunek: $0 < \frac{e}{d} \le 0{,}1$ (mimośrodowo ściskane):

$$\eta_o = \eta_{ao} + (1-\eta_{ao})\frac{10e}{d} \tag{13}$$

$$\eta_c = \eta_{co} + \left(1-10\frac{e}{d}\right) \tag{14}$$

- dla elementów spełniających warunek: $e/d > 0{,}1$ (mimośrodowo ściskane):

$$\eta_o = 1{,}0 \tag{15}$$

$$\eta_c = 0{,}0 \tag{16}$$

Smukłość względną wyznaczono ze wzoru 2 mającego postać:

$$\lambda = \sqrt{\frac{N_{pl,Rk}}{N_{cr}}}$$

gdzie:

N_{cr} – sprężysta krytyczna siła normalna wyznaczona ze wzoru:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI_{eff}}{l^2} \tag{17}$$

przy czym $$EI_{eff} = E_a I_a + E_s I_s + K_e E_{cm} I_c \tag{18}$$

gdzie:

l – długość wyboczeniowa,
K_e – współczynnik poprawkowy o wartości 0,6,
I_a, I_c, I_s – momenty bezwładności przekroju stalowego, niezarysowanego przekroju betonowego i zbrojenia w rozpatrywanej płaszczyźnie zginania.

- $N_{pl,Rk}$ – charakterystyczna nośność plastyczna przekroju wyznaczona ze wzoru 19, przy czym w pracy wytrzymałości obliczeniowe f_{yd}, f_{cd}, f_{sd} zastąpiono średnimi f_{ym}, f_{cm}, f_{sm}:

$$N_{pl,Rk} = A_a f_{yd} + 0{,}85 A_c f_{cd} + A_s f_{sd} \tag{19}$$

W elementach wypełnionych betonem wartość 0,85 może zostać zastąpiona przez 1,0. Współczynnik wyboczeniowy χ użyty we wzorze 6 można odczytać z krzywych wyboczeniowych zawartych w EC3 [9] lub wyznaczyć ze wzoru Ayrtona-Perry'ego:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \tag{20}$$

gdzie wielkość ϕ wyznacza się ze wzoru:

$$\phi = 0{,}5\left[1 + 0{,}21\left(\bar{\lambda} - 0{,}2\right) + \bar{\lambda}^2\right] \tag{21}$$

Do wyznaczenia współczynnika redukcyjnego w przedstawionych poniżej obliczeniach zastosowano wzory 19 i 20.

3. Ocena poprawności normowej metody uproszczonej wyznaczania nośności słupów CFST w świetle wybranych badań eksperymentalnych

Oceny poprawności uproszczonej metody wyznaczania nośności słupów CFST według EC4 dokonano na podstawie wybranych badań przeprowadzonych na przestrzeni lat 1957-2004 w różnych ośrodkach badawczych. Wyznaczone podczas tych badań nośności słupów CFST $N_{R,exp}$ porównano z wartościami teoretycznymi nośności tych słupów $N_{Rm,cal}$ wyznaczonymi według analizowanej metody normowej przy uwzględnieniu średnich wartości właściwości mechanicznych stali i betonu. Poniżej przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych słupów CFST wraz z ich parametrami geometrycznymi oraz wartościami średnimi właściwości

mechanicznych betonu i stali. W tabelach tych w kolumnie 8 przedstawiono też wartość nośności słupa wyznaczonej na podstawie metody normowej przedstawionej w podpunkcie 2.2. W kolumnie 10 podano stosunek nośności eksperymentalnej do obliczonej dla poszczególnych słupów $\left(\frac{N_{R,exp}}{N_{Rm,cal}}\right)$. Następnie dla całej populacji badanych słupów wyznaczono parametry rozkładu statystycznego stosunku wytrzymałości eksperymentalnej do obliczonej na postawie średnich wartości parametrów mechanicznych, takie jak wartość średnia, odchylenie standardowe, współczynnik zmienności i wreszcie minimalna wartość stosunku $\left(\frac{N_{R,exp}}{N_{Rm,cal}}\right)_{min}$ przy poziomie ufności 95%. Przy ocenie poprawności analizowanej metody kierowano się właśnie tym ostatnim parametrem, przyjmując, że metoda jest poprawna, jeżeli wartość tego stosunku przekracza 1,0. Oprócz zestawienia tabelarycznego przedstawiono wykresy stosunku nośności eksperymentalnej do obliczonej na postawie średnich wartości parametrów mechanicznych w funkcji nośności obliczonej na postawie średnich wartości parametrów mechanicznych. Na wykresach tych naniesiono także wartości średnią i gwarantowaną z prawdopodobieństwem 95%. Ze względu na objętość artykułu poniżej przedstawiono jedynie analizę porównawczą dla wybranych badań w przykładowych ośrodkach badawczych.

3.1. Badania Kloppela i Godera z 1957 roku [10]

Tabela 1. Zestawienie eksperymentalnych nośności słupów CFST (z badań Kloppela i Godera [10]) oraz wartości teoretycznych (obliczonych wg EC4) na podstawie średnich wartości właściwości mechanicznych

Symbol	t [mm]	d [mm]	f_y [N/mm^2]	f_c [N/mm^2]	E_{cm} [GPa]	l [cm]	$N_{Rm,cal}$ [kN]	$N_{R,exp}$ [kN]	$N_{R,exp}/N_{Rm,cal}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
64	4,11	207,78	304	23,2	31,0	222,0	1530	1834	1,20
65	4,04	207,92	293	30,2	32,9	222,0	1701	2289	1,35
66	4,11	207,78	291	30,2	32,9	222,0	1708	2239	1,31
69	6,05	203,90	395	23,2	31,0	222,0	2170	2462	1,13
70	5,97	204,06	399	23,2	31,0	222,0	2165	2421	1,12
71	6,5	203,00	300	30,2	32,9	222,0	2127	2804	1,32
72	6,3	203,40	411	30,2	32,9	222,0	2484	2932	1,18
83	3,66	113,68	300	21,4	30,4	105,0	624	695	1,11
84	3,73	113,54	333	21,4	30,4	105,0	670	746	1,11
85	3,76	113,48	313	24,6	31,4	105,0	677	837	1,24
86	3,99	113,02	332	24,6	31,4	105,0	724	863	1,19
89	5,61	109,78	349	21,4	30,4	105,0	900	998	1,11
90	5,41	110,18	348	21,4	30,4	105,0	877	1018	1,16
91	5,46	110,08	336	24,6	31,4	105,0	888	1099	1,24
92	5,56	109,88	327	24,6	31,4	105,0	883	1079	1,22
95	3,71	113,58	300	21,4	30,4	231,0	559	641	1,15

96	3,76	113,48	333	21,4	30,4	231,0	612	629	1,03
97	3,71	113,58	313	24,6	31,4	231,0	607	695	1,14
98	3,86	113,28	332	24,6	31,4	231,0	651	755	1,16
101	5,69	109,62	349	21,4	30,4	231,0	846	786	0,93
102	5,49	110,02	348	21,4	30,4	231,0	822	816	0,99
103	5,64	109,72	336	24,6	31,4	231,0	839	874	1,04
104	5,44	110,12	327	24,6	31,4	231,0	799	865	1,08

Parametry rozkładu statystycznego wyznaczono w następujący sposób:

Średnia wartość stosunku $\left(\frac{N_{R,exp}}{N_{Rm,cal}}\right)$:

$$\left(\frac{N_{R,exp}}{N_{Rm,cal}}\right)_{mean} = \frac{\sum_{i=1}^{23}\frac{N_{R,exp}}{N_{Rm,cal}}}{\mathrm{n}} = \frac{26{,}52}{23} = 1{,}15 \tag{22}$$

Odchylenie standardowe:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1}\cdot\sum\left(\left(\frac{N_{R,\exp}}{N_{Rm,cal}}\right)_i - \left(\frac{N_{R,exp}}{N_{Rm,cal}}\right)_{mean}\right)^2} = \sqrt{0{,}23\cdot\frac{1}{23-1}} = 0{,}102 \tag{23}$$

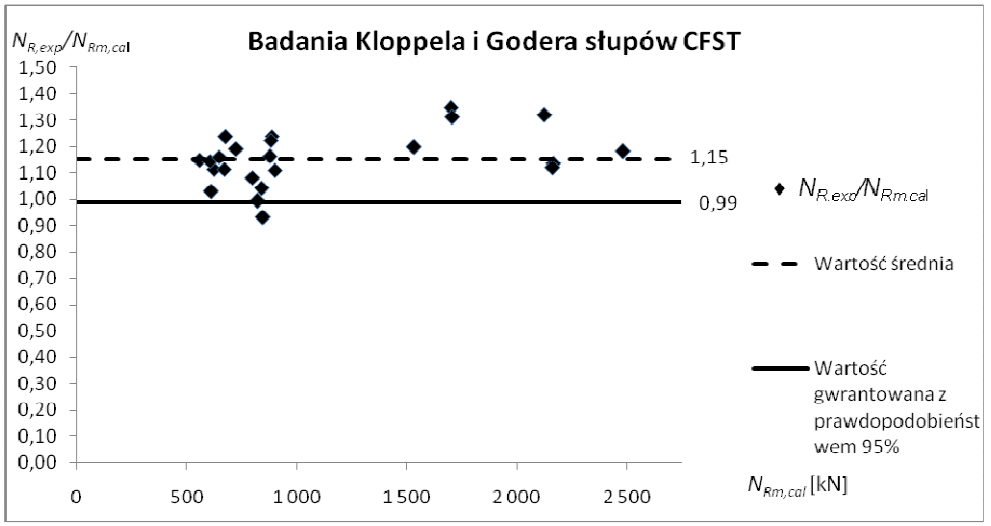
Współczynniki zmienności:

$$v = \frac{s}{\left(\frac{N_{R,exp}}{N_{Rm,cal}}\right)_{mean}} = \frac{0{,}102}{1{,}15} = 0{,}089 \tag{24}$$

Minimalna wartość stosunku $\left(\frac{N_{R,exp}}{N_{Rm,cal}}\right)$ przy poziomie ufności 95%:

$$\left(\frac{N_{R,exp}}{N_{Rm,cal}}\right)_{min} = \left(\frac{N_{R,exp}}{N_{Rm,cal}}\right)_{mean} - 1{,}64\cdot s = 1{,}15 - 1{,}64\cdot 0{,}102 = 0{,}99 \tag{25}$$

Wyniki analizy w postaci graficznej przedstawiono na rysunku 1. Zaznaczono na nim: punktami stosunek nośności eksperymentalnej do nośności obliczonej na postawie średnich wartości parametrów mechanicznych, linią przerywaną wartość średnią stosunku nośności eksperymentalnej do nośności obliczonej na postawie średnich wartości parametrów mechanicznych, natomiast linią ciągłą wartość analizowanego stosunku przy poziomie ufności 95%.



Rysunek 1. Stosunek nośności eksperymentalnej do nośności obliczonej dla średnich wartości właściwości mechanicznych stali i betonu. $\frac{N_{R,exp}}{N_{Rm,cal}} = \mathrm{f}\left(N_{Rm,cal}\right)$

Jak można zauważyć, średnia wartość stosunku $\left(\frac{N_{R,exp}}{N_{Rm,cal}}\right)_{mean}$ = 1,15 > 1,0 bezpiecznie szacuje przewidywaną nośność słupa, podobnie akceptowana może być wartość gwarantowana z prawdopodobieństwem 95%, $\left(\frac{N_{R,exp}}{N_{Rm,cal}}\right)_{min}$ = 0,99, wskazuje, że analizowana metoda według EC4 w świetle analizowanych wyników poprawnie szacuje wartość nośności słupów CFST.

Mniej optymistyczne wnioski można wyciągnąć na podstawie innych badań (np. [11]).

3.2. Badania Fujii z 1994 roku [11]

Tabela 2. Zestawienie eksperymentalnych nośności słupów CFST (z badań Fujii, 1994 [11]) oraz wartości teoretycznych (obliczonych wg EC4) na podstawie średnich wartości właściwości mechanicznych

Symbol	t [mm]	d [mm]	f_y [N/mm^2]	f_c [N/mm^2]	E_{cm} [GPa]	l [cm]	$N_{Rm,cal}$ [kN]	$N_{R,exp}$ [kN]	$N_{R,exp}/N_{Rm,cal}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U60-35	3,3	107,40	291	37,0	24,0	85,0	669	834	1,25
U60-45	4,68	104,64	332	37,0	24,0	85,0	855	1049	1,23
U60-60	6,34	101,32	486	37,0	24,0	85,0	1297	1608	1,24
U150-16	1,73	110,54	266	33,0	21,0	175,1	414	461	1,11
U150-60	5,99	102,02	486	37,0	24,0	175,0	1174	1177	1,00
U200-16	2,06	109,88	266	28,0	22,0	225,0	402	353	0,88

U250-16	1,66	110,68	266	36,0	21,0	275,0	409	402	0,98
U250-35	3,28	107,44	291	36,0	21,0	275,0	621	667	1,07
U250-45	4,84	104,32	332	31,0	20,0	275,1	841	726	0,86
B60-16	1,79	110,42	266	37,0	24,0	85,0	510	515	1,01
B60-35	3,35	107,30	291	37,0	24,0	85,0	674	785	1,17
B60-45	4,44	105,12	332	37,0	24,0	85,0	830	902	1,09
B60-60	6,00	102,00	486	37,0	24,0	85,0	1250	1334	1,07
B100-60	5,91	102,18	486	25,0	22,0	125,0	1079	1177	1,09
B150-16	1,93	110,14	266	33,0	21,0	175,0	430	461	1,07
B150-35	3,32	107,36	291	30,0	20,0	175,0	532	628	1,18
B150-60	5,94	102,12	486	37,0	24,0	175,0	1167	1138	0,97
B200-16	1,78	110,44	266	28,0	22,0	225,0	378	373	0,99
B200-35	3,31	107,38	291	24,0	23,0	232,0	504	535	1,06
B200-60	6,14	101,72	486	28,0	22,0	225,0	1280	1000	0,78
B250-16	1,72	110,56	266	36,0	21,0	275,0	417	353	0,85
B250-35	3,41	107,18	291	36,0	21,0	275,0	635	569	0,90
B250-45	4,49	105,02	332	31,0	20,0	275,0	797	657	0,82
EB100-60	5,94	102,12	486	25,0	22,0	128,0	1078	1285	1,19
EB250-16	1,73	110,54	266	36,0	21,0	275,0	418	383	0,92

Parametry rozkładu statystycznego w tym przypadku wynoszą:

Średnia wartość stosunku $\frac{N_{R,exp}}{N_{Rm,cal}}$ wyznaczona według wzoru 22:

$$\left(\frac{N_{R,exp}}{N_{Rm,cal}}\right)_{mean} = \frac{\sum_{i=1}^{23}\frac{N_{R,exp}}{N_{Rm,cal}}}{n} = \frac{26{,}53}{26} = 1{,}03$$

Odchylenie standardowe wyznaczone według wzoru 23:

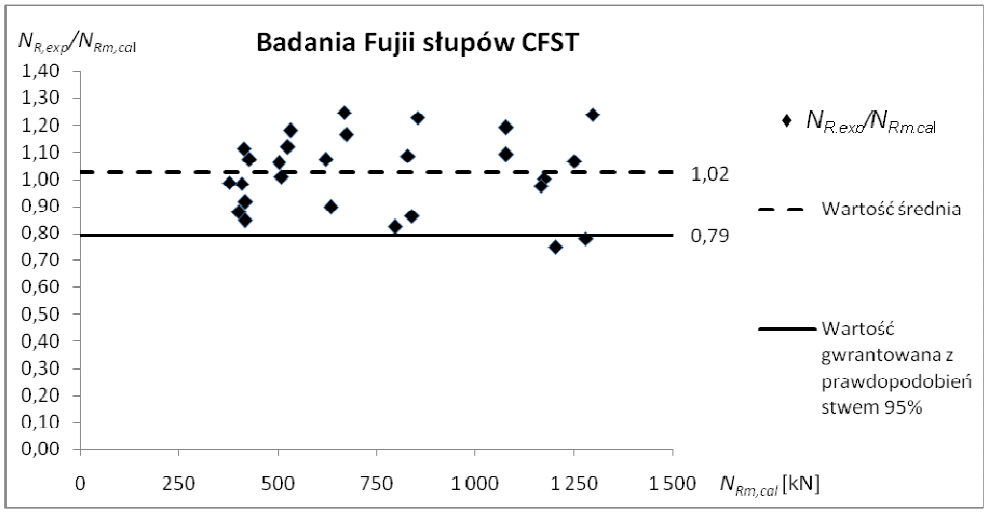
$$s = \sqrt{\frac{1}{\mathrm{n}-1}\cdot\sum\left(\left(\frac{N_{R,exp}}{N_{Rm,cal}}\right)_i - \left(\frac{N_{R,exp}}{N_{Rm,cal}}\right)_{mean}\right)^2} = \sqrt{\frac{1}{26-1}\cdot 0{,}77} = 0{,}141$$

Współczynniki zmienności wyznaczone według wzoru 24:

$$v = \frac{s}{\left(\frac{N_{R,exp}}{N_{Rm,cal}}\right)_{mean}} = \frac{0{,}141}{1{,}03} = 0{,}137$$

Minimalna wartość stosunku $\frac{N_{R,exp}}{N_{Rm,cal}}$ przy poziomie ufności 95% wyznaczona według wzoru 25 wynosi:

$$\left(\frac{N_{R,exp}}{N_{Rm,cal}}\right)_{min} = \left(\frac{N_{R,exp}}{N_{Rm,cal}}\right)_{mean} - 1{,}64\cdot s = 1{,}02 - 1{,}64\cdot 0{,}17 = 0{,}79$$



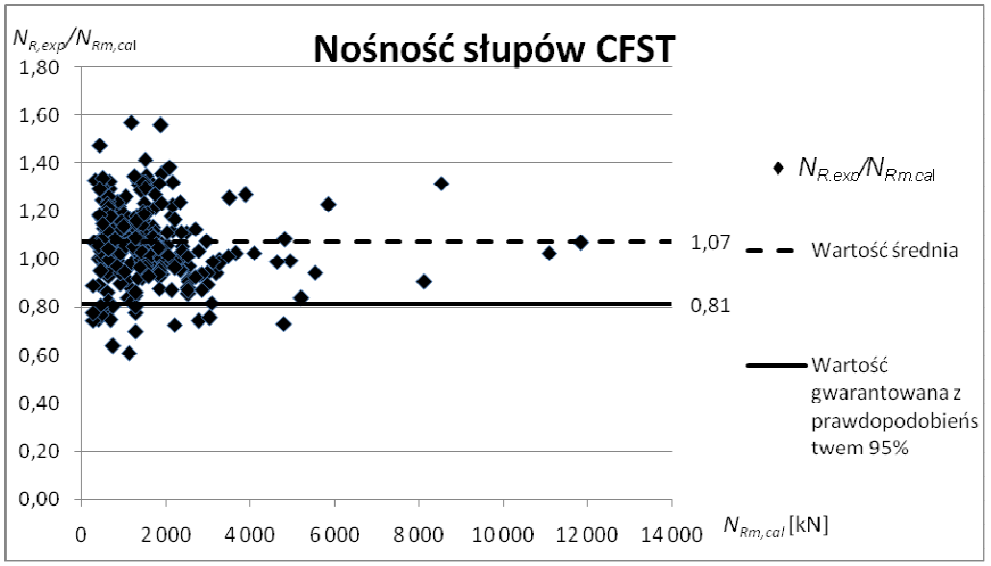
Rysunek 2. Stosunek nośności eksperymentalnej do nośności obliczonej dla średnich wartości właściwości mechanicznych stali i betonu. $\frac{N_{R,exp}}{N_{Rm,cal}} = \mathrm{f}\left(N_{Rm,cal}\right)$

Wyniki analizy przedstawiono graficznie na rysunku 2. Punktami zaznaczono stosunek nośności eksperymentalnej do nośności obliczonej na postawie średnich wartości parametrów mechanicznych, linią przerywaną wartość średnią stosunku nośności eksperymentalnej do nośności obliczonej na postawie średnich wartości parametrów mechanicznych, natomiast linią ciągłą wartość analizowanego stosunku przy poziomie ufności 95%.

Jak można zauważyć, analizowana metoda według EC4 w świetle analizowanych wyników znacznie przeszacowuje wartość nośności słupów CFST.

W identyczny sposób została wykonana analiza wyników uzyskanych przez innych badaczy; Masuo et al. [12], Cai et al. [13], Cai i Gu [14], Tanga et al. [15] (w tym przypadku stwierdzono zgodność wyników eksperymentalnych i teoretycznych), Bridge'a i O'Shea [16], Ghannama et al. [17] (znaczne, niebezpieczne przeszacowanie nośności) oraz Zonga [18].

Wyniki zbiorczej analizy przedstawionych wyżej badań pokazano w formie graficznej na rysunku 3. Analizując dane na nim zamieszczone, nietrudno zauważyć, że średnia stosunku nośności eksperymentalnej do nośności wyznaczonej na podstawie normy EC4 z 280 wyników badań przeprowadzonych w różnych ośrodkach na przestrzeni wielu lat wskazuje na dość dobrą predykcję nośności słupów CFST. Niestety, jeżeli uwzględni się dyspersję wyników, łatwo zaobserwować, że nośność słupów CFST wyznaczona na podstawie normy EC4 jest niebezpiecznie przeszacowana. Wartość $\left(\frac{N_{R,exp}}{N_{Rm,cal}}\right)_{min}$ przy poziomie ufności 95% wynosi zaledwie 0,81.



Rysunek 3. Stosunek $\frac{N_{R,exp}}{N_{Rm,cal}} = \mathrm{f}\left(N_{Rm,cal}\right)$ wyznaczony na podstawie wyników badań [10-18]

4. Badania Korzeniowskiego, Abramskiego, Kondrata przeprowadzone na Politechnice Gdańskiej

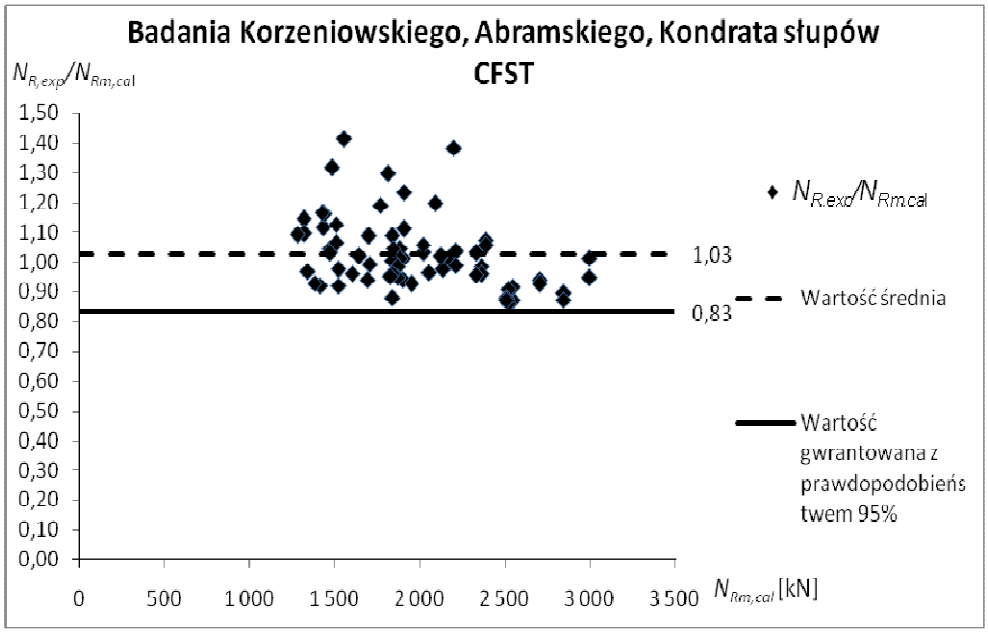
W badaniach tych maksymalna wartość stosunku *d/t* została przekroczona. Mimo to postanowiono sprawdzić, czy metoda podana w EC4 może być stosowana w takich przypadkach do wyznaczania nośności słupów CFST. W tabeli 3 zestawiono podobnie jak w poprzednich przypadkach parametry badanych słupów CFST oraz wyniki stosunku nośności uzyskanej na drodze eksperymentalnej do nośności przewidywanej na podstawie normy EC4.

Wyniki analizy przedstawiono w formie graficznej na rysunku 4. Punktami oznaczono stosunek nośności eksperymentalnej do nośności obliczonej na postawie średnich wartości parametrów mechanicznych, linią przerywaną wartość średnią stosunku nośności eksperymentalnej do nośności obliczonej na postawie średnich wartości parametrów mechanicznych, natomiast linią ciągłą wartość analizowanego stosunku przy poziomie ufności 95%.

Tabela 3. Zestawienie eksperymentalnych nośności słupów CFST (z badań przeprowadzonych na Politechnice Gdańskiej) oraz wartości teoretycznych (obliczonych wg EC4) na podstawie średnich wartości właściwości mechanicznych

Symbol	t [mm]	d [mm]	f_y [N/mm^2]	f_c [N/mm^2]	E_{cm} [GPa]	l [cm]	$N_{Rm,cal}$ [kN]	$N_{R,exp}$ [kN]	$N_{R,exp}$/ /$N_{Rm,cal}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
L-5C30NA	5	158,30	380	34,4	31,9	220,0	1474	1542	1,05
L-5C30NB	5	158,30	380	34,4	31,9	220,0	1474	1520	1,03
L-5C30WA	5	158,30	380	31,7	34,2	220,0	1436	1670	1,16
L-5C30WB	5	158,30	380	31,7	34,2	220,0	1436	1602	1,12
L-5C30EA	5	158,30	350	28,8	26,3	220,0	1319	1508	1,14
L-5C30EB	5	158,30	350	36,4	28,4	220,0	1440	1672	1,16
L-5C60NA	5	158,30	380	68,2	43,8	220,0	2022	2083	1,03
L-5C60NB	5	158,30	380	68,2	43,8	220,0	2022	2137	1,06
L-5C60WA	5	158,30	380	61,6	37,5	220,0	1910	2122	1,11
L-5C60WB	5	158,30	380	61,6	37,5	220,0	1910	2359	1,23
L-5C60EA	5	158,30	350	52,5	42,5	220,0	1707	1695	0,99
L-5C60EB	5	158,30	350	49,4	33,4	220,0	1644	1679	1,02
L-10C30NA	10	148,30	300	34,2	33,5	220,0	1903	1927	1,01
L-10C30NB	10	148,30	300	34,2	33,5	220,0	1903	1792	0,94
L-10C30WA	10	148,30	300	32,9	33,3	220,0	1885	1965	1,04
L-10C30WB	10	148,30	300	32,9	33,2	220,0	1885	1907	1,01
L-10C30EA	10	148,30	305	28,8	26,3	220,0	1842	1847	1,00
L-10C30EB	10	148,30	305	36,4	28,4	220,0	1951	1810	0,93
L-10C60NA	10	148,30	300	67,0	37,7	220,0	2362	2322	0,98
L-10C60NB	10	148,30	300	67,0	37,7	220,0	2362	2265	0,96
L-10C60WA	10	148,30	300	64,7	38,1	220,0	2332	2404	1,03
L-10C60WB	10	148,30	300	64,7	38,1	220,0	2332	2231	0,96
L-10C60EA	10	148,30	305	52,5	42,5	220,0	2189	2191	1,00
L-10C60EB	10	148,30	305	49,4	33,4	220,0	2137	2082	0,97
S-5C30NA	5	158,30	350	38,7	31,3	80,0	1871	1841	0,98
S-5C30NB	5	158,30	350	38,7	31,3	80,0	1871	1776	0,95
S-5C30WA	5	158,30	350	36,8	32,3	80,0	1841	1768	0,96
S-5C30WB	5	158,30	350	36,8	32,3	80,0	1841	1617	0,88
S-5C30EA	5	158,30	350	36,4	28,4	80,0	1827	1739	0,95
S-5C30EB	5	158,30	350	28,8	26,3	80,0	1697	1595	0,94
S-5C60NA	5	158,30	350	68,4	38,8	80,0	2390	2568	1,07
S-5C60NB	5	158,30	350	68,4	38,8	80,0	2390	2520	1,05
S-5C60WA	5	158,30	350	58,3	37,2	80,0	2214	2290	1,03
S-5C60WB	5	158,30	350	58,3	37,2	80,0	2214	2188	0,99
S-5C60EA	5	158,30	350	49,4	33,4	80,0	2055	1984	0,97
S-5C60EB	5	158,30	350	52,5	42,5	80,0	2125	2165	1,02
S-10C30NA	10	148,30	305	38,7	32,3	80,0	2550	2220	0,87
S-10C30NB	10	148,30	305	38,7	31,3	80,0	2549	2338	0,92
S-10C30WA	10	148,30	305	36,8	32,3	80,0	2521	2285	0,91
S-10C30WB	10	148,30	305	36,8	32,3	80,0	2521	2164	0,86
S-10C30EA	10	148,30	305	36,4	28,4	80,0	2511	2212	0,88
S-10C30EB	10	148,30	305	36,4	28,4	80,0	2511	2185	0,87
S-10C60NA	10	148,30	305	68,4	38,8	80,0	2997	3035	1,01
S-10C60NB	10	148,30	305	68,4	38,8	80,0	2997	2834	0,95

S-10C60WA	10	148,30	305	58,3	37,2	80,0	2845	2544	0,89
S-10C60WB	10	148,30	305	58,3	37,2	80,0	2845	2483	0,87
S-10C60EA	10	148,30	305	49,4	33,4	80,0	2709	2550	0,94
S-10C60EB	10	148,30	305	49,4	33,4	80,0	2709	2511	0,93
3B30m	3	205,00	312	30,6	31,4	217,0	1509	1699	1,13
3B30c	3	205,00	256	35,4	32,5	217,0	1555	2199	1,41
3B60m	3	205,00	312	50,8	33,3	217,0	2091	2500	1,20
3B60c	3	205,00	312	54,4	37,2	217,0	2200	3044	1,38
Zb2r	3	205,00	312	27,9	27,8	217,0	1426	1662	1,17
Zb2r_bis	3	205,00	256	30,6	30,9	217,0	1416	1304	0,92
Zb2r_90	3	205,00	297	37,9	34,4	217,0	1702	1852	1,09
Zb2c	3	205,00	256	27,5	28,3	217,0	1323	1449	1,09
Zb2c_bis	3	205,00	297	32,1	29,5	217,0	1526	1405	0,92
Zb2rbp	3	205,00	297	32,0	29,1	217,0	1522	1484	0,97
Zb2cbp	3	205,00	297	34,7	30,2	217,0	1604	1542	0,96
Zbe2r	3	205,00	297	27,4	23,8	217,0	1381	1283	0,93
Zbe2c	3	205,00	297	25,8	27,5	217,0	1341	1300	0,97
2B30m	2	205,00	243	32,3	27,5	217,0	1282	1399	1,09
2B60m	2	205,00	243	52,1	31,8	217,0	1838	2000	1,09
Zb2_be	2	205,00	298	37,0	31,2	217,0	1485	1956	1,32
Zb1,2r	3	205,00	256	37,8	32,9	137,0	1771	2107	1,19
Zb1,2c	3	205,00	256	28,6	35,3	137,0	1510	1606	1,06
Zb1,2_be	2	205,00	298	44,3	32,3	137,0	1815	2355	1,30
Zb0,6cbp	3	205,00	256	34,7	30,8	77,0	1843	1929	1,05



Rysunek 4. Stosunek nośności eksperymentalnej do nośności obliczonej dla średnich wartości właściwości mechanicznych stali i betonu. $\frac{N_{R,exp}}{N_{Rm,cal}} = \mathrm{f}\left(N_{Rm,cal}\right)$

Jak można zauważyć, metoda według EC4 w świetle analizowanych wyników przeszacowuje wartość nośności słupów CFST, jednak stopień tego przeszacowania nie jest większy niż w przypadku słupów CFST spełniających wszystkie warunki normowe. Biorąc pod uwagę znaczną liczbę słupów przebadanych na Politechnice Gdańskiej, można pokusić się o wniosek, że metoda według EC4 może być stosowana w wielu wypadkach również do słupów o cieńszych ściankach stalowej rury, z uwzględnieniem uwag dotyczących poprawności tej metody odnoszących się do wszystkich CFST, podanych we wnioskach.

5. Wnioski

1. W przypadku słupów badanych na Politechnice Gdańskiej, w których maksymalna wartość stosunku *d/t* została przekroczona, nie stwierdzono gorszej relacji między przewidywaną a wyznaczoną na drodze eksperymentalnej nośnością słupów. Wskazuje to na możliwość szerszego zastosowania metody obliczania słupów CFST według EC4, z uwzględnieniem uwag podanych w dalszych wnioskach.
2. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń i analiz można stwierdzić, że używając do obliczeń średnich wartości parametrów mechanicznych stali i betonu, metoda normowa omówiona w podpunkcie 2.2 przeszacowuje wartości nośności słupów CFST, mimo że średnia stosunku nośności eksperymentalnej do obliczonej według normy EC4 dla średnich właściwości mechanicznych betonu i stali jest zadowalająca.
3. Oceny poprawności normowej metody uproszczonej wyznaczania nośności słupów CFST dokonano na podstawie badań 280 słupów CFST. W analizowanych badaniach minimalna wartość stosunku $\left(\frac{N_{R,exp}}{N_{Rm,cal}}\right)_{min}$ przy poziomie ufności 95% przekroczyła wartość 1,0 tylko w jednej grupie badanych słupów, w kilku przypadkach zbliżała się do 1. Według autorów wskazuje to na konieczność bardziej ostrożnej oceny poprawności metody stosowanej według normy EC4.
4. Zdaniem autorów istnieje potrzeba zwiększenia bezpieczeństwa metody stosowanej w EC4 do wyznaczania nośności słupów CFST, chociażby przez wprowadzenie dodatkowego współczynnika bezpieczeństwa. W tym celu wskazana jest pogłębiona analiza słupów CFST z uwzględnieniem wpływu różnych parametrów geometrycznych i materiałowych tych słupów na relację między nośnością teoretyczną a uzyskaną na drodze eksperymentalnej.

Literatura

1. Kloppel K., Goder W., *Traglastversuche mit ausbetonierten Stahlrohren und Aufstellung einer Bemessungsformel*, „Der Stahlbau" 1957, Heft 1, 2.
2. Roik K., Schwalbenhofer K., *Experimentelle und theoretische Untersuchungen zum plastischen Verhalten von Verbundstützen bei grossen Deformationen*, „Stahlbau" 1989, Heft 11.
3. Roik K., Bode H., Bergmann R., *Zur Traglast von betongefullten Hohlprofilstützen unter Berücksichtigung des Langzeitverhaltens des Betons*, „Der Stahlbau" 1982, Heft 7.
4. Kilpatrick A.E., Rangan B.V., *Test on high-strenght concrete-filled steel tubular columns*, „ACI Structural Journal" 1999, no. 3-4.
5. Kilpatrick A.E., Rangan B.V., *Influence of interfacial shear transfer on behavior of concrete-filled steel tubular columns*, „ACI Structural Journal" 1999, no. 7-8.
6. Johansson M., *Composite action and confinement effects in tubular steel-concrete columns*, Chalmers University of Technology, Goteborg 2002.
7. Johansson M., Gylltoft K., *Mechanical behavior of circular steel-concrete composite stub columns*, „Journal of Structural Engineering ASCE" 2002, no. 8.
8. PN-EN 1994-1-1:2008, Eurokod 4: Projektowanie zespolonych konstrukcji stalowo--betonowych.
9. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1.1: Zasady ogólne i reguły dla budynków. PN-EN 1993-1-1:2006.
10. Kloppel V.K., Goder W., *An investigation of the load carrying capacity of concrete--filled steel tubes and development of design formula*, „Der Stahlbau" 1957, Heft 1.
11. Fujii, K., *Structural behaviour of two types of mortar filled steel tubes*, Proceedings 4th International Conference on Composite Construction, Kosice, Slovakia, 20-23 June, 1994.
12. Masuo K., Adachi M., Kawabata K., Kobayashi M., *Buckling behavior of concrete filled circular steel tubular columns using lightweight concrete*, Proceedings 3rd ASCCS International Conference on Composite Construction, Fukuoka, Japan, 24-27 September, 1991.
13. Cai S.H., Jiao Z.S., *Behavior and ultimate strength of short concrete-filled steel tubular columns*, „Journal of Building Structures" 1984, no. 6.
14. Cai S.H., Gu W.L., *Behavior and ultimate strength of long concrete-filled steel tubular columns*, „Journal of Building Structures" 1985, no. 6.
15. Tang G.Z., Zhao B.Q., Zhu H.X., Shen X.M., *Study on the fundamental structural behaviour of concrete filled steel tubular columns*, „Journal of Building Structures" (China) 1982, no. 1.
16. Bridge R., O'Shea M., *Australian composite code concrete filled steel tubes*, ASCCS Seminar on Concrete Filled Steel Tubes – A Comparison of International Codes and Practices, International Conference on Composite Construction – Conventional and Innovative, Innsbruck, 16-18 September, 1997.
17. Ghannam S., Jawad Y.A., Hunaiti Y., *Failure of lightweight aggregate concrete-filled steel tubular columns*, „Steel and Composite Structures" 2004, no. 1.
18. Zhong S., *Concrete filled steel tubular structures*, Publishing Company of Science and Technology of Heilongjiang, Heilongjiang 1994.

Uwaga: Pozycje [10-18], zawierające opis, wyniki i analizę przeprowadzonych badań przywoływanych w artykule, nie były dostępne dla autorów. Zostały omówione szczegółowo na stronie http://web.ukonline.co.uk/asccs2/ (ASCC Database of Concrete – Filled Steel Tube Columns prepared by C. Douglas Goode). Dokonano tam również syntezy wyników cytowanych badań.

EC4 NORMATIVE METHOD OF CALCULATING THE LOAD BEARING CAPACITY OF THE COMPOSITE COLUMNS CFST IN THE LIGHT OF EXPERIMENTAL RESEARCH

Abstract: *The work verifies the correctness and the safety of the EC4 normative method of calculating the load bearing capacity in the composite columns CFTS. The analysis has been based on the choice of the results of experimental research on the 280 columns, both carried out by the author as well as the ones described in the literature. The following parameters of the static distribution have been determined: the mean value, the standard deviation, the coefficient of the variation and the value guaranteed with the probability of 95%. The achieved results were the basis for the rating of the normative method.*

Andrzej Olchawa, Dominika Iskra-Świercz
Stanisław Kwitnewski, Tomasz Dąbrowski

OCENA MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA KONDENSATORA PŁASKIEGO DO POMIARU PRZENIKALNOŚCI ELEKTRYCZNEJ OŚRODKA POROWATEGO PIASEK KWARCOWY–POWIETRZE

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów przenikalności elektrycznej porowatej skały dwufazowej (piasek kwarcowy–powietrze) za pomocą kondensatora płaskiego. Wyniki wskazują na dużą zgodność wartości pomierzonych z wartościami obliczonymi na podstawie uznanych wzorów. Pomiary przenikalności elektrycznej za pomocą kondensatora płaskiego można uznać za wiarygodne.

Wprowadzenie

Dielektrykami nazywamy ciała stałe, ciecze oraz gazy, których oporność właściwa jest większa od 10^8 Ωm. Grunt oraz składowe medium porowego gruntu, tj. woda, powietrze czy np. substancje ropopochodne, są dielektrykami, których względne wartości przenikalności elektrycznej ε_r w odpowiednich warunkach temperatury i ciśnienia wynoszą odpowiednio [1]:

- szkielet gruntowy $\approx$ 4,0,
- woda 80,8,
- powietrze 1,0,
- ropa naftowa 2,0÷2,7.

Przenikalność elektryczna jednostkowej objętości ośrodka porowatego, którego pory wypełnione są roztworem porowym lub/i powietrzem, zależy od wartości przenikalności elektrycznej składowych ośrodka oraz ich wzajemnych relacji ilościowych. Ustalenie związków ilościowych pomiędzy przenikalnością elektryczną porowatego układu wielofazowego a objętościami: szkieletu gruntowego, powietrza oraz objętościami tworzącymi medium porowe pozwoliłoby w praktyce na proste oszacowanie objętościowej zawartości np. substancji zanieczyszczających grunt. Koniecznym warunkiem stosowania takiej metody szacowania objętości składowych medium porowego jest wiarygodność aparatury pomiarowej.

Celem prezentowanego artykułu jest ocena wiarygodności pomiaru statycznej przenikalności elektrycznej skały porowatej (gruntu niespoistego) za pomocą kondensatora płaskiego.

1. Prawo Gaussa dla dielektryków

Okładki kondensatora, jak wiadomo, są przewodnikami, a więc powierzchniami ekwipotencjalnymi, tzn. wszystkie punkty na okładce mają tę samą wartość potencjału elektrycznego i istnieje różnica potencjałów między nimi. Ładunek q i różnica potencjałów U (napięcie) kondensatora są do siebie proporcjonalne, co wyraża wzór [2]:

$$q = C \cdot U \tag{1}$$

gdzie:

C – jest stałą proporcjonalności, którą nazywamy pojemnością kondensatora.

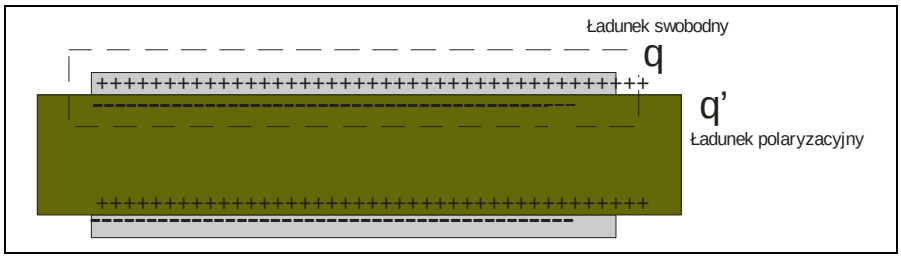
W dielektrykach ładunki elektryczne nie mogą się swobodnie przemieszczać, jednak możliwe jest przesunięcie ładunków jednego znaku w stosunku do ładunków przeciwnego znaku w skali mikro. Całkowity ładunek otoczony przez powierzchnie Gaussa, zaznaczone linią przerywaną (rys. 1) wynosi $q - q'$ w przypadku jednej okładki kondensatora, a zgodnie z prawem Gaussa różnicę tę opisuje równanie [2, 3]:

$$\varepsilon_0 \oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \varepsilon_0 \cdot E \cdot S = q - q' \tag{2}$$

gdzie:

E – pole elektryczne,
d – odległość między okładkami kondensatora,
ε_0 – przenikalność elektryczna próżni,
S – pole powierzchni okładek kondensatora,
q' – wartość indukowanego ładunku powierzchniowego.

$$E = \frac{q}{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot S} - \frac{q'}{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot S} \tag{3}$$



Rysunek 1. Kondensator płaski z płytką dielektryczną [1]

Z powyższych zależności (wzory 2 i 3) wynika, że obecność dielektryka w zewnętrznym polu elektrycznym powoduje powstawanie w dielektryku ładunku indukowanego q', co wpływa na zmniejszenie wartości natężenia pola elektrycznego wewnątrz kondensatora.

Obecność dielektryka zatem zmniejsza wartość natężenia pola elektrycznego wewnątrz kondensatora (E_0), które występowało w kondensatorze przed umieszczeniem w nim dielektryka o pewną wartość ε_r według zależności:

$$E = \frac{U}{d} = \frac{E_0}{\varepsilon_r} = \frac{q}{\varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot S} \tag{4}$$

stąd ładunek:

$$q = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot S \cdot E \tag{5}$$

Podstawiając do wzoru 1 wartość ładunku q, otrzymujemy pojemność $\bar{C}$:

$$\bar{C} = \frac{\varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot S \cdot E}{U} = \frac{\varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot S \cdot E}{E \cdot d} = \frac{\varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d} \tag{6}$$

gdzie:

$\bar{C}$ – pojemność dielektryka z kondensatorem.

Analogicznie dla kondensatora, bez dielektryka między okładkami, jego pojemność opisuje wzór:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot S \cdot E_0}{U_0} = \frac{\varepsilon_0 \cdot S \cdot E_0}{E_0 \cdot d} = \frac{\varepsilon_0 \cdot S}{d} \tag{7}$$

Porównanie pojemności $\bar{C}$ do pojemności C kondensatora określa wartość względnej przenikalności elektrycznej dielektryka ε_r.

2. Polaryzacje dielektryków

Proces polaryzacji elektrycznej w dielektryku polega na niewielkim wzajemnym przesunięciu względem siebie ładunków dodatnich i ujemnych. Rozsunięcie to wytwarza, co opisano wyżej, ładunki powierzchniowe w płytach dielektryka. Ładunki te z kolei wytwarzają pole o natężeniu $\vec{E}_0$, które jest skierowane przeciwnie do kierunku przyłożonego pola $\vec{E}_0$ (rys. 2). Wypadkowa natężenia pola $\vec{E}$ wewnątrz dielektryka, tzn. suma wektorów $\vec{E}_0$ i $\vec{E}$, ma ten sam kierunek jak wektor $\vec{E}_0$, lecz mniejszą wartość.

W zależności od mechanizmów polaryzacji i właściwości polaryzowanych cząstek można wyróżnić cztery podstawowe jej rodzaje [1]:

- polaryzację elektronową, która jest rezultatem przesunięcia się pod wpływem pola elektrycznego ujemnie naładowanych chmur elektronowych względem dodatnich jąder. Występuje we wszystkich materiałach. Jest to proces bardzo

szybki, dlatego gdy badania przeprowadza się z użyciem zmiennego pola elektrycznego, efekty związane z polaryzacją elektronową obserwowane są w zakresie częstotliwości odpowiadających ultrafioletowi, co odpowiada czasowi reakcji zawierającemu się w przedziale od 10^{-15} do 10^{-13} s,

- polaryzację jonową, która zachodzi tylko w materiałach o wiązaniach jonowych. Jest rezultatem przesunięcia się jonów w sieci krystalicznej materiału. To najwolniejszy ze wszystkich procesów polaryzacyjnych, gdyż wymaga ruchu wielu atomów związanych w sieci krystalicznej – zjawisko zachodzi w czasie od 10^{-13} do 10^{-12}s,
- polaryzację dipolową, która polega na orientacji osi dipoli zgodnie z przebiegiem linii przyłożonego pola elektrycznego $\vec{E}_0$. Zmniejsza się ona wraz ze wzrostem temperatury dielektryka (zwiększeniem energii kinetycznej dipoli). Charakterystyczne jest, że polaryzacja dipolowa zwiększa się wraz ze wzrostem natężenia pola elektrycznego i zachodzi w szerokim przedziale czasowym od 10^{-10} do 10^{-2} s,
- polaryzację makroskopową, która polega na przemieszczaniu się objętości dielektryka pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego elektronów i jonów, zamykania ich w pułapkach objętościowych. Polaryzacja ta zachodzi w przedziale czasowym od 10^{-2}s do 3 lat.

Przenikalność elektryczna jest silnie uwarunkowana częstotliwością zewnętrznego pola elektrycznego oddziałującego na ośrodek porowaty, co, jak wiadomo, wynika z różnego przebiegu poszczególnych rodzajów polaryzacji i ich dominacji w różnych zakresach częstotliwości fal elektromagnetycznych [4].

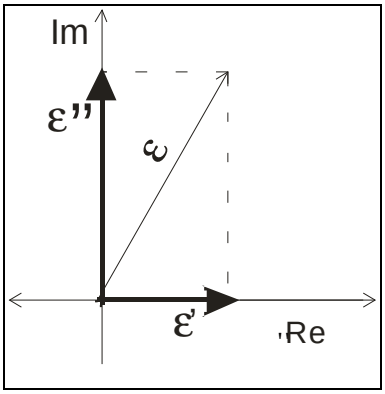
W polach harmonicznie zmiennych można przenikalność elektryczną zapisać w postaci zespolonej [3]:

$$\varepsilon = \varepsilon' - i\,\varepsilon'' \tag{8}$$

gdzie:

ε', ε''– odpowiednio: rzeczywista i urojona przenikalność elektryczna.

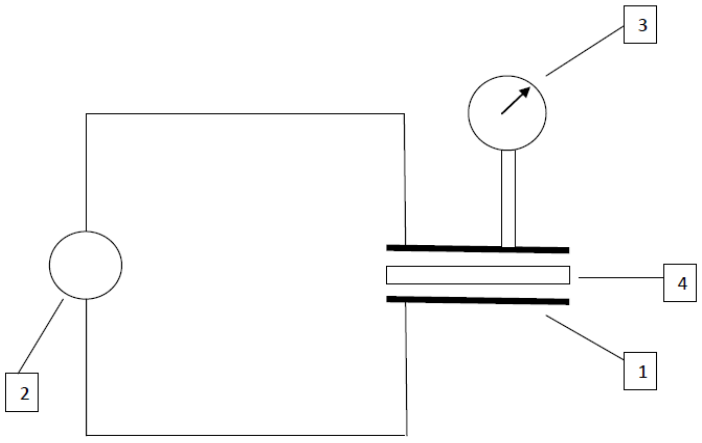
Składowa ε' to miara polaryzowalności dielektryka, ε'' to straty energii w przemiennym polu elektrycznym (rys. 2).



Rysunek 2. Składowe przenikalności elektrycznej dielektryka [3]

3. Opis urządzenia i jego kalibracja

Elektrody kondensatora do pomiaru przenikalności elektrycznej ośrodków porowatych wykonano z dwóch miedzianych okładek o średnicy 66,1 mm. Dolna okładka kondensatora (elektroda) zamontowana została na stałe do obudowy z tworzywa sztucznego. Druga, ruchoma, do gwintowanego pierścienia stalowego. W celu zredukowania pojemności montażowej górną okładkę połączono klejem z pierścieniem stalowym nieprzewodzącym prądu elektrycznego. Gwintowany pierścień i gwint w obudowie z tworzywa sztucznego pozwala regulować płynnie odległość między elektrodami kondensatora. Odległość mierzona jest zamontowanym na obudowie zegarowym czujnikiem liniowego pomiaru odległości. Tak skonstruowane urządzenie pozwala w badaniach eksperymentalnych ustawiać odległość między elektrodami w zakresie od 0 do 12,0 mm z dokładnością do 0,01 mm. Na rysunku 3 przedstawiono schemat kondensatora do pomiaru pojemności z dielektrykiem w postaci materiałów porowatych. Kalibrację urządzenia wykonano na podstawie porównania względnej przenikalności elektrycznej tego samego materiału (guma) oznaczonej kondensatorem o uznanej wiarygodności pomiarowej (badanie wykonano na Wydziale Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej Politechniki Gdańskiej). Porównując wyniki wartości przenikalności elektrycznej gumy z pomierzonymi wartościami ε, zastosowano współczynnik korekcyjny $\gamma_{cor} = 1{,}08$.



1- Okładki kondensatora płaskiego.
2- Miernik pomiaru pojemności kondensatorów.
3- Czujnik zegarowy do pomiaru wysokości próby z dokładnością do 0,01mm.
4- Próbka, d_{max} = 12,00mm

Rysunek 3. Schemat kondensatora do pomiaru pojemności z dielektrykiem w postaci materiałów porowatych

4. Przenikalność elektryczna skał i gruntów

Przenikalność elektryczną skały dwufazowej (porowatej), tj. skała–powietrze lub skała–woda, można oszacować, stosując proponowane przez różnych badaczy wzory, np.:

- wzór Lichtenkera [1, 5]:

$$\log \varepsilon = V_1 \cdot \log \varepsilon_1 + V_2 \cdot \log \varepsilon_2 \tag{9}$$

- wzór Lorentza-Lorenza [1, 5]:

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} = \frac{\varepsilon_1 - 1}{\varepsilon_2 + 2} \cdot V_1 + \frac{\varepsilon_1 - 1}{\varepsilon_2 + 2} \cdot V_2 \tag{10}$$

- propozycję Olchawa i Kumor [6]:

$$\sqrt{\varepsilon} \cdot V = \sqrt{\varepsilon_1} \cdot V_1 + \sqrt{\varepsilon_2} \cdot V_2 \tag{11}$$

gdzie:

ε, ε_1, ε_2 – przenikalność elektryczna, odpowiednio, mieszaniny i poszczególnych faz,
V_1, V_2 – objętości faz wyrażone w częściach jedności.

W celu oceny przydatności wymienionych wzorów z literatury przedmiotu (wzory 9-11) [1, 5, 6] do eksperymentalnych badań przenikalności elektrycznej ośrodków porowatych przeprowadzono badania pojemności kondensatora z próbką piasku kwarcowego. Porównując ich wyniki z pojemnością kondensatora bez piasku, obliczono względną przenikalność elektryczną układu dwufazowego piasek kwarcowy–powietrze. Do obliczeń względnej przenikalności elektrycznej skały przyjęto dwie wartości stałej dielektrycznej dla kwarcu ε_1 = 4,2 lub ε_2 = 5 [1]. Objętość poszczególnych faz obliczono na podstawie zmierzonej masy piasku kwarcowego wysuszonego w temperaturze 105°C i przyjętej gęstości ρ_s = 2,65 · $\cdot\ 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$. Liczba wykonanych pomiarów wynosiła 10.

5. Wyniki badań

W tabeli 1 przedstawiono wyniki względnej przenikalności elektrycznej obliczonej na podstawie pomierzonych wartości $\bar{C}$.

Tabela 1. Wartości przenikalności elektrycznej obliczone na podstawie pomierzonej wartości $\bar{C}$

Numer pomiaru	$\varepsilon = \frac{\bar{C}}{C}$	**Wartość średnia ,** $\bar{\varepsilon}$	**Statystyka** $(\hat{S})^2 = \sum (\varepsilon_i - \bar{\varepsilon}) \cdot (n-1)^{-1}$
1	3,37	3,15	0,0089
2	3,21		
3	3,12		
4	3,19		
5	3,00		
6	2,90		
7	3,29		
8	3,19		
9	3,15		
10	3,13		

Minimalną liczebność próby potrzebną do uzyskania założonej dokładności przedziałowej estymacji średniej określono według tzw. dwustopniowej metody Steina [7]. Liczebność właściwej próby określono na podstawie wzoru:

$$n = \frac{t^2_{\alpha:(n-1)}}{d^2} \cdot (s)^2 \tag{12}$$

gdzie:

$t^2_{\alpha:(n-1)}$ – jest wartością z tablic rozkładu Studenta dla $n_0 - 1$ stopni swobody, dla $\alpha = 0{,}05$ i $n_0 - 1 = 9$ przyjęto 2,262,

d – maksymalny, dopuszczalny błąd szacunku (tutaj ε).

Obliczona wartość statystyki $(\hat{S})^2$ (założona wartość dopuszczalnego błędu $d = 0{,}1$) daje liczebność właściwą próby $n = 4{,}55 < n_0 = 10$. Oznacza to, że próba $n_0 = 10$ jest wystarczająca do uzyskania maksymalnego błędu szacunku nie większego od $\varepsilon = 0{,}1$.

W tabeli 2 przedstawiono średnie arytmetyczne zmierzonych i obliczonych wartości przenikalności elektrycznej ε skały dwufazowej piasek kwarcowy–powietrze.

Tabela 2. Wartości przenikalności elektrycznej ε skały dwufazowej piasek kwarcowy–powietrze

Wzór	**Obliczona wartość ε na podstawie przyjętych wartości ε_1 lub ε_2 i wzorów (9-11)**		**Pomierzona wartość ε**
	ε_1	ε_2	
Lichtenker	2,51	2,81	3,15
Lorentz-Lorenz	2,48	2,74	
Olchawa-Kumor	2,80	3,11	

Porównując obliczone względne wartości przenikalności elektrycznej skały dwufazowej z wartościami pomierzonymi, widać, że najbliższa pomierzonej jest

wartość obliczona na podstawie wzoru 11 i przyjętej do obliczeń wartości względnej przenikalności elektrycznej kwarcu $\varepsilon = 5{,}0$.

Mniejsza wartość pomierzona od wartości obliczonej może również wynikać z obecności wody sorbowanej z fazy gazowej podczas czynności pomiarowych, powierzchnia ciał stałych (w tym materiałów mineralnych) jest bowiem w stanie pewnych napięć, a w szczególności powierzchniowego napięcia elektrycznego. Zgodnie z podstawowymi prawami termodynamiki na powierzchni materiałów mineralnych zachodzą procesy zmniejszające napięcia oraz procesy prowadzące do wysycenia powierzchni cząstkami bądź molekułami znajdującymi się w pobliżu granicy faz [8, 9]. Względna przenikalność elektryczna wody sorbowanej wynosi ok. 3 [10], a to zmniejsza przenikalność elektryczną skały dwufazowej. Autorzy uważają, że wpływ ten może być pomijalnie mały.

Na podstawie badań przeprowadzonych za pomocą skonstruowanego i opisanego urządzenia można uznać, że wyniki pomierzonych przenikalności elektrycznych układu skała porowata–powietrze są porównywalne z wynikami obliczonymi na podstawie uznanych wzorów.

6. Wnioski

Na podstawie przedstawionych wyników badań można sformułować następujące wnioski:

1. Konstrukcja urządzenia do pomiaru pojemności z dielektrykiem pozwala na wiarygodny pomiar przenikalności elektrycznej skał porowatych.
2. Wyniki pomierzonych wartości przenikalności elektrycznej skały wskazują na dużą zgodność z wartościami obliczonymi na podstawie uznanych wzorów.
3. Na wartość pomierzonej przenikalności elektrycznej może mieć wpływ obecność wody sorbowanej przez skałę z fazy gazowej. Wpływ ten musiałby być zbadany na postawie pomiarów przenikalności elektrycznej tych skał, które charakteryzują się dużą zewnętrzną powierzchnią właściwą i dużym elektrostatycznym ładunkiem powierzchniowym.

Literatura

1. Drożdżak R., Twardowski K., *Przenikalność dielektryczna ośrodków porowatych – czynniki wpływają cena jej zmienność*, „Wiertnictwo, Nafta, Gaz" 2010, t. 27, z. 1-2.
2. Halliday D., Resnick R., Walker J., *Podstawy fizyki. Tom 3*, Wydawnictwo PWN, Warszawa 2015.
3. Chełkowski A., *Fizyka dielektryków*, Wydawnictwo PWN, Warszawa 1979.

4. Cihlar J., Ulaby F.T., *Dielectric properties of soils as a function of moisture content*, „RSL Technical Report" 1974, vol. 177. no. 47 (NASA-CR-141868).
5. Plewa M., Plewa S., *Petrofizyka*, Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa 1992.
6. Olchawa A., Kumor M.K., *Oznaczenie zawartości oleju napędowego w zanieczyszczonym podłożu na podstawie pomiaru przenikalności dielektrycznej gruntu metodą reflektometryczną (TDR)*, [w:] *Problemy geotechniczne i środowiskowe z uwzględnieniem podłoży ekspansywnych* (Rozdział III: *Geoinżynieria środowiska*), pod red. E. Dembickiego, M.K. Kumora, Z. Lechowicza, Wydawnictwo Uczelniane UTP, Bydgoszcz 2009.
7. Aczel A.D., *Statystyka w zarządzaniu*, PWN, Warszawa 2000.
8. Dutkiewicz E.T., *Fizykochemia powierzchni*, WNT, Warszawa 1998.
9. Kamieński B., *Zjawiska powierzchniowe*, [w:] *Chemia fizyczna*, pod red. K. Pigonia, Z. Ruziewicza, PWN, Warszawa 1980.
10. Skierucha W., *Wpływ temperatury na pomiar wilgotności gleby metodą reflektometryczną*, „Acta Agrophysica" 2005, vol. 122.

EVALUATE OPERATION OF THE PARALLEL PLATE CAPACITOR FOR MEASURING ELECTRIC PERMITIVITTY OF A POROUS MEDIUM SILICA SAND–AIR

Abstract: *This paper presents an analysis of the results of measurements of electric permittivity of a two phase system silica sand–air. The measurements were made by parallel plate capacitor. The results indicate a high agreement between the values measured by the capacitor and the ones calculated with canonical formulas. It should be considered that the capacitor generates reliable results.*

Tadeusz Marcinkowski
Marek Kierończyk

OGRANICZANIE EMISJI AMONIAKU Z WYBRANYCH MINERALNYCH NAWOZÓW AZOTOWYCH Z WYKORZYSTANIEM INHIBITORA UREAZY NBPT

Ocena skuteczności inhibitora NBPT (triamid kwasu N-(n-butylo)tiofosforowego) w ograniczaniu emisji amoniaku z mocznika i roztworów saletrzano-mocznikowych (RSM), stosowanych do nawożenia roślin uprawnych, była głównym celem badań przeprowadzonych w roku 2013 w dwóch wybranych gospodarstwach rolnych. W warunkach doświadczenia polowego wykazano, że po zastosowaniu mocznika pod drugi pokos traw w dawce 60 kg N·ha^{-1} emisja amoniaku w ciągu 5 dni wynosiła 5,44 kg N·ha^{-1}, zaś po zastosowaniu mocznika stabilizowanego NBPT w podobnej dawce – tylko 2,08 kg N·ha^{-1}. W podobnych warunkach określano polową emisję amoniaku z RSM stosowanych wczesną wiosną w dawce 120 kg N·ha^{-1} do nawożenia rzepaku ozimego. Łączna emisja gazu po upływie 5. doby po zastosowaniu RSM bez inhibitora wynosiła 3,28 kg N·ha^{-1}, zaś po zastosowaniu RSM z dodatkiem inhibitora NBPT – tylko 0,95 kg N·ha^{-1}.

Wprowadzenie

Szacowana emisja amoniaku w Polsce w roku 2015 wynosiła ok. 267 Gg [1]. Głównym źródłem tej emisji jest rolnictwo – 259 Gg, zaś w niewielkim tylko stopniu przemysł i transport drogowy – 8 Gg. W sektorze rolniczym podstawowymi źródłami emisji NH_3 była gospodarka odchodami zwierzęcymi – 217 Gg, oraz uprawy z zastosowaniem nawozów – 43 Gg. Wynika z tego, że co najmniej 20% ulatniającego się amoniaku pochodzi z syntetycznych nawozów azotowych, stosowanych do nawożenia roślin uprawnych. Potencjalnie duże możliwości uwalniania się amoniaku występują w nawozach zawierających azot w postaci amonowej bądź amidowej i są to głównie saletra amonowa, mocznik, roztwory saletrzano-mocznikowe (RSM), w nieco mniejszym stopniu siarczan amonowy i nawozy wieloskładnikowe. Emisja amoniaku pogarsza jakość powietrza, którym oddychamy, i powoduje określone problemy ekotoksykologiczne, takie jak: zakwaszanie i eutrofizacja ekosystemów naturalnych, wzrost poziomu zanieczyszczeń atmosferycznych, w tym zawartości materii zawieszonej, a zwłaszcza cząstek stałych – PM_{10} i $PM_{2,5}$. Ulatniający się amoniak to również problem ekonomiczny, ponieważ część azotu z zakupionych nawozów ulatnia się do atmosfery i nie uczestniczy w procesie produkcyjnym, a zatem obniża efektywność ekonomiczną gospodarstwa rolnego. W warunkach krajowych skala tego zjawiska

jest nadal niedostatecznie rozpoznana, a w wielu przypadkach wręcz pomijana. Współczynnik emisji 0,074 kg $NH_3 \cdot kg\ N^{-1}$ z nawozów, przyjmowany przez Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami (KOBiZE) w szacowaniu emisji amoniaku z nawozów mineralnych, został opracowany na podstawie danych z końca lat 90. minionego stulecia, głównie w oparciu o masę i asortyment produkowanych wówczas nawozów [2, 3]. Należy dodać, że w znacznym stopniu ma on charakter domyślny [4] i w Polsce nie był weryfikowany i potwierdzony odpowiednimi badaniami ilościowymi. W tym kontekście na szczególną uwagę zasługują innowacyjne technologie nawożenia roślin, które wydatnie redukują emisję amoniaku z powszechnie stosowanych nawozów azotowych, takich jak mocznik i RSM. Ze względu na występowanie w nich azotu w formie amidowej ($-NH_2$) są one szczególnie podatne na enzymatyczną hydrolizę (rozkład) z udziałem ureazy, która powszechnie występuje w środowisku glebowo-wodnym, czemu towarzyszy uwalnianie się znacznych ilości amoniaku. Proces ten jednak można wydatnie ograniczyć, stosując łącznie z nawozami substancje hamujące aktywność enzymatyczną urazy, zwane inhibitorami. Wśród nich praktyczne zastosowanie, zwłaszcza w Ameryce Północnej i Europie, znalazł triamid kwasu *N*-(n-butylo) tiofosforowego (NBPT), który m.in. pod nazwą handlową Agrotain® jest zarejestrowany w wielu krajach, w tym na obszarze Unii Europejskiej (UE).

Ocena skuteczności inhibitora NBPT w ograniczaniu emisji amoniaku z mocznika i RSM, stosowanych do nawożenia użytków zielonych i roślin uprawnych, była głównym celem dwóch doświadczeń polowych przeprowadzonych w roku 2013 w Żuławskim Ośrodku Badawczym Instytutu Technologiczno-Przyrodniczego w Falentach we współpracy z firmą Keytrade Polska Sp. z o.o.

1. Materiał i metody badań

Pomiary wykonywano w warunkach produkcyjnych dwóch gospodarstw rolnych, z których jedno, położone na terenie Żuław Elbląskich, zajmuje się towarową produkcją mleka, zaś drugie, położone na terenie Wielkopolski, wyłącznie towarową produkcją roślinną, głównie zbóż i rzepaku. W pierwszym gospodarstwie, umownie oznaczonym jako A (tab. 1), latem 2013 roku badano emisję amoniaku z mocznika stabilizowanego inhibitorem ureazy NBPT i z mocznika bez inhibitora, które stosowano w gospodarstwie do nawożenia łąk trwałych. Doświadczenie przeprowadzono na łące położonej na madzie średniej, gdzie na dwa wyznaczone poletka o powierzchni 100 m^2 zastosowano pod drugi odrost traw nawożenie azotem w dawce 60 kg $N \cdot ha^{-1}$. Na pierwszym poletku zastosowano mocznik stabilizowany inhibitorem ureazy NBPT, zaś na drugim mocznik bez inhibitora. Emisję amoniaku z zastosowanych nawozów monitorowano przez okres 5 dni od ich aplikacji. Doświadczalne pomiary emisji amoniaku z RSM wykonano na przełomie lutego i marca 2013 roku także w gospodarstwie oznaczonym umownie jako B.

Tabela 1. Ogólna charakterystyka warunków glebowo-klimatycznych podczas wykonywania doświadczeń polowych (opracowanie własne)

Kod gospodarstwa, rodzaj nawozu i miejsce jego zastosowania		Rodzaj gleby	pH gleby	Dawka azotu [kg N·ha^{-1}]	Maksymalna temperatura powietrza [^{o}C]	Prędkość wiatru [m·s^{-1}]	Uwagi
A	Mocznik łąka trwała	Mada średnia	5,01	60	26-32	0,2-5,0	Niewielki opad deszczu w 5. dobie doświadczenia
	Mocznik + NBPT łąka trwała	jw.	5,01	60	26-31	0,2-5,0	
B	RSM21 rzepak ozimy	Brunatna właściwa	6,33	120	-3,0-1,0	0,2-5,6	Niewielki opad śniegu w 2. dobie doświadczenia
	RSM21+NBPT rzepak ozimy	jw.	6,30	120	-3,0-1,0	0,2-5,6	



Fotografia 1. Opryskiwacz polowy wykorzystany do aplikacji roztworów RSM (fot. T. Marcinkowski)

Na polu z uprawą rzepaku ozimego wyznaczono również dwa poletka doświadczalne, każde o powierzchni ok. 500 m^2 (większa powierzchnia poletka spowodowana była wykorzystaniem do aplikacji sprzętu mechanicznego) i na pierwszym z nich zastosowano nawożenie RSM-21 zawierającym inhibitor urazy NBPT o stężeniu 0,5% wag., zaś na drugim RSM-21 bez inhibitora. W obu przypadkach dawka zastosowanego azotu ogółem wynosiła 120 kg N·ha^{-1}, zaś do aplikacji nawozów wykorzystano opryskiwacz polowy (fot. 1), przystosowany do oprysku grubokroplistego. Podobnie jak w wariancie A emisję amoniaku monitorowano przez okres 5 dni od zastosowania nawozów. Masę ulatniającego się amoniaku z badanych nawozów mineralnych szacowano techniką mikrometeorologicznej dozymetrii pasywnej, którą szczegółowo opisano we wcześniejszych publikacjach

autorów [5-7]. Pomiary prowadzono w czasie 24-godzinnej ekspozycji 32 rurkowych dozymetrów pasywnych [8], wewnątrz powleczonych warstwą sorbentu w postaci kwasu szczawiowego, które umieszczano na masztach pomiarowych (fot. 2) ustawianych wokół poletka doświadczalnego. Gęstość pionowego strumienia amoniaku mierzono w czterech różnych przedziałach wysokości, licząc od powierzchni źródła emisji, maksymalnie do wysokości 2,0-3,0 m. Zebrany amoniak w postaci szczawianu amonu ekstrahowano z dozymetrów wodą dejonizowaną i oznaczano kolorymetrycznie przy pomocy autoanalizera przepływowego marki FIA Compact. Podczas trwania doświadczeń polowych pobierano z poletek próbki gleby z warstwy 0-10 cm w celu oznaczenia w nich pH (w 1 M KCl) oraz monitorowano panujące warunki meteorologiczne, w tym temperaturę i wilgotność powietrza, opady atmosferyczne oraz prędkość wiatru.



Fotografia 2. Rozmieszczenie masztów pomiarowych na poletku doświadczalnym (fot. T. Marcinkowski)

2. Wyniki badań i dyskusja

Uzyskane wyniki polowych pomiarów emisji amoniaku (tab. 2) wskazują, że gazowe straty tej formy azotu z badanych nawozów mineralnych mogą być bardzo zróżnicowane. W warunkach przeprowadzonego doświadczenia polowego oraz w zależności od rodzaju i dawki zastosowanego nawozu wynosiły one w ciągu pierwszych 5 dniu od jego zastosowania od 0,95 do 5,44 kg $N \cdot ha^{-1}$. Największą

emisję amoniaku odnotowano na poletkach doświadczalnych gospodarstwa A, gdzie przy dawce czystego składnika w ilości 60 kg N·ha^{-1} straty azotu w formie amoniaku wynosiły z mocznika 5,44 kg N·ha^{-1}, zaś z mocznika stabilizowanego NBPT 2,08 kg N·ha^{-1}. Prawdopodobnie mniejsze straty azotu z tej formy mocznika były wynikiem hamowania procesu jego hydrolizy do amoniaku przez inhibitor. Nie zmienia to jednak faktu, że w pierwszym przypadku ok. 9%, a w drugim ponad 3% azotu ulotniło się do atmosfery już po upływie 5. doby po ich zastosowaniu. Wprawdzie dodatek inhibitora powodował redukcję emisji amoniaku o 62% (tab. 3) w stosunku do mocznika bez inhibitora, jednak straty produkcyjne i środowiskowe, zwłaszcza w pierwszym przypadku, były bardzo wyraźne. Należy dodać, że w okresie prowadzenia doświadczenia w gospodarstwie A panowały dość ekstremalne warunki klimatyczne (tab. 1). Temperatura powietrza okresowo przekraczała 30°C, a niewielki opad atmosferyczny (ok. 2 mm) miał miejsce w 5. dobie doświadczenia. Mogło to dodatkowo zwiększać ulatnianie się amoniaku. Thompson i wsp. [9] oraz Sommer i wsp. [10] twierdzą, że realny wpływ na wielkość emisji amoniaku z nawozów mogą mieć temperatura i szybkość wiatru, zwłaszcza przy „powierzchniowym" sposobie nawożenia. Zdaniem cytowanych autorów na użytkach zielonych z racji ich specyfiki fitosocjologicznej, która w pewnym stopniu ogranicza szybki kontakt nawozu z glebą, proces ulatniania się amoniaku może być dynamiczny, zwłaszcza w ciągu kilku pierwszych dni od jego zastosowania.

Tabela 2. Emisja amoniaku z badanych nawozów azotowych w ciągu pierwszych 5 dni od ich zastosowania (opracowanie własne)

Kod gospodarstwa i rodzaj zastosowanego nawozu		Dawka azotu [kg N·ha^{-1}]	Emisja amoniaku w kolejnych 5 dobach po zastosowaniu nawozu [kg N·ha^{-1}]						Straty azotu (%)
			1	2	3	4	5	Razem	
A	Mocznik	60	1,02	2,70	0,84	0,88	1,83	5,44	9,06
	Mocznik + NBPT	60	0,18	1,60	0,10	0,10	0,10	2,08	3,46
B	RSM21	120	1,76	1,00	0,50	0,02	0,00	3,28	2,83
	RSM21 + NBPT	120	0,91	0,04	0,00	0,00	0,00	0,95	0,79

Tabela 3. Doświadczalnie wyznaczona efektywność NBPT w redukcji emisji amoniaku (opracowanie własne)

Kod gospodarstwa	Porównywane nawozy	% redukcji
A	Mocznik+NBP Mocznik	62
B	RSM21+NBP RSM21	71

W gospodarstwie B porównywano emisję amoniaku z RSM zawierającego inhibitor NBPT i roztworu RSM bez inhibitora, zastosowanych w dawce 120 kg N·ha^{-1} na plantację rzepaku ozimego w okresie przedwegetacyjnym, tj. na przełomie lutego i marca 2013 roku. Po upływie 5. doby od aplikacji nawozów (tab. 2) łączna emisja amoniaku z RSM z inhibitorem wynosiła 0,95, zaś z RSM

bez inhibitora 3,28 kg $N \cdot ha^{-1}$. Podczas trwania doświadczenia maksymalna temperatura powietrza wynosiła ok. 1,0°C, a w 2. dobie obserwacji wystąpiły niewielkie opady śniegu z deszczem. Ostatecznie gazowe straty azotu w pierwszym przypadku oszacowano poniżej 1%, zaś w drugim na poziomie 2,83%. Jednak o stosunkowo niskiej emisji amoniaku w tym przypadku zdecydowały prawdopodobnie panujące podczas doświadczenia warunki meteorologiczne, a zwłaszcza niska temperatura powietrza (od -3 do -1°C) oraz pojawienie się opadów deszczu ze śniegiem już w 2. dobie po aplikacji nawozów. Dla porównania w analogicznym doświadczeniu [11], przeprowadzonym przez autorów, również na plantacji rzepaku w lutym 2012 roku, oszacowana emisja była ponad dwukrotnie wyższa i w wariancie bez inhibitora wynosiła ok. 8 kg $N \cdot ha^{-1}$, zaś w wariancie z inhibitorem 3,7 kg $N \cdot ha^{-1}$. W tym przypadku temperatura powietrza podczas pomiarów była znacznie wyższa i wynosiła od 0 do 9,5°C. Niemniej jednak w trudnych warunkach meteorologicznych panujących podczas prowadzenia pomiarów w gospodarstwie B wykazana doświadczalnie efektywność inhibitora ureazy w ograniczaniu emisji amoniaku z zastosowanych ciekłych nawozów azotowych była również wysoka i wynosiła 71% (tab. 3). Należy dodać, że w obu gospodarstwach wyznaczone do badań poletka doświadczalne położone były na glebach kwaśnych (gospodarstwo A) i lekko kwaśnych (gospodarstwo B), co raczej sprzyjało ograniczaniu emisji z badanych nawozów mineralnych.

Podsumowanie

Emisja amoniaku z rolnictwa jest istotnym problemem ekologicznym i ekonomicznym, a jej udział w zanieczyszczaniu atmosfery i ekosystemów naturalnych jest niepodważalny. Obecnie obowiązujące postanowienia Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady UE 2016/2284 w sprawie redukcji emisji niektórych rodzajów zanieczyszczeń atmosferycznych [12] zobowiązują poszczególne kraje członkowskie do ograniczenia emisji amoniaku w latach 2020-2030 o 1% rocznie w stosunku do roku 2005 i o 17% w każdym kolejnym roku, licząc od roku 2030. Dla wielu krajów, zwłaszcza z dużym udziałem sektora rolniczego w gospodarce narodowej, będzie to nie lada wyzwanie. Możliwości ograniczania emisji amoniaku na różnych etapach produkcji rolniczej są jednak bardzo duże i należy ich poszukiwać m.in. poprzez wprowadzanie i rozpowszechnianie tzw. niskoemisyjnych technologii gospodarowania azotem i to nie tylko w sektorze produkcji roślinnej, ale również w szeroko rozumianej produkcji zwierzęcej. Biorąc pod uwagę ograniczanie emisji amoniaku z mineralnych nawozów azotowych, a zwłaszcza amidowych (mocznik i RSM), ich stosowanie będzie możliwe jedynie wtedy, gdy emisja tego gazu podczas ich aplikacji zostanie ograniczona co najmniej o 30%. Uda się to osiągnąć, jeśli technologie nawożenia upraw rolniczych będą zgodne z zaleceniami Kodeksu Dobrych Praktyk Rolni-

czych, a w przypadku pogłównego stosowania mocznika i RSM (tam, gdzie nie ma możliwości wymieszania go z glebą) wymagane będzie obowiązkowe stosowanie inhibitora ureazy do ich stabilizacji. Jak wynika z przedstawionych powyżej wyników badań, istotnie ogranicza on emisję amoniaku z tych nawozów, co niewątpliwie poprawia efektywność wykorzystania azotu w mineralnym żywieniu roślin uprawnych.

Literatura

1. GUS, *Ochrona środowiska*, Warszawa 2017.
2. Grześkowiak A., *Kierunki zmian w asortymencie nawozów mineralnych*, Zakłady Chemiczne Police S.A., Police 2001.
3. Pietrzak S., *Metoda inwentaryzacji amoniaku ze źródeł rolniczych w Polsce i praktyczne jej zastosowanie*, „Woda – Środowisko – Obszary Wiejskie" 2006, t. 6, z. 1, s. 319-334.
4. Poland's Informative Inventory Report 2016, *Submission under UN ECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution*, IOŚ-PIB, Warsaw 2016.
5. Ferm M., Marcinkowski T., Kieronczyk M., Pietrzak S., *Measurements of ammonia emissions from manure storing and spreading stages in Polish commercial farms*, „Atmospheric Environment" 2005, vol. 36, s. 7106-7113.
6. Marcinkowski T., *Emisja gazowych związków azotu z rolnictwa*, „Woda – Środowisko – Obszary Wiejskie" 2009, t. 10, z. 3, s. 175-189.
7. Marcinkowski T., Kierończyk M., Martyna A., *Szacowanie emisji amoniaku z mineralnych nawozów azotowych w świetle wyników doświadczenia polowego*, „Rozprawy Naukowe i Zawodowe PWSZ w Elblągu" 2012, z. 15, s. 33-40.
8. Kierończyk M., Marcinkowski T., *Pomiar emisji amoniaku ze źródeł rolniczych metodą mikrometeorologicznej dozymetrii pasywnej*, „Woda – Środowisko – Obszary Wiejskie" 2004, t. 4, z. 2a, s. 537-546.
9. Thompson R.B., Pain B.F., Rees Y.J., *Ammonia volatilization from cattle slurry following surface application or injection to grassland*, „Plant and Soil" 1990, vol. 125, no. 1, s. 109-117.
10. Sommer S.G., Hutchings N.J., *Ammonia emission from field applied manure and its reduction-inviter paper*, „European Journal of Agronomy" 2001, vol. 15, s. 1-15.
11. Marcinkowski T., Wardencki W., *Estimation of the effectiveness of NBPT for limiting ammonia emission from urea based on the field experiments*, „Ecological Chemistry and Enginering S" 2014, vol. 21, s. 147-153.
12. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/2284 z dnia 14 grudnia 2016 r. w sprawie redukcji krajowych emisji niektórych rodzajów zanieczyszczeń atmosferycznych, zmiany dyrektywy 2003/35/WE oraz uchylenia dyrektywy 2001/81/WE.

DECREASING AMMONIA EMISSION FROM SELECTED NITROGEN MINERAL FERTILIZERS BY USING UREA INHIBITOR NBPT

Abstract: *Estimation of effectiveness using urease inhibitor (NBPT) in decreasing ammonia emission from urea and solution ammonium sulfate and urea used for fertilization of crops was the objective of carried out research in 2013 in selected farms. In experimental conditions was demonstrated that after application urea for second cut of grass in dose 60 kg N·ha^{-1} ammonia emission during 5 days was at the level 5.44 kg N·ha^{-1}, but after application the same dose of fertilizer stabilized by urea inhibitor (NBPT) emission not exceeded 2.08 kg N·ha^{-1}. In similar condition was specified field ammonia emission from ammonium sulfate-urea solutions used in earlier spring in the dose 120 kg N·ha^{-1} or fertilization winter rape. Cumulated emission of this gas 5 days after application ammonium sulfate-urea solutions without inhibitor was 3.28 kg N·ha^{-1}, but applied with NBPT at the level 0.95 kg N·ha^{-1}.*

Maciej Czyżak
Robert Smyk

ON THE MODULO REDUCTION BY THE MONTGOMERY METHOD

In this paper we consider the modulo reduction problem in the residue number system and modulo reduction of large numbers encountered in the RSA and elliptic curves cryptography. We present detailed derivation of the Montgomery method and we also give numerical examples of reduction of small numbers and the reduction for ranges useful for elliptic curves cryptography.

Introduction

Modulo reduction $r = |X|_N$ is one of the basic operations when using the residue number system (RNS) [1] or in cryptography algorithms such as the RSA or elliptic curves cryptography (ECC). In the RNS the modulo reduction is needed at the input of the system where an integer number X is represented in the binary or two's complement system and we have to find a set of residues $x_i = |X|_{mi}$, $i = 1, 2,..., n$ with respect to the set of the members of the RNS base $B = \{m_1, m_2,..., m_n\}$ termed the moduli. Moreover, we have $N = \Pi_{i=1}^{n} m_i$. At the output of the RNS system we have to convert back the RNS representation into the weighted form. Usually for this conversion the Chinese Remainder Theorem (CRT) or mixed-radix conversion (MRC) [1, 2] are used. This reverse conversion process usually involves Y modulo N reduction [3], where Y is the the signal at the output of the RNS system. For example, in the DSP systems that use the RNS commonly $[\log_2 N] < 50$ bits and the binary representation of Y ($[\log_2 Y]$) is greater by 3 or 4 bits than N. The relatively small difference between the dynamic ranges of Y and N, and thus their binary representations, allows to perform the modulo reduction to $[0,2N]$ and subsequently the simple comparison with N permits the calculation modulo N.

The problem looks different with the RSA [4] and ECC [5]. For the former we may have to use numbers up to 2000 bits and for the ECC usually 160 bits are necessary. The basic operation in the cryptographic operations is exponentiation that is implemented as a series of multiplications of large numbers and next $|X^e|_N$ has to be calculated but in order to reduce the required number range we have to perform $(X \cdot X)_N$ after every multiplication step. For moduli with the specific form there exists method that simplifies the modulo reduction process. In an early work Avizenis [6] presented a modulo reduction $\left|X\right|_{2^a-1} = 1$ based on the segmentation of

the converted word into a-bit bytes due to $\left|2^{ta}\right|_{2^a-1}=1$. The obtained segments can be added and finally reduced modulo (2^a-1). Piestrak [3] generalized the segmentation concepts to moduli of other form that 2^a-1. His method is based on the cyclic property of the series $|2^j|_A$. This denotes that the series 2^j, 2^{j+1}, $2^{j+P(A)}$, $2^{j+2P(A)}$, ..., $2^{j+tP(A)}$ has the same residue mod A, where $P(A)$ is a period, so the segments of $P(A)$ bit lengths can be added without any conversion. Piestrak further generalized this approach by introducing the generalized period $Per(A)$ = min ($P(A)$, $HP(A)$) where $|2^{P(A)}|_A = 1$ and $|2^{HP(A)}|_A = A-1$. The use of the approach based on $Per(A)$ is effective when $Per(A)$ is much shorter than A. However, $HP(A)$ may not exist for certain moduli.

In the general case the calculation of $|X|_N$ would require the division of X by N, that is ineffective for large numbers. Montgomery [7] proposed the method of multiplication of two integers modulo N while avoiding division by N. The Montgomery method allows to replace the modulo N reduction by the simpler to implement reduction modulo R. The modulus R is chosen in such a manner that reduction modulo R is simple in the given calculation environment. For example, if we use the decimal system, R is chosen as a power of 10 greater and the closest to N. For computer calculations R is chosen as a power of 2.

In this work we analyze the Montgomery method and provide numerical examples that explain in detail operations needed to perform the reduction by this method. In Section 1 we review the foundations of the Montgomery method. In Section 2 we present numerical examples.

1. Review of Montgomery method

In the Montgomery method N-residue, $N > 1$ is defined as a residue class modulo N. Select the base R relatively prime with N (R is usually equal to the machine word or its power) such that $R > N$ and such so that computation of modulo R is simple to implement from the computational point of view. Let $R^{-1} = \left|\frac{1}{R}\right|_N$ and $N^{-1} = \left|\frac{1}{N}\right|_R$ be the multiplicative inverses of R modulo N and N modulo R, respectively. They have to be integers that fulfill the following conditions $0 < R^{-1} < N$ and $0 < N^{-1} < R$ and $RR^{-1} - NN^{-1} = 1$ that corresponds to $|RR^{-1}|_N = 1$ and $|-NN^{-1}|_R = 1$. Moreover for $0 \le i < N$ let i be the residue class containing $|iR^{-1}|_N$. The rationale behind this selection is the ability to easily compute $|TR^{-1}|_N$ from T if $0 \le T < RN$. The reduction $|TR^{-1}|_N$ can be represented using the following algorithm.

Algorithm 1 (Montgomery modulo reduction)

Step 1: $$m = \left| |T|_R \cdot \left|\frac{1}{N}\right|_T \right|_R \tag{1a}$$

Step 2: $t = (T + mN)/\mathrm{R}$ (1b)

Step 3: If $t \geq N$ then $t \leftarrow t - N$ (1c)

To prove the Algorithm 1 we have to show, that
1) t is an integer hence is divisible by R,
2) $t \in [0,2N)$.

Using the expression for m from (1a) after multiplication of both sides by N and regarding that $|NN^{-1}|_R = 1$ we receive

$$mN \equiv TNN^{-1} \equiv -|T|_R, \tag{2}$$

hence t is an integer number.

Now we would show, that in the Step 3 (1c) T is reduced to the interval $[0,2N)$. We have

$$0 \leq T + mN < RN + RN \tag{3}$$

This gives the following result after division of (3) by R as in Step 2 (1b)

$$0 \leq t < 2N \tag{4}$$

1.1. Multiplication and addition of *N*-residues

It can be proven that the multiplication of N-residues using REDC makes that the product remains in the Montgomery space. Given two numbers, being N-residues from the Montgomery space $[0, N-1]$ and let

$$Z_R = REDC\,(x_R, y_R) \tag{5}$$

where $x_R = |x \cdot R|_N$, $y_R = |y \cdot R|_N$ are factors transformed to the Montgomery space. We then have

$$z_R \equiv |x_R y_R R^{-1}|_N = |xRyRR^{-1}|_N = |xyR|_N = |Z_R|_N \tag{6}$$

Addition in the case of N-residues is analogous the casual addition due to

$$y_R R^{-1} + y_R R^{-1} = z_R R^{-1} \tag{7}$$

if and only if

$$x_R + y_R \equiv |z_R|_N \tag{8}$$

1.2. Computation of *N*-residues

Using REDC we may avoid modulo N operation by replacing it by the simpler modulo R operation. N-residue x_R is expressed as

$$x_R = |xR|_N \tag{9}$$

Once x_R is given $|x|_N$ can be obtained as follows

$$x = |x_R R^{-1}|_N \tag{10}$$

It can be proven that in order to avoid modulo N operation the direct computation modulo operation as in (9) can be replaced by computing x_R as

$$x_R = REDC(|x|_N |R^2|_N) \tag{11}$$

R^2 can be precomputed and the REDC allows to effectively obtain x_R without using modulo N operation.

Example 1. Numerical example for REDC using decimal numbers

We have to compute $m = \left| |T|_R \cdot \left| \frac{1}{N} \right|_R \right|_R$, $t = (t + mN)/R$ where N^{-1} is multiplicative inverse $N^{-1} = \left| \frac{1}{N} \right|_R$. Select $N = 97$, $R = 100$, $x = 43$, $y = 56$ and $P = |43 \cdot 56|_{97} = 80$.

The multiplicative inverses $\left| \frac{1}{R} \right|_N$ and $\left| \frac{1}{N} \right|_R$ fulfill

$$R \cdot \left| \frac{1}{R} \right|_N - N \cdot \left| \frac{1}{N} \right|_R = 1 \tag{12}$$

We have to solve two equations

$$\left| -N \cdot \left| \frac{1}{N} \right|_R \right|_R = 1 \tag{13}$$

and

$$\left| \mathrm{R} \cdot \left| \frac{1}{R} \right|_N \right|_N = 1 \tag{14}$$

For $N = 97$ we have

$$\left| -97 \cdot \left| \frac{1}{97} \right|_R \right|_R = 1$$

$$\left| (R-97) \cdot \left| \frac{1}{97} \right|_R \right|_R = 1$$

$$\left| 3 \cdot \left| \frac{1}{N} \right|_{100} \right|_{100} = 1$$

$$\text{hence } \left| \frac{1}{N} \right|_{100} = 67$$

Then solving $\left| R \cdot \left| \frac{1}{R} \right|_{97} \right|_{97} = 1$ we obtain $\left| 100 \cdot \left| \frac{1}{R} \right|_{97} \right|_{97} = 1$, then $\left| \frac{1}{R} \right|_{97} = 65$

We can perform the calculations in the REDC. Firstly we compute two *N*-residues

$$|x_R|_N = |43 \cdot 100|_{97} = 32$$
$$|y_R|_N = |56 \cdot 100|_{97} = 71$$

Then we can perform Step 1 of the Algorithm 1. We first compute

$$T = 32 \cdot 71 = 2272$$

then we can compute *m*, for convenience we shall use explicit calculation of *T*.

$$m = ||32 \cdot 71|_{100} \cdot 67|_{100} = ||2272|_{100} \cdot 67|_{100} = |72 \cdot 67|_{100} = |4824|_{100} = 24$$

In the next step we can compute the final result *t*

$$t = \frac{2272 + 24 \cdot 97}{100} = \frac{2272 + 2328}{100} = 46$$

And now we can determine the product $P = |x \cdot y|_N = 80$ using *N*-residue of the product in the following manner

$$P = \left| t \cdot \left| \frac{1}{R} \right|_N \right|_N = |46 \cdot 65|_{97} = 80$$

1.3. The use of the Montgomery multiplication for large numbers

In this section we shall provide an example of the Montgomery multiplication for large numbers. In the first example we shall use a numbers of about 160-bits (70 decimal digits). We assume $N = 10^{70} - 3$, $R = 10^{70}$. We have to compute $m = \left| |T|_R \cdot \left| \frac{1}{N} \right|_R \right|_R$, $t = (t + mN)/R$ where N^{-1} is multiplicative inverse $N^{-1} = \left| \frac{1}{N} \right|_R$. Select $x = 10^{70} - 5$, $y = 10^{70} - 9$ and $P = |x \cdot y|_{10^{70}-3} = (10^{140} - 14)(10^{70} + 45) \bmod (10^{70} - 3) = 12$. The values of the operands in the individual steps of the algorithm are presented in the Table 1. The calculation example has been developed and

implemented in python. For the representation of large values, the decimal type was used.

Table 1. The values of the operands in the individual steps of the algorithm

Operand	Value
N	99999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999 99999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999 99999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999 99999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999 99999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999 999999999999999999999999999997
$\left\|\frac{1}{R}\right\|_N$	66666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666 66666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666 66666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666 66666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666 66666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666 666666666666666666666666666665
$\left\|\frac{1}{N}\right\|_R$	66666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666 66666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666 66666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666 66666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666 66666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666666 666666666666666666666666666667
$\|x_R\|_N$	99999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999 99999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999 99999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999 99999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999 99999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999 999999999999999999999999999991
$\|y_R\|_N$	99999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999 99999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999 99999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999 99999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999 99999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999 999999999999999999999999999979
T	99999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999 99999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999 99999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999 99999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999 99999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999 99999999999999999999999999997000000000000000000000000000000000000000000000 00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000 00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000 00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000 00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000 000000000000000000000000000000000000000000000000000000000189
m	63
t	10000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000 00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000 00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000 00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000 00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000 00000000000000000000000000000330000000000000000000000000000000000000000000 00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000 00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000 00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000 00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000 0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
$T = t - N$	36
P	12

Conclusions

The paper presents the modulo reduction problem in the residue number system and modulo reduction of large numbers encountered in the RSA and elliptic curves cryptography. We show derivation of the Montgomery method and we also give numerical examples of reduction of small numbers and the reduction for ranges useful for elliptic curves cryptography.

References

1. Szabo N.S., Tanaka R.I., *Residue Arithmetic and its Applications to Computer Technology*, McGraw-Hill, New York 1967.
2. Ananda Mohan P.V., *Residue number systems: Theory and applications*, Birkhäuser, Bangalore–Karnataka 2016.
3. Piestrak S.J, *Design of residue generators and multioperand modulo adders using carry-save adders*, „IEEE Trans. on Computers" 1994, vol 4, no. 1, s. 68-77.
4. Washington L.C., *Elliptic curves: Number theory and cryptography*, 2nd. ed., Chapman and Hall/CRC, Boca Raton 2008.
5. Schneier B., *Applied cryptography: Protocols, algorithms and source code in C*, John Wiley & Sons, Inc. New York 2015.
6. Avizienis A., *Arithmetic codes: Cost and effectiveness studies for application in the digital system design*, „IEEE Trans. on Computers" 1971, vol. 20, no. 11, s. 1322-1331.
7. Montgomery P., *Modular multiplication without trial division*, „Mathematics of Computation" 1985, vol. 44, no. 170, s. 519-521.
8. Warren H.S. Jr, *Montgomery multiplication*, http://www.hackersdelight.org/MontgomeryMultiplication.pdf (access 10.2018).

REDUKCJA MODULO PRZY UŻYCIU METODY MONTGOMERY

Streszczenie: *W artykule zaprezentowano algorytm redukcji modulo w resztowym systemie liczbowym oraz redukcji występującej w przypadku użycia operandów o zakresach dynamicznych stosowanych w praktyce w kryptografii RSA lub krzywych eliptycznych. Wyprowadzono metodę Montgomery. Opracowano i przedstawiono przykłady na małych i wielkich liczbach.*

Jacek Paluszak

STROJENIE GŁĘBOKICH SIECI NEURONOWYCH

W artykule przedstawiono zagadnienia związane z metodami oraz strategiami trenowania sztucznych sieci neuronowych. Szczególny nacisk położono na dobieranie architektury sieci odpowiedniej do rozwiązywanego problemu oraz podstawy strojenia tzw. hiperparametrów sieci.

1. Projektowanie sztucznych sieci neuronowych

Przed rozpoczęciem budowy sztucznych sieci neuronowych istotnym etapem jest przeanalizowanie, jakiego rodzaju dane wejściowe wprowadzane są do sieci oraz jakie dane wyjściowe zamierza się uzyskać. Jest to pierwszy i jednocześnie bardzo ważny krok w całym procesie projektowania sieci neuronowej, ponieważ stanowi on odpowiedni fundament do jej powstania. Kiedy wiadomo, jakie informacje będą wprowadzane, należy zdefiniować, jaką formę ma sieć zwracać: czy oceny (klasyfikowane dane z określonym prawdopodobieństwem), czy liczby rzeczywiste (regresja). Po tych ustaleniach następny etap decyzji projektowych obejmuje dobór parametrów w postaci liczby warstw oraz liczby parametrów w każdej warstwie. Są one odpowiedzialne za wymagania dotyczące pamięci systemu stawiane przez dany typ sieci z określoną liczbą parametrów. Liczba warstw i parametrów w poszczególnej warstwie decyduje o potencjalnych możliwościach przetwarzania informacji przez sieć. Dodatkowe kwestie po ustaleniu typu architektury oraz warstw wyjściowej, które należy rozpatrzyć, to: strategia inicjalizacji wag połączeń, funkcje aktywacji, funkcje straty, algorytm optymalizacji, minipaczki, a także regularyzacja.

Strategia inicjalizacji wag z reguły wiąże się z architekturą sieci oraz rodzajem danych na wejściu. Im lepsza strategia, tym proces uczenia sieci może być szybszy. Funkcja aktywacji przeznaczona jest dla warstw. Jej zadaniem jest modelowanie nieliniowych zależności pomiędzy danymi wejściowymi a wyjściowymi, ponadto ułatwia wybieranie cech określonych typów i zajmuje się przygotowaniem warstwy wejściowej do regresji lub klasyfikacji. Dobór funkcji aktywacji i wybranej architektury wpływa na finalną postać funkcji strat. Funkcja strat determinuje, czego uczy się sieć (np. czy jej efektem finalnym jest klasyfikacja, czy regresja). W zależności od stawianego problemu należy rozważyć, jaka metoda optymalizacji powinna zostać przyjęta [1]. Zastosowanie metod regularyzacji zapobiega zbędnemu skupieniu się modelu na szumie w danych. Dzięki temu wagi mają szanse na możliwie najmniejsze wartości umożliwiające uogólnianie całej populacji danych.

1.1. Procedura tworzenia głębokich sieci neuronowych

Pierwszy etap to określenie danych wejściowych. Od ich rodzaju zależy architektura sieci. Drugi etap to określenie danych na wyjściu. Wpływa to na konfigurację architektury sieci oraz na typ warstwy wyjściowej. Trzeci etap to wybór architektury rozwiązujący postawiony jej problem. Wybór modelu, architektury i funkcji straty jako jednakowo ważny. Oszacowanie liczby warstw ukrytych oraz dobranie ze względu na przeznaczenie każdej warstwy i ogólnej architektury sieci funkcji aktywacji. Czwarty etap to przygotowanie danych testowych do zadań oczyszczania, wizualizacji, wektoryzacji i normalizacji, zrównoważenia klas oraz podziału na zbiory testowe, treningowe i weryfikacyjne. Piąty etap obejmuje opracowanie strategii strojenia hiperparametrów przy wykorzystaniu zrównoważonego podzbioru danych. Powyższe kroki stanowią wysokopoziomowy opis procesu strojenia, ale ogólnie wytyczają drogę, którą należy obrać, tworząc neuronową sieć głębokiego uczenia.

2. Architektury sieci względem danych wejściowych

Proces tworzenia sieci głębokiej rozpoczyna się od ustalenia, jaki typ danych reprezentowany jest na wejściu, np. dane kolumnowe, obrazy, audio, wideo czy szeregi czasowe. Dane kolumnowe, zazwyczaj w formacie CSV, z reguły są wynikiem eksportu tabeli z bazy RDBMS (system zarządzania relacyjną bazą danych) lub normalizacji i połączenia kilku zbiorów danych. Jest to typ informacji, z którego nie trzeba wyodrębniać cech, więc wybór architektury jest stosunkowo prosty – wielowarstwowa sieć perceptronowa. Jeśli trzeba klasyfikować obrazy, zalecane jest użycie sieci konwolucyjnej (CNN, *Convolutional Neural Network*). Zapewnia ona uzyskanie najlepszych efektów przetwarzania obrazów. W przypadku szeregów czasowych mamy do czynienia z danymi sekwencyjnymi, czyli seryjnymi danymi wejściowymi modelu. Dodatkowo w szeregach czasowych do każdego elementu przypisany jest znacznik czasu. Do przetwarzania takiego typu informacji należy użyć sieci rekurencyjnej (RNN, *Recurrent Neural Network*), która umożliwia modelowanie *N* wektorów wejściowych, a nie tylko jednego [2]. Dzięki tej sieci można modelować aktywność systemu w czasie. Dla danych audio również powinno się zastosować ten typ sieci, ponieważ pliki audio mają charakter czasowy, stanowią szeregi próbek dźwiękowych. Przy plikach wideo sprawa wytypowania adekwatnej sieci jest bardziej skomplikowana. Przetwarzanie tych danych, czyli wyodrębnianie informacji z serii obrazów, wymaga bardziej złożonych obliczeń. Jednym z rozwiązań jest użycie sieci zbudowanej z warstw: konwolucyjnej, wybierającej, gęstej (jednokierunkowej) i rekurencyjnej, klasyfikujących poszczególne ramki. Innym sposobem jest wyodrębnienie poszczególnych ramek i zapisywanie ich w postaci plików, a następnie analizowanie ich za pomocą sieci CNN.

3. Związek między przeznaczeniem sieci a jej warstwą wyjściową

Wynik otrzymywany od sieci jest uzyskiwany z warstwy wyjściowej. Jej funkcja aktywacji jest dostosowana do żądanego wyniku lub odpowiedzi modelu.

3.1. Warstwa wyjściowa modelu regresyjnego

Model regresyjny zwraca liczbę rzeczywistą, np. cenę towaru zależną od jego ilości. Podstawowymi własnościami warstwy wyjściowej modelu regresyjnego jest funkcja strat i funkcja aktywacji [1]. Najczęściej stosowanymi rodzajami dla funkcji strat są średnia kwadratów błędów oraz suma kwadratów błędów, natomiast dla funkcji aktywacji – funkcja tożsamościowa (liniowa).

3.2. Warstwa wyjściowa modelu klasyfikującego

Dla modelu klasyfikującego warstwa wyjściowa zawiera N jednostek wyjściowych, z których każda zawiera ocenę klasy. Kiedy $N = 1$, model zwraca pojedynczą etykietę, sprawdzając, czy dane spełniają, czy nie spełniają zadanego warunku. Kiedy jednak $N > 1$, oceniana jest każda klasa danych wejściowych i w takim wariancie stosuje się inną konfigurację warstwy wyjściowej [1].

4. Liczba warstw i parametrów – wpływ na wielkość pamięci

W sieciach neuronowych liczba warstw i neuronów znajdujących się w każdej z warstw określa liczbę parametrów modelu. Im więcej parametrów, tym bardziej skomplikowane są funkcje modelujące.

Liczba warstw ukrytych znajdujących się w architekturze sieci jest uzależniona od wielkości zbioru danych. W miarę wzrostu zbioru danych liczba warstw ukrytych się powiększa. Dodatkowo każda z warstw powinna mieć określoną konkretną liczbę neuronów. Jeśli w sieci będzie ich za mało, mogą zaistnieć komplikacje związane z przetrenowaniem modelu. Natomiast kiedy model będzie cechował się zbyt obszerną liczbą parametrów, może on zbytnio oddalić się od swojego głównego przeznaczenia, czyli znacznie dopasuje się do konkretnego przypadku. Można tego uniknąć, stosując zasadę, że przy kolejnej warstwie liczba neuronów powinna ulegać spadkowi. Ponadto w żadnej warstwie ukrytej liczba neuronów nie powinna być mniejsza niż jedna czwarta liczby neuronów znajdujących się w warstwie wyjściowej, ponieważ przy zbyt licznej grupie neuronów wzrasta prawdopodobieństwo zbytniego dopasowania się modelu.

Praktycznym rozwiązaniem będącym „złotym środkiem" między niedoborem neuronów a ich nadmierną liczbą jest zastosowanie warstw ukrytych składających się z takiej samej ich liczby [3].

Kiedy liczba warstw ukrytych oraz liczba neuronów zawartych w każdej z nich zostanie ustalona, można zacząć określać liczbę parametrów sieci głębokiej. Istnieją dwie praktyczne metody do ich zdefiniowania: wyliczenie na podstawie typu architektury lub z sumowania liczby parametrów w poszczególnych warstwach.

5. Określenie zapotrzebowania na pamięć

Kiedy sieć głęboka przekracza pojemnością możliwości komputera, przetrenowanie jej może zakończyć się fiaskiem z powodu przepełnienia pamięci. Trening nie jest wprawdzie bezpośrednio związany ze strojeniem sieci, ale jest istotny, kiedy rozmiar sieci jest duży. Nie można dostroić sieci, jeżeli nie można jej wcześniej przetrenować.

Podczas trenowania sieci pamięć komputera zajmowana jest przez wielowymiarowe tablice zapisujące sześć rodzajów danych: parametry sieci, gradienty parametrów (tyle samo co parametrów), aktywacje, gradienty aktywacji (tyle samo co aktywacji), stan aktualizatora i dane treningowe. Należy także mieć na uwadze uwzględnienie dodatkowej pamięci na macierze tymczasowe, bufory, dane ładowane synchronicznie i wszelkiego rodzaju dane konieczne do wytworzonego systemu [4].

Aby być przygotowanym na każdą ewentualność, warto znać rozwiązania w przypadku wystąpienia najczęstszego problemu związanego z pamięcią, czyli z jej brakiem. Istnieje kilka możliwości: zmniejszenie wielkości paczki danych, użycie lepszego sprzętu bądź skorzystanie z usługi chmurowej lub zmniejszenie sieci.

6. Strategie inicjalizacji wag

Inicjalizacja wag jest najważniejszym punktem startowym w procesie uczenia sieci neuronowej. W zależności od postawionego przed siecią problemu należy dobrać adekwatną strategię. Sposób, w jaki zostanie zainicjowana waga, wpływa znacząco na proces treningu sieci. Strategie stosowane podczas inicjowania to: obciążenie początkowe z wartością równą 0, wagi w warstwach ukrytych zainicjowane tak, aby nie było symetrii pomiędzy ukrytymi jednostkami (symetria łamana jest poprzez wprowadzenie czynnika losowego w procesie inicjalizacji) [5].

Jeśli wagi są zbyt duże, mogą uśredniać duże wartości wyjściowe i duże gradienty, co ma zgubny wpływ na proces uczenia.

7. Funkcja aktywacji

Istnieje lista popularnych funkcji aktywacji, które mają swoje zastosowanie w danych przypadkach (tab. 1).

Tabela 1. Lista popularnych funkcji aktywacji [6]

Funkcja aktywacji	Opis zastosowania
Liniowa	Stosowana w warstwie wyjściowej modelu regresyjnego
Sigmoida	Stosowana w warstwie wyjściowej binarnego modelu klasyfikującego Funkcja zwracająca wartości z przedziału [0;1] Rzadko stosowana, nie należy jej używać w warstwach ukrytych
Tangens hiperboliczny	Funkcja zwracająca ciągłe dane z zakresu [-1;1] Stosowana w sieciach LSTM (*Long Short Term Memory*)
Softmax	Stosowana w warstwie wyjściowej modelu wieloklasowego
ReLU	Stosowana w sieciach: • RBM (*Restricted Boltzmann Machines*) • CNN (*Convolutional Neural Network*) • wielowarstwowych perceptronach

Zalecane jest używanie funkcji aktywacji ReLU w ogólnych przypadkach. Należy być jednak ostrożnym przy dobieraniu szybkości uczenia się sieci, ponieważ złe jej dopasowanie może spowodować pojawianie się „martwych" neuronów (takich, które nie biorą udziału w procesie uczenia się sieci). Mają one negatywny wpływ na proces uczenia się sieci i znacznie ograniczają możliwość jej późniejszego wykorzystania w różnych aplikacjach. Inną opcją jest tangens hiperboliczny, ale w zastosowaniu sprawdza się gorzej niż ReLU i max out. Sigmoida jest zwykle stosowana tylko w jednoetykietowych warstwach wyjściowych sieci klasyfikujących i nie jest używana w warstwach ukrytych.

8. Funkcja strat

Funkcja strat ocenia jakość efektów użycia funkcji optymalizacyjnej. Stosowana jest w dwóch miejscach: w warstwie wyjściowej oraz w sieciach realizujących nienadzorowany trening wstępny, np. autokod erach, sieciach RBM i VAE. Niestety, większość warstw (warstwy konwolucyjnej, gęste, LSTM itp.) nie ma możliwości przypisania funkcji straty, ponieważ nie można ich wstępnie trenować [6].

Oprócz samej klasyfikującej funkcji straty jest jeszcze funkcja zawiasowa i funkcja logistyczna. Funkcja zawiasowa ma najczęstsze zastosowanie w sieciach optymalizowanych w aspekcie twardej klasyfikacji, np. 0 = brak nadużycia, 1 = nadużycie. Ich popularna nazwa to klasyfikatory 0-1. Funkcję logistyczną stosuje się w sieciach, w których większą wagę przywiązuje się do prawdopodobieństwa klasyfikacji niż do twardej klasyfikacji. Przykładem dla tej funkcji jest sieć wykrywająca potencjalne nadużycie, w której działanie zaangażowany jest czynnik ludzki bądź sieć prognozująca, czy użytkownik kliknie w baner

reklamowy na stronie. Prognozowanie prawdopodobieństwa oznacza generowanie liczb z zakresu od 0 do 1.

Funkcje strat i przypadki ich zastosowania przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Funkcje strat i przypadki ich zastosowania [7]

Funkcja straty	Zastosowanie	Właściwości
Entropia rekonstrukcyjna	Sieć RBM, autokoder	Projektowanie cech
Kwadrat błędów	Warstwa wyjściowa	Regresja
Entropia skośna	Warstwa wyjściowa	Klasyfikacja binarna
Entropia wieloklasowa	Warstwa wyjściowa	Klasyfikacja
Pierwiastek ze średniej kwadratów błędów	Autokoder, RBM, warstwa wyjściowa	Projektowanie cech, regresja
Funkcja zawiasowa	Warstwa wyjściowa	Klasyfikacja
Ujemny logarytm prawdopodobieństwa	Warstwa wyjściowa	Klasyfikacja

RBM – sieć *Restricted Boltzmann Machines*

9. Metody optymalizacyjne

Najczęściej stosowaną metodę w optymalizacji sieci głębokiego uczenia stanowi stochastyczny gradient prosty. Jest to metoda prosta w implementacji, ale cechuje się bardzo dużą złożonością w strojeniu i zwielokrotnianiu. Istnieją także metody drugiego rzędu: metoda BFG, gradient sprzężony oraz metoda bezhesjanowa. Wady i zalety ich stosowania zostały przedstawione w tabeli 3.

Tabela 3. Porównanie metod optymalizacyjnych [8]

Metoda	Uwagi do metody pierwszego rzędu	Uwagi do metody drugiego rzędu	Zalety	Wady
Stochastyczny gradient prosty	Gradient	Brak	Szybka konwergencja, niski koszt aktualizacji parametrów	Mała stabilność
L-BFGS	Gradient	Informacje o krzywiźnie pochodzą z gradientu	Skuteczne wyszukiwanie lokalnych minimów	Skuteczniejszy trening sieci w porównaniu do stochastycznego gradientu prostego, wyższy koszt aktualizacji parametrów, wyższy koszt pamięci
Gradient sprzężony	Gradient	Informacje o krzywiźnie są pozyskiwane z gradientu	–	Wyższy koszt aktualizacji parametrów, wyższy koszt pamięci
Stochastyczny gradient prosty bezhesjanowy	Brak	Krzywizna	Automatyczne określenie wielkości kroku, wykorzystanie gradientu sprzężonego do określenia następnego kroku	Nie jest uniwersalna dla wszystkich typów sieci, wyższy koszt aktualizacji parametrów, wyższy koszt pamięci

10. Wielkość minipaczek

Odmiana uczenia na podstawie minipaczek to jedna z odmian metody stochastycznego gradientu prostego do wyliczania owego gradientu. Jest ona znacznie bardziej wydajna od metody wykorzystującej tylko jeden zbiór treningowy. Dobór wielkości minipaczki jest kompromisem pomiędzy potrzebną pamięcią, wydajnością obliczeń a wydajnością procesu optymalizacyjnego. Zbyt mała minipaczka nie pozwala na pełne wykorzystanie możliwości wytworzonego systemu, a zbyt duża może okazać się nieefektywna. Wartość gradientu dla wszystkich rekordów będących w minipaczce jest uśredniana, a to oznacza, że koszt dodania kolejnych gradientów przeważa nad korzyściami. Aby wydajność była na najwyższym poziomie, wielkość paczki powinna być wielokrotnością liczby 32. Jest to najbardziej pożądana korelacja, jednak kiedy nie może ona zaistnieć, wielkość minipaczki powinna być wtedy wielokrotnością liczby 16 lub cyfr 8, 4 albo 2. Powód: operacje na pamięci i sprzęt są zoptymalizowane do przetwarzania tablic, których wielkość jest potęgą liczby 2. Ostatni aspekt, który należy rozpatrzyć, to wydajność procesu optymalizacyjnego. W jego przypadku należy pamiętać, że nie można dobierać wielkości minipaczki, nie biorąc pod uwagę innych hiperparametrów, np. szybkości uczenia się. Większa minipaczka daje gładszy gradient (dokładniejszy i bardziej spójny), co w efekcie pozwala na uzyskanie większej szybkości uczenia przy tej samej liczbie aktualizacji parametrów. Użycie większej paczki skutkuje wydłużeniem czasu aktualizowania parametrów, ale umożliwia uczenie się sieci w pewnych trudniejszych przypadkach, np. zaszumionych lub niejednolitych zbiorach danych [1].

Pojawia się zatem pytanie, jaka wielkość paczki jest najodpowiedniejsza? W przypadku użycia procesorów CPU jest to od 32 do 256 rekordów oraz od 32 do 1024 rekordów dla procesora GPU.

11. Regularyzacja

Metoda regularyzacji stosowana w procesie treningu sieci ma na celu zapobieganie nadmiernemu dopasowaniu. Jednak regularyzacja umożliwia także uzyskanie lepszej wersji modelu poprzez stosowanie metod zapobiegających przybieraniu przez parametry nadmiernie dużych wartości. Odpowiednia kombinacja ustawień wykonywana jest zazwyczaj ręcznie, ale można zastosować wyszukiwanie losowe lub wyszukiwanie kratowe.

Funkcje wstępne są w uczeniu maszynowym powszechnie stosowane do regularyzacji wektorów parametrów. Pomniejszania wag dokonuje się zazwyczaj za pomocą funkcji wstępnych L1 (zastosowanie przy danych rozrzedzonych) lub L2 (zastosowanie przy danych zagęszczonych). Funkcja L1 cechuje się większą

dyskryminacją za duże wagi, ale nie sprowadza małych wag do zera. Natomiast L2 mniej dyskryminuje za duże wagi, ale sprowadza wiele małych wag do zera (bądź wartości bliskiej zeru), co może dać w rezultacie rozrzedzony wektor wag.

11.1. Regularyzacja max-norm

Regularyzacja max-norm polega na ustaleniu górnej granicy norm L2 wektora wag dla każdej ukrytej jednostki. Jest to inne działanie niż dyskryminacja na podstawie kwadratów długości wszystkich wektorów wag, typowa dla funkcji L2. Metody oparte na ograniczeniach, a nie na strategiach dyskryminacyjnych, zapobiegają przyjmowaniu przez wagi nadmiernych wartości, niezależnie od wielkości wejściowych aktualizacji wag [7].

11.2. Regularyzacja Dropout

Niekosztowna obliczeniowo metoda polegająca na wyłączeniu jednostek z modelu podczas treningu. Jest użyteczna w prawie każdym rodzaju sieci i, jak się okazało, działa poprawnie razem z stochastycznym gradientem prostym. Jej działanie opiera się na czasowym nadawaniu aktywacjom jednostek wartości 0,0. W warstwie wejściowej neurony do wyłączenia wybierane są losowo z prawdopodobieństwem z zakresu od 0,5 do 1,0 [7].

12. Wnioski

Głębokie sieci neuronowe odniosły nieprawdopodobny sukces, przewyższając standardowe techniki uczenia maszynowego (a często i ludzi) w wielu różnych zadaniach z zakresu rozpoznawania wzorców. Sieci głębokie są jednak bardzo zależne od wartości ich hiperparametrów, które często muszą być strojone ręcznie. Proces strojenia hiperparametrów jest czasochłonny, szczególnie w świecie dużych zbiorów danych. Generujemy nowe dane na ogromną skalę w większości dziedzin: w obrazowaniu i analizie danych medycznych, genomice, kategoryzacji tekstu czy biologii obliczeniowej. Nie ulega wątpliwości, że „rewolucja dużych danych" wywiera wpływ na wiele dziedzin nauki. Potrzeba opracowywania automatycznych metod wyznaczania wartości hiperparametrów głębokich sieci neuronowych wydaje się oczywista.

Literatura

1. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A., *Deep learning: systemy uczące się*, tłum. W. Sikorski, PWN, Warszawa 2018.
2. Nielsen M., *Neural networks and deep learning*, eBook.
3. Długosz R., Talaśka T., Pedrycz W., Wojtyna R., *Realization of the conscience mechanism in CMOS implementation of winner takes all self-organizing neural networks*, „IEEE Transactions on Neural Networks" 2010, vol. 21, no. 6.
4. Nikhil B., *Fundamentals of Deep Learning*, O'reilly UK Ltd., Beijing–Boston––Farnham–Sebastopol–Tokyo 2017.
5. Hornik K., Stinchcombe M., White H., *Multilayer feedforward networks are universal approximators*, „Neural Networks" 1989, vol. 2, no. 5, s. 359-366.
6. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A., *Deep learning*, 2016, book in preparation for MIT Press, URL http://www.deeplearningbook.org.
7. Tighiouart B., Rubel P., Bedda M., *Improvement of QRS boundary recognition by means of unsupervised learning*, „Computers in Cardiology" 2003, vol. 30, s. 49-52.
8. Korbicz J., Obuchowicz A., Uciński D., *Sztuczne sieci neuronowe. Podstawy i zastosowania*, Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa 1994.
9. Leite C.R., Martin D.L., Sizilio G.R. et al., *Classification of cardiac arrhythmias using competitive networks*, „2010 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society", doi: 10.1109/IEMBS.2010.5626728.
10. Bohena K., *Mikroprocesory neuromorficzne*, „Świat Nauki" (Scientific American) 2007, wydanie specjalne, tom 1, nr 8.

TUNING DEEP NEURAL NETWORKS

Abstract: *In this paper, a review of methods and strategies for training of deep neural networks is presented. Among others, problems related with matching network architectures and principles of tuning of neural network hyperparameters are discussed.*

Joachim Domsta

ON A BIG-BANG-LESS MODIFICATION OF THE NEWTONIAN SUSSKIND UNIVERSE
The case of finite mass with spherically symmetrical distribution

The fundamentals of the expanding spherically symmetric escape speed Susskind model of the (not necessarily homogeneous) universe based on Newtonian gravity are considered in detail. A rigorous formulation of the evolution for the case of finite mass of the universe is presented. Every escape speed model is uniquely characterized by the time dependent function describing the process of releasing the matter from the center into the space. The homogeneity of the distribution of the mass at some instant in a bounded ball (defining the finite mass Susskind universe) is shown as sufficient and necessary for existence of the Big-Bang (B-B), when the total mass is released at one instant. Then (as in the infinite homogeneous universe) the local Hubble factor and local density of the universe are constants dependent on the age of the universe, only. New formulas are derived to illustrate how the non-instantaneous matter release from the center implies non-homogeneity of the mass distribution and anisotropy of the relative expansion rate, thus also the lack of a (global) Hubble constant.

Introduction

Among many models of the universe based on the Einstein equations the simplest are the *de Sitter* and *Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker* worlds [4, 8]. These most regular (uniform and anisotropic) models admit basically three types of evolution of the universe – collapsing, expanding and some intermediate models like static or moderately expanding. For allowing an insight into these rather mathematically sophisticated structures, Leonard Susskind in *Cosmology Lectures* [6, videos 1-2] has introduced a family of models obtaining more readable structures, based on classical Newtonian equation exploiting the classical Newtonian gravitational forces, only.

The Susskind models were presented with some gaps left for the readers to complete by themselves. Our first goal is to present a rigorous derivation of the equations of the basic model, the more – in particular – that the originally assumed unboundedness of the universe mass makes the correct inference impossible. To improve this point, we are analysing finite mass models instead. The main goal, however is to present an extended class of models covering both – the original homogeneous Susskind's universe and the universes with non-homogeneous distribution of the matter. For this aim and for better readability of the paper, we confine ourselves to considerations of the so-called *escape speed models*, only, for which all particles of the universe have ultimately speed 0 as the time elapsed

approaches infinity (see Section 1). Even under this restriction some consequences seem to be interesting, e.g. that non-homogeneity of the distribution of the matter is intrinsically joint with the lack of the Big-Bang (B-B).

In Section 2 the counterparts of Susskind formulas for the model with the B-B instant are given as a particular case. Despite our switching from the infinite mass model to the one of finite mass, the following two well known formulas remain unchanged:

- $q(t) = \left(\frac{T+t}{T}\right)^{2/3}$, for the *expansion coefficient* in dependence on the *age T* of the universe "now", and after *t* units of time past now,
- $h(t) = \frac{2}{3(T+t)}$ for the Hubble constant at the instant *t* units of time past now.

It is worth to add that these two formulas make the classical Susskind model quantitatively very close to those based on general relativity, cf. the notion of universes that are 'matter-dominated' presented e.g. in [4, Chapter 17]. This coincidence is made by Susskind as a motivation for developing the classical model for a relatively simple interpretation of cosmological constants, see [6, videos 3-10]. We are not continuing this direction since we consider only consequences of the assumption of non-instantaneous release of the matter onto the basic model.

Just for mentioning existence of many other problems, we are presenting additionally equations of the so called *peculiar motions*, which are those performed by a probe mass points relative to the motion of particles of the Susskind homogeneous universe (cf. subsection 2.3).

We are pointing out in Section 3, that in the case of non-instantaneous release of the matter, the distribution of the matter becomes non-homogeneous. Also the local relative expansion rate may depend on time, the distance from the center as well as on the direction. Therefore the Hubble constant for non-central points may exhibit anisotropy.

1. The general spherically symmetric model

1.1. Basic assumptions

(A.1) the instants *t* of considerations form the real line $\mathbb{R} = (-\infty, \infty)$;
(A.2) the universe is built of a matter of positive finite constant total mass $M^{\text{tot}} < \infty$, interacting with itself *via* Newton gravitation type forces, only;

(A.3) the space of particles' positions of the matter is represented by $\mathbb{R}^3$; if the Cartesian coordinates of a vector $\mathbf{r}$ are (x, y, z), then its length equals $r = |\mathbf{r}| := \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$;

(A.4) at every instant $t \in \mathbb{R}$, the distribution of the mass is spherically symmetric with respect to the origin which is called *center*; it possesses (non-negative) density $\rho_t(r) \geq 0$, everywhere for $r > 0$, except – possibly – at the origin, where a matter of mass denoted by $M_t(0)$ can be concentrated; in particular, the mass of particles contained in the *central ball* of radius r (i.e. with center at the origin) equals

$$M_t(r) = M_t(0) + \int_{(0,r)} 4\pi^2 \rho_t(r) dr \overset{r\to\infty}{\longrightarrow} M^{\text{tot}} = M_t(0) + \int_{(0,\infty)} 4\pi r^2 \rho_t(r)\, dr;$$

(A.5) at every instant $t \in \mathbb{R}$, the velocity field of the matter possesses also spherical symmetry; at point $\mathbf{r}$ it is denoted by $\mathbf{v}_t(\mathbf{r}) = v_t(r) \cdot \mathbf{r}/r$, for $\mathbf{r} \neq \mathbf{0}$, where $v_t(r)$, $r > 0$, is a real valued function.

1.2. Equations of motion

Under the above assumptions, according to the Newton shell theorem and the Newton second law, at instant $t \in \mathbb{R}$ the material points occupying position at distance $r > 0$ from the center, are accelerated by the gravity attracting forces caused by the mass contained inside the central ball of radius r. Therefore with the use of the gravitational constant G the acceleration equals $\mathbf{g}_t(\mathbf{r}) = -G M_t(r)\, \mathbf{r}/r^3$.
Due to the spherical symmetry of the density and both fields – of the velocity and the acceleration – the distribution of the matter remains all the time of the same symmetry. Therefore for the equations of motion it is enough to use the corresponding scalar function:

$$g_t(r) = -G M_t(r)/r^2, \quad \text{for } r > 0,\ t \in (a, b). \tag{1}$$

Now let us consider a central ball, which at some instant $t_0 \in (a, b)$ possesses radius $r_0(t_0) > 0$ and let us denote the mass of the inside contained universe material points (particles) by $M_{t_0}(r_0(t_0)) =: M \leq M^{\text{tot}}$. Moreover, let us suppose that at every future instant $t > t_0$ the considered ball of radius $r_0(t)$ consists of the same material particles of the universe, which means that no particles leave the ball and no ones enter it. Thus

$$M_t(r_0(t)) = M, \text{ which is independent of } t, \text{ for } t_0 \leq t < \infty. \tag{2}$$

According to this we are justified to parametrize the positive distance at instant t of a material point of the universe from the origin by $r(t|M)$, where M stands for the mass of all particles which at instant t are closer to the center than the material

points. Since the points on the surface of the ball of radius r are accelerated with $g_t(r)$ given by (1), with the use of (2) we infer that the second derivative of $r(t|M)$ with respect to time equals

$$\ddot{r}\,(t|M) = -\frac{GM}{r(t\,|\,M)^2},\ t_0 \le t < \infty \tag{3}$$

The *escape speed solution* is any one, for which $\lim_{t\to\infty} \dot{r}\,(t|M) = 0$.

It is not hard to verify, that for a given $M \le M^{\text{tot}}$, any such positive solutions with maximal domain is given by the formula

$$r(t|M) = \sqrt[3]{\frac{9}{2}GM}\ (t - r(M))^{\frac{2}{3}},\ \text{for}\ \ t > \tau\,(M),\quad \text{with some}\ \ \tau\,(M) \in \mathbb{R} \tag{4}$$

We interpret these functions as a model of *the escape speed evolution* of the radius of the surface of a material ball posed centrally, containing mass M with spherically symmetric distribution inside and outside it.

1.3. Auxiliary assumptions

As we see from the preceding section, it is not possible to solve the equations in full generality even in the case of the escape speed model, since we need to know the following:

- the values of the parameter $\tau(M)$, for every M,
- the rules of evolution before the instant denoted by $\tau(M)$,
- what happens to the particles in case of intersecting orbits after the instants $\tau(M)$.

However, we are interested only in such cases when there are no such intersections off the center (i.e. in the space where $r > 0$). More detailed complementary restrictions are expressed by the following additional assumptions:

(A.6) the particles indexed by M are at rest in the center till the instant $\tau(M)$ inclusive; after this instant they move away according to (4), i.e. $r(t|M) = \sqrt[3]{\frac{9}{2}GM\,(t-r(M))_+^2}$, where $a_+ := \max\{0, a\}$, for $a \in \mathbb{R}$;

(A.7) the real valued function $\tau(M)$, $0 < M < M^{\text{tot}}$, is weakly decreasing.

In these terms, the mass of the center at instant t is related as follows:

$$M_t(0) = \inf\{\, M : \tau(M) < t\}$$

which makes $M_t(0)$ and $M^{\text{tot}} - M_t(0)$ left continuous decreasing functions with the following meanings:

- the increment

$$[M^{\text{tot}} - M_{t_2}(0)] - [M^{\text{tot}} - M_{t_1}(0)] = M_{t_1}(0) - M_{t_2}(0),\ \text{for}\ t_1 < t_2,$$

equals the mass released from the center to the space between instants t_1 and t_2; these are material points (particles of the matter of the universe) parametrized by $M \in (M_{t_2}(0), M_{t_1}(0)]$;

- the jump at a point of discontinuity
  $[M^{\text{tot}} - M_{t+0}(0)] - [M^{\text{tot}} - M_t(0)] = M_t(0) - M_{t+0}(0)$
  denotes the mass of instantaneously released matter from the center to the space at instant t; these are points parametrized by $M \in (M_0(t + 0), M_0(t)]$.

Let us close this section with the following:
PROPOSITION. *Under the above assumptions (A.1-7) the trajectories of the released particles (with $r > 0$) do not intersect each other. And conversly, if all such trajectories do not intersect anywhere but the origin, then the function τ is necessarly decreasing.*
Proof: The released particles are moving away from the center rectilinearly, beginning at the center, with distance varying according to formula (A.6). Different particles on the same ray possess different parameter M, thus it sufficies to consider the sign of the difference of the cubes $r(t|M_2)^3 - r(t|M_1)^3$, for $M_2 > M_1$, which is the same as the one of

$$M_2 (t - \tau(M_2))^2 - M_1(t - \tau(M_1))^2 =$$
$$= (M_2 - M_1)(t - \tau(M_2))^2 + M_1(\tau(M_1) - \tau(M_2))(2t - \tau(M_1) - \tau(M_2))$$

Therefore, the above expression is positive for every triple of t, $M_1 < M_2$ such that $t > \tau(M_2)$, if and only if $\tau(M_1) - \tau(M_2) \geq 0$.

2. The homogeneous Susskind universe

2.1. Necessity of existence of B-B

The original homogeneous escape speed Newtonian Susskind universe has been defined as matter uniformly filling the real $\mathbb{R}^3$ space, with particles escaping from each other with velocity proportional to the distance between them, under influence of the mutually interacting gravity forces. At this point the model is inconsistent due to the lack of a reasonable justification of the value of the gravity forces caused by the matter of infinite mass uniformly filling the whole space. In order to avoid this inconsistency we are presenting here a slightly modified model of the universe, by defining it *via* the following conditions complementing the previous (A.1-7).

(A.8) the matter of the universe at some instant t_0 (which we choose equal 0), is distributed with a constant density ρ_0 concentrated in the ball $B(\mathbf{0}, R_0)$, with zero central mass;

(A.9) the initial velocity of the particles occupying the sphere at distance $r \leq R_0$ from the center equals the escape speed

$$v_0(r) = \sqrt{2GM_0(r)/r}\,, \text{ where } M_0(r) = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_0.$$

Let us note that $M_0(r) = M^{\text{tot}}\ r^3/R_0^3$ is the mass of the matter in the sub-ball $B(\mathbf{0}, r)$ at $t_0 = 0$. In terms of the trajectories of the particles indexed by M (≡ containing in their spheres at each instant the same matter of mass M), assumptions (A.8) and (A.9) imply the following formulas for their distances from the origin (radius of their spheres) and their (radial) velocities

$$r(0|M) = \sqrt[3]{M / M^{\text{tot}}}\ R_0 \tag{5}$$

$$\dot{r}(0|M) = v(0|M) = \sqrt{2GM / r(0|M)} = \sqrt{\frac{8\pi G\rho_0}{3}}\ r(0|M) \tag{6}$$

Therefore also according to (A.6)

$$r(0|M) = \sqrt[3]{\frac{9}{2}GM}\ (-\tau(M))^{\frac{2}{3}}, \text{ with some } \tau(M) < t_0 = 0 \tag{7}$$

Comparing (5) and (7) we can state the following:
PROPOSITION: (Susskind [6, Lecture 1] *In the homogeneous escape speed Newtonian Susskind universe, with finite total mass M^{tot} and radius R_0 at instant $t_0 = 0$, the instant of release of the matter from the center into the space is independent of M*

$$(*) \qquad \tau(M) = \text{const} = -T, \text{ where } T := \sqrt{\frac{2R_0^{\ 3}}{9GM^{\text{tot}}}} = \frac{1}{\sqrt{6\pi G\rho_0}} > 0$$

The common value of $\tau(M)$ is called *instant of the Big-Bang* (briefly: *B-B*). Moreover, due to the next formula for any $t > -T$, the time $t + T$ elapsed since B-B is called the *age of the universe at instant t*. In these terms according to (A.6) we have:

$$r(t|M) = \sqrt[3]{\frac{9}{2}GM}\ (t + T)^{\frac{2}{3}} \tag{8}$$

$$\dot{r}(t|M) = \sqrt[3]{\frac{4}{3}GM}\ (t + T)^{-\frac{1}{3}} = \frac{2r(t|M)}{3(t+T)} \text{ and } \ddot{r}(t|M) = -\frac{2r(t|M)}{9(t+T)^2} \tag{9}$$

and the inverse proportionality to the current age of the universe for the Hubble constant:

$$h^{\text{hom}}(t) = \frac{2}{3(t+T)}, \text{ which for } t = 0 \text{ equals } \sqrt{\frac{8\pi}{3}G\rho_0} \tag{10}$$

Let us note the remarkable coincidence of the Hubble constant given for the Einstein-de Sitter model $h^2 = \kappa\rho/3$ where κ is the Einstein constant and that its size

evolves with time proportionally to $(T + t)^{2/3}$, even though the Susskind model is not relativistic. For confirmation of the similarity of Susskind's Newtonian model and the corresponding relativistic model of gravitationally evolving dust the reader is referred to monographs on field theory, e.g. to [3].

3.2. Further consequences of homogeneity

Here we expose the features making the homogeneous universe so much interesting due to independence of the properties around arbitrary point. For, let us introduce the *rate of the relative expansion* which *a'priori* depends on the initial position, however it does not :

$$q(t|M) := r(t|M) / r(0|M) = \left(\frac{t+T}{T}\right)^{2/3} =: q(t) \tag{11}$$

The motion of two arbitrary particles of the universe is given by the formula:

$$\mathbf{r}_1(t) = q(t)\ \mathbf{r}_1(0),\ \ \mathbf{r}_2(t) = q(t)\ \mathbf{r}_2(0),\ \text{ for } t > -T$$

Therefore, for any sub-ball $B(\mathbf{r},\ r_0) \subset B(R_0)$, with center at $\mathbf{r}$ and radius r_0, the relative motion of a particle occupying at $t_0 = 0$ the position $\mathbf{r}_1 \in B(\mathbf{r},\ r_0)$, is expressed by the difference of two points' positions as follows:

$$\mathbf{r}_1(t) - \mathbf{r}(t) = q(t)\ \mathbf{r}_1(0) - q(t)\ \mathbf{r}(0) = q(t)\ (\mathbf{r}_1(0) - \mathbf{r}(0))$$

which means, that

COROLLARY. *The matter of any sub-ball contained in the universe expands with respect to its center in the same way as any other ball with the same radius.*

REMARK. Since the local properties are independent of the total mass M^{tot} of the considered here Newtonian Susskind universe, but just *via* its density, it is quite resonable to extend the model by accepting its unbounded radius and mass. However, then no reasoning but the analogy can justify appropriateness of the statement, that the particles are driven by the Newtonian gravity forces. Indeed, then the vectorial sum of the forces from the uniformly spread infinite mass in the whole space does not exist.

2.3. The peculiar motion

In this section we are considering the "free" motion of a probe point starting at the origin of the space. Assuming – as usually in such cases – that the probe does *not* influence the motion of the material points of the universe, and that motion of the probe is under influence of the gravity of the matter of the universe, due to the permanent spherical symmetry of the chosen solutions, referring to the Newton law and gravity (the shell theorem included), the equation of motion for the position $\mathbf{p}(t)$ of the probe becomes

$$\ddot{\mathbf{p}}(t) = -\frac{GM_t(p(t))}{p(t)^3}\,\mathbf{p}(t), \text{ with } \mathbf{p}(t_0) = 0, \text{ and } \dot{\mathbf{p}}(t_0) = \mathrm{w}_0 \tag{12}$$

and the mass $M_t(r)$ is given by the condition:

$$M_t(r) = M, \text{ whenever } r = r(t|M) \tag{13}$$

Fortunately, in the considered homogeneous Susskind model the scalar coefficient at $\mathbf{p}(t)$ is dependent on t, only. Indeed, since according to Remark on page 107 with the use of (10) we can write for every $0 < r \le R_0\, q(t)^3$:

$$M_t(r) = M_0\left(\frac{r}{q(t)}\right) = \frac{M_0(r)}{q(t)^3} = \frac{M^{\mathrm{tot}} r^3}{R_0^{\,3} q(t)^3} = \frac{M^{\mathrm{tot}} r^3}{R_0^{\,3}}\,\frac{T^2}{(T+t)^2}$$

Applying this for $p(t)$, with the use of Susskind's theorem (see $(*)$ on page 106), equation (12) for the peculiar motion assumes the following form:

$$\ddot{\mathbf{p}}(t) = \frac{GM^{\mathrm{tot}}T^2}{R_0^{\,3}(T+t)^2}\,\mathbf{p}(t) = -\frac{2}{9}\frac{p(t)}{(T+t)^2} \text{ with } \mathbf{p}(t_0) = \mathbf{0}, \text{ and } \dot{\mathbf{p}}(t_0) = \mathbf{w}_0 \tag{14}$$

This equation for $\mathbf{p}(t)$ indicates its co-linearity with $\ddot{\mathbf{p}}(t)$. Hence, according to the initial conditions, the solution is colinear with the initial velocity $\dot{\mathbf{p}}(t_0) = \mathbf{w}_0$. Therefore, the only function to be found is the scalar function $p(t)$ such that $p(t)\mathbf{w}_0/|\mathbf{w}_0| = \mathbf{p}(t)$, for all t. This equation assumes the form:

$$\ddot{p}(t) = -\frac{2}{9}\,\frac{p(t)}{(T+t)^2} \text{ with } p(t_0) = 0, \text{ and } \dot{p}(\mathrm{t}_0) = w_0 \tag{15}$$

This problem possesses the unique solution given by

$$p(t) = 3\,w_0\,(T + t_0)\left(\left(\frac{t+T}{t_0+T}\right)^{2/3} - \left(\frac{t+T}{t_0+T}\right)^{1/3}\right) \tag{16}$$

Indeed, by the uniqueness theorem for ODE it sufficies to verify the equation and the initial conditions, which is left without details. It follows that

$$\dot{p}(t) = w_0\left(2\left(\frac{t+T}{t_0+T}\right)^{-1/3} - \left(\frac{t+T}{t_0+T}\right)^{-2/3}\right) \tag{17}$$

$$\ddot{p}(t) = -\frac{2}{3}\frac{w_0}{t_0+T}\left(\left(\frac{t+T}{t_0+T}\right)^{-4/3} - \left(\frac{t+T}{t_0+T}\right)^{-5/3}\right) \tag{18}$$

Now, let us compare the velocity and the acceleration of the probe with the simultaneous particle of the universe occupying the same position $p(t)$. Its equation

of motion, due to the consequences of uniformity expressed by equations (10) imply

$$\dot{r}(t) = \frac{2}{3}\frac{r(t)}{t+T} = \frac{2}{3}\frac{p(t)}{t+T} = 2w_0\left(\left(\frac{t+T}{t_0+T}\right)^{-1/3} - \left(\frac{t+T}{t_0+T}\right)^{-2/3}\right)$$

$$\dot{r}(t) = -\frac{2}{9}\frac{r(t)}{(t+T)^2} = -\frac{2}{9}\frac{p(t)}{(t+T)^2} = -\frac{2}{3}\frac{w_0}{t_0+T}\left(\left(\frac{t+T}{t_0+T}\right)^{-4/3} - \left(\frac{t+T}{t_0+T}\right)^{-5/3}\right)$$

As a consequence, the speed and the acceleration of the probe with respect to the instantaneously occupied particle of the universe are as follows:

$$\dot{p}(t) = \dot{r}(t) = w_0\left(\frac{t+T}{t_0+T}\right)^{-2/3}, \quad \ddot{p}(t) - \ddot{r}(t) = 0$$

The later equality is obvious: the probe and the particle of the universe standing at the same position are moving with the same acceleration, since it is caused by the gravitation of the same part of the universe.

3. Spherically symmetric universes without B-B

3.1. A smooth process of release of the matter from the center

The non-instantaneous release of the matter from the center into the space is characterized by a non-constant function τ introduced in Section 1. Its value $\tau(M)$ denotes the instant of release of particles which are supposed to comove with the surface of the central ball containing the matter of mass M. To the end of this work we still assume conditions (A.1-7) and specify the impact of the variability of τ under the assumptions:

$$\tau \text{ is continuous on } [0, M^{\text{tot}}],\ \tau' < 0 \text{ on } (0, M^{\text{tot}}),\ \tau(-T) = M^{\text{tot}},\ \tau(0) = 0 \qquad (19)$$

From this it follows that the mass of the center satisfies $M_0(t) = M^{\text{tot}}$, for $t < -T$, and next

$$M_0(t) = \tau^{-1}(t) \text{ for } -T \le t \le 0;\ M_0(t) = 0 \text{ for } t > 0 \qquad (20)$$

Moreover, for $r \in [0, r(t|M)]$ there exists exactly one $M_t(r) \in [M_0(t), M^{\text{tot}}]$ for which

$$r(t|\, M_t(r)) = r \tag{21}$$

According to assumption (A.6) the volume of the central ball containing the universe matter of mass M is given by

$$V(t|M) := \frac{3}{4}\pi\, r(t|M)^3 = 6\,\pi\, G\, M\, (t - \tau(M))_+^2 \text{ , for } t \geq -T \tag{22}$$

Thus, the average density of this ball equals:

$$\rho^{av}(t|M) = [6\,\pi\, G\, (t - \tau\,(M))_+^2]^{-1}, \text{ for } t > -T \tag{23}$$

Obviously, for every $t \geq -T$, functions $V(t|M)$ and $r(t|M)$ by condition (19) are continuous, equal 0 for $M \leq M_0(t)$ and strictly increasing in $[M_0(t), M^{tot}]$.

3.2. Non-homogeneity of the density

Due to the spherical symmetry, the *local density* is a function dependent on instant $t > -T$ and radius $r \in (0, r(t|M^{tot}]$ (the central point is omitted since it is possibly of positive mass). We define it and calculate as follows:

$$\rho_t(r) := \frac{1}{4\pi r^2}\frac{\partial M_t(r)}{\partial r}\left[\frac{\partial V(t|M)}{\partial M}\right]^{-1} \text{ , whenever } t > \tau\,(M),\ M = M_t(r)$$

According to (22) we obtain then

$$\rho_t(r) = [6\,\pi\, G\, (t - \tau\,(M)) + (t - \tau\,(M) - 2\, M\, \tau'(M))]^{-1} \tag{24}$$

COROLLARY. *Under the above assumptions, if additionally function* $-M\,\tau'(M)$ *is increasing in* $M \in [0,\ M^{tot}]$, *then the local density* $\rho_t(r)$ *is decreasing in* $r \in [0,\ r_t(M^{tot})]$.

It is interesting that the monotonicity of the product $M\tau'(M)$ is satisfied for the model in which the release of the matter is governed by any positive power function of the form $\tau(M) = -T\left(\frac{M}{M^{tot}}\right)^p$, $M \in [0,\ M^{tot}]$, with $p > 0$, since then $M\,\tau'(M) = -pT\left(\frac{M}{M^{tot}}\right)^p$.

3.3. Calculating the anisotropy of expansion

Let us start with the *transversal relative expansion rate* defined for any pair of points $\mathbf{u}\, r_t(M)$, $\mathbf{w}\, r_t(M)$ on the same central sphere of radius $r_t(M)$ as follows ($\mathbf{u}$ and $\mathbf{w}$ stand for arbitrary different unit vectors). It equals the ratio of the size of the relative velocity and the distance, which due to spherical symmetry is independent of the direction of the vectors:

$$\lambda_t^{\perp}(r;\, \mathbf{u},\, \mathbf{w}) := \frac{\left|\mathbf{u}\dot{r}(t|M) - \mathbf{w}\dot{r}(t|M)\right|}{\left|\mathbf{u}r(t|M) - \mathbf{w}r(t|M)\right|} = \frac{\left|\dot{r}(t|M)\right|}{r(t|M)}, \text{ whenever } M = M_t(r),\ t > \tau(M)$$

In our model of smooth release of the matter to the space determined by function τ satisfying (19) we have (cf. (10) for the homogeneous universe):

$$\lambda_t^{\perp}(r) = \frac{\partial}{\partial t}\ln(\mathrm{t} - \tau(\mathrm{M}))^{2/3} = \frac{2}{3(t-\tau(M))}, \text{ whenever } M = M_t(r),\ t > \tau(M) \qquad (25)$$

The *radial relative expansion rate* is defined differently, since it is related to the different speed of expansion of different spheres:

$$\lambda_t^{\mathrm{II}}(r) = \lim_{\Delta\to 0}\frac{\dot{r}(t|M+\Delta) - \dot{r}(\mathrm{t}|\mathrm{M})}{\dot{r}(t|M+\Delta) - \dot{r}(\mathrm{t}|\mathrm{M})}, \text{ whenever } M = M_t(r),\ t > \tau(M)$$

if the limit exist. Our assumptions (19) allow us to state:

$$\lambda_t^{\mathrm{II}}(r) = \frac{\partial}{\partial t}\ln\left(\frac{\partial r(t|M)}{\partial M}\right), \text{ whenever } M = M_t(r),\ t > \tau(M)$$

In order to express it in terms of function τ, we can use the equality:

$$\ln\frac{\partial r(t|M)}{\partial M} = \ln\frac{\partial r(t|M)^3}{\partial M} - \ln(3r(t|M)^2)$$

which allows us to write:

$$\lambda_t^{\mathrm{II}}(r) = \frac{\partial}{\partial t}\ln\{(t-\tau(M) + [t-\tau(M) - 2Mr'(M)]\} - 2\frac{\partial}{\partial t}\ln\{(t-\tau(M))^{2/3} = \frac{2}{3(t-\tau(M))}\left[1 + \frac{3M\tau'(M)}{t-\tau(M)-2M\tau'(M)}\right]. \qquad (26)$$

Comparing the equations (25) and (26) we arrive at the following
COROLLARY. *Under the above assumptions the local radial and transversal relative expansion rates satisfy* $\lambda_t^{\mathrm{II}}(r) < \lambda_t^{\perp}(r)$, *whenever* $M = M_t(r)$, $t > \tau(M)$.

4. Closing remarks

We have omitted any detailed analysis of a parameter corresponding to the Hubble constant in the non-homogeneous models, since any reasonable definition should be dependent on more than two points and/or instants. The shown coincidence of the formula for the Hubble constant of homogeneous universe and the transversal relative expansion rate can be seen as a tip for the justified choice of some characteristics.

A more serious question is the reason of why we should consider non-homogeneous evolution of the universe. The authors opinion is that it might be a starting point for alternative explanation of some anisotropies well recognized within the relict microwave cosmic radiation. For low value of time of duration T of the beginning of the universe if compared to the current age t, a rough analysis of (25, 26) shows that the radial-to-transversal ratio of the rate of expansions differs from 1 of a quantity of order $\frac{M}{M_0}\frac{T}{t}$, where the first factor measures the relative position of the observer with respect to the size of the universe. This should be somehow indicated by the amplidutes of the sphericals $Y_l^{(m)}(\Theta,\varphi)$ with $l \leq 2$ in the expansion of the angular map of the microwave radiation. This way of analysis is presented e.g. in [1], for a broad presentation of the methods of searching and analysis of the relict radiation – see [7]. Unfortunately, the results are devoted to higher order sphericals with possible emphasize or just the first order terms (consisting of sphericals with $l \leq 1$, only). The latter are so much interesting since they confirm very well the speed of our solar system through the space, see e.g. George F. Smoot's *Nobel Lecture* [5], who expressed the following widely assumed interpretation:

"*The current best observed dipole 3.358 ± 0.017 mK indicates that the solar system is moving at 368 ± 2 km/sec relative to the observable universe in the direction galactic longitude l =263.86° and latitude b = 48.25° with an uncertainty slightly smaller than 0.1 (Jarosik et al., 2006 [2]). etc.*"

Hopefully, the presented here non-uniformity caused by the extended time of creation of the universe gives a chance for explaning some other anisotropies or new explanation of already explained phenomena by other causes.

References

1. de Bernardis P., Masia S., *The cosmic microwave background: observing directly the early universe*, „ Proc. SPIE 8442, Space Telescopes and Instrumentation" (Optical, Infrared, and Millimeter Wave) 2012, vol. 8442, 844203, doi: 10.1117/12.979916 https://doi.org/10.1117/12.979916.
   (1 Aug. 2012 arXive version: https://arxiv.org/abs/1208.0298v1)

2. Jarosik N.,, Barnes C., Greason M.R. et al., *Three-year Wilkinson microwave anisotropy probe (WMAP) observations: Beam profiles, data processing, radiometer characterization and systematic error limits*, „The Astrophysical Journal Supplement Series" 2007, vol. 170, no. 2, doi: 10.1086/513697. http://iopscience.iop.org/article/10.1086/513697/pdf (27.02.2006 arXiv version: https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0603452.pdf).
3. Landau L.D., Lifshitz E.M., *Teoriya Polya*, [in:] *Nauka* (6th ed., in Russian), Moskva 1973 [Polish edition: Landau L.D., Lifszyc E.M., *Teoria pola*, PWN, Warszawa 1977].
4. Rindler W., *Relativity – Special, General, and Cosmological* (2nd ed.), 0xford University Press, Oxford 2006
5. Smoot G.F., *Nobel Lecture: Cosmic microwave background radiation anisotropies: Their discovery and utilization*, „Rev. Mod. Phys." 2007, vol. 79, no. 3, doi: 10.1103/RevModPhys.79.1349.
https://cdn.journals.aps.org/files/RevModPhys.79.1349.pdf
6. Susskind L., *Cosmology Lectures*, 2013; available by links to YouTube from https://m.kevinkimball.net/Susskind--Cosmology-Lectures.html.
7. Wallish B., *Cosmological Probes of Light Relics*, dissertation for the degree *Doctor of Philosophy*, University of Cambridge, Dept. of Applied Mathematics and Theoretical Physics, June 2018, https://www.repository.cam.ac.uk/bitstream/handle/1810/283003/PhD_BenjaminWallisch.pdf?sequence=1&isAllowed=y
8. Weinberg S., *Gravitation and Cosmology: Principles and Applications of the General Theory of Relativity*, John Wiley & Sons, Inc., New York–London–Sydney–Toronto 1972.

O ZMODYFIKOWANYM NEWTONOWSKIM WSZECHŚWIECIE SUSSKINDA BEZ WIELKIEGO WYBUCHU
Przypadek masy skończonej o rozkładzie sferycznie symetrycznym

Streszczenie: *Szczegółowo rozważono podstawy modelu rozszerzającego się wszechświata Susskinda o symetrii sferycznej (niekoniecznie jednorodnego) opartego na newtonowskich siłach grawitacji, odpowiadającego tzw. prędkościom ucieczki. Przedstawiono ścisłe sformułowanie ewolucji w przypadku skończonej masy wszechświata. Każdy szczególny model odpowiadający prędkościom ucieczki charakteryzuje się funkcją czasu opisującą proces uwalniania się materii do przestrzeni z punktu centralnego. Pokazano, że jednorodność rozkładu masy w przynajmniej jednej chwili w pewnej skończonej kuli jest konieczna i wystarczająca dla istnienia Wielkiego Wybuchu (W-W) (gdy cała masa jest uwolniona w jednej chwili). Wówczas lokalny współczynnik Hubble'a i gęstość wszechświata są stałymi zależnymi co najwyżej od jego wieku. Wyprowadzono pewne formuły dla zilustrowania, w jaki sposób niejednochwilowe uwolnienie materii z punktu centralnego implikuje niejednorodność rozkładu masy i anizotropię współczynnika względnego rozszerzania się, a tym samym brak globalnej stałej Hubble'a.*

Acknoledgements

The author thanks Professors Jonathan Doolin and George Dishman for valuable discussion on the subject of this article.

Stefan Sokołowski

ANIMOWANA GRAFIKA OPARTA NA PRAWACH RUCHU – KOMPUTEROWE WSPOMAGANIE NAUKI FIZYKI

Ten artykuł jest opisem i przewodnikiem po internetowej pomocy naukowej dla studentów lub uczniów, a ma na celu ułatwienie zrozumienia zagadnień mechaniki klasycznej – trajektorii ciał poruszających się z danym przyspieszeniem. Aplikacja może być traktowana jako wirtualne laboratorium, w którym użytkownicy mogą szybko i łatwo przeprowadzać własne eksperymenty. Po wypełnieniu formularza na ekranie matematycznym opisem ruchu użytkownik widzi obraz kulki poruszającej się zgodnie z tym opisem. To daje sposób odkrywania praw natury: zaproponować prawo i porównać ruch na ekranie z rzeczywistym, by potwierdzić lub obalić to prawo. W artykule rozważono kilka przykładowych wirtualnych eksperymentów oraz wyjaśniono mechanizm działania animacji.

Wprowadzenie

Władza, jaką ma fizyk lub inżynier nad światem, w dużej części bierze się ze wzorów matematycznych opisujących ten świat. Znalezienie wzoru, opisującego fragment rzeczywistości i prawidłowo przewidującego jego zachowanie, jest zasadniczym krokiem do panowania nad tym fragmentem rzeczywistości. Rozumienie związku między światem a wzorami powinno więc stanowić jeden z głównych celów nauczania fizyki.

W procesie poznawczym na ogół mamy do czynienia najpierw z obserwacjami, a potem dopiero ze wzorami. To, że tory planet są eliptyczne[1], było wiadome, jeszcze zanim Newton sformułował prawo ciążenia, z którego ta eliptyczność wynika. Fakt, że zmienne pole magnetyczne wzbudza prąd w przewodniku, był znany przed sformułowaniem równań Maxwella. Ale we wszystkich przypadkach dopiero poznanie zależności matematycznych dało odkrywcom pełne zrozumienie zjawisk.

Jednym ze sposobów dotarcia do wiedzy przyrodniczej jest podążanie tą samą drogą: wykonać eksperyment, zaproponować wzór opisujący wielkości w nim zmierzone i zbadać jego implikacje; jeśli zgadzają się z rzeczywistością eksperymentalną, zaufać wzorowi.

[1] Jak każdy dobrze wie, są eliptyczne albo paraboliczne, albo hiperboliczne – o ile można bez wielkiego błędu założyć, że interesują nas tylko dwa masywne ciała w poza tym pustej i nieskończonej przestrzeni. W tym opracowaniu nie rozważam żadnych efektów relatywistycznych.

Publicznie dostępna aplikacja internetowa

http://iis.pwsz.elblag.pl/~stefan/Fiz

stanowi wirtualne laboratorium do testowania wzorów **mechaniki klasycznej** (por. klasyczne podręczniki [1] lub [2]). W okienka formularza użytkownik wpisuje:

- wzór na przyspieszenie ciała oraz
- jego początkowe położenie i początkową prędkość (patrz punkt 1 poniżej) i widzi na ekranie kulkę biegnącą wg podanego wzoru.

Należy podkreślić, że aplikacja „nie zna się" na fizyce. Jest ślepo posłuszna wpisanym wzorom i nigdy nie powie użytkownikowi, że idzie on złą drogą. Jedynym ostrzeżeniem będzie rozbieżność między ruchem ciała w rzeczywistości i jego obrazem na ekranie.

Poniżej zostanie wyjaśnione oraz zilustrowane na kilku przykładach, jak działa aplikacja i jak jej używać. W niektórych przypadkach otrzymane efekty zaskoczyły samego autora. Jednak czytelnik powinien wykonać jakieś własne eksperymenty, nie poprzestając na przykładach z tej pracy. Również recenzent tej pracy proszony jest o osobiste „pobawienie się" aplikacją, zanim napisze recenzję.

W dalszej części pracy zostanie omówiona matematyka, która umożliwiła aplikacji działanie. Trzeba ją rozumieć na tyle, żeby w sytuacji niepoprawnego ruchu na ekranie umieć odróżnić nieadekwatność wpisanych przez siebie wzorów od artefaktów spowodowanych numerycznymi błędami przybliżeń w aplikacji. W końcu wyniki eksperymentów prowadzonych w prawdziwych (niewirtualnych) laboratoriach też nie zawsze od razu zgadzają się z rzeczywistością pozalaboratoryjną.

Praca kończy się propozycjami przyszłych rozszerzeń projektu.

1. Uruchamianie aplikacji

Po otwarciu witryny o wspomnianym już adresie

http://iis.pwsz.elblag.pl/ ~stefan/Fiz

użytkownik widzi okno wyglądające podobnie do przedstawionego na rysunku 1 (s. 118). Po prawej stronie okna znajduje się formularz, w który należy wpisywać wzory. Po lewej znajduje się animowany rysunek ruchu wg tych wzorów. Jeśli te dwie części na siebie nachodzą lub są zbyt daleko albo jeśli nie cały formularz jest widoczny, to należy poeksperymentować ze zwiększaniem i zmniejszaniem tekstu w części formularzowej (Ctrl-+ i Ctrl-–) i ewentualnym odświeżeniem okna przeglądarki (Ctrl-r).

1.1. Zadawanie parametrów ruchu

Najważniejsze rubryki formularza to:

- a_x i a_y wyrażające przyspieszenie kulki w punkcie (x, y) płaszczyzny (przy czym $-1 \le x, y \le 1$),
- x_0 i y_0 wyrażające początkowe położenie kulki oraz
- vx_0 i vy_0 wyrażające prędkość początkową.

Na przykład dla zilustrowania ruchu piłki rzuconej *poziomo* z prędkością 9 km/h z wysokości 1 metra można formularz wypełnić tak:

- na piłkę działa tylko grawitacja pionowo, więc $a_x = 0$; w dół, więc $a_y = -9{,}8$ m/s^2,
- początkiem ruchu jest punkt o $x_0 = -1$ (żeby wykorzystać całą szerokość rysunku) i $y_0 = 1$ m,
- 9 km/h to 2,5 m/s, więc $vx_0 = 2{,}5$; rzut jest poziomy, więc $vy_0 = 0$.

To jest wyjątkowo prosty przykład, ze stałym przyspieszeniem. W ogólnym przypadku przyspieszenie może zależeć od chwilowego położenia, prędkości i czasu – i w rubryki dotyczące przyspieszenia można wpisać dowolny wzór zawierający zmienne *x*, *y*, *vx*, *vy*, *t* oraz wywołania funkcji:

floor (zaokrąglenie w dół)	tg (tangens)
ceil (zaokrąglenie w górę)	arcsin (arcus sinus)
round (zaokrąglenie do najbliższej całkowitej)	arccos (arcus cosinus)
abs (wartość bezwzględna)	arctg (arcus tangens)
exp (eksponens)	ln (logarytm naturalny)
sin (sinus)	pow (potęga)
cos (cosinus)	sqrt (pierwiastek kwadratowy)

Pozostałe rubryki formularza mają znaczenie pomocnicze lub komentarzowe:

- **pomocniczy kod** – miejsce na zdefiniowanie własnych wartości pomocniczych zależnych od położenia, prędkości i czasu; tych zmiennych można potem użyć w definicji przyspieszenia,
- **krok przybliżenia** – dokładność rysunku. Zbyt duża liczba powoduje duże błędy zaokrągleń; zbyt mała – spowolnienie animacji,
- **tło** – ścieżka do obrazka, który ma być podłożony pod rysunek, żeby łatwiej było zilustrować zjawisko. Obecność tego obrazka sama z siebie nie wpływa na ruch kulki.

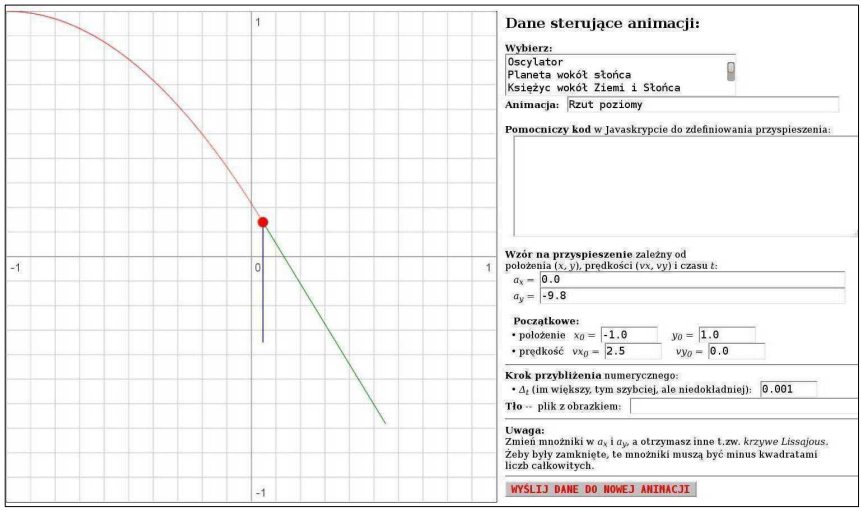
W rubryce **Wybierz** znajduje się kilka predefiniowanych eksperymentów. Zostaną one omówione w punkcie 2. Rubryka **Uwaga** dotyczy niektórych z tych predefiniowanych wzorów.

1.2. Wygląd animacji

Na rysunku otrzymujemy ruchomą **czerwoną** kulkę, jej ślad (trajektorię) oraz dwa ruchome wektory:

- **niebieski** przedstawiający chwilową prędkość oraz
- **zielony** przedstawiający chwilowe przyspieszenie.

Uwaga dotycząca prędkości animacji: aplikacja musi czasem wykonać dosyć skomplikowane obliczenia dla znalezienia następnej pozycji kulki. Ustalenie małego kroku powoduje, że te obliczenia trzeba wykonywać częściej, może więc spowolnić animację. Należy też pamiętać, że nawet kiedy kulka wyleci poza rysunek, to nadal leci i jej kolejne pozycje nadal są obliczane, chociaż już jej nie widać.



Rysunek 1. Okno aplikacji

1.3. Technikalia informatyczne

Aplikacja wykorzystuje klasykę internetową:

- HTML – por. [3],
- PHP – por. [4],
- JavaScript – por. [5].

Obliczenia ruchu ciał zaprogramowane są w JavaScripcie i wykonywane na komputerze użytkownika, a nie na serwerze. Wobec tego, jeśli ruch na ekranie jest zbyt wolny, może pomóc przeniesienie się na szybszy komputer. Rysunki również są wykonywane przez program javascriptowy.

Wzory wpisane do rubryk formularza są bez zmiany i interpretacji kopiowane do programu javascriptowego. Ich składnia powinna więc być javascriptowa – w razie wątpliwości należy zajrzeć do jakiegoś podręcznika JavaScriptu (np. [5]). Ale czytelnik, choć trochę zaznajomiony z notacją matematyczną dowolnego języka programowania, powinien poradzić sobie z nimi bez zaglądania do podręcznika.

Błąd składniowy w takim wzorze może jednak spowodować:

- albo brak kulki na planszy,
- albo w ogóle brak rysunku planszy,
- albo inne niepożądane skutki typowe dla niezamierzonego „wstrzyknięcia kodu” (por. np. [6]) do formularza internetowego.

Program nie zawiera żadnej ochrony przed takimi błędami.

Własne zmienne pomocnicze należy wprowadzać w rubryce **Pomocniczy kod** i ich pierwsze użycie poprzedzać deklaracją złożoną ze słowa var, nazwy zmiennej i średnika. W deklarację może być włączona inicjalizacja zmiennej, np.

```
var opor=0.03;
var vv=sqrt(vx*vx+vy*vy);
```

Należy unikać jednoliterowych nazw zmiennych, bo mogą wejść w kolizję z używanymi w samym programie. Lepsze są nazwy długie i nietypowe.

Aplikacja powinna działać we wszystkich „poważnych" przeglądarkach; tzn. takich, które obsługują javascriptowy element *canvas*. O ile autorowi wiadomo, w przeglądarce Internet Explorer jest on dostępny dopiero od roku 2014, a w Chrome od 2009. Inne popularne przeglądarki (Firefox, Opera, Safari) stały się „poważne" kilka lat wcześniej.

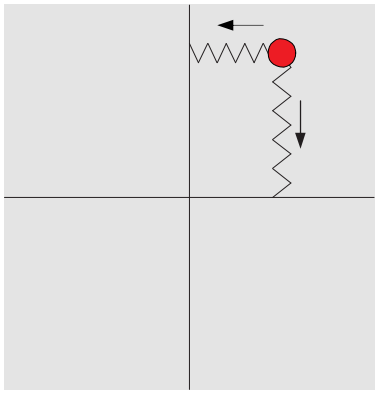
System operacyjny u klienta nie ma znaczenia dla funkcjonowania aplikacji.

2. Przykłady eksperymentów

W tym punkcie omówiono eksperymenty predefiniowane i łatwo dostępne z rubryki **Wybierz** formularza. Czytelnik proszony jest o zapoznanie się z nimi i wykonanie jakichś ich wariantów wg własnej inwencji.

2.1. Oscylator harmoniczny

Dwuwymiarowy oscylator (rys. 2) otrzymujemy, gdy osie układu współrzędnych przyciągają kulkę z siłą proporcjonalną do jej odległości od osi – im większe wychylenie od położenia początkowego, tym silniejsze przyciąganie. Kulka jest „na sprężynkach" ślizgających się po osiach.



Rysunek 2. Oscylator harmoniczny

Oznacza to, że wektor przyspieszenia ma kierunek przeciwny do wektora łączącego punkt początkowy (0, 0) z kulką:

$$a_x = -p_x \cdot x$$
$$a_y = -p_y \cdot y$$

gdzie p_x i p_y są jakimiś ustalonymi mnożnikami, oznaczającymi siłę sprężynek. Dla $p_x = p_y$ kulka krąży po elipsie o kształcie zależnym od początkowego położenia i prędkości.

Znacznie ciekawszy jest jednak przypadek, gdy $p_x \neq p_y$ – wynikiem są tzw. krzywe Lissajous.

2.2. Planeta wokół słońca

Na niewielką planetę w sąsiedztwie dużego słońca działa grawitacja[2]. Przyspieszenie grawitacyjne jest skierowane wprost ku jego środkowi masy umieszczonemu w początku układu (0, 0) i ma wartość proporcjonalną do r^{-2}, gdzie $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ jest odległością planety od środka masy słońca. Współczynnik proporcjonalności zawiera masy obu ciał oraz stałą grawitacyjną – ale wielkości te wpływają tylko na wybór jednostek pomiaru, więc nie zostały uwzględnione w animacji. Wobec tego wektor przyspieszenia wyznaczony jest wzorem

$$(ax, ay) = \vec{a} = -\frac{\vec{r}}{r} \cdot r^{-2} = \left(-\frac{x}{r} \cdot r^{-2}, -\frac{y}{r} \cdot r^{-2} \right) \quad (1)$$

Czynnik $\frac{\vec{r}}{r}$ to wektor długości 1 skierowany ku słońcu; czynnik r^{-2} to wartość przyspieszenia grawitacyjnego w odległości r od słońca.

Do rubryki **Pomocniczy kod** zostało wpisane

```
var  odl=sqrt(x*x+y*y),
     zal_a_od_odl  =  pow(odl,-2);
```

co definiuje zmienne odl (odległość), czyli r, oraz zal_a_od_odl (zależność przyspieszenia od odległości).

Tak zdefiniowane zmienne zostały użyte w definicji przyspieszenia:

$$a_x = -x/odl * zal_a_od_odl$$
$$a_y = -y/odl * zal_a_od_odl$$

w zgodzie ze wzorem (1).

Położenie początkowe i prędkość początkowa zostały wypełnione „rozsądnie” (nie stało za tym żadne wyliczenie) – i planeta zaczęła krążyć wokół słońca po elipsie.

W miarę zwiększania prędkości początkowej vy_0 elipsa staje się coraz bardziej „pękata”; w okolicach wartości 1.12 staje się okręgiem; przy dalszym zwiększaniu

[2] Założenie, że słońce ma dużą masę, a planeta małą, potrzebne jest do tego, żeby nie musieć rozróżniać między środkiem masy słońca a środkiem masy układu słońce–planeta. Poza tym jest nieistotne.

prędkości początkowej jej trajektoria zaczyna wychodzić poza rysunek i wracać. A w końcu opuszcza rysunek i już nie wraca – osiąga tzw. prędkość ucieczki.

Jak dotąd wszystko jest zgodne z klasyczną mechaniką Newtona. Ale co się stanie, jeśli prędkość początkowa planety będzie, przeciwnie, coraz mniejsza? Jeśli jest zerowa, to planeta zaczyna spadać na słońce, przenika do jego wnętrza[3], a potem… znika. Tak naprawdę nie tyle znika, ile zostaje wystrzelona poza rysunek z olbrzymią prędkością, biorącą się z olbrzymiego przyspieszenia – bo r^{-2} jest bliskie nieskończoności dla r bliskiego zeru. To już nie jest Newton, to jest artefakt przybliżeń numerycznych. Żeby takich artefaktów uniknąć, należy nie dopuszczać do sytuacji, gdy przyspieszenie staje się zbyt duże.

Teraz spróbujmy innych modyfikacji. Co się dzieje, kiedy przyspieszenie jest proporcjonalne nie do r^{-2}, tylko do niewiele różniącego się $r^{-1.99}$ lub $r^{-2.01}$? Wtedy planeta porusza się po „obracającej się" elipsie – to nie jest nic nowego, wiedział to już Newton[4]. Żeby uniknąć spadania planety na słońce, ewentualnie jej ucieczki do nieskończoności, w miarę oddalania się od standardowego r^{-2}, musimy modyfikować również prędkość początkową vy_0. Ale dla grawitacji proporcjonalnej do r^{-3} (czyli zal_a_od_odl = pow(odl,3)) żadna prędkość początkowa nie jest już właściwa. Gdyby w naszym Wszechświecie obowiązywało takie prawo ciążenia zamiast newtonowskiego, to w ogóle nie istniałyby stabilne orbity.

2.3. Księżyc wokół Ziemi i Słońca

Pozostańmy jeszcze przez chwilę w przestrzeni kosmicznej. Jak zobaczyć na ekranie układ złożony z krążących wokół siebie Słońca, Ziemi i Księżyca? Natrafiamy tutaj na trudności. Pierwsza dotyczy tzw. problemu trzech ciał. Otóż ciała niebieskie krążą po elipsach, gdy są tylko dwa w pustym wszechświecie. Jeśli jest ich więcej, to ich ruchy mogą być całkiem chaotyczne; w szczególności nie wyrażają się przez żadne gotowe wzory. Jednak można ich ruch przybliżać numerycznie, krok za krokiem – to właśnie robi omawiana aplikacja.

Druga trudność wynika z kosmicznych odległości. Średnica orbity Księżyca w ruchu wokół Ziemi wynosi ok. 770 tys. km, a średnica orbity Ziemi w ruchu wokół Słońca wynosi ok. 300 mln km – czyli ok. 390 razy więcej. Jak coś takiego przedstawić z zachowaniem skali na ekranie, którego rozdzielczość wynosi, powiedzmy, 2000×1500 pikseli[5]?

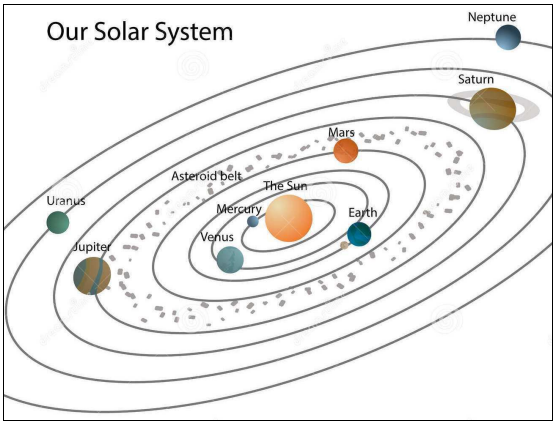
Jeśli przyjmiemy, że 1 piksel odpowiada 150 000 km, to orbita Ziemi ledwie zmieści się na ekranie na szerokość, ale już nie zmieści się na wysokość; a orbita Księżyca będzie miała niewiele ponad 5 pikseli średnicy, czyli nie będzie się

[3] Ta aplikacja liczy tak, jakby kulka była punktem.

[4] Newton próbował wyjaśnić precesję orbitalną Merkurego i Księżyca przez modyfikację wzoru na grawitację. W końcu jednak zdecydował, że wzoru nie należy ruszać, a raczej wziąć pod uwagę niewielką dodatkową grawitację, pochodzącą od innych ciał niebieskich znajdujących się w Układzie Słonecznym.

[5] Wprawdzie nie ma takich monitorów, ale tak przyjmijmy dla uproszczenia rachunku.

oddzielać od rysunku Ziemi. W zasadzie wszystkie przedstawienia Układu Słonecznego, jakie czytelnik kiedykolwiek mógł widzieć na ekranie lub na kartach książek (np. na rys. 3), to wizje artystyczne pozbawione skali. Inaczej albo nie mogłyby się tam zmieścić, albo nie byłoby nic widać.



Rysunek 3. Graficzna prezentacja Układu Słonecznego (Dreamstime.com)

Musimy pójść tą samą drogą i zrezygnować z zachowania skali: powiększyć rozmiary orbity Księżyca względem rozmiarów orbity Ziemi. Jednak to oznacza znaczne oddalenie Księżyca od Ziemi i nieproporcjonalnie duże wahania jego odległości od Słońca. Skutkiem tego grawitacja słoneczna będzie na Księżyc działać inaczej niż w rzeczywistości.

Wynikiem raczej prób niż obliczeń jest uzyskany w tym przykładzie ruch okrężny Księżyca wokół (niewidocznej na rysunku) Ziemi, krążącej po okręgu wokół Słońca. Oczywiście skala się nie zgadza; ale w dodatku długość roku się nie zgadza: na jeden obieg Księżyca i Ziemi wokół Słońca przypada ok. 14 obiegów Księżyca wokół Ziemi, zamiast 12.

2.4. Squash – wzory warunkowe

Squash jest grą polegającą na odbijaniu piłki o ściany i podłogę. Żadna więcej wiedza o jej zasadach nie jest potrzebna dla prześledzenia tego przykładu.

Jak zapisać wzorem odbicie piłki od ściany? W aplikacji możemy zadawać tylko przyspieszenia. Trzeba więc napisać, że od momentu zetknięcia brzegu piłki ze ścianą szybko narasta *przyspieszenie odbicia* skierowane **od** ściany. Uderzenie o ścianę chwilowo odkształca elastyczną piłkę, przyspieszenie jest tym większe, im bardziej środek piłki zbliża się do ściany:

$$a_x = (x<-0.88\ ?\ 1000*(-44-50*x) : x>0.88\ ?\ 1000*(44-50*x) : 0)$$
$$a_y = (y<0.02\ ?\ 1000*(1-50*y) : 0) \qquad (2)$$

Z powyższych wzorów[6] wynika, że na wysokości 0.02 środka piłki (tuż nad podłogą) przyspieszenie odbicia jeszcze jest zerowe, ale na wysokości 0 wynosi już 1000 (stukrotnie więcej niż grawitacyjne), a między tymi skrajnościami jest interpolowane liniowo. Podobnie dzieje się przy uderzeniach o ściany.

Jeśli wspomniane przyspieszenie 1000 zmienimy na mniejsze (np. na 100), to piłka będzie „wchodzić w podłogę" i w ścianę. Jeśli zaś będzie bardzo duże (np. 10 000), to pojawią się artefakty numeryczne związane z wysokimi przyspieszeniami (por. uwaga o artefaktach wynikających z dużych przyspieszeń w punkcie 2.2).

W dotychczas omówionych eksperymentach siła działająca na poruszający się obiekt i powodująca przyspieszenie jego ruchu zależała tylko od chwilowego położenia obiektu. W tym przykładzie uwzględniono również przyspieszenie oporu powietrza – proporcjonalne do kwadratu prędkości i przeciwnie skierowane. Tak więc wpisane tam przyspieszenie ma postać taką jak w (2) wzbogaconą o jeszcze jeden składnik odpowiedzialny za opór. Teraz rzucona poziomo piłka nie odbija się bez końca o przeciwległe ściany, ruch z wolna zamiera.

2.5. Planeta wokół dwóch słońc

Ten przykład jest pierwszym, w którym autor przystąpił do eksperymentowania, nie wiedząc z góry, jakich wyników oczekiwać.

Mamy do czynienia z **dwoma** słońcami o równej masie w pewnej odległości od siebie; oraz z niewielką planetą w ich polu grawitacyjnym. Planeta stale podlega silniejszemu przyciąganiu tego słońca, które akurat jest bliżej, ale to drugie słońce też ją przyciąga.

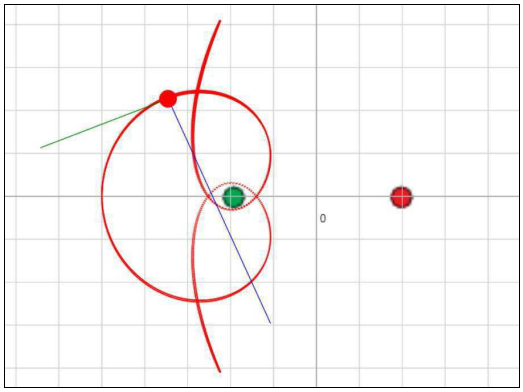
Przykład jest o tyle niefizyczny, że w rzeczywistości takie słońca również powinny się wzajemnie przyciągać i w końcu spaść jedno na drugie. Chyba żeby biegały wokół siebie i siła odśrodkowa równoważyłaby przyciąganie – ale wtedy tor planety byłby całkiem inny. Jednak dałoby się zapewne wykonać dokładnie takie doświadczenie, jak tu opisane, biorąc jednoimienne duże ładunki elektryczne zamiast słońc, a niewielki ładunek elektryczny przeciwnego znaku zamiast planety (por. punkt 2.6). Ładunki elektryczne łatwiej jest unieruchomić, a wzory na przyciąganie są takie same jak dla grawitacji.

Okazuje się, że możliwa jest orbita „ósemkowa" wokół obu słońc. Jednak warunki początkowe tego eksperymentu zostały dobrane przez próby i błędy i wszystko wskazuje na to, że ich niewielka zmiana spowoduje, że w końcu planeta spadnie na któreś ze słońc – jej ósemkowa orbita nie jest stabilna.

[6] Konstrukcja (w ? e_1 : e_2) oznacza znane z wielu języków programowania wyrażenie warunkowe: jeśli warunek w jest spełniony, to wartość e_1, w przeciwnym razie wartość e_2.

2.6. Ładunki przyciągający i odpychający

A co będzie, jeśli jedno ze słońc będzie przyciągać planetę, a drugie odpychać? Ponieważ nie istnieje grawitacja ujemna, taka wersja eksperymentu dotyczy raczej ładunków elektrycznych niż grawitacji.



Rysunek 4. Kształt orbit planet w aplikacji

Orbit w tym doświadczeniu może być dużo różnych, zależnie od wartości początkowych. Zadziwiający kształt ma ta predefiniowana w aplikacji (rys. 4). Ponadto jest ona całkiem niestabilna – po kilku obiegach zielonego ładunku kuleczka (ładunek próbny) spada na ten zielony ładunek. Być może czytelnik potrafi znaleźć jakąś jeszcze ciekawszą orbitę albo orbitę stabilną.

W tym przypadku wykonanie eksperymentu w prawdziwym laboratorium wydaje się możliwe: unieruchomienie dwóch dużych ładunków elektrycznych tak, żeby na siebie nie spadały, jest stosunkowo proste. Autor przypuszcza jednak, że takiej orbity jak zaprezentowana powyżej nie da się uzyskać. Czytelnik proszony jest o próbę zgadnięcia dlaczego, a w ostateczności o przeczytanie przypisu[7].

3. Matematyczne podstawy funkcjonowania aplikacji

W rozwiązywaniu problemów mechaniki newtonowskiej na ogół tak się dzieje, że z analizy sił, działających na punkt materialny, wynika przyspieszenie, z jakim on się porusza.

[7] Ładunki elektryczne różnoimienne przyciągają się, a jednoimienne odpychają z przyspieszeniem proporcjonalnym do r^{-2} tylko w sytuacjach **statycznych**. Jeśli jednak jeden z nich zacznie się poruszać po krzywoliniowej orbicie, to wytwarza pole magnetyczne i traci energię. W tym przypadku rozbieżność między wynikami eksperymentów wirtualnego i rzeczywistego mogłaby bystrego czytelnika naprowadzić na… równania Maxwella – por. [7].

Jeśli wektor położenia punktu oznaczymy przez $\vec{r}$, jego pierwszą pochodną po czasie (czyli wektor prędkości) przez $\dot{\vec{r}}$, a jego drugą pochodną (czyli wektor przyspieszenia) przez $\ddot{\vec{r}}$, to z takiej analizy wynika równanie różniczkowe postaci

$$\ddot{\vec{r}}(t) = \vec{F}(t, \vec{r}, \dot{\vec{r}}) \tag{3}$$

Przy dość naturalnych założeniach o funkcji $\vec{F}$, której postać bierze się z rozważań fizycznych, takie równanie ma dokładnie jedno rozwiązanie na funkcję $\vec{r}$ – czyli trajektorię punktu.

Jednak to, że rozwiązanie istnieje, nie oznacza jeszcze, że potrafimy je znaleźć efektywnie, to znaczy we wzorze $\vec{r}$ = … wypełnić kropeczki wyrażeniem zależnym tylko od czasu. Możemy znać funkcję $\vec{F}$ w postaci uwikłanej, z której nie umiemy wyplątać niewiadomych $\vec{r}$ i $\dot{\vec{r}}$. W wielu przypadkach dysponujemy nawet dowodem, że rozwiązanie wprawdzie jest, lecz nie wyraża się przez funkcje elementarne. Ale przecież **musimy** znaleźć trajektorię! Jeśli nie daje się jej opisać analitycznie (czyli wyrazić wzorem), to trzeba się zgodzić na przybliżone *rozwiązanie numeryczne*.

3.1. Dokładne rozwiązanie równania uproszczonego a przybliżone rozwiązanie równania dokładnego

Kiedy równania nie da się rozwiązać efektywnie, wtedy jednym ze sposobów może być niewielka zmiana równania tak, żeby stało się łatwiejsze. Tak tradycyjnie czyni się np. przy omawianiu wahadła. Dokładne równanie ma postać

$$\ddot{\Theta} + \frac{g}{l} \cdot \sin\Theta = 0 \tag{4}$$

gdzie:

$\Theta(t)$ – zmieniający się kąt odchylenia od pionu,
g – przyspieszenie grawitacyjne,
l – długość ramienia wahadła (por. np. [8]).

Ponieważ dla małych kątów Θ wartość $\sin\Theta$ jest bardzo bliska samemu Θ, można bez popełnienia dużego błędu zastąpić (4) przez znacznie prostsze do rozwiązania równanie

$$\ddot{\Theta} + \frac{g}{l} \cdot \Theta = 0$$

pod warunkiem, że kąty wychylenia wahadła są bardzo małe. A co, jeśli nie są małe? No cóż, wtedy otrzymane rozwiązanie jest niepoprawne.

Inne podejście, zastosowane w omawianej tutaj aplikacji, polega na obliczaniu *przybliżonej* trajektorii krok po kroku; im mniejsze kroki, tym większa dokładność

przybliżenia (ale za to więcej rachunków do wykonania). Wyniki poprzedniego kroku są danymi dla kroku następnego.

Prędkość jest zmianą położenia, więc znając początkowe położenie i początkową prędkość, można wyznaczyć przybliżone położenie po upływie małego czasu Δt:

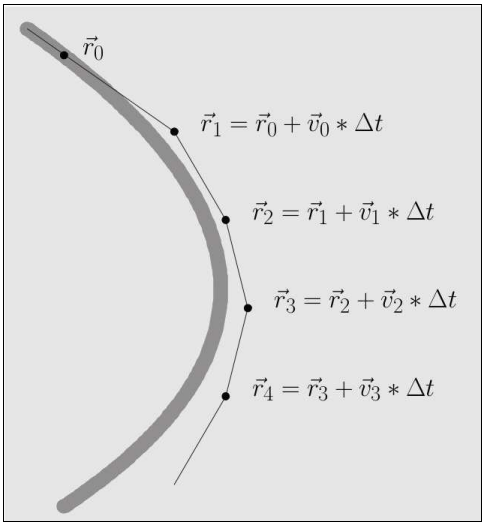
$$\vec{r}(t+\Delta t) = \vec{r}(t) + \vec{v}(t) \cdot \Delta t \tag{5}$$

Do rozpoczęcia obliczeń dla kroku następnego nadal brakuje prędkości w chwili $t + \Delta t$. Ale przyspieszenie jest zmianą prędkości, więc przybliżoną prędkość po upływie czasu Δt można wyznaczyć podobnie:

$$\vec{v}(t+\Delta t) = \vec{v}(t) + \vec{a}(t) \cdot \Delta t \tag{6}$$

– potrzebne przyspieszenie $\vec{a}(t)$ wynika bezpośrednio z podstawowego równania (3).

Wobec tego mamy wszystkie dane do tego, żeby policzyć następny krok. I tak krok za krokiem wyliczamy całą trajektorię; przy czym błąd narasta w miarę, jak oddalamy się od punktu początkowego (rys. 5).



Rysunek 5. Przybliżone rozwiązanie równania różniczkowego

To jest tzw. metoda Eulera rozwiązywania równania różniczkowego. Mówiąc ściśle, otrzymujemy w ten sposób linię łamaną, zamiast gładkiej krzywej. Ale jeśli przedział czasowy Δt jest wystarczająco mały, oko nie zauważy ostrych załamań.

3.2. Metoda zastosowana w aplikacji

W punkcie 3.1 zarysowano ideę przybliżonego rozwiązywania równań różniczkowych postaci

$$\ddot{\vec{r}}(t) = \vec{F}(t, \vec{r}, \dot{\vec{r}})$$

Jednak okazuje się, że przedstawiona tam metoda Eulera jest zbyt mało precyzyjna wobec szybkiej kumulacji błędów przybliżeń. Na przykład obliczony w ten sposób tor planety wokół Słońca staje się spiralą, po której planeta oddala się od Słońca i gubi się w przestworzach. Wyliczone trajektorie teoretycznie są zbieżne z prawdziwymi przy interwale czasowym Δt dążącym do zera; ale ta zbieżność jest tak powolna, że przegrywa z nawarstwiającymi się błędami obliczeń na liczbach rzeczywistych.

Na szczęście istnieją bardziej zbieżne metody numeryczne dla rozwiązywania takich równań. W omawianej aplikacji wykorzystano metodę Rungego-Kutty rzędu 4 – por. [9] lub [10].

Jednak trajektoria wyliczona dowolną przybliżoną metodą iteracyjną w końcu „rozjeżdża się" z rzeczywistą. Maestria wirtualnego eksperymentatora polega na umiejętności skutecznego odróżnienia, kiedy dziwaczność zachowania kulki na ekranie wynika z błędności wzorów wpisanych do formularza aplikacji, a kiedy z artefaktów aproksymacji.

4. Podsumowanie oraz możliwe rozszerzenia projektu

W obecnej wersji aplikacji możemy zobaczyć na ekranie **tylko jedną** ruchomą kulkę. Dlatego np. Księżyc w punkcie 2.3 krąży dookoła *niewidzialnej* Ziemi. Obraz byłby bardziej przekonujący, gdyby Ziemia krążąca wokół Słońca również była widoczna.

Nie ma żadnych zasadniczych przeszkód, żeby ruchomych kulek na ekranie było więcej. Przy rozwiązywaniu równań wszystko jedno jest, czy będziemy rozpatrywać n punktów na płaszczyźnie, czy jeden punkt w przestrzeni $2n$-wymiarowej. Oczywiście potrzebna byłaby trochę większa moc obliczeniowa, ale nie wydaje się, żeby to był wielki problem. Właściwie problemem jest tylko wprowadzanie danych. Już teraz formularz po prawej stronie okna aplikacji jest całkiem spory; dla każdej odrębnie wyświetlanej kulki potrzebny byłby osobny formularz tak samo duży. Zapewne lepsze byłoby zupełnie inne podejście; np. opisywanie całego systemu ruchomych kulek w specjalnie opracowanym języku i translator tego języka na wejściu do aplikacji.

Aplikacja w obecnym kształcie przedstawia ruch tylko na płaszczyźnie.

Jak przedtem, nie jest problemem przeprowadzenie obliczeń dla wersji trójwymiarowej. Jedynym kłopotem może być narysowanie tego na ekranie w odpowiedniej perspektywie tak, żeby było widać, kiedy kulka porusza się w bok, a kiedy np. w głąb. To nie jest już problem rozwiązywania równań, lecz grafiki 3D.

Jak dotąd wszystkie obliczenia prowadzone są przy założeniu, że ruchoma kulka jest pojedynczym punktem, czyli ma zerowe rozmiary. Nie można więc np. uwidocznić ruchomego ramienia wahadła ani odbijania się o bandę wirującej kuli bilardowej (wirowanie wpływa na kąt odbicia).

Żeby móc eksperymentować wirtualnie z ciałami niepunktowymi, potrzebne są bardziej skomplikowane prawa ruchu. To już nie byłaby nowa wersja omawianej aplikacji, tylko całkiem nowa aplikacja.

W trakcie prowadzenia eksperymentu należy pamiętać, że *rzeczywisty* czas jego przebiegu (np. mierzony zegarkiem niezależnym od komputera) może znacznie różnić się od czasu *symulowanego* liczonego przez parametr t i skok Δt. Tak się dzieje szczególnie wtedy, gdy dla otrzymania dokładniejszej trajektorii parametr Δt zostaje bardzo zmniejszony. Wtedy przeglądarka „nie nadąża" z obliczeniami w czasie rzeczywistym.

Nie ma żadnych przeszkód, żeby przeglądarka wyświetlała zegar czasu symulowanego, ale w aktualnej wersji nie zostało to jeszcze zrobione.

W punkcie 2.2 i ponownie w 2.4 zostało wspomniane, że duże przyspieszenia (a raczej: duże zmiany przyspieszeń) powodują artefakty numeryczne, które potrafią całkiem zaburzyć przebieg zjawiska fizycznego.

Radą na to mogłoby być automatyczne dostosowywanie kroku obliczenia Δt – powinien on maleć, gdy przyspieszenia rosną. Jednak ceną za takie zwiększenie dokładności byłaby rosnąca rozbieżność czasu rzeczywistego z czasem symulowanym. W skrajnym przypadku mogłoby się zdarzyć, że czas rzeczywisty, odpowiadający skończonemu odcinkowi czasu symulowanego, byłby nieskończony – ruch kulki na ekranie zwalniałby i zamierał.

Literatura

1. Arnold W.I., *Metody matematyczne mechaniki klasycznej*, PWN, Warszawa 2007.
2. Taylor J.R., *Mechanika klasyczna, Tom 1*, PWN, Warszawa 2007.
3. W3Schools *HTML5 Tutorial*, https://www.w3schools.com/html/ (dostęp: lipiec 2018).
4. W3Schools *PHP5 Tutorial*, https://www.w3schools.com/php/ (dostęp: lipiec 2018).
5. W3Schools *JavaScript Tutorial*, https://www.w3schools.com/js/ (dostęp: lipiec 2018).
6. Hasło: *Code injection*, https://en.wikipedia.org/wiki/Code_injection (dostęp: lipiec 2018).
7. Hasło: *Równania Maxwella*, https://pl.wikipedia.org/wiki/Równania_Maxwella (dostęp: styczeń 2019).
8. Hasło: *Wahadło matematyczne*, https://pl.wikipedia.org/wiki/Wahadło#Wahadło_matematyczne (dostęp: lipiec 2018).

9. Stoer J., Bulirsch R., *Wstęp do metod numerycznych*, PWN, Warszawa 1980.
10. Werpachowski R., *Metody numeryczne w fizyce, czyli jak ujarzmić pecet*, Festiwal Nauki 2005, https://www.youtube.com/watch?v=vb1jgncRGaU (dostęp: lipiec 2018).

ANIMATED GRAPHICS BASED ON LAWS OF MOTION – COMPUTATIONAL SUPPORT FOR PHYSICS

Abstract: *This paper is a description and user's manual of an Internet teaching resource for students, aiming at enhancing their understanding of classical mechanics issues – trajectories of objects travelling with given accelerations. The application may be viewed as a virtual laboratory, in which users may promptly and easily conduct their own experiments. Having filled out a form on a computer screen with the mathematical description of a motion, the user is presented with the image of a small ball moving in compliance with the given description. This provides a discovery strategy for laws of nature: put forward a law and compare the resulting on-screen motion with the real one, to corroborate or to refute the law. A number of example virtual experiments are discussed and the engine controlling the animation is presented.*

Daria Rybarczyk

WYKORZYSTANIE BEZZAŁOGOWYCH STATKÓW POWIETRZNYCH W SYSTEMACH BEZPIECZEŃSTWA MORSKIEGO

W pracy przedstawiono przegląd technologii bezzałogowych statków powietrznych oraz możliwości ich wykorzystania w systemach bezpieczeństwa. Szczególną uwagę zwrócono na ich wykorzystanie przez służby ratownicze. Zaproponowano zastosowanie dronów w ratownictwie morskim jako uzupełnienie istniejącego kompleksowego systemu ratowania życia na morzu.

Wprowadzenie

Człowiek marzył o lataniu już w starożytności. Uznawany za twórcę mechaniki, grecki uczony Archytas z Tarentu konstruował różnego typu mechanizmy, w tym maszynę latającą w postaci drewnianego ptaka wyważonego za pomocą ciężarków. Do poruszania maszyny konstruktor wykorzystał parę wodną wytwarzaną w jej wnętrzu. W Chinach dwa tysiące lat temu używano do celów militarnych balonów ogrzewanych przez lampy olejowe. Miały na celu wyznaczenie kierunku uderzenia na oddziały przeciwnika [1]. W Europie pierwszy raz użyto latawców w celach wojskowych w 1066 roku w bitwie pod Hastings, gdzie wykorzystano je do przekazywania sygnałów, a więc wymiany informacji. W bitwie pod Legnicą w 1241 roku Mongołowie pod wodzą Czyngis-chana użyli latawców, na których przenoszony był proch [2].

W czasie I wojny światowej stosowano balony jako środki rozpoznania i zapory dla samolotów nieprzyjaciela. W tym celu użyto ich również podczas II wojny światowej w bitwach o Wielką Brytanię oraz pod Moskwą.

Pierwszy samolot bezzałogowy nazwany Aerodrome został zbudowany pod koniec XX wieku przez Samuela P. Langleya. Napędzany był silnikiem parowym, a jego pierwszy historyczny lot trwający ponad minutę odbył się 6 maja 1896 roku [3].

Pojawiające się nowe technologie adaptowane na potrzeby lotnictwa determinowały rozwój lotnictwa bezzałogowego. Najważniejsze znaczenie miało wynalezienie i rozwój fal radiowych, które umożliwiły bezzałogowy lot kontrolowany. Był to początek dynamicznego rozwoju różnego rodzaju konstrukcji w lotnictwie bezzałogowym. Początkowo miały one głównie zastosowania wojskowe. Szybko jednak okazało się, że takie działania jak rozpoznanie, patrolowanie i monitorowanie mogą być wykorzystywane w podobny sposób w środowisku cywilnym.

Rozwijające się nowe technologie wpływają na zakres wykorzystywania bezzałogowych statków powietrznych (UAV, *unmanned aerial vehicle*), potocznie zwanych dronami. Stały się one tańsze, a przez to bardziej dostępne. Ponadto ulepszane są ich konstrukcje w zakresie zasięgu, sterowania czy odporności na zjawiska atmosferyczne. Możliwości ich zastosowania wydają się ograniczone jedynie pomysłowością twórców.

1. Technologia dronów

Bezzałogowy statek powietrzny to napędzany obiekt powietrzny wykonujący lot bez pilota na pokładzie z wykorzystaniem siły aerodynamicznej oraz niemający możliwości zabierania pasażerów. Samo urządzenie latające jest częścią systemu nazywanego bezzałogowym systemem powietrznym (UAS, *unmanned aerial system*), który zawiera inne elementy niezbędne do wykonywania lotu.

Na UAS składają się trzy zasadnicze komponenty. Pierwszym z nich jest stacja kontroli lotu, za pomocą której jest obserwowany i kontrolowany lot platformy powietrznej. Drugim infrastruktura komunikacyjna, umożliwiająca przesyłanie niezbędnych danych. Trzeci to platforma powietrzna, będąca UAV [4].

Czynniki techniczne, które mają duży wpływ na możliwości i sposób wykorzystania UAV, to zasięg lotu i transmisji danych, osiągany pułap lotu, zautomatyzowane systemy sterowania, dokładność i stabilność lotu, jakość i trwałość konstrukcji. Istotne są również warunki atmosferyczne określone jako brzegowe dla danego urządzenia. Ważną rolę odgrywają komponenty, które decydują o stopniu automatyzacji pracy sytemu i o wykorzystaniu zaawansowanych algorytmów przetwarzania informacji, w tym sztucznej inteligencji.

W UAV możliwe jest zastosowanie różnorodnych sensorów. Sensory optyczne, takie jak kamery o wysokiej rozdzielczości, kamery multispektralne, kamery termowizyjne i noktowizyjne, lasery oraz radary, montowane są do dronów bezpośrednio lub za pomocą uchwytów, przy pomocy których można stabilizować kamery i nimi manipulować. Drony można wyposażyć w czujniki wilgotności, gazów, pyłów, dymu, substancji promieniotwórczych oraz innych substancji niebezpiecznych.

Bezzałogowe statki powietrzne dzieli się na wirnikowce (multikoptery) i stałopłaty – konstrukcje zbliżone do samolotów. Wirnikowce mają zdolność do natychmiastowego pionowego startu i szybkiej zmiany kierunku lotu. Potrafią wisieć nad miejscem zdarzenia oraz pracować w mniejszych przestrzeniach. Stałopłaty mogą przemieszczać się stosunkowo szybko i wysoko. Pozwala to na lepszą obserwację rozległego terenu i ocenę rozmiaru zdarzenia. Dlatego do konkretnego zastosowania dobierane jest odpowiednie rozwiązanie [5].

2. Drony w systemach bezpieczeństwa

Technologia UAV może być z powodzeniem wykorzystana w systemach bezpieczeństwa. Bezzałogowe statki powietrzne mogą być wykorzystywane do monitorowania miast, lasów, stanów wód, do kontroli obiektów publicznych czy monitorowania imprez masowych. Zastosowanie dronów pozwala na obniżenie kosztów i zwiększenie efektywności patroli.

Znajdują zastosowanie także w integracji z istniejącymi systemami bezpieczeństwa. Niemiecka firma Ela-soft GmbH na międzynarodowych targach Security Essen w 2016 roku przedstawiła zmodyfikowany system bezpieczeństwa GEMOS uzupełniony o współpracę z dronami. System GEMOS posiada interfejsy do komunikacji z klasycznymi systemami zabezpieczeń – systemami przeciwpożarowymi, systemami sygnalizacji włamania i napadu, systemami kontroli dostępu, wizyjnymi systemami dozorowymi i innymi [6].

Ochroną bezpieczeństwa ludzi w różnych miejscach i różnych sytuacjach zajmują się służby ratownicze, które mogą i już wykorzystują drony w swojej działalności.

Górskie Ochotnicze Pogotowie Ratunkowe (GOPR) prowadzi akcje ratownicze w górach, gdzie dostęp do wielu rejonów jest ograniczony. Akcje GOPR wspomaga Lotnicze Pogotowie Ratunkowe. Do wypadku w górach często dochodzi w warunkach załamania pogody, kiedy jest utrudnione lub wręcz niemożliwe wykorzystanie śmigłowców ratowniczych. Podstawowym zadaniem w takiej sytuacji jest znalezienie osoby poszkodowanej. Drony z umieszczonymi na nich kamerami mogą szybciej odnaleźć człowieka niż ratownicy. Mogą też zrzucić przygotowany pakiet ratowniczy zawierający środki pierwszej pomocy, koc termiczny czy prowiant. Zwiększa to szanse na przeżycie w oczekiwaniu na dotarcie ratowników do miejsca zdarzenia. Podczas akcji lawinowych dron wyposażony w kamerę termowizyjną może dokładnie wskazać miejsce osoby zagrożonej. W poszukiwaniach osób zaginionych czy uwięzionych w jaskiniach drony mogą znakomicie wesprzeć ludzi – dotrzeć do trudno dostępnych zakamarków jaskiń, odnaleźć ludzi i dostarczyć im potrzebnych środków.

Dron poruszający się w jaskiniach powinien być odporny na zderzenia z otaczającymi elementami. Firma Flyability skonstruowała drona do poszukiwań i przeprowadzania akcji ratowniczych w obiektach trudno dostępnych. Wykonany z bardzo wytrzymałych materiałów dron GimBall (rys. 1) umieszczony w klatce ochronnej, wyposażony w kamery ze specjalnym układem stabilizacji, doskonale nadaje się do pracy w jaskiniach.

Wodne Ochotnicze Pogotowie Ratunkowe (WOPR) prowadzi działania ratownicze na obszarze wodnym. Podobnie jak w innych akcjach ratowniczych kluczową sprawą jest czas działania. Wykorzystanie bezzałogowego statku może skrócić czas dotarcia do tonącego, co zwiększa jego szanse przeżycia. Bezzałogowe statki już pracują na plażach. Przykładem może być opisywany w czsopiśmie „Komputer Świat" przypadek uratowania dwóch pływaków w Australii, który miał

miejsce w styczniu bieżącego roku. Dwóch nastolatków dryfowało ok. 700 m od brzegu w Lennox Head. Wysłano do nich drona, ten zrzucił nadmuchiwaną szalupę, która pozwoliła na uratowanie chłopców (rys. 2). Cała akcja trwała 70 sekund. Ratownicy nie byli w stanie w tak krótkim czasie dotrzeć do tonących [8].



Rysunek 1. Dron GimBall [7]



Rysunek 2. Dron, który uratował dwóch pływaków w Australii [8]

Na polskiej plaży też pracuje już dron. Firma Airpas Machines z Pomorskiego Parku Naukowo-Technologicznego Gdynia skonstruowała innowacyjny UAV, który może pomóc jednostkom WOPR w ratowaniu tonących. Jego zadaniem jest patrolowanie wybrzeża, kontrolowanie niestrzeżonych odcinków plaż oraz alarmowanie o zagrożeniach. Urządzenie wyposażone jest w kamery rejestrujące obraz w rozdzielczości Full HD z 10-krotnym zbliżeniem optycznym oraz boję ratowniczą z holem, którą można zrzucić tonącemu i odholować go w najbliższe bezpieczne miejsce. W tym roku dron stacjonował na plaży w Jastrzębiej Górze [9].

Państwowa Straż Pożarna może wykorzystywać UAV podczas pożarów. Odpowiednio dobrane mogą patrolować obszary zajęte przez ogień. Obraz z kamery umieszczonej na dronie pozwala na określenie rozmiaru danego pożaru oraz sprawdzenie, gdzie rozprzestrzenia się ogień i czy na jego drodze znajdują się zabudowania. Dzięki temu można od razu wysłać pomoc do terenów zagrożonych. Dzięki kamerom termowizyjnym możliwe jest odnalezienie poszkodowanych osób, źródła pożaru, zwłaszcza w miejscach, w których ogień i toksyczny dym nie pozwalają na wejście strażaków.

Pogotowie ratunkowe i służby drogowe to kolejni potencjalni użytkownicy specjalistycznych UAV. Na drogach ma miejsce najwięcej zdarzeń i wypadków. Opracowywane są koncepcje wykorzystania dronów w ratownictwie drogowym. Do ich zadań należałoby monitorowanie i identyfikowanie zdarzeń zaistniałych na drodze, dostarczenie niezbędnych środków medycznych i sprzętu do miejsca wypadku, a nawet transport ofiar do szpitala [10].

Budowane są coraz bardziej zaawansowane urządzenia pozwalające na ratowanie ludzi. W 2014 roku młody inżynier z Belgii Alec Momont skonstruował dron ratowniczy, który ma na swoim pokładzie defibrylator (rys. 3) [11]. W 3 lata

później pomysł został zrealizowany i przetestowany przez szwedzkie Centrum Naukowe Resuscytacji. Średni czas dostarczenia latającego defibrylatora z bazy do miejsc, w których był potrzebny, wyniósł 5 minut, podczas gdy średni czas dojazdu karetek wynosi 22 minuty [12].



Rysunek 3. Testowany w Szwecji dron-defibrylator

Trwają również prace nad projektem, w którym UAV mógłby zastąpić śmigłowce w sytuacji, gdy potrzebny jest transport poszkodowanego z rejonów zagrożenia. Pierwszy dron-karetka powstał na potrzeby wojska (rys. 4). Służy do transportu rannych ze strefy bojowej i dostarcza zaopatrzenie [13].



Rysunek 4. Bezzałogowy statek powietrzny Air Mule [14]

3. Wykorzystanie dronów w ratownictwie morskim

Wiele dokumentów o zasięgu międzynarodowym, krajowym i regionalnym reguluje kwestie bezpieczeństwa żeglugi. Najważniejszy dokument to Międzynarodowa Konwencja o Bezpieczeństwie Życia na Morzu (SOLAS). Zawarte są w niej wytyczne dotyczące bezpiecznej eksploatacji i wyposażenia statku. Statki muszą spełniać wymagania związane ze stanem technicznym oraz z wyposażeniem w środki i urządzenia ratunkowe. Wszystkie jednostki pływające muszą być wyposażone we właściwy sprzęt ratunkowy, który zależy od typu i wielkości jednostki. Specjaliści do spraw przemysłu oraz z ośrodków badawczych wciąż jeszcze pracują nad udoskonaleniem środków i technik stosowanych w ratownictwie

morskim. Mają one zapewnić bezpieczne opuszczenie jednostki pływającej w przypadku jej awarii, możliwość przetrwania do czasu przybycia służb ratowniczych oraz jak najszybsze zlokalizowanie rozbitków. Opracowywane są różne rodzaje tratw, sprzętu do szybkiego i bezpiecznego umieszczania ludzi w tratwach, sprzętu do podejmowania rozbitków z wody, indywidualnych środków ochrony oraz procedur obowiązujących w razie wypadku na morzu.

Do ratowania życia ludzi na morzu powołana jest Morska Służba Poszukiwania i Ratownictwa (SAR, *Search And Rescue*). W skład SAR wchodzą: Morskie Ratownicze Centrum Koordynacyjne mieszczące się w Gdyni, Morskie Pomocnicze Centrum Koordynacyjne w Świnoujściu, brzegowe stacje ratownicze w wybranych portach oraz morskie statki i łodzie ratownicze. Ponadto w swych działaniach SAR korzysta ze wsparcia innych służb: marynarki wojennej, państwowej straży pożarnej, policji, służby ochrony zdrowia. Przede wszystkim wykorzystywane są ratownicze śmigłowce marynarki wojennej. Obecnie istnieją dwa miejsca bazowania śmigłowców ratownictwa morskiego, tj. 43. Baza Lotnictwa Morskiego w Gdyni i 44. Baza Lotnictwa Morskiego w Darłowie. Całodobowy dyżur ratowniczy pełni wyłącznie jednostka w Darłowie, która posiada dwie maszyny. To za mało dla zabezpieczenia polskiego liczącego ponad 500 km wybrzeża.

Służba SAR, aby wykonać swoje podstawowe zadanie, musi utrzymywać ciągłą gotowość do przyjmowania i analizowania zawiadomień o zagrożeniu życia na morzu, planować, prowadzić i koordynować akcje poszukiwawcze i ratownicze, utrzymywać w gotowości siły i środki ratownictwa, współdziałać podczas akcji poszukiwawczych i ratowniczych z innymi służbami na obszarze kraju, współdziałać ze służbami innych państw [15].

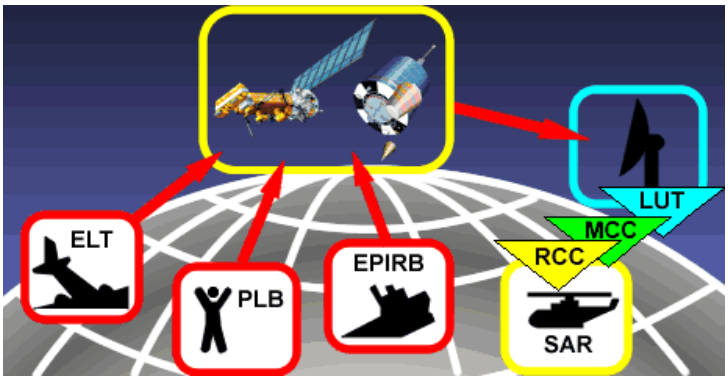
We współczesnym ratownictwie morskim wykorzystuje się techniki satelitarne. Najważniejszym systemem, w którym się je stosuje, jest system ratownictwa COSPAS/SARSAT[1] (rys. 5), który powstał z połączenia systemów: rosyjskiego COSPAS i kanadyjsko-francusko-amerykańskiego SARSAT. System służy do przekazywania poprzez satelity sygnałów alarmowych nadawanych ze specjalnych urządzeń do ośrodków SAR [16].

W skład systemu wchodzą:

- radiopławy wysyłające sygnały o niebezpieczeństwie: dla lotnictwa (ELT, *emergency locator transmitter*), dla użytku osobistego (PLB, *personal locator beacons*), dla statków (EPIRB, *emergency position-indicating radio beacon*),
- instrumenty na pokładach satelitów odbierających sygnały z radiopław,
- naziemne stacje odbiorcze (LUT, *local user terminal*), które odbierają i przetwarzają sygnały z satelity oraz generują alarm,
- ośrodki sterowania (MCC, *mission control center*), które odbierają alarmy z LUT i przekazują je do centrów koordynacji ratownictwa (RCC, *rescue coordination center*), punktów kontaktowych SAR (SPOC, *search and rescue points of*

[1] COSPAS – akronim od rosyjskiej nazwy *Cosmicheskaya Sistema Poiska Avariynyh Sudov*, SARSAT – akronim od angielskiej nazwy *Search And Rescue Satellite-Aided Tracking*.

contacts) i innych ośrodków koordynacji, które przekazują dane do odpowiednich służb ratowniczych.



Rysunek 5. Ogólny schemat działania systemu COSPAS/SARSAT [16]; radiopławy transmitujące sygnały w niebezpieczeństwie: dla lotnictwa (ELT), dla użytku osobistego (PLB), dla statków (EPIRB), LUT – naziemne stacje odbiorcze, MCC – ośrodki kontrolne misji, RCC – centra koordynacji ratownictwa, SAR – Morska Służba Poszukiwania i Ratownictwa

System COSPAS/SARSAT zawiera dwa typy satelitów:

- satelity na niskich orbitach tworzące system LEOSAR (*Low-altitude Earth Orbit SAR*),
- satelity na orbitach geostacjonarnych tworzące system GEOSAR (*Geostationary Earth Orbit SAR*).

Oba systemy wzajemnie się uzupełniają i zapewniają pokrycie całej powierzchni ziemi.

Radiopława EPIRB to przenośne urządzenie, które wysyła sygnał SOS do jednostek SAR na częstotliwości 406 MHz, która jest częstotliwością alarmową wykorzystywaną przez system COSPAS/SARSAT. Uruchamiane jest automatycznie w momencie, kiedy wpadnie do wody. Ma ono za zadanie ułatwić służbom ratowniczym zlokalizowanie jednostki pływającej lub osoby potrzebującej pomocy w możliwie najkrótszym czasie. Do transmitowanej wiadomości SOS dołączany jest unikalny numer UIN (*unique identity number*) radiopławy oraz w niektórych modelach pozycja uzyskana z odbiornika GPS. Radiopławy są oznaczane kodem MMSI statku nadawanym przez Urząd Komunikacji Elektronicznej i rejestrowane. Razem z sygnałem SOS dociera więc do SAR informacja o jednostce pływającej z bazy danych zarejestrowanych urządzeń.

Lokalizator PLB to podobnie działające urządzenie, ale przypisywane jest w procesie rejestracji do konkretnej osoby, a nie do jednostki pływającej. Mogą być w nie wyposażone współczesne kamizelki ratunkowe. Nadajnik emituje sygnał SOS wraz z unikalnym numerem UIN oraz aktualnymi współrzędnymi do globalnego systemu COSPAS/SARSAT. Służby ratownicze zostaną zaalarmowane o wypadku i jego miejscu w ciągu kilku minut.

Na jednostkach pływających obowiązkowo musi znajdować się radiotelefon VHF (*very high frequency*), służący do wysyłania sygnału wezwania o pomoc do

wszystkich okolicznych jachtów i statków, a także do morskich służb ratowniczych. Zasięg pomiędzy różnymi statkami oraz pomiędzy statkami a stacjami radiowymi brzegowymi może się dość znacznie różnić. Zależy to od zmiennych wysokości anten instalowanych na statkach o różnych rozmiarach i lokalizacji stacji brzegowych. W normalnych warunkach rozprzestrzeniania się fal radiowych spodziewany zasięg radiokomunikacji w zakresie fal VHF waha się pomiędzy 20 a 30 mil morskich (Mm). Dodatkowo radia VHF wyposażone są w system DSC (*Digital Selective Calling*), który umożliwia automatyczne przesyłanie komunikatów o niebezpieczeństwie wraz z informacją o jednostce pływającej i jej pozycji przez radiowe łącza na częstotliwościach VHF. Statki po usłyszeniu sygnału mogą same rozpocząć akcję ratowniczą lub zawiadomić służby ratownicze SAR.

Szybkie zlokalizowanie osoby, która wpadła do wody, jest najważniejszą sprawą podczas akcji ratowniczej i od tego zależy, czy osoba zostanie uratowana, czy nie. Ma to ogromne znaczenie zwłaszcza w zimnych wodach ze względu na niebezpieczeństwo wychłodzenia organizmu.

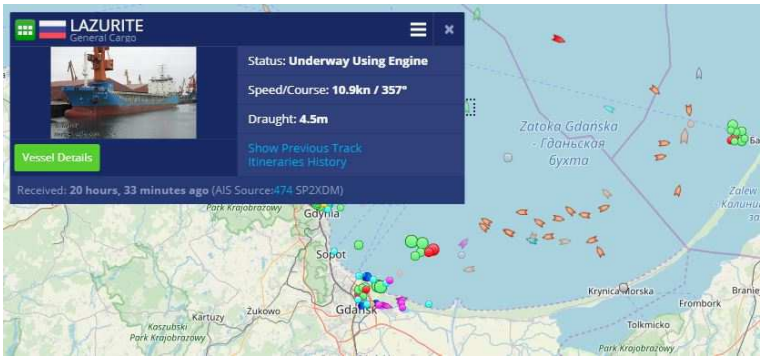
Statki lub łodzie ratownicze skierowane do danego wypadku morskiego potrzebują czasu na dotarcie do miejsca zdarzenia. Nawet wtedy, gdy powiadomienie przyszło z pławy EPIRB wyposażonej w GPS, co daje możliwość natychmiastowego wykrycia sygnału (wychwytuje go system GEOSAR z dokładnością do ok. 10 m), czas dopłynięcia do poszkodowanych może być długi. Jeżeli jednak sygnał był nadany przez radiopławę EPIRB bez GPS (wychwytuje go system LEOSAR z dokładnością do 5 km), dochodzi do tego opóźnienie w wykryciu sygnału wynoszące średnio 45 minut. Gdy poszukiwany jest statek czy jacht, który ma łączność radiową, statek ratowniczy może go odnaleźć, gdyż ktoś na statku może podawać dokładną bieżącą pozycję. Bardzo często chodzi o osobę, która wypadła za burtę, zwłaszcza w przypadku jachtów. W ciężkich warunkach pogodowych, a właśnie w takich dochodzi do wypadków, bardzo trudno jest zlokalizować człowieka w morzu. Jeżeli ma on na sobie kamizelkę ratunkową, to może przetrwać w wodzie w oczekiwaniu na pomoc w czasie zależnym od jej temperatury. I tak np. w wodzie o temperaturze 15°C czas przeżycia ludzi normalnie ubranych wynosi ok. 4,5 godziny[2] [17]. Wysoka fala, deszcz, mgła, noc znacznie ograniczają możliwość odnalezienia członka załogi, który wypadł z jachtu.

I tu z pomocą mogłyby przyjść UAV umieszczone na statkach i łodziach ratowniczych. Wyposażone w kamerę HD, kamerę termowizyjną o wysokiej rozdzielczości i urządzenie GPS będą w stanie szybciej odnaleźć rozbitka, umożliwią zwiększenie zasięgu jego poszukiwania oraz precyzyjną lokalizację. Obraz z kamer podlegałby analizie, a po rozpoznaniu człowieka podawana byłaby odnaleziona pozycja. Analiza mogłaby być prowadzona przez człowieka lub przez specjalne programy [18]. Oprogramowanie pracujące z dronem można zintegrować z innymi systemami na jednostce ratowniczej tak, aby pozycja rozbitka widoczna

[2] Ze względu na duże indywidualne różnice w tolerancji ustroju na oziębianie w wodzie związane z wiekiem, płcią, budową ciała i aklimatyzacją opracowano dla potrzeb marynarki wojennej i handlowej oraz dla lotnictwa i ratownictwa morskiego szereg nomogramów i wzorów, według których oznacza się dopuszczalny czas przebywania rozbitków w wodzie.

była bezpośrednio na elektronicznej mapie nawigacyjnej. Daje to możliwość automatycznej koordynacji działań służb SAR.

Obecnie na jachtach znajdują się urządzenia pozycyjne GPS, programy obrazujące pozycję w czasie rzeczywistym na podstawie systemu elektronicznych map nawigacyjnych oraz system automatycznej identyfikacji jednostki (AIS, *Automatic Identification System*). Został on opracowany w latach 90. ubiegłego wieku, a jego popularność i wykorzystanie wzrosły w ostatnim dziesięcioleciu. Powstał w celu uzupełnienia systemów radarowych. Urządzenia AIS pracują na dwóch częstotliwościach VHF (161,975 MHz/kanał 87 i 162,025 MHz/kanał 88), które determinują zasięg systemu – od kilkunastu do kilkudziesięciu mil morskich. Transponder pełniący funkcję nadajnika i odbiornika otrzymuje automatycznie informacje o pozycji i ruchu statku z GPS i innych czujników (logu, żyrokompasu, wskaźnika prędkości kątowej). Do tego dodawane są informacje identyfikujące statek (nazwa statku, sygnał wywoławczy, numer MMSI, nazwa portu docelowego, zanurzenie, wymiary), a następnie wysyłane w specjalnym formacie. Dzięki temu jednostki pływające „widzą się" nawzajem. Na rysunku 6 przedstawiono widok z AIS w programie Marine Traffic wraz z wyświetloną informacją o wybranym statku. System AIS początkowo pracował samodzielnie, miał własną antenę i własne wyświetlacze. Obecne systemy nawigacyjne obsługują AIS, a urządzenia odbiorczo-nadawcze systemu AIS są do nich podłączone. Podobnie można zintegrować systemy pracujące na statku z oprogramowaniem dronów, tak żeby pozycja znalezionego obiektu pojawiała się na mapach nawigacyjnych.



Rysunek 6. Zrzut ekranu z programu Marine Traffic

Wykorzystanie dronów ulokowanych na statkach ratowniczych ma niebagatelne znaczenie w sytuacji, gdy baza śmigłowców jest niewystarczająca.

Drony przeznaczone do pracy w warunkach morskich powinny być odporne na szeroki zakres warunków meteorologicznych. Mogłyby być dodatkowo wyposażone w boję ratunkową lub minitratwę ratunkową, która po zrzuceniu do wody sama się napompuje.

Obecnie na Wydziale Nawigacyjnym Akademii Morskiej w Szczecinie realizowany jest projekt SARA (*Search And Rescue Aid and Surveillance using High EGNSS Accuracy*) finansowany w ramach programu Horyzont 2020. Akademia

Morska w Szczecinie jest partnerem w konsorcjum projektowym, którym kieruje włoska firma Sistematica SPA, a w którego skład wchodzą także producent dronów TopView SRL, Uniwersytet Florencki i Uniwersytet w Aarhus. Zakończenie projektu planowane jest na 2020 rok. Jego celem jest budowa bezzałogowej jednostki latającej przystosowanej do precyzyjnej detekcji osób w wodzie. Pierwsze testy techniczne odbyły się we wrześniu bieżącego roku [19].

Drugą propozycją wykorzystania drona na statkach ratowniczych może być produkt firmy Airpas Machines z Pomorskiego Parku Naukowo-Technologicznego, której prototyp został już wykonany [20].

Podsumowanie

Bezzałogowe statki powietrzne mogą być znakomitym uzupełnieniem istniejących systemów bezpieczeństwa. Mogą wspomagać służby ratownicze w życiu publicznym oraz w sytuacjach zagrożenia kryzysowego. Dynamiczny rozwój techniki pozwala na rozszerzenie zastosowań dronów. W ratownictwie morskim otwierają się nowe możliwości wsparcia służb SAR. Wyposażenie statków ratowniczych w latające maszyny pozwoli na szybsze zlokalizowanie człowieka na morzu, co znacznie zwiększy szansę na jego uratowanie. Widoczność na morzu w trudnych warunkach (wysokie zafalowanie, mgła, deszcz, noc) jest skrajnie ograniczona. Ratownicy na statku często nie są w stanie odnaleźć osoby, która wypadła za burtę. Używanie lokalizatorów przez każdą osobę na statku lub jachcie nie jest jeszcze powszechne ze względu na koszt oraz procedury związane z rejestracją, która wymaga posiadania pozwolenia radiowego przez osoby zainteresowane. W tej sytuacji dron zaopatrzony w kamerę termowizyjną, znajdujący się dużo wyżej niż ratownicy na statku oraz poruszający się szybciej, jest nieoceniony.

Literatura

1. Clark M.R., *Air power by the people, for the people, but not with the people*, Maxwell Air Force Base, Alabama 1999.
2. Korbal R., *Słynne bitwy w historii Polski*, Podsiedlik-Raniowski i Spółka, Poznań 2007, s. 9.
3. Pater Z., *Wybrane zagadnienia z historii techniki*, Politechnika Lubelska, Lublin 2011 (dostępne w Bibliotece Cyfrowej PL: http://bc.pollub.pl/Content/688/PDF/historia.pdf).
4. Zieliński T., *Funkcjonowanie bezzałogowych systemów powietrznych w sferze cywilnej*, Wydawnictwo Naukowe Silva Rerum, Poznań 2014.
5. Burdziakowski P., *Przegląd budowy i funkcjonalności współczesnych bezzałogowych statków powietrznych do celów fotogrametrycznych*, „Biuletyn WAT" 2016, vol. 5, no. 4.

6. https://www.zabezpieczenia.com.pl/systemy-zintegrowane/system-zarz%C4%85dzania-bezpiecze%C5%84stwem-gemo [dostęp: 5.11.2018].
7. https://www.flyability.com/pl/ [dostęp: 5.11.2018].
8. https://www.komputerswiat.pl/aktualnosci/wydarzenia/dron-uratowal-dwoch-plywakow-w-australii/73c9p3l [dostęp: 5.11.2018].
9. http://ppnt.pl/pl/aktualnosci/ppnt/dron-z-ppnt-pomoze-ratowac-ludzkie-zycie [dostęp: 5.11.2018].
10. Berner B., Chojnacki J., *Koncepcja wykorzystania dronów w ratownictwie drogowym*, „Autobusy, Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe" 2017, no. 7-8.
11. http://www.swiatdronow.pl/dron-ratowniczy-latajacy-defibrylator-aleca-momonta [dostęp: 5.11.2018].
12. http://www.swiatdronow.pl/szwedzi-testuja-drony-z-defibrylatorami-aed [dostęp: 5.11.2018].
13. Atherton K.D., *Air Mule Hovercraft Ambulance Flies Autonomously*, „Rescue Robocops" 2016, January.
14. http://www.urbanaero.com/category/airmule [dostęp: 5.11.2018].
15. Czajkowski J., Korcz K., *GMDSS dla łączności bliskiego zasięgu*, Wydawnictwo Skryba, Gdańsk 2006.
16. https://cospas-sarsat.int/en/system-overview/cospas-sarsat-systems [dostęp: 5.11.2018].
17. Michniewski P., *Rozważania nad problemem hipotermii*, „Polish Hyperbaric Research" 2014, no. 4.
18. Zieliński M., Milewski S., *Zastosowanie termowizyjnych systemów obserwacyjnych w ratownictwie morskim*, [w:] *Pomiary termowizyjne w praktyce*, pod red. H. Madury, Agenda Wydawnicza PAK, Warszawa 2004.
19. http://thesaraproject.eu [dostęp: 5.11.2018].
20. http://ppnt.pl/pl/aktualnosci/ppnt/w-gdyni-powstaje-dron-karetka [dostęp: 5.11.2018].

UNMANNED AERIAL VEHICLE USE IN SECURITY SYSTEMS

Abstract: *The paper presents an overview of the technology of unmanned aerial vehicles and the possibilities of their use in security systems. Particular attention has been paid to the use by emergency services. The use of drones in maritime rescue was proposed as a complement to the existing comprehensive life-saving system at sea.*

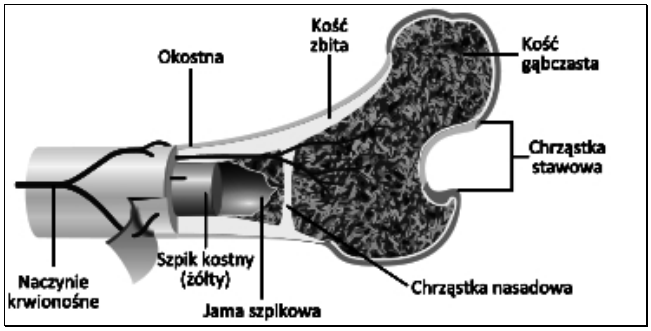
Henryk Olszewski, Wiktoria Wojnicz
Eliza Drobniewska, Dorota Olszak
Paweł Ożga

BEZDOTYKOWE OKREŚLANIE PARAMETRÓW WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH PRÓBEK BIOMECHANICZNYCH PRZY WYKORZYSTANIU FOTOGRAMETRII BLISKIEGO ZASIĘGU

Jednym z intensywnie rozwijających się działów biomechaniki są badania właściwości fizycznych układu kostnego człowieka. Kości ludzkie zbudowane są z dwóch typów tkanki kostnej: tkanki kostnej zbitej oraz tkanki kostnej gąbczastej. Tkanka kostna zbita stanowi budulec powierzchni wszystkich kości, składają się z niej trzony kości długich. Tkanka gąbczasta (trabecular structure) *wypełnia nasady (główki) kości długich oraz wnętrza pozostałych kości. Wnętrza te wypełnione są dodatkowo szpikiem kostnym.*

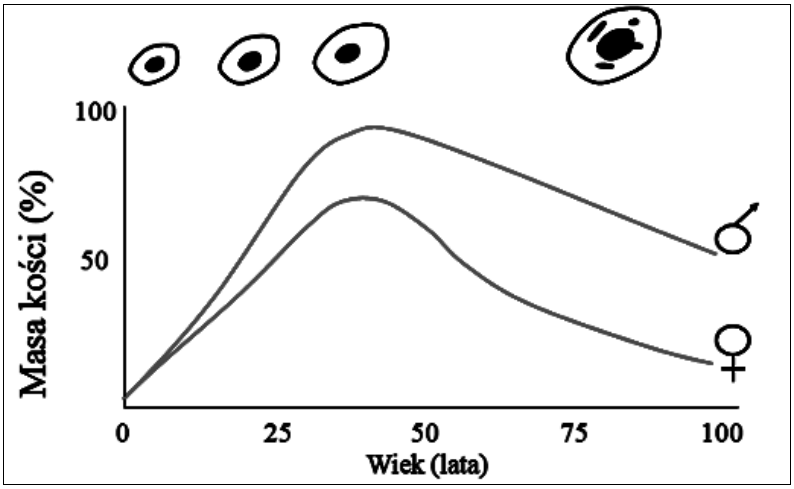
Wprowadzenie

Tkanka gąbczasta jest zbudowana z beleczek (rys. 1). System przestrzennych beleczek spełnia dwie funkcje: podporową i metaboliczną. Tkanka beleczkowa podpiera tkankę zewnętrzną korowa – zbitą, wypełniając wnętrze kości, dzięki czemu może ona przenosić wysokie obciążenia. Badania przeprowadzone przez Wolffa udowadniają, że ułożenie beleczek w tkance gąbczastej jest zgodne z kierunkami naprężeń głównych – hipoteza trajektoryjnej teorii rozkładu beleczek. Zmiana obciążenia oraz zmiana działania kierunków wektorów sił powoduje więc dostosowywanie się kości do bieżącego stanu obciążenia. Beleczki tworzą ciasno owinięte wokół siebie blaszki kostne [1].



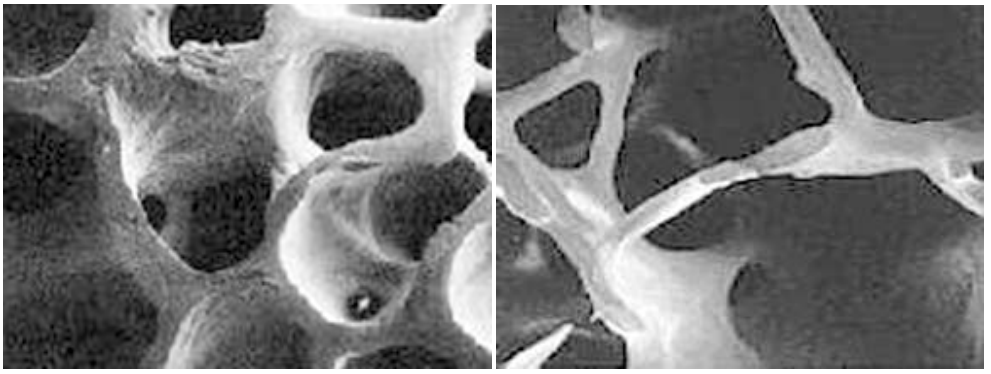
Rysunek 1. Przekrój podłużny przez kość długą [2]

Jednym z podstawowych problemów analizy układu kostnego jest określenie właściwości wytrzymałościowych kości. Rozwój metod badania tych właściwości spowodowany jest m.in. gwałtownym wzrostem liczby zachorowań na osteoporozę, chorobę, w której gęstość kości jest zmniejszona, występującą głównie u osób starszych [3]. Skutkuje to zwiększeniem prawdopodobieństwa urazów kostnych oraz wydłużonym czasem rekonwalescencji. Osteoporoza – stwierdzana najczęściej spośród chorób kości – jest metaboliczną chorobą układu kostnego charakteryzującą się spadkiem masy kości i uszkodzeniem jej przestrzennej struktury, co w rezultacie prowadzi do zmniejszenia wytrzymałości kości. Na zmniejszenie masy kości mają wpływ hormony, szczególnie estrogen powstrzymujący demineralizację kości. Brak obciążeń mechanicznych powoduje spadek ilości wapnia usuwanego przez krew i nerki. Wzrasta wówczas ryzyko powstawania kamieni w nerkach. Na zmniejszenie masy kości szczególnie narażeni są astronauci, którzy muszą wykonywać ćwiczenia w celu osłabienia efektu odciążenia kości przez brak grawitacji. Wielkością charakteryzującą odporność kości na złamanie jest ilość energii pochłoniętej przez materiał przed złamaniem przypadająca na jednostkę objętości. Wraz z upływem czasu u ludzi dorosłych zachodzą małe zmiany w długości kości, ale stosunkowo duże w ich gęstości. U kobiet następuje szybszy spadek masy kości niż u mężczyzn (rys. 2). Kobiety tracą 0,5-1% masy kości każdego roku do 50. roku życia lub menopauzy. Po menopauzie szybkość utraty masy kości wzrasta do 6,5%.



Rysunek 2. Zmiany masy kości u kobiet i mężczyzn wraz z upływem czasu [4]

Na rysunku 3 przedstawiono zmiany struktury kości gąbczastej wywołane osteoporozą – widoczne jest rozrzedzenie struktury gąbczastej i zmniejszenie wymiarów poprzecznych beleczek.

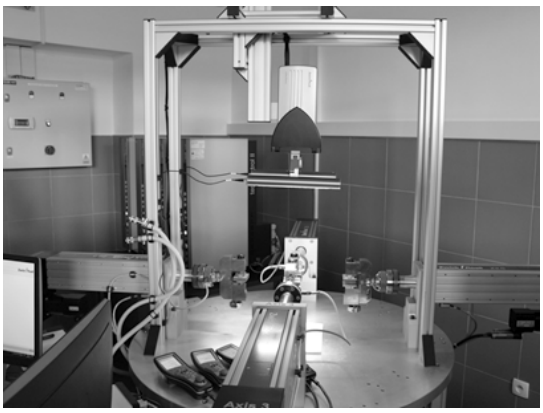


Rysunek 3. Uszkodzenie przestrzennej struktury kości gąbczastej wywołane osteoporozą [1]

Każda kość zbudowana jest z wielu komórek kostnych. W kościach znajdują się tzw. kanaliki Haversa zawierające naczynia, nerwy oraz tkankę łączną. Podczas chodu kości są cyklicznie obciążane, co wywołuje ich ściskanie i rozciąganie, a w konsekwencji prowadzi do ruchu płynów odżywiających kości. Ruch powoduje więc zwiększenie masy kości, ich umocnienie i szybsze gojenie [3, 5].

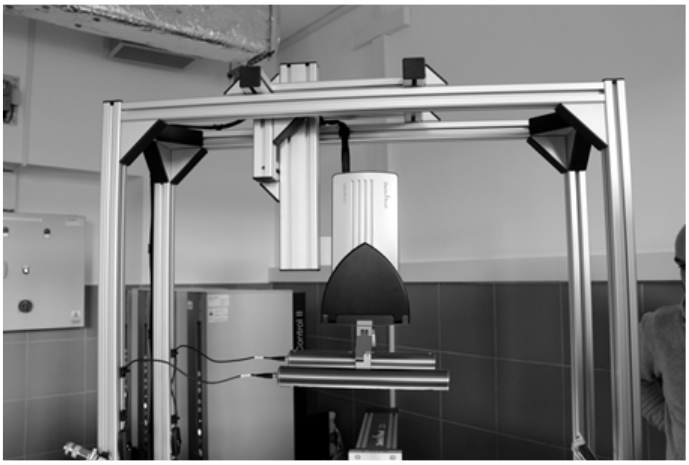
1. Badania doświadczalne

Statyczna próba rozciągania jest jedną z podstawowych prób stosowanych do określenia właściwości mechanicznych materiałów, z próby tej wyznacza się właściwości wytrzymałościowe i plastyczne badanego obiektu. Próbkę po zamocowaniu w maszynie wytrzymałościowej poddaje się rozciąganiu aż do jej zerwania. Statyczną próbę rozciągania przeprowadza się w temperaturze odtoczenia. Podczas próby wyznaczono granice plastyczności oraz wytrzymałość na rozciąganie. Dodatkowo określono wydłużenie próbki. Próbę przeprowadzono na dwuosiowej krzyżowej maszynie wytrzymałościowej firmy Zwick Roell (rys. 4).



Rysunek 4. Dwuosiowa krzyżowa maszyna wytrzymałościowa firmy Zwick Roell (opracowanie własne)

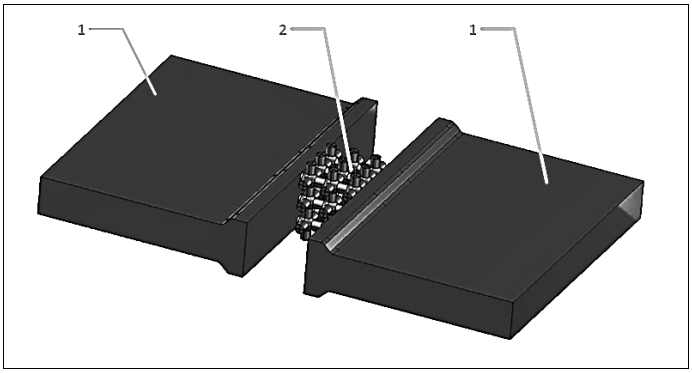
Siła maksymalna w maszynie wytrzymałościowej wynosi 2 kN. Poziomą dwuosiową maszynę wytrzymałościową z siłownikami elektromechanicznymi firmy Zwick Roell wykorzystuje się do jedno- lub dwuosiowych badań materiałów biologicznych, folii, papieru, elastomerów. Okrągła płyta bazowa maszyny zbudowana z profili aluminiowych jest zamocowana na ramie nośnej. Na płycie bazowej zamontowane są cztery siłowniki elektromechaniczne o standardowym skoku 200 mm. W maszynie wykorzystuje się fotogrametrię bliskiego zasięgu do pomiaru wydłużenia i regulacji odkształcenia. W tym celu zamontowany jest w niej ekstensometr video Xtens (rys. 5).



Rysunek 5. Ekstensometr video Xtens (opracowanie własne)

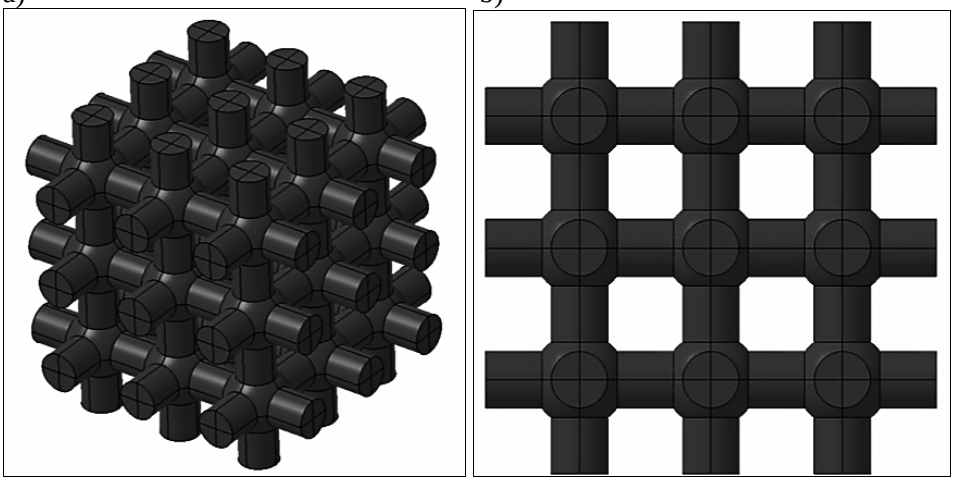
Pozwala on na dokładne pomiary wydłużenia we wszystkich kierunkach obciążenia bez możliwości wystąpienia jakichkolwiek uszkodzeń próbki. Wynika to z braku konieczności bezpośredniego kontaktu z badaną próbką. Cyfrowy obraz próbki zamontowanej w ekstensometrze rejestrowany przez pełnoklatkową kamerę przetwarzany jest przez serwer graficzny w czasie rzeczywistym. Badaniom wytrzymałościowym poddano próbki modelu struktury gąbczastej kości w postaci przestrzennej kratownicy o regularnym kształcie (rys. 6). Wykonano dwa rodzaje próbek: pierwszy rodzaj posiadał średnicę beleczek równą 3 mm, zaś osie belek były odległe o 4 mm, w drugim rodzaju osie beleczek o średnicy 2 mm były oddalone od siebie o 3 mm. Próbki zostały wydrukowane na drukarce 3D w rozdzielczości 0,25 mm. Model struktury gąbczastej przedstawiono na rysunku 7.

Na próbce naniesiono markery optyczne w postaci białych kropek, które były automatycznie rozpoznawane przez oprogramowanie stacji bazowej (rys. 8). Ich przemieszczenia z klatki do klatki były konwertowane na wydłużenia próbki. Na rysunku 9 przedstawiono rozpoznane markery naniesione na powierzchni próbki – każdemu markerowi przypisany jest osobny identyfikator w postaci kolejnej liczby naturalnej. Maszyna wytrzymałościowa Zwick Roell pozwala również na przeprowadzenie badań próbek zanurzonych w cieczach przy wykorzystaniu łaźni o regulowanej głębokości cieczy z zewnętrznym sterownikiem temperatury.

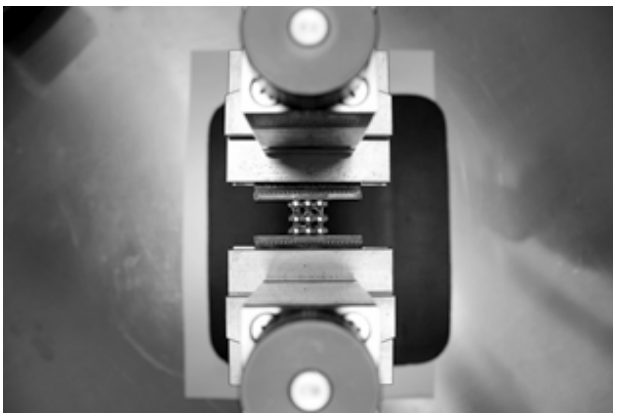


Rysunek 6. Model próbki struktury gąbczastej: 1) belka umieszczana w uchwycie maszyny wytrzymałościowej, 2) struktura gąbczasta (opracowanie własne)

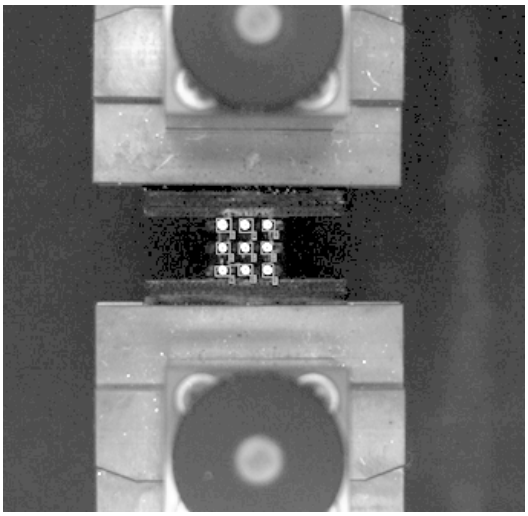
a) b)



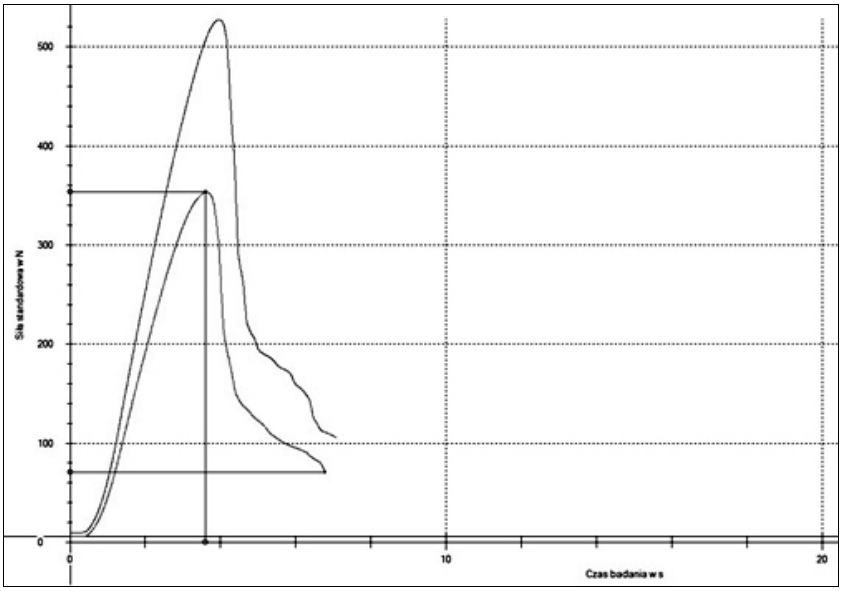
Rysunek 7. Model struktury gąbczastej: a) widok izometryczny, b) widok powierzchni bocznej (opracowanie własne)



Rysunek 8. Markery optyczne na powierzchni badanej próbki (opracowanie własne)



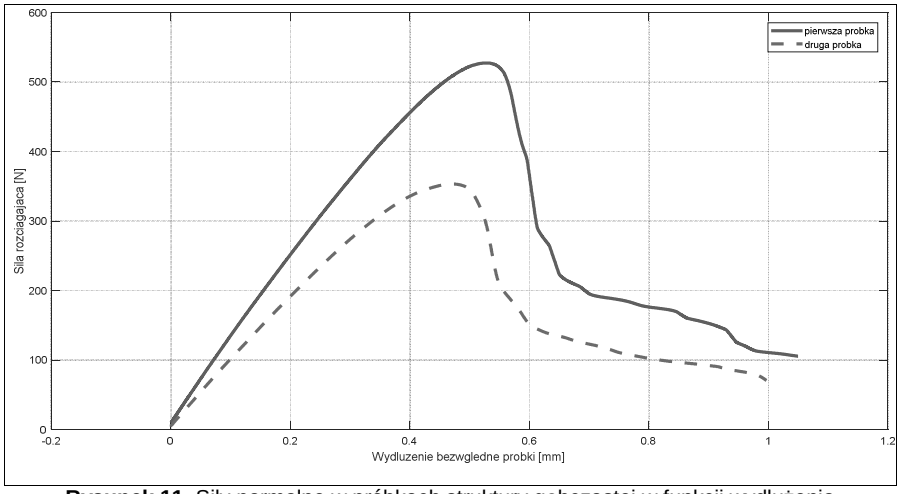
Rysunek 9. Identyfikatory markerów optycznych
(opracowanie własne)



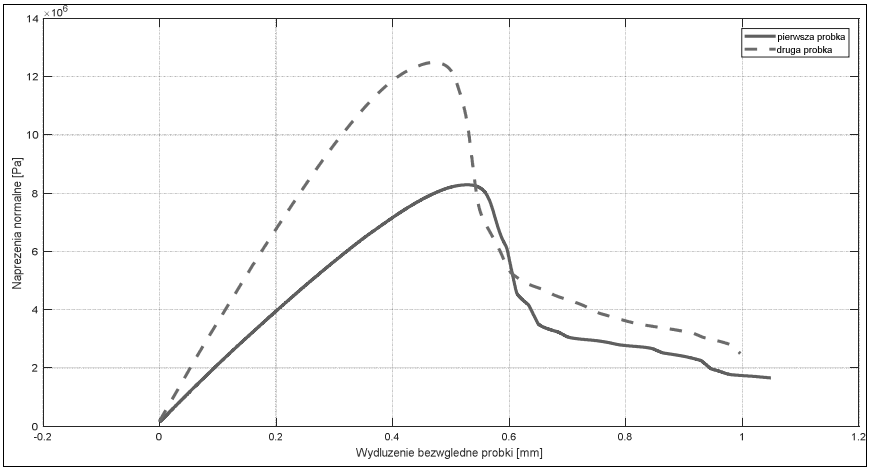
Rysunek 10. Krzywa rozciągania próbek struktury gąbczastej (linia górna – próbka pierwsza, linia dolna – próbka druga) wygenerowana przez maszynę wytrzymałościową Zwick / Roell
(opracowanie własne)

Próbki zostały wstępnie napięte siłą: pierwszy rodzaj próbek – 5 N, drugi rodzaj próbek – 2 N. W rezultacie wyznaczono dwie krzywe rozciągania dla dwóch analizowanych rodzajów próbek. Na rysunku 10 przedstawiono krzywe rozciągania próbek w funkcji czasu otrzymane bezpośrednio z maszyny wytrzymałościowej Zwick Roell. W wyniku analizy wyników pomiarów wyznaczono przebiegi

sił normalnych (rys. 11) oraz naprężeń normalnych (rys. 12) w funkcji odkształceń bezwzględnych. Zniszczenie pierwszej próbki posiadającej beleczki kostne o większej średnicy następuje przy większej wartości rozciągającej siły normalnej równej 515 N niż w przypadku drugiej próbki – zerwanie nastąpiło przy sile normalnej 355 N. Analiza naprężeń normalnych występujących w obydwu próbkach prowadzi jednak do odmiennych wniosków. Przy pęknięciu pierwszej próbki wystąpiły naprężenia normalne równe 8,29 MPa (wytrzymałość próbki na rozciąganie), zaś zerwaniu drugiej próbki odpowiadały naprężenia normalne równe 12,89 MPa. W przypadku naprężeń otrzymane wyniki próby wytrzymałościowej są więc odwrotne niż w przypadku siły normalnej.



Rysunek 11. Siły normalne w próbkach struktury gąbczastej w funkcji wydłużenia bezwzględnego próbek (opracowanie własne)



Rysunek 12. Naprężenia normalne w próbkach struktury gąbczastej w funkcji wydłużenia bezwzględnego próbek (opracowanie własne)

2. Wnioski

Parametry materiałowe struktury gąbczastej kości długich mają znaczący wpływ na ocenę makroskopową kości, szczególnie w przypadku wystąpienia osteoporozy. Beleczki tworzące istotę gąbczastą kości są ułożone zgodnie z przebiegiem obciążeń. Kierując się tą zasadą, wykonano model kości przedstawiony na rysunkach 6 i 7. Podczas badań wytrzymałościowych próbki zostały obciążone rozciągającą siłą osiową skierowaną wzdłuż osi belek. Przyjęty rodzaj obciążeń próbki jest więc zgodny z obciążeniami występującymi w ludzkich kościach. Przeprowadzone badania wytrzymałościowe wykazały różnicę 160 N w sile niszczącej próbkę. Zniszczenie pierwszej próbki nastąpiło przy osiowej sile rozciągającej równej 515 N, zaś zniszczenie drugiej próbki nastąpiło przy sile 355 N. Obydwie próbki zostały wydrukowane z tą samą rozdzielczością. Analiza wytrzymałości na rozciąganie próbek wykazała jednak przeciwne wyniki: pęknięciu pierwszej próbki odpowiadają naprężenia normalne 8,29 MPa, zaś drugiej 12,89 MPa.

Przeprowadzone obliczenia świadczą o decydującym wpływie na wytrzymałość struktury gąbczastej układu i rozmiaru beleczek kostnych. W przypadku drugiej próbki beleczki są oddalone od siebie o 3 mm i ich średnica jest równa 2 mm, zaś w przypadku pierwszej próbki beleczki są oddalone od siebie o 4 mm i ich średnica jest równa 3 mm. Druga próbka struktury gąbczastej jest więc bardziej zwarta, zaś pole przekroju poprzecznego beleczek jest mniejsze, co pozwala jej osiągnąć większą wytrzymałość na rozciąganie. Z drugiej strony większa średnica beleczek kostnych pierwszej próbki (3 mm) w porównaniu do średnicy beleczek kostnych drugiej próbki (2 mm) umożliwia przeniesienie przez pierwszą próbkę większych osiowych sił normalnych (515 N). Wyznaczone wytrzymałości na rozciąganie równe: 8,29 MPa (próbka pierwsza), 12,89 MPa (próbka druga) mieszczą się w przedziale wytrzymałości na rozciąganie struktury gąbczastej osób dorosłych (mężczyzn): 1÷20 MPa [3, 6].

W kolejnych próbach wytrzymałościowych przewiduje się wystąpienie zmienności właściwości wraz z kierunkiem przyłożenia zewnętrznego obciążenia (właściwości kierunkowe) z powodu niejednorodnej budowy mikrostruktury tkanki kostnej, co zostanie przedstawione w kolejnych artykułach. Przeprowadzone próby wskazują na użyteczność metod fotogrametrycznych w ocenie właściwości mechanicznych struktur biomechanicznych.

Literatura

1. Cowin S., *Bone mechanics handbook*, CRC Press, Boca Raton 2001.
2. Bochenek A., Reicher M., *Anatomia człowieka*, tom 1, PZWL, Warszawa 1968, s. 163.
3. Currey J., *Bones. Structure and mechanics*, Princeton University Press, Princeton 2002.

4. Whiting W., Zernicke R., *Biomechanics of musculoskeletal injury*, 2nd ed., Human Kinetics Publishers, Champaign 2008.
5. Lorenzetti S.R., *New method to determine the Young's modulus of single trabeculae*, Swiss Federal Institute of Technology, Zürich 2006.
6. Pahr D.H., Zysset P.K., *Influence of boundary conditions on computed apparent elastic properties of cancellous bone*, „Biomechanics and Modeling in Mechanobiology" 2008, no. 7, s. 463-476.

CONTACTLESS DETERMINATION OF BIOMECHANICAL SAMPLES STRENGTH PARAMETERS USING THE NEAR RANGE PHOTOGRAMMETRY

Abstract: *One of the intensively developing branches of biomechanics is the study of the physical properties of the human bony system. Human bones are made of two types of bone structures: compacted structure and trabecular structure. Compacted structure is the building material of all bones and consists of long bone stems. The trabecular structure fills the heads of the long bones and the inside of the remaining bones. The interiors are additionally filled with bone marrow.*

Karol Kabecki, Aleksandra Meuś
Daria Rybarczyk

SYSTEM DO ANALIZY I WIZUALIZACJI PARAMETRÓW ENERGII WYTWARZANEJ PRZEZ ELEKTROWNIE

Zapotrzebowanie na aplikacje ułatwiające analizę energii produkowanej przez źródła odnawialne wzrasta w związku z ich rozwojem w Polsce. W pracy przedstawiono opis systemu umożliwiającego gromadzenie, analizę i wizualizację danych pochodzących z różnych źródeł energii odnawialnej.

Wprowadzenie

Odnawialne źródła energii (OZE) cieszą się dużym zainteresowaniem w dobie rozwiązań ekologicznych oraz troski o środowisko naturalne. Udział energii odnawialnej w bilansie energetycznym Polski stale wzrasta pomimo barier, jakie ta branża napotyka.

W związku z powyższym nieustannie wzrasta zapotrzebowanie na aplikacje ułatwiające analizę energii produkowanej przez źródła odnawialne. Na rynku istnieją aplikacje służące do obsługiwania sieci elektrowni oraz prezentowania ich parametrów. Najczęściej ograniczają się one do wybranego źródła energii oraz występują w angielskiej wersji językowej. Przykładowym programem tego typu jest Breeze [1], umożliwiający analizę energii wytwarzanej przez turbiny wiatrowe. Kolejny to System Advisor Model (SAM) [2], prezentujący dane tylko na temat paneli fotowoltaicznych.

Zaproponowany w niniejszej pracy system umożliwia agregację analiz różnych źródeł energii odnawialnej. Został stworzony dla firmy VIS Energia, a docelowo na rzecz operatorów systemu dystrybucji energii elektrycznej (OSD). Podczas rozmów przeprowadzonych z przedstawicielem potencjalnego klienta zbadano zapotrzebowanie na określone funkcjonalności. Wybrano te, które okazały się najbardziej przydatne dla użytkownika końcowego.

Projektowany system pozwala m.in. na przegląd oraz analizę parametrów energii elektrycznej wytwarzanej przez wiele elektrowni w całej Polsce. Informacje podawane przez system dotyczą lokalizacji obiektów wytwarzających energię elektryczną, sumarycznej mocy, jaką dany obiekt wytworzył oraz wprowadził do sieci, sprawności poszczególnych układów, mocy zainstalowanych oraz mocy osiągalnych elektrowni, a także profilu zmienności wytwarzania energii elektrycznej czynnej i biernej [3, 4]. System umożliwia przegląd danych technicznych

generatorów mocy podłączonych do poszczególnych przyłączy, przy czym mogą to być generatory różnych typów, m.in. turbiny wiatrowe, ogniwa fotowoltaiczne oraz turbiny wodne. Kolejnym wymogiem stawianym przez klienta jest sprawdzanie i aktualizacja informacji przez operatora systemu dystrybucyjnego. Informacje te dotyczą głównie koncesji przysługujących firmom oraz przekroczeń w ilości wytwarzanej energii przez poszczególne elektrownie.

Wybór technologii oprogramowania należał do firmy VIS Energia i zależny był od posiadanych przez tę firmę licencji na narzędzia programistyczne. Stworzony system jest aplikacją internetową napisaną w języku C# [5] w środowisku Visual Studio z wykorzystaniem narzędzia DevExpress [6]. Do przechowywania danych systemu wykorzystano bazę danych MSSQL [7].

1. Budowa aplikacji internetowej

Głównym celem aplikacji jest umożliwienie klientowi analizy oraz wizualizacji danych w zakresie elektrowni, przyłączy oraz generatorów, do których konkretny użytkownik ma dostęp. Analizie podlegają informacje na temat wytwarzanej energii czynnej lub biernej.

Aplikacja importuje pliki programu Microsoft Excel z danymi o produkcji energii i mocy elektrycznej przez odnawialne źródła energii. Import danych i struktura docelowej bazy danych uwzględniają specyfikę źródeł i różne formaty danych w plikach udostępnianych przez firmy eksploatujące elektrownie.

Baza danych powstała w oparciu o arkusze kalkulacyjne z raportami w zakresie produkcji energii poszczególnych elektrowni należące do firmy Energa-Operator SA. Arkusze kalkulacyjne zawierają informacje dotyczące wyprodukowanej energii elektrycznej przez każde źródło, podają ich sprawność, unikatowe identyfikatory oraz kilka dodatkowych opisów.

W celu zapewnienia możliwości przeglądu zmian zawartych w bazie danych utworzono dodatkowe encje, których zadaniem jest składowanie danych historycznych. Ponadto gromadzone są informacje o zapytaniach oraz aktywności potencjalnych użytkowników.

System posiada budowę modułową, dzięki czemu w łatwy sposób można go rozwijać. Jego zasadnicze części to:

- moduł mapowania wczytywanych danych,
- moduł wczytywania plików z zewnętrznego serwera,
- moduł zarządzania danymi w bazie danych,
- moduł zarządzania użytkownikami,
- moduł raportowania,
- moduł kalkulatora inwestycyjnego,
- moduł do wykonywania zapytań SQL na bazie danych.

1.1. Moduł mapowania wczytywanych danych

Operatorzy systemów dystrybucyjnych energii elektrycznej zbierają dane z poszczególnych miejsc w postaci cyklicznie generowanych plików Excel. Podstawowym problemem przetwarzania dokumentów, które przychodzą do systemu, jest ich nieregularna struktura. W celu optymalizacji parsowania dokumentów został utworzony moduł odpowiedzialny za możliwość określania, jakie dane znajdują się pod wskazanymi pozycjami pliku Excel.

Mapowanie dynamicznych wartości odnosi się do dokumentu zawierającego dzienne zestawienie danych dla poszczególnych przyłączy. Przychodzące pliki wraz z rozwojem infrastruktury ulegają zmianie. Aby uniknąć problemów przy późniejszym działaniu serwisu oraz ewentualnych modyfikacjach metod odpowiedzialnych za wczytywanie dokumentów, utworzono stronę *DocumentMapping.aspx*, pozwalającą głównemu administratorowi strony dokonywać edycji albo utworzenia nowego mapowania. System zawiera również statyczny sposób inicjalizacji bazy danych firm, elektrowni oraz przyłączy wraz z ich wszystkimi parametrami, polegający na przetwarzaniu dodatkowego pliku udostępnionego przez podmiot zainteresowany.

Strona *DocumentMapping.aspx* umożliwia administratorowi wybranie wcześniejszego mapowania z rozwijanej listy albo utworzenie nowego poprzez użycie przycisku o nazwie *Nowe*, co można zaobserwować na rysunku 1.

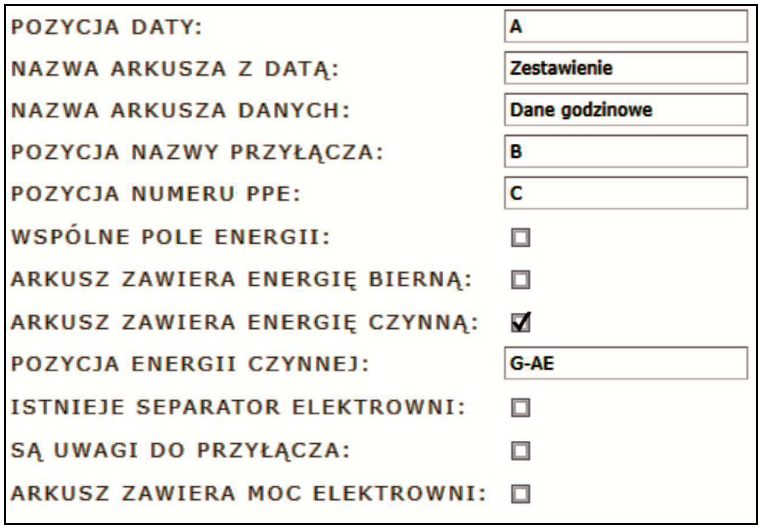


Rysunek 1. Fragment okna w zakładce *Narzędzia administratora*

Po wykonaniu jednej z wcześniej opisanych akcji, na stronie pojawia się formularz z parametrami do zmiany. W przypadku wybrania wcześniejszego mapowania system załaduje poprzednie informacje w odpowiednie pola.

Pola zaczynające się od słowa *Pozycja* (widoczne na rys. 2) wskazują na pojedynczą kolumnę lub ich zakres, w których znajdują się opowiadające im dane. Pliki z danymi składają się z co najmniej dwóch arkuszy, których nazwy trzeba wprowadzić do formularza, aby określić pozycję danych oraz pozycję daty. Pola wyboru służą do określenia, jakie dane zawiera plik xls. Dodatkowo dokument może zawierać różne typy formatowania wytwarzanej energii.

Po kliknięciu przycisku *Sprawdź* następuje parsowanie pliku, wskutek czego powstaje tabela (tab. 1).



Rysunek 2. Parametry możliwe do zmiany

Tabela 1. Wynik parsowania do przeanalizowania przez operatorów systemu dystrybucji

Nazwa przyłącza	Nr PPE przyłącza	Uwagi przyłącza	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00
ELEKTROWNIA WODNA WŁOCŁAWEK - TB1	PL003700000000		0	0	0	0	0
ELEKTROWNIA WODNA WŁOCŁAWEK - TB2	PL003700000000		36986,4	36313,2	36306,6	36313,2	36326,4
ELEKTROWNIA WODNA WŁOCŁAWEK - TB3	PL003700000000		22743,6	22737	22743,6	22743,6	22743,6
FARMA WIATROWA KORSZE	PL003761003565		15873	24552	36993	48873	54582
EC WYBRZEŻE	PL003713000000		0	0	0	0	0
EC WYBRZEŻE	PL003713000000		27680	27510	27655	27380	27885

Tabela wynikowa umożliwia wykrycie błędów wprowadzonego mapowania. Jeżeli mapowanie uznane zostanie za poprawne, wówczas może zostać zapisane do bazy.

Należy zaznaczyć, że mapowanie statyczne jest wykorzystywane wyłącznie do przetwarzania plików inicjujących.

1.2. Moduł wczytywania plików z zewnętrznego serwera

Moduł pozwala na samoczynne sprawdzenie, czy na zdefiniowanym serwerze pojawiły się nowe pliki i czy zostały zaimportowane. W przypadku nowych firm i nietypowych struktur danych w arkuszach moduł pozwala na ręczne zdefiniowane nowego szablonu danych wejściowych z arkusza.

Można również wczytywać dane z serwisu *cire.pl* [8]. Znajdują się tam informacje na temat cen energii o konkretnych godzinach z rynku bilansującego. Dane te są używane przy prezentacji, jaki przychód notuje elektrownia.

Klasa realizująca funkcje cyklicznego odświeżania, czyli sprawdzająca, czy określony plik pojawił się na wskazanym serwerze, działa w tle jako osobna usługa.

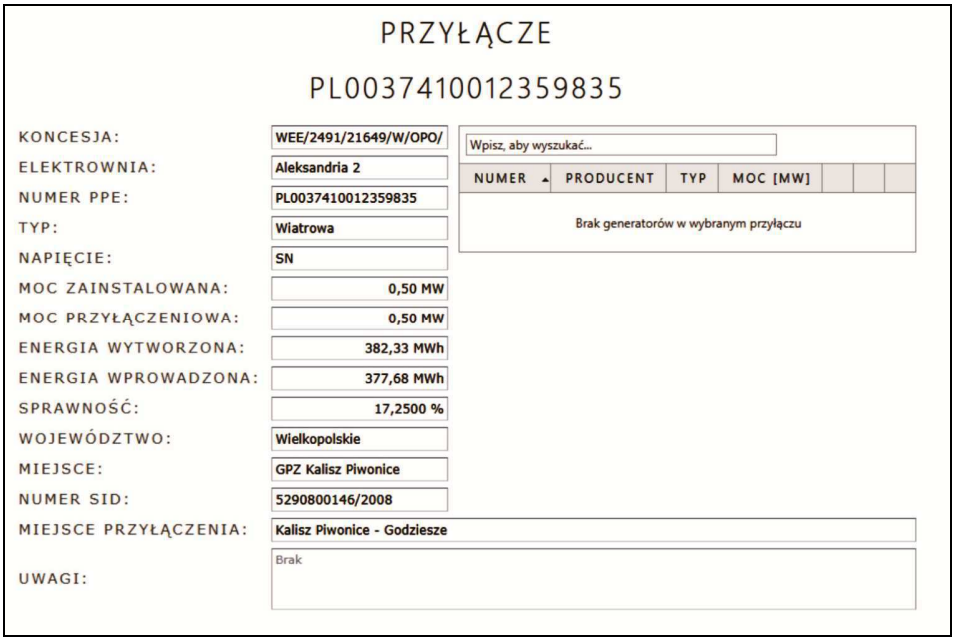
1.3. Moduł zarządzania danymi w bazie danych

Moduł ten jest bardzo obszernym narzędziem, dzięki któremu użytkownicy mogą dodawać oraz modyfikować dane dotyczące każdego obiektu w systemie, zaś wszystkie zawarte w nim formularze są zabezpieczone przed wprowadzaniem niepoprawnych danych oraz wymagają wpisania wszystkich niezbędnych danych.

Operator ma za zadanie aktualizować koncesje posiadane przez firmy, które wydawane są przez odpowiednie urzędy. Są to uprawnienia pozwalające na sprzedaż energii elektrycznej wyprodukowanej przez elektrownie. Koncesje w systemie są potrzebne do tego, aby móc podpinać pod nie elektrownie różnych typów. Z kolei każda z elektrowni ma co najmniej jedno przyłącze, do którego mogą być podłączone generatory.

Moduł zarządzania danymi realizuje zarządzanie firmami i koncesjami, elektrowniami, przyłączami, generatorami i użytkownikami.

Przykładowe dane o przyłączu przedstawiono na rysunku 3.

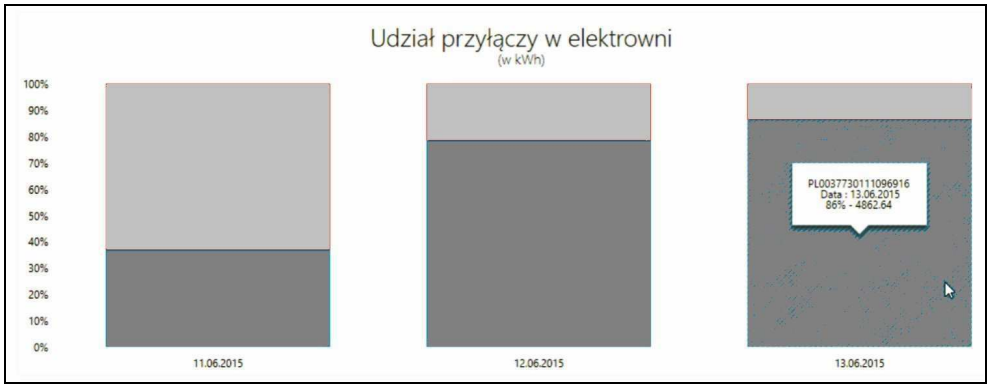


Rysunek 3. Szczegóły przyłącza elektrowni Aleksandria 2

1.4. Moduł raportowania

Moduł ten służy do przekazywania informacji użytkownikowi w postaci wykresów lub tabel. Pierwszym możliwym sposobem jest graficzne przedstawienie danych bezpośrednio na stronie internetowej. Jest to realizowane w formie interaktywnych wykresów wykonanych w technologii JavaScript z wykorzystaniem jQuery oraz DevExtreme. Umożliwiają one przybliżanie i przesuwanie krzywych wykresów, co w efekcie skutkuje dynamiczną zmianą skali. Dostępne jest wyłączanie poszczególnych elementów za pomocą legendy w sytuacji, jeżeli wykres zawiera zbyt dużą liczbę przyłączy. Dodatkowo użytkownik kilkoma prostymi ruchami może dostosować wykres do swoich oczekiwań.

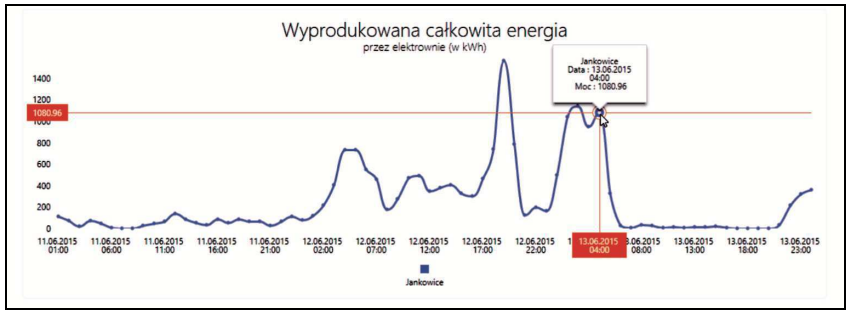
Główna prezentacja danych następuje po wybraniu elektrowni, trybu zarządzania zakresem daty oraz wybraniu możliwości przedstawienia przychodu w tym czasie. Elektrownia może mieć kilka źródeł wytwarzania energii przyłączonych do różnych przyłączy. Na rysunku 4 widoczny jest udział procentowy wyprodukowanej energii przypadającej na dwa przyłącza znajdujące się w elektrowni do całkowitej energii wyprodukowanej przez elektrownię w wybranych dniach.



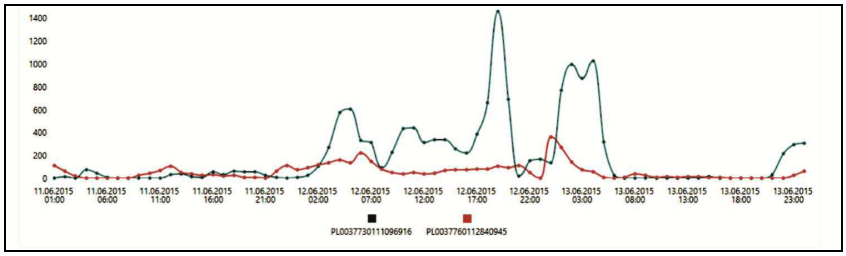
Rysunek 4. Udział procentowy wyprodukowanej energii przypadającej na poszczególne przyłącza do całkowitej energii wyprodukowanej przez elektrownię

Z kolei na rysunku 5 zilustrowano przebieg produkcji energii w całej elektrowni w wybranym czasie z interwałem godzinowym. Użytkownik, przesuwając kursor na wybrany punkt, dostaje dokładną informację na temat nazwy elektrowni, godziny oraz wytworzonej mocy.

Na rysunku 6 przedstawiono produkcję energii przenoszonej przez poszczególne przyłącza. Prezentacja poszczególnych przyłączy jest wykorzystywana przez operatorów do wykrywania błędów w działaniu całego systemu.

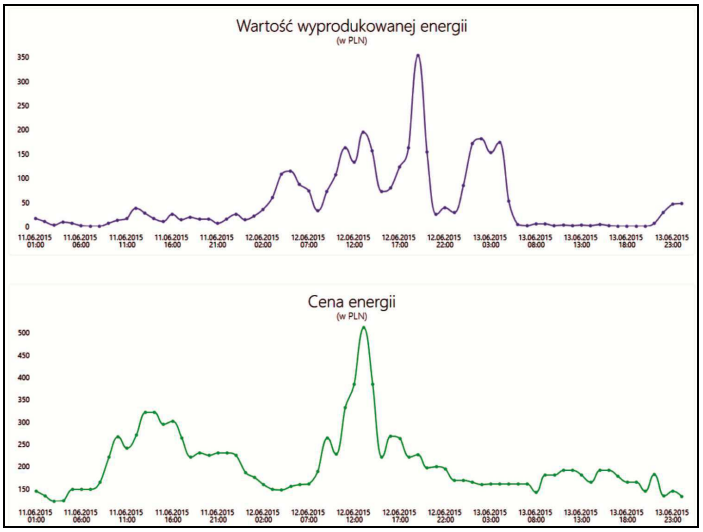


Rysunek 5. Całkowita produkcja elektrowni



Rysunek 6. Energia elektryczna przenoszona przez poszczególne przyłącza

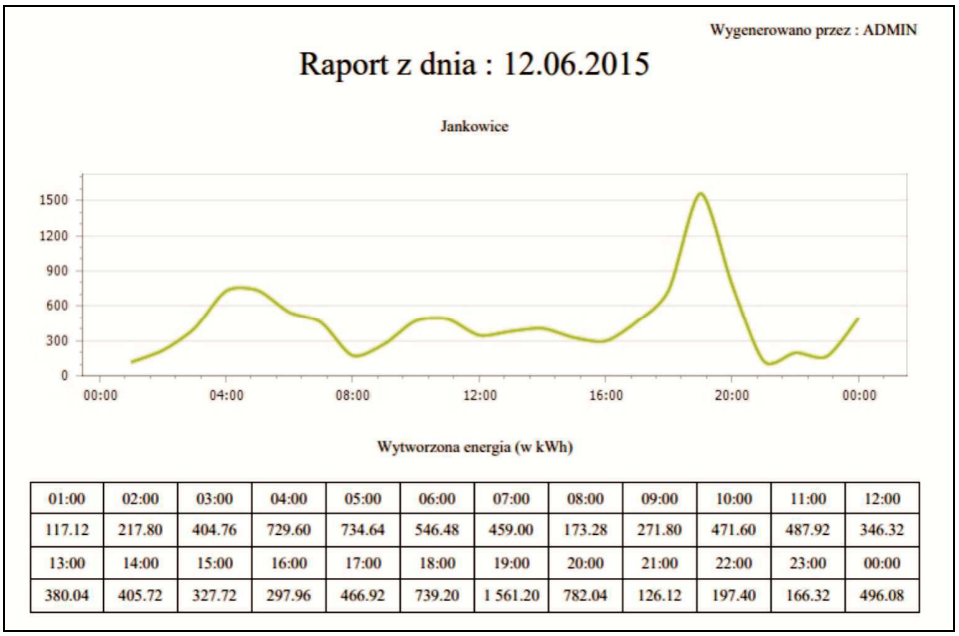
Dla przykładu, jeżeli wybrano możliwość wyświetlania przychodu, generowane są dodatkowo dwa wykresy: jeden przedstawia energię przeliczoną na zysk danej elektrowni, zaś drugi wskazuje przebieg cen energii na podstawie cen w danym dniu na rynku bilansującym pobieranych z platformy CIRE. Całość jest widoczna na rysunku 7.



Rysunek 7. Wykresy przedstawiające prawdopodobne przychody ze sprzedaży oraz cenę energii w danym okresie

Kliknięcie w konkretny wykres słupkowy pokazany na rysunku 4 powoduje przefiltrowanie następnych wykresów, z uwzględnieniem zaznaczonego dnia. Dzięki temu użytkownik w wygodny sposób może dokonać analizy przebiegu zmian w pracy elektrowni.

System zapewnia również generowanie raportów w formacie PDF. Można wykonać trzy typy raportów: dzienny, miesięczny oraz przekroczeń mocy. Na kolejnym rysunku (rys. 8) przedstawiono raport dzienny dla wybranej elektrowni.



01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00
117.12	217.80	404.76	729.60	734.64	546.48	459.00	173.28	271.80	471.60	487.92	346.32
13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	00:00
380.04	405.72	327.72	297.96	466.92	739.20	1 561.20	782.04	126.12	197.40	166.32	496.08

Rysunek 8. Wycinek raportu dziennego

Raport miesięczny generowany jest na podobnych zasadach, jednakże z zastosowaniem interwału dziennego zamiast interwału godzinowego, zaś wszystkie dane w tabelach pod wykresami są przedstawione jako informacje o zsumowanej wytworzonej energii elektrycznej.

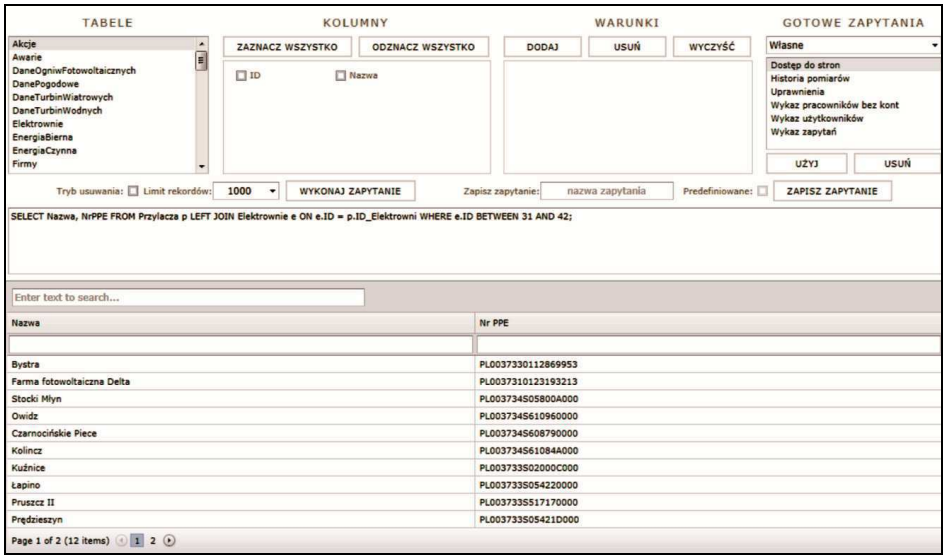
Możliwe jest też raportowanie przekroczenia mocy nominalnej elektrowni w postaci sumy mocy nominalnych przyłączy.

1.5. Moduł kalkulatora inwestycyjnego

Głównym celem kalkulatora inwestycyjnego jest możliwość oszacowania ilości wytworzonej energii przez elektrownię wiatrową w ciągu roku oraz czasu, w którym zwrócą się poniesione nakłady inwestycyjne. Użytkownik, po wprowadzeniu odpowiednich danych, otrzymuje interesujące go informacje na temat produkcji energii elektrycznej oraz opłacalności inwestycji. Obliczenia bazują na rozkładzie Weibulla, klasach szorstkości terenu i obliczeniach prędkości wiatru [9, 10].

1.6. Moduł do wykonywania zapytań SQL na bazie danych

Moduł ten pozwala użytkownikom nieznającym języka SQL (*structured query language*) wygenerować zapytanie. Za jego pomocą możliwe jest intuicyjne budowanie zapytań SQL, które następnie mogą zostać zapisane w bazie do późniejszego wykorzystania. Przykładowo, aby zbudować poprawnie działającą instrukcję, należy wybrać tabelę, następnie użyć opcji *Wykonaj*, po czym w dolnej części strony pojawi się zbiór rekordów spełniający warunki zapytania. Opcjonalnie można dokonać wyboru kolumn i warunków. Widok tego konstruktora przedstawiono na poniższym rysunku (rys. 9).



Rysunek 9. Konstruktor zapytań SQL

Podsumowanie

Szybki dostęp do danych, ich analiza i przejrzysta prezentacja jest ważnym elementem w pracy podmiotów gospodarczych oraz określonych instytucji. W tym celu, aby operatorzy systemów dystrybucji energii mogli analizować parametry energii wytwarzanej przez elektrownie, należy poszczególne dane zgromadzić w jednym miejscu. Stworzona aplikacja pozwala na importowanie plików Excel z danymi o produkcji energii i mocy elektrycznej przez źródła energii odnawialnej. Uwzględnia specyfikę źródeł i różne formaty danych w dostarczanych plikach oraz umożliwia uruchamianie w osobnym wątku automatycznego sprawdzania na zdefiniowanych serwerach obecności nowych danych. Jest to rozwiązanie unikatowe.

Zaprojektowany system posiada rozbudowany moduł raportowania, który prezentuje dane na stronie, głównie w formie interaktywnych wykresów, lub pozwala na eksportowanie raportów w formacie PDF.

Dołączono do niego autorski kalkulator inwestycyjny oraz specjalny konstruktor zapytań SQL, który jest również nowatorskim rozwiązaniem.

System został utworzony w sposób modularny, co umożliwia późniejszą rozbudowę albo modyfikację poszczególnych jego elementów.

Rozwiązanie zostało zaprezentowane przedstawicielom polskich OSD. Aplikacja otrzymała pozytywną opinię i ma realne szanse na wdrożenie.

Wydaje się, że istnieje niedobór oprogramowania tego typu. Wraz z rozwojem energetyki odnawialnej będą potrzebne bardziej zaawansowane aplikacje do jej obsługi.

Literatura

1. Strona producenta oprogramowania Breeze, http://www.greenbyte.com/ [dostęp: 25.05.2018].
2. Strona producenta oprogramowania SAM, http://photovoltaic-software.com/free.php [dostęp: 25.05.2018].
3. Lewandowski W.M., *Proekologiczne odnawialne źródła energii*, WNT, Warszawa 2010.
4. Lubośny Z., *Elektrownie wiatrowe w systemie elektroenergetycznym*, WNT, Warszawa 2009.
5. Lis M., *C#. Praktyczny kurs, Wydanie III*, Helion, Gliwice 2016.
6. https://documentation.devexpress.com/GeneralInformation/2216/General-Information [dostęp: 05.06.2018].
7. Robin D., *SQL Server. Wstęp dla programistów*, Helion, Gliwice 2016.
8. Serwis informacyjny o Rynku Energii – ceny na rynku bilansującym, https://rynek-bilansujacy.cire.pl/st,17,107,me,0,0,0,0,0,ceny-energii-na-rb.html [dostęp: 27.04.2018].
9. Radziewicz W., *Produkcja energii elektrycznej w elektrowni wiatrowej w zależności od potencjału wiatru na różnych wysokościach*, http://www.ptzp.org.pl/files/konferencje/kzz/artyk_pdf_2009/104_Radziewicz.pdf [dostęp: 27.04.2018].
10. *Encyklopedia energii wiatrowej*, http://green-power.com.pl/pl/home/wiatr-i-jego-pomiar-w-energetyce-wiatrowej/ [dostęp: 28.04.2018].

SYSTEM FOR ANALYSIS AND VISUALIZATION OF ENERGY PARAMETERS

Abstract: *Demand for applications facilitating the analysis of energy produced by renewable sources increases due to their development in Poland. The paper presents a description of the system enabling the collection, analysis and visualization of data from various renewable energy sources.*

Jarosław Niedojadło

NOWY SYSTEM PRAKTYK ZAWODOWYCH NA STUDIACH O PROFILU PRAKTYCZNYM ZAPROPONOWANY PRZEZ PWSZ W ELBLĄGU

W artykule przedstawiono wyniki testowania nowej koncepcji praktyk zawodowych, merytorycznie opracowanej w PWSZ w Elblągu. Testowanie miało miejsce w PWSZ w Elblągu w ramach projektu pt. „Program praktyk zawodowych w Państwowych Wyższych Szkołach Zawodowych, prowadzonego przez MNiSW. Przedstawiono dotychczas stosowane w uczelni sposoby przygotowania, prowadzenia i rozliczania praktyk zawodowych, nowe rozwiązania wynikające z założeń projektowych oraz zdobyte doświadczenia i wnioski.

Wprowadzenie

Praktyki zawodowe są bardzo ważnym składnikiem procesu kształcenia, szczególnie na studiach o profilu praktycznym. Podczas praktyki studenci mogą pogłębić umiejętności nabyte w uczelni, pozyskać nowe, a zwłaszcza zdobyć doświadczenie zawodowe oraz niektóre kompetencje społeczne podczas wykonywania określonych prac i zadań pod nadzorem doświadczonych pracowników, np. inżynierów. Jednakże zorganizowanie oraz przeprowadzenie praktyk zawodowych, umożliwiających osiągnięcie ww. efektów nie jest łatwe i wymaga dobrej współpracy uczelni z zakładami pracy, szczególnie tymi działającymi w jej regionie.

W państwowych wyższych szkołach zawodowych przed 2014 rokiem stosowano różne rozwiązania dotyczące prowadzenia praktyk zawodowych, wynikające z profilu studiów oraz lokalnych doświadczeń, w tym we współpracy z otoczeniem gospodarczym i innymi instytucjami. Koncepcja jednolitego systemu praktyk zawodowych dla tej formacji uczelni została przygotowana w Państwowej Wyższej Szkole Zawodowej (PWSZ) w Elblągu – w uczelni, która zdobyła bardzo duże doświadczenie w prowadzeniu długoterminowych praktyk zawodowych [1]. Projekt został zgłoszony dwutorowo: poprzez Kontrakt Terytorialny Województwa Warmińsko-Mazurskiego do Ministerstwa Gospodarki oraz poprzez Konferencję Rektorów Publicznych Wyższych Szkół Zawodowych do Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego (MNiSW) (2013 rok) [2]. Ministerstwo – jako organ prowadzący – opracowało szczegółowy zakres i strukturę organizacyjną projektu, uruchomionego w 2016 roku jako projekt pozakonkursowy o charakterze koncepcyjnym pt. „Program praktyk zawodowych w Państwowych Wyższych Szkołach

Zawodowych" w ramach Programu Operacyjnego Wiedza Edukacja Rozwój współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego, zwany dalej projektem pilotażowych praktyk zawodowych lub krótko Projektem PPZ.

Projekt PPZ obejmuje kursowe praktyki zawodowe (KPZ) i dodatkowe, niewystępujące wcześniej w uczelnianych programach kształcenia, pilotażowe praktyki zawodowe (PPZ). Każda z powyższych praktyk powinna trwać 3 miesiące[1], co w sumie daje 6-miesięczne praktyki zawodowe. W Projekcie PPZ praktyka zawodowa jest traktowana jako jedna całość, a w jej części pilotażowej testuje się nowe rozwiązania.

Główne założenia oraz sposób realizacji Projektu PPZ zilustrowano na przykładzie rozwiązań stosowanych w PWSZ w Elblągu.

1. Praktyki zawodowe w PWSZ w Elblągu

W ciągu 20 lat działalności PWSZ w Elblągu bardzo dużą wagę przywiązywano do praktyk zawodowych, a zdobyte doświadczenie zostało wykorzystane i rozwinięte w Projekcie PPZ. W dalszej części tego artykułu opisano praktyki zawodowe na stacjonarnych studiach pierwszego stopnia o profilu praktycznym, prowadzone zgodnie z kierunkowymi programami kształcenia obowiązującymi w PWSZ w Elblągu. W Projekcie PPZ praktyki te nazwano kursowymi praktykami zawodowymi.

1.1. Ogólne zasady merytoryczne, organizacja i prowadzenie kursowych praktyk zawodowych w PWSZ w Elblągu

Kursowe praktyki zawodowe są przygotowywane i prowadzone na poszczególnych kierunkach studiów wg zasad określonych w sylabusie modułu dydaktycznego „Praktyka zawodowa" oraz w Regulaminie praktyki zawodowej. Są tam określone m.in.: czas trwania i cele praktyki zawodowej, efekty uczenia się, jakie ma osiągnąć student w trakcie praktyki, typowe miejsca odbywania praktyki zawodowej, zasady wyboru miejsca praktyki przez studenta, ogólny program praktyki oraz zasady jej dokumentowania i zaliczania.

Prace organizacyjne niezbędne do prowadzenia praktyk wykonują uczelniani opiekunowie praktyk powoływani przez rektora (na wniosek dyrektora instytutu). Każdemu kierunkowi studiów przypisano po jednym uczelnianym opiekunie praktyk. Wyjątkiem są praktyki na kierunkach nauczycielskich i pedagogicznych, gdzie każda specjalność ma odrębnego opiekuna praktyki. Do obowiązków uczelnianego opiekuna praktyki należy m.in.: uzgadnianie szczegółów organi-

[1] W przypadku kursowej praktyki zawodowej jest to jej wymiar minimalny.

zacyjnych z instytucją przyjmującą na praktykę, przeprowadzenie odprawy ze studentami przed rozpoczęciem praktyki, doraźna kontrola jej przebiegu, a po jej zakończeniu – ocena sprawozdania studenta z praktyki oraz zaliczenie lub udział w komisyjnym zaliczaniu praktyki.

Ze strony instytucji prowadzącej praktykę zawodową wyznaczani są zakładowi opiekunowie praktyk, którzy przygotowują miejsca praktyk, przydzielają praktykantom zadania i je rozliczają, potwierdzają w dzienniku praktyki wykonanie prac oraz oceniają przebieg praktyki. Zakładowym opiekunem praktyk może być pracownik z dużym doświadczeniem zawodowym zgodnym z kierunkiem studiów praktykanta oraz posiadający wyższe wykształcenie. Kompetencje kandydata na zakładowego opiekuna praktyk ocenia dyrektor instytutu.

1.2. Kursowe praktyki zawodowe na kierunkach technicznych w PWSZ w Elblągu

Kształcenie inżynierów w PWSZ w Elblągu prowadzone jest na czterech kierunkach studiów: *budownictwo*, *informatyka*, *inżynieria środowiska*[2], *mechanika i budowa maszyn*. Każdy student ma obowiązek odbycia 15-tygodniowej praktyki zawodowej w semestrze VII – poprzedzającym semestr dyplomowy. Wyjątkowo na kierunku studiów *budownictwo* praktyka zawodowa jest podzielona na dwie części (3 tygodnie w semestrze IV oraz 12 tygodni w semestrze VII).

Miejsca praktyk są najczęściej przygotowywane przez uczelnię, jednakże studenci – szczególnie zamiejscowi – mają możliwość zgłaszania własnych propozycji. Możliwe jest także odbywanie praktyk w firmach na terenie państw Unii Europejskiej. Zgłaszane propozycje są opiniowane pod względem merytorycznym przez uczelnianych opiekunów praktyk i zatwierdzane przez dyrektora instytutu. W każdym przypadku uczelnia zawiera pisemne porozumienia z instytucjami przyjmującymi studentów na praktyki.

W okresie swojej działalności PWZS w Elblągu nawiązała współpracę z 455 instytucjami, w tym w podziale na kierunki studiów:

- *budownictwo* – 132 instytucje,
- *informatyka* – 284 instytucje,
- *mechanika i budowa maszyn* – 39 instytucji.

Do 2017[3] roku na kierunkach *budownictwo* oraz *mechanika i budowa maszyn* wybór miejsca odbywania praktyki był najczęściej powiązany z tematem pracy dyplomowej, gdyż w semestrze poprzedzającym praktyki zawodowe studenci wybierali tematy prac dyplomowych, a następnie miejsce odbywania praktyki.

W przypadkach gdy temat pracy dyplomowej był zgłoszony przez zakład pracy, wybór tematu był jednocześnie wyborem miejsca praktyki. Na kierunku *informatyka* wybór miejsc odbywania praktyk nie był wprost powiązany z tematyką

[2] Na kierunku studiów *inżynieria środowiska* praktyki zawodowe odbędą się w 2019 roku.
[3] Od 2017 roku stosowano rozwiązania wypracowane w ramach Projektu PPZ (patrz punkty 2.3 i 2.6).

prac dyplomowych, jednakże – podobnie jak na pozostałych technicznych kierunkach studiów – studenci mieli możliwość modyfikacji lub zmiany tematu pracy dyplomowej w trakcie trwania praktyki zawodowej, tak aby mogli podjąć się rozwiązania rzeczywistego problemu występującego w zakładzie.

Jak wspomniano wcześniej, nadzór nad przebiegiem praktyk zawodowych sprawują uczelniani opiekunowie praktyk zawodowych (po jednym na kierunek studiów) oraz zakładowi opiekunowie praktyk, wskazani przez zakład pracy. Student kierowany na praktykę zawodową otrzymuje skierowanie na formularzu, który jednocześnie pełni funkcję protokołu zaliczenia praktyki. W trakcie odbywania praktyki, studenci kierunków *budownictwo* oraz *mechanika i budowa maszyn* prowadzą dzienniki praktyk, w których opisują wykonywane prace i zadania, ich realizację potwierdza zakładowy opiekun praktyki. Po zakończeniu praktyki studenci przygotowują sprawozdania, w których skrótowo opisują przebieg praktyki oraz dokonują samooceny, w jakim stopniu osiągnęli zakładane efekty uczenia się. Na kierunku studiów *informatyka* studenci nie prowadzą dzienników praktyk, a jedynie sporządzają obszerne sprawozdania, w których opisują przebieg praktyki oraz prace wykonane w czasie jej trwania.

Praktyki zawodowe są zaliczane komisyjnie. W skład komisji wchodzi dyrektor lub wicedyrektor instytutu, uczelniany opiekun praktyk, nauczyciel akademicki związany z danym kierunkiem studiów. Punktem wyjściowym zaliczenia jest odczytanie przez przewodniczącego komisji oceny wystawionej przez zakładowego opiekuna praktyki oraz krótka charakterystyka i ocena sprawozdania z praktyki, przedstawiona przez uczelnianego opiekuna praktyki. Następnie weryfikowana jest wiedza i umiejętności nabyte przez studenta, w trakcie krótkiej merytorycznej dyskusji o zagadnieniach rozwiązywanych przez niego w trakcie odbywania praktyki. Ocena zaliczająca praktykę jest wystawiana komisyjnie.

1.3. Kursowe praktyki zawodowe na kierunkach społecznych w PWSZ w Elblągu

Na kierunkach studiów *administracja* oraz *ekonomia* praktyki zawodowe są przygotowywane i prowadzone podobnie jak na kierunkach technicznych. Jednakże miejsc odbywania praktyk nie wiązano z tematyką prac dyplomowych. W trakcie odbywania praktyki studenci nie prowadzą dzienników praktyk, lecz sporządzają raport z jej przebiegu. Praktykę zalicza uczelniany opiekun praktyk na podstawie sporządzonego raportu oraz oceny praktyki wystawionej przez zakładowego opiekuna praktyki.

Na potrzeby praktyk zawodowych nawiązano współpracę z 305 instytucjami, w tym na kierunkach studiów, odpowiednio:

- *administracja* – 137 instytucji,
- *ekonomia* – 168 instytucji.

1.4. Kursowe praktyki na kierunkach pedagogicznych i nauczycielskich w PWSZ w Elblągu

Uczelnia oferuje kierunki studiów: *filologia*, *filologia polska*, *pedagogika*, *pedagogika specjalna*, w ramach których dostępne są specjalności kształcenia nauczycielskie i nienauczycielskie, co ma wpływ na organizację i przebieg praktyk zawodowych. Do 2014 roku ww. kierunki studiów były prowadzone w ramach tzw. profilu ogólnoakademickiego (gdzie obowiązywał mniejszy wymiar godzinowy praktyk zawodowych), a do 2017 roku trwał okres przejściowy dla wyższych szkół zawodowych, w czasie którego programy kształcenia (w tym programy praktyk zawodowych) były dostosowywane do wymogów profilu praktycznego, co czyniono z jednoczesnym uwzględnieniem wytycznych MNiSW w sprawie standardów kształcenia nauczycieli. Okres dostosowawczy pokrył się z pierwszym etapem Projektu PPZ. W dalszej części artykułu opisano przebieg praktyk zawodowych odbywanych w okresie od listopada 2016 do czerwca 2018 roku[4].

Nauczycielskie praktyki zawodowe

Były prowadzone w łącznym wymiarze 150 godz. dydaktycznych, w podziale na:

- **praktyki asystenckie** (90 godz. dydaktycznych, 30 dni): w semestrach III i IV studenci przebywali we wskazanej placówce dydaktycznej, jeden dzień w tygodniu (8 godz. dydaktycznych) i uczestniczyli w prowadzeniu zajęć z uczniami, w wymiarze 3 godz. lekcyjnych. Praktyki były prowadzone w 4-5-osobowych grupach studenckich pod nadzorem zakładowego opiekuna praktyki,
- **praktyki nauczycielskie** (60 godz. dydaktycznych, 20 dni): w semestrze V (wrzesień-październik) studenci przebywali w placówce dydaktycznej, łącznie 20 dni (8 godz. dydaktycznych dziennie), prowadzili lekcje w wymiarze 3 godz. dydaktycznych i inne zajęcia pod nadzorem zakładowego opiekuna praktyki.

Nienauczycielskie praktyki zawodowe

Praktyki te były prowadzone w łącznym wymiarze 90 lub 120 godz. dydaktycznych, w zależności od specjalności kształcenia, przykładowo na:

- **specjalności dziennikarsko-publicystycznej** (kierunek studiów: *filologia polska*) praktyka w wymiarze 120 godz. dydaktycznych odbywała się: w semestrach III (30 godz.), IV (30 godz.), V (60 godz.) i była prowadzona w blokach kilkudniowych po 8 godz. dydaktycznych dziennie,
- **specjalności: *języki obce w biznesie*** (kierunek studiów: *filologia angielska*) praktyka w wymiarze 90 godz. dydaktycznych odbywała się w semestrze IV.

Miejsca odbywania praktyk, szczególnie nauczycielskich, były przygotowywane przez uczelnię, jednakże studenci mogli zgłaszać swoje propozycje miejsc odbywania praktyk, które były weryfikowane przez uczelnianych opiekunów

[4] Od października 2018 roku praktyki zawodowe na kierunkach studiów filologicznych i pedagogicznych są prowadzone wg podobnych zasad, lecz w wymiarze min. 360 godz. dydaktycznych.

praktyk i zatwierdzane przez dyrektora instytutu. Na potrzeby praktyk zawodowych nawiązano współpracę z 284 instytucjami, w tym:
- na specjalnościach nauczycielskich – 253 instytucje,
- na specjalnościach nienauczycielskich – 31 instytucji.

Przebieg praktyki był dokumentowany w dzienniku praktyki, do którego student dołączał wykonane przez siebie konspekty, materiały dydaktyczne i inne opracowania. Praktykę zaliczał uczelniany opiekun praktyki, który brał pod uwagę opinię zakładowego opiekuna praktyki oraz zawartość dziennika praktyki.

2. Projekt pilotażowych praktyk zawodowych

Po uruchomieniu Projektu PPZ, co nastąpiło w 2016 roku, został powołany 15-osobowy specjalny zespół ekspertów, składający się z przedstawicieli PWSZ oraz przedstawicieli związku pracodawców, który opracował wszystkie założenia merytoryczne dotyczące PPZ oraz wzory dokumentów niezbędnych do prowadzenia i rejestrowania przebiegu praktyk.

2.1. Nowe podejście do praktyk zawodowych

Jak już wspomniano we Wprowadzeniu, w Projekcie PPZ przyjęto, że praktyka ma trwać 6 miesięcy i składać się z KPZ (min. 3 miesiące) oraz z dodatkowej 3-miesięcznej PPZ.

Wprowadzono pewne ujednolicenie sposobu opracowania efektów uczenia się, przyporządkowanych praktyce zawodowej, ujmujące efekty dotychczas realizowane i nowe.

Ze względu na dużą różnorodność kierunków studiów prowadzonych w PWSZ były one przygotowane w podziale na cztery rodzaje kierunków studiów [3] dla:
- kierunków technicznych (w tym informatycznych),
- kierunków nauczycielskich,
- kierunków utworzonych w obszarze kształcenia w zakresie nauk medycznych i nauk o zdrowiu oraz nauk o kulturze fizycznej,
- kierunków utworzonych w obszarach kształcenia w zakresie nauk społecznych i/lub nauk humanistycznych, np.: administracja, ekonomia itp.

Uczelniom zaproponowano ujednolicony sposób dokumentowania przebiegu praktyk oraz sposób jej zaliczania, w formie zaliczenia komisyjnego. Wprowadzono minizadania zawodowe jako sposób weryfikacji umiejętności nabytych przez praktykantów, stosowany w trakcie praktyki oraz po jej zakończeniu – podczas zaliczenia komisyjnego. Docelowo zaplanowano wprowadzenie informatycznego systemu obsługi praktyk zawodowych mającego usprawnić: obieg infor-

macji, komunikację między opiekunami praktyk i praktykantami oraz ograniczyć do minimum dokumentację „papierową". Wprowadzono powiązanie praktyk zawodowych z wykonywaniem tzw. aplikacyjnych prac dyplomowych (patrz punkt 2.6), traktowane jako rozwiązanie systemowe. Liczba aplikacyjnych prac dyplomowych jest jednym ze wskaźników projektowych. Bardzo precyzyjnie określono obowiązki: praktykantów, zakładowych i uczelnianych opiekunów praktyk, uczelni oraz instytucji prowadzącej praktyki – z uwzględnieniem etapu przygotowania, odbywania i zaliczania praktyk zawodowych [3].

W ramach Projektu PPZ (całkowicie w części dotyczącej PPZ i częściowo w części dotyczącej praktyk kursowych) zastosowano system motywacyjny: stypendia dla praktykantów, refundowanie dodatkowych kosztów praktykantów, wynagrodzenie dla zakładowych i uczelnianych opiekunów praktyk. Należy wyraźnie podkreślić, że ww. świadczenia dla zakładowych opiekunów praktyk nie były wynagrodzeniem za prowadzenie praktyk, lecz za zwiększony nakład pracy związany z wdrożeniem nowego systemu praktyk zawodowych w danej instytucji, tak aby w kolejnych latach można było powielać wypracowane rozwiązania.

2.2. Program pilotażowych praktyk zawodowych

Praktyki zawodowe, zarówno kursowe, jak i pilotażowe, uczelnie prowadzą w oparciu o programy praktyk, które opracowały oddzielnie dla każdego kierunku studiów. W przypadku praktyk kursowych uczelnie stosują swoje dotychczasowe rozwiązania, jednakże w przypadku PPZ wprowadzono ujednolicone rozwiązania w skali całego Projektu PPZ. Zespół ekspertów opracował ogólne cele praktyki zawodowej, które powinien osiągnąć student [3]. Są to:

- pogłębienie i poszerzenie umiejętności zdobytych przez studenta w czasie studiów i nabycie nowych umiejętności poprzez praktyczne rozwiązywanie rzeczywistych zadań zawodowych. Poszerzenie wiedzy zdobytej w czasie studiów,
- nabycie umiejętności i zachowań potrzebnych w środowisku pracy (praca w zespole, należyty stosunek do pracy i innych współuczestników, z którymi praca jest wykonywana),
- zapoznanie praktykantów z organizacją i funkcjonowaniem instytucji oraz jej komórek związanych z realizacją zadań bezpośrednio powiązanych z kierunkiem i specjalnością studiów,
- zapoznanie z wyposażeniem technicznym, technologicznym i informatycznym instytucji,
- poznanie środowiska zawodowego, zasad etyki zawodowej, holistycznego i zindywidualizowanego podejścia do osób podczas odbywania praktyk zawodowych.

Dla każdego rodzaju kierunków studiów opracowano „Modelowe efekty kształcenia" dla 6-miesięcznej praktyki zawodowej [3], które stanowiły dla uczelni

bazę do opracowania przedmiotowych efektów uczenia się[5] dla PPZ prowadzonych na poszczególnych kierunkach studiów. Założono przy tym, że efekty uczenia się dotyczą całej 6-miesięcznej praktyki zawodowej, tj. kursowej i pilotażowej łącznie, w tym sensie, że efekty uczenia się przypisane do PPZ są nowymi w stosunku do efektów uczenia się przypisanych kursowej praktyce, ewentualnie stanowią ich pogłębienie lub/i poszerzenie.

Sposób opracowywania efektów uczenia się przedstawiono na przykładzie kierunku *budownictwo* prowadzonego w PWSZ w Elblągu. W pierwszym kroku przeprowadzano analizę sylabusów i regulaminów praktyk zawodowych obowiązujących na kierunku studiów. Efekty uczenia się ujęte w sylabusach zapisano w tabeli zakładanych efektów kształcenia (uczenia się) dla 6-miesięcznej praktyki zawodowej (tab. 1), gdzie w kolumnie dotyczącej praktyki kursowej wskazano, na którym etapie praktyki kursowej efekty są osiągane[6]. W kolejnym kroku, po analizie modelowych efektów kształcenia (uczenia się) dla danego rodzaju kierunków studiów, w tym przypadku kierunków technicznych (tab. 2), opracowano efekty uczenia się dla PPZ. Część z nich pokrywa się z efektami określonymi dla praktyki kursowej, przy założeniu, że będą one rozwijane i pogłębiane w trakcie PPZ, np. efekt nr 11 (tab. 1). Opracowano także 5 nowych efektów uczenia się (nr 13-17) dotyczących wyłącznie PPZ. Wszystkie efekty uczenia się, dotyczące praktyki zawodowej na kierunku *budownictwo*, mają swoje odniesienia do efektów kształcenia (uczenia się) modelowych i kierunkowych, np. efekt 04 (tab. 1) jest odnoszony do efektu modelowego MoT05 i kierunkowego K_U16.

Na kolejnym etapie tabela modelowych efektów kształcenia (uczenia się) dla 6-miesięcznej praktyki zawodowej na kierunkach technicznych była uzupełniona o dane dotyczące praktyki zawodowej kierunku studiów *budownictwo*. Do każdego efektu modelowego przyporządkowano odpowiadające im efekty kształcenia (uczenia się) osiągane w ramach praktyki zawodowej kursowej i/lub pilotażowej, określone w tabeli 1, poprzez wpisanie ich numeru w odpowiedniej kolumnie tabeli 3. Umożliwiło to weryfikację, czy wszystkie efekty modelowe uwzględniono w programie praktyki zawodowej.

Ostatnim etapem było opracowanie systemu i metod weryfikacji efektów uczenia się dotyczących 6-miesięcznej praktyki zawodowej. Określono: kto, na jakiej podstawie i na którym etapie praktyki zawodowej, zalicza wskazane efekty uczenia się (tab. 4).

[5] W okresie opracowania dokumentacji projektowej obowiązywało pojęcie „efekty kształcenia". Obecnie, zgodnie z Polską Ramą Kwalifikacji, stosuje się pojęcie „efekty uczenia się". Ze względu na cytowaną dokumentację projektową, w której funkcjonuje pojęcie efektów kształcenia, w odwołaniach do tych dokumentów stosowano określenie „efekty kształcenia" z podaniem nowej nazwy w nawiasie. Nie zmienia to sensu merytorycznego, gdyż efekty kształcenia, przewidziane dla praktyki zawodowej, w sensie merytorycznym odpowiadają efektom uczenia się.

[6] Prowadzone są dwie praktyki zawodowe, 3-tygodniowa w IV semestrze i 12-tygodniowa w VII semestrze.

Tabela 1. Zakładane efekty kształcenia 6-miesięcznej praktyki zawodowej na kierunku studiów *budownictwo*, prowadzonym w PWSZ w Elblągu i odniesienie ich do modelowych efektów kształcenia dla praktyki kursowej i pilotażowej [4]

Nr	Opis efektów kształcenia praktyki zawodowej	Odniesienie do efektów:			Efekt osiągany w ramach praktyki:		
					Kursowej dzielonej		Pilota-żowej
		Modelowych	Obszarowych i inżynierskich	Kierunkowych	PK1	PK2	PP
01	Zna elementarne zasady funkcjonowania przedsiębiorstwa budowlanego realizującego prace budowlano-montażowe	MoT 01	T1P_U05 T1P_W08	K_W14	X		
02	Zna elementarne zasady organizacji i kierowania budową	MoT 05	T1P_U19 T1P_K01	K_W12 K_W14 K_U16	X		
03	Opisuje przeznaczenie i zasadę działania wybranych maszyn lub urządzeń stosowanych w pracach budowlanych	MoT 02	T1P_U17	K_W14 K_U21	X		
04	Potrafi wykonywać proste prace budowlane i budowlano-montażowe	MoT 05	T1P_U18 T1P_U19 InzP_U12 T1P_K01	K_U16	X		
05	Potrafi zidentyfikować zagrożenia bezpieczeństwa pracy podczas realizacji robót budowlanych	MoT 04	T1P_U11 InzP_K01	K_U13	X		
06	Zna i potrafi opisać zasady funkcjonowania przedsiębiorstwa budowlanego oraz obowiązki uczestników procesu inwestycyjno-budowlanego	MoT 01	T1P_U05 T1P_W08	K_W12 K_W17		X	
07	Potrafi opisać budowę, działanie oraz zasady eksploatacji wybranych maszyn lub urządzeń stosowanych w budownictwie	MoT 02	T1P_U17	K_U21		X	
08	Ma doświadczenie w eksploatacji obiektów budowlanych i systemów technicznych stosowanych w budownictwie	MoT 03	T1P_U17 InzP_U10	K_U21		X	X
09	Potrafi identyfikować rzeczywiste zagrożenia z zakresu BHP występujące w zakładzie oraz zna praktyczne sposoby zapobiegania im	MoT 04	T1P_U11 InzP_K01	K_U16		X	
10	W oparciu o kontakty ze środowiskiem inżynierskim zakładu potrafi podnieść swoje kompetencje, wiedzę i umiejętności, co najmniej z dwóch zakresów: projektowania elementów lub obiektów budowlanych; przygotowania realizacji procesów budowlanych; organizacji i kierowania pracami budowlano-montażowymi	MoT 05	TP1_U05 T1P_U18 InzP_U09 InzP_U12 T1P_K01	K_U07 K_U16 K_K01		X	X

11	Potrafi zidentyfikować problem techniczny występujący w zakładzie, opisać go oraz przedstawić koncepcję rozwiązania	MoT 06	T1P_U13 T1P_U18 InzP_U05 InzP_U12	K_U22		X	X
12	Potrafi rozwiązać zadanie inżynierskie z zakresu działalności firmy	MoT 07	T1P_U18 T1P_U19 InzP_U09 InzP_U12	K_U22		X	X
13	Potrafi komunikować się w środowisku zawodowym, stosując różne techniki i z użyciem specjalistycznej terminologii	MoT 08	T1P_U02 T1P_U07	K_U14 K_U20			X
14	Potrafi przygotować specjalistyczną informację z zakresu projektowania elementów lub obiektów budowlanych; przygotowania realizacji procesów budowlanych; organizacji i kierowania pracami budowlano-montażowymi i przekazać ją innym pracownikom	MoT 09	T1P_U02 T1P_U04 T1P_K01	K_U14 K_U20 K_K01 K_K04 K_K07			X
14	Jest gotów do przestrzegania zasad postępowania gwarantujących właściwą jakość działań zawodowych oraz bezpieczeństwo	MoT 10	T1P_K02 T1P_K05 InzP_K01	K_K02 K_K05			X
16	Jest gotów do utrzymywania właściwych relacji w środowisku zawodowym	MoT 11	T1P_K03 T1P_K05	K_K03 K_K05			X
17	Jest gotów do pracy w zespole i przestrzegania zasad etyki zawodowej	MoT 12	T1P_K03 T1P_K05	K_K03 K_K04 K_K05			X

Tabela 2. Wybrane modelowe efekty kształcenia 6-miesięcznej praktyki zawodowej na kierunkach technicznych i odniesienie ich do efektów kształcenia dla praktyki zawodowej na wybranym kierunku studiów prowadzonym przez uczelnię (z podziałem na praktykę kursową i pilotażową) [3]

Nr	**Dla kierunków technicznych**		**Dla kierunku studiów prowadzonym przez uczelnię: ……..**			
	Opis modelowych efektów kształcenia praktyki zawodowej	**Odniesienie do efektów obszarowych i inżynierskich**	**Odniesienie do efektów kierunkowych**	**Efekt osiągany w ramach praktyki:**		
				Kursowej	**Pilotażowej**	
					Pogłębiany	**Nowy**
MoT 01	Zna i potrafi opisać zasady funkcjonowania wybranych działów technicznych zakładu, w którym odbywa praktykę	TP1_U05 T1P_W08				
MoT 02	Potrafi opisać budowę, działanie oraz zasady eksploatacji wybranych maszyn lub urządzeń stosowanych w firmie	T1P_U17				
MoT 03	Ma doświadczenie związane z utrzymaniem wybranych urządzeń, systemów i obiektów technicznych typowych dla studiowanego kierunku	T1P_U17 InżP_U10				
MoT 04	Potrafi identyfikować rzeczywiste zagrożenia z zakresu BHP występujące w zakładzie oraz zna praktyczne sposoby zapobiegania im	T1P_U11 InzP_K01				

MoT 05	W oparciu o kontakty ze środowiskiem inżynierskim zakładu podnosi swoje umiejętności i kompetencje (ewentualnie poszerza wiedzę) w zakresach: a) projektowania …… (maszyn, obiektów budowlanych, procesów produkcyjnych, oprogramowania komputerowego i in.) b) realizacji procesów ..... (np. produkcyjnych, budowlanych) c) organizacji i kierowania pracami …. (np. budowlanymi) d) eksploatacji, w tym utrzymania …. (np. maszyn, urządzeń itp.)	TP1_U05 T1P_U18 InzP_U09 InzP_U12 T1P_K01				
…	…	…				

Tabela 3. Wybrane modelowe efekty kształcenia 6-miesięcznej praktyki zawodowej na kierunkach technicznych i odniesienie ich do efektów kształcenia dla praktyki zawodowej na kierunku studiów *budownictwo* prowadzonym w PWSZ w Elblągu, z podziałem na praktykę kursową i pilotażową [4]

Nr	**Dla kierunków technicznych**		**Dla uczelnianego kierunku *budownictwo***			
	Opis modelowych efektów kształcenia praktyki zawodowej	**Odniesienie do efektów obszarowych i inżynierskich**	**Odniesienie do efektów kierunkowych**	**Efekt osiągany w ramach praktyki:**		
				Kurso-wej	**Pilotażowej**	
					Pogłę-biany	**Nowy**
MoT 01	Zna i potrafi opisać zasady funkcjonowania wybranych działów technicznych zakładu, w którym odbywa praktykę	TP1_U05 T1P_W08	K_W12 K_W14 K_W17	01, 06		
MoT 02	Potrafi opisać budowę, działanie oraz zasady eksploatacji wybranych maszyn lub urządzeń stosowanych w firmie	T1P_U17	K_W14 K_U21	03, 07		
MoT 03	Ma doświadczenie związane z utrzymaniem wybranych urządzeń, systemów i obiektów technicznych typowych dla studiowanego kierunku	T1P_U17 InżP_U10	K_U21	08	08	
MoT 04	Potrafi identyfikować rzeczywiste zagrożenia z zakresu BHP występujące w zakładzie oraz zna praktyczne sposoby zapobiegania im	T1P_U11 InzP_K01	K_U13 K_U16	05, 09		
MoT 05	W oparciu o kontakty ze środowiskiem inżynierskim zakładu podnosi swoje umiejętności i kompetencje (ewentualnie poszerza wiedzę) w zakresach: a) projektowania …… (maszyn, obiektów budowlanych, procesów produkcyjnych, oprogramowania komputerowego i in.) b) realizacji procesów … (np. produkcyjnych, budowlanych) c) organizacji i kierowania pracami …. (np. budowlanymi) d) eksploatacji, w tym utrzymania …. (np. maszyn, urządzeń itp.)	TP1_U05 T1P_U18 InzP_U09 InzP_U12 T1P_K01	K_W12 K_W14 K_U07 K_U16 K_K01	02, 04, 10	10	
…	…	…	…	…	…	…

Tabela 4. System i metody weryfikacji efektów kształcenia praktyki zawodowej realizowanej na kierunku studiów *budownictwo* prowadzonym w PWSZ w Elblągu [4]

System i metody weryfikacji efektów kształcenia praktyki zawodowej	Nr efektu kształcenia	
	Modelowego dla praktyki zawodowej	Na kierunku studiów *budownictwo*
Bezpośredni nadzór nad pracami studenta (wpis do dziennika praktyki, opinia i ocena wydana przez opiekuna zakładowego)	MoT: 03, 06, 07, 08, 09, 10, 11, 12	04, 08, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17
Sprawozdanie z praktyki (opinia i ocena wydana przez opiekuna uczelnianego)	MoT: 01, 02, 04, 06, 07	01, 02, 03, 05, 06, 07, 09, 11, 12
Rozwiązywanie minizadań zawodowych opracowanych przez opiekuna zakładowego i opiekuna uczelnianego	MoT: 03, 05, 06, 07	08, 10, 11, 12

Opracowane efekty uczenia się oraz zasady ich weryfikacji, zakresy obowiązków praktykanta, ogólne cele praktyki zawodowej oraz jej ogólny przebieg, stanowiły dla uczelni podstawę do opracowania regulaminów pilotażowych praktyk zawodowych dla kierunków studiów objętych Projektem PPZ. Ważną część regulaminów praktyk stanowią wzory formularzy (zawarte w załącznikach do regulaminów), wykorzystywane m.in. w celu dokumentowania przebiegu i zaliczania praktyki. Przykłady regulaminów praktyk są dostępne na stronie internetowej obsługującej Projekt PPZ w PWSZ w Elblągu [4].

2.3. Organizacja pilotażowych praktyk zawodowych w PWSZ w Elblągu

Rekrutacja praktykantów, instytucji prowadzących praktyki oraz opiekunów praktyk do udziału w Projekcie PPZ była prowadzona z zachowaniem zasad konkurencyjności, ściśle określonych regulaminami opracowanymi w uczelni. Procedury projektowe nie są przedmiotem niniejszego opracowania, jednakże warto wspomnieć, że w PWSZ w Elblągu do udziału w Projekcie PPZ zgłaszały się głównie instytucje współpracujące od wielu lat z uczelnią przy organizowaniu praktyk zawodowych.

Zasady wyboru miejsc odbywania PPZ przez studentów uszczegóławiają regulaminy praktyk. Studenci wybierali instytucje z listy zatwierdzonych miejsc praktyk, z zachowaniem zasad konkurencyjności, tzn. wybierali w kolejności wynikającej z listy rankingowej (kolejność wg średniej oceny uzyskanej w toku studiów).

W ramach Projektu PPZ nawiązano współpracę ze 148[7] instytucjami odbywania praktyk zawodowych. Poniżej podano liczby instytucji w podziale na kierunki studiów:

- *administracja* – 24 instytucje,
- *budownictwo* – 10 instytucji,
- *ekonomia* – 39 instytucji,
- *informatyka* – 20 instytucji,

[7] Liczbę instytucji, w których odbywały się PPZ, określono odrębnie dla każdego kierunku studiów. W niektórych instytucjach praktyki odbywali studenci z kilku kierunków studiów, w różnych działach. Uwzględniając tego typu powtórzenia, współpracę nawiązano ze 125 instytucjami.

- *filologia* – 14 instytucji,
- *filologia polska* – 13 instytucji,
- *mechanika i budowa maszyn* – 7 instytucji,
- *pedagogika* –13 instytucji,
- *pedagogika specjalna* – 8 instytucji.

Uczelniani opiekunowie pilotażowych praktyk zawodowych (UOPPZ) byli wyłonieni w trybie z zachowaniem zasad konkurencyjności. W odróżnieniu od praktyk kursowych, na każdym kierunku studiów powoływano kilku UOPPZ, z których każdy pod opieką miał grupę nie większą niż 10 praktykantów.

Kandydaci na zakładowych opiekunów pilotażowych praktyk zawodowych (ZOPPZ) byli zgłaszani przez instytucje prowadzące praktyki, jednakże ich kompetencje, a w szczególności doświadczenie zawodowe, były weryfikowane przez uczelnię. Każdy ZOPPZ sprawował nadzór maksymalnie nad 5 praktykantami, a najlepiej sprawdzała się współpraca z jednym praktykantem.

Bardzo ważnym etapem realizacji Projektu PPZ były szkolenia opiekunów praktyk zawodowych prowadzone przez ekspertów wyznaczonych przez MNiSW. Opiekunowie byli zapoznawani z istotą Projektu PPZ oraz z zasadami przygotowania, prowadzenia, dokumentowania i zaliczania praktyk, a także z zakresem swoich obowiązków.

Kolejnym etapem było opracowanie szczegółowych programów i harmonogramów PPZ, wspólnie przez opiekunów zakładowego i uczelnianego oraz praktykanta. Ogólny program praktyki oraz zakładane efekty uczenia się zawierają regulaminy PPZ opracowane dla poszczególnych kierunków studiów. Szczegóły dostosowania programów do możliwości określonej instytucji odbywania praktyki zawodowej oraz do oczekiwań praktykanta ujmowano w szczegółowym programie PPZ. Zawiera on zestaw efektów kształcenia (uczenia się), jakie praktykant ma osiągnąć, powiązanych ze stanowiskami pracy i wykazem typowych prac, i wykonywać na PPZ. Wybrane przykłady z trzech kierunków studiów przedstawiono w tabelach 5-7.

Tabela 5. Przykładowy opis stanowisk i wykonywanych prac w powiązaniu z zakładanymi efektami kształcenia (uczenia się) ze szczegółowego programu PPZ dla kierunku studiów *mechanika i budowa maszyn* prowadzonego w PWSZ w Elblągu. Miejsce odbywania praktyki: Grupa Żywiec – Browar w Elblągu

Efekty kształcenia		**Stanowisko pracy/przykładowe prace wykonywane przez praktykanta**
03	Ma doświadczenie w eksploatacji wybranej maszyny, urządzenia lub systemu technicznego	Warsztat elektroautomatyki/linia rozlewnicza: Czynny udział w obsłudze wybranych maszyn i urządzeń (po przeszkoleniu: samodzielnie lub pod nadzorem)
05	W oparciu o kontakty ze środowiskiem inżynierskim zakładu potrafi podnieść swoje kompetencje, wiedzę i umiejętności, co najmniej z dwóch zakresów: projektowania procesów produkcyjnych, realizacji procesów wytwarzania, eksploatacji, w tym utrzymania maszyn i urządzeń	Warsztat mechaniczny/Warsztat Elektroautomatyki: Udział w przygotowaniu remontów wybranych maszyn i urządzeń Linia rozlewnicza: Czynny udział w nadzorowaniu wybranego procesu
…	…	…

Tabela 6. Przykładowy opis stanowiska i wykonywanych prac w powiązaniu z zakładanym efektem kształcenia (uczenia się) ze szczegółowego programu PPZ dla kierunku studiów *administracja* prowadzonego w PWSZ w Elblągu. Miejsce odbywania praktyki: Zakład Ubezpieczeń Społecznych w Elblągu

Efekty kształcenia		Stanowisko pracy/przykładowe prace wykonywane przez praktykanta
04	Student nabywa umiejętności organizacyjnych, obsługuje petentów, nawiązuje kontakty z instytucjami i innymi podmiotami funkcjonującymi w gospodarce. Koordynuje działania administracyjno-organizacyjne	Stanowisko ds. obsługi korespondencji: • korzystanie z urządzeń biurowych i użytkowanie aplikacji komputerowych • monitorowanie terminów w zakresie realizacji zadań na stanowisku pracy • rejestracja potwierdzeń odbioru • wprowadzanie zwolnień lekarskich do systemu • rejestrowanie wniosków komorniczych i wniosków o udostępnianie danych osobowych • rejestracja i skanowanie korespondencji wpływającej do zakładu
…	….	…

Tabela 7. Przykładowy opis stanowiska i wykonywanych prac w powiązaniu z zakładanym efektem kształcenia (uczenia się) ze szczegółowego programu PPZ dla kierunku studiów *filologia polska*, specjalność *dziennikarsko-publicystyczna*, prowadzonego w PWSZ w Elblągu. Miejsce praktyki: Stowarzyszenie Rozwoju Rozgłośni Radiowej w Elblągu

Efekty kształcenia		Stanowisko pracy/przykładowe prace wykonywane przez praktykanta
03	Zna i stosuje zasady opracowywania rozmaitych gatunków wypowiedzi prasowych/internetowych	Dziennikarz radiowy: Przygotowanie informacji radiowej Przygotowanie wywiadu radiowego – przygotowanie pytań do wywiadu, rozmowa z uczestnikami wydarzenia, którego dotyczy materiał w celu stworzenia wywiadu radiowego Przygotowanie sondy ulicznej – rozmowa z przechodniami na określony temat w celu zebrania odpowiedniej ilości materiału dźwiękowego do stworzenia radiowej sondy ulicznej
…	…	…

Tabela 8. Przykładowy wykaz miejsc realizacji praktyki i liczby planowanych dni rozliczeniowych ze szczegółowego harmonogramu PPZ dla kierunku studiów *mechanika i budowa maszyn.* Miejsce praktyki: Grupa Żywiec – Browar w Elblągu

Lp.	Dział / komórka (miejsce realizacji praktyki)		Planowana liczba dni rozliczeniowych
1	Warsztat Elektro-automatyki		28
2	Warsztat mechaniczny		10
3	Linia rozlewnicza		4
4	Linia rozlewnicza		4
5	Linia rozlewnicza		4
6	Biuro Głównego Mechanika		5
7	Biuro Głównego Inżyniera		5
		Łącznie	**60**
		Wymagana	**60**

W szczegółowym harmonogramie PPZ określano, w jakich komórkach organizacyjnych instytucji odbywania praktyki ma przebywać praktykant i ile dni ma ją odbywać (tab. 8). Nie uściślano dat, pozostawiając instytucji prowadzącej praktyki swobodę wyboru.

W sytuacji, gdy w określonej instytucji praktykant nie mógł osiągnąć wszystkich zakładanych efektów uczenia się, konieczne było podzielnie praktyki np. na dwie części, gdzie brakujące efekty były nabywane w innej instytucji. W takim przypadku szczegółowy program i harmonogram były opracowywane niezależnie dla każdej instytucji, z wyraźnym zaznaczeniem, które efekty uczenia się są osiągane w każdej z nich.

Ostatnim etapem przygotowania PPZ, na kilka dni przed ich uruchomieniem, były odprawy UOPPZ ze swoimi praktykantami, na których szczegółowo omawiano obowiązki praktykanta, zasady dokumentowania praktyki i jej zaliczania. Studenci otrzymywali także skierowania na praktyki.

2.4. Przebieg pilotażowych praktyk zawodowych w PWSZ w Elblągu

Każdy student biorący udział w Projekcie PPZ miał obowiązek odbycia 6-miesięcznej praktyki zawodowej, w tym min. 3 miesiące KPZ i 3 miesiące PPZ. Na większości kierunków studiów prowadzonych w PWSZ w Elblągu PPZ odbywała się bezpośrednio po KPZ, w jednym 6-miesięcznym bloku, trwającym przez dwa semestry.

Należy przy tym wspomnieć, że miesiąc rozliczeniowy PPZ składał się z 20 dni rozliczeniowych, a jeden dzień rozliczeniowy trwał 6 godz. zegarowych dla kierunków filologicznych i pedagogicznych oraz 8 godz. zegarowych dla pozostałych kierunków studiów. Przyjęto także, że główne efekty uczenia się praktykant nabywa w dniu rozliczeniowym w ciągu 6 godz. zegarowych praktyki (8 godz. dydaktycznych). Na większości kierunków studiów praktyki były prowadzone w trybie zbliżonym do dualnego, tzn. 3-4 dni studenci przebywali na praktyce (specjalności nauczycielskie 1 dzień), a resztę tygodnia w uczelni. Umożliwiało to włączenie długoterminowych praktyk do planu studiów, bez wydłużenia czasu trwania studiów. Na kierunkach studiów *administracja* oraz *ekonomia* testowano dodatkowy wariant, gdzie praktyka kursowa odbywała się w semestrze letnim od lutego do czerwca, a praktyka pilotażowa – w okresie wakacyjnym.

Na kierunkach studiów filologicznych oraz pedagogicznych czas realizacji Projektu PPZ zbiegł się z okresem dostosowywania programów kształcenia do profilu praktycznego. Okazało się, że studenci przystępujący do Projektu PPZ w jego pierwszej edycji (grudzień 2016 – czerwiec 2017) mieli mniejszy wymiar praktyki kursowej od wymaganych 3 miesięcy. Dlatego wprowadzono tzw. uzupełniającą praktykę kursową w wymiarze od 20 do 40 dni rozliczeniowych (w zależności od kierunku studiów), rozliczaną na zasadach obowiązujących KPZ.

Przebieg PPZ był regulowany ogólnymi wytycznymi zawartymi w: „Modelowym przebiegu praktyki" określonym dla każdego rodzaju kierunków studiów [3] oraz w szczegółowym programie i harmonogramie praktyki. Wszystko było podporządkowane głównemu celowi, jakim jest osiągnięcie przez praktykanta zakładanych efektów uczenia się.

W trakcie odbywania praktyki student podlegał bezpośrednio ZOPPZ, do którego najważniejszych obowiązków należało:

- przyjęcie praktykanta na praktykę w instytucji i organizacja niezbędnych szkoleń (w tym BHP),
- merytoryczna opieka nad praktykantem oraz pełnienie funkcji jego bezpośredniego przełożonego, w tym:
  - organizacja stanowiska pracy i przeprowadzenie instruktażu stanowiskowego,
  - wyznaczanie i rozliczanie dziennych zadań – zgodnie z przyjętym szczegółowym programem praktyki,
  - potwierdzanie prac wykonanych przez praktykanta w dzienniku praktyki,
  - po zakończeniu praktyki ocena praktykanta i przebiegu praktyki oraz opracowanie wspólnie z uczelnianym opiekunem praktyki zawodowej, zagadnień i minizadań zawodowych na komisyjne zaliczenie praktyki.

Uczelniany opiekun pilotażowych praktyk zawodowych sprawował ogólny nadzór nad przebiegiem praktyki, był on w ścisłym kontakcie z ZOPPZ oraz z praktykantem. Okresowo kontrolował kompletność wpisów w dzienniku praktyki, a także miał obowiązek przeprowadzenia co najmniej jednej niezapowiedzianej wizytacji praktyki, z której sporządzał protokół.

Przebieg praktyki był dokumentowany. Karta pracy praktykanta służyła do potwierdzania pobytu studenta na praktyce (nieodzowna do rozliczeń finansowych). Zakładowy opiekun pilotażowych praktyk zawodowych potwierdzał każdy dzień pobytu studenta na praktyce oraz liczbę przepracowanych godzin. Przykładowo na kierunkach technicznych student musiał wykazać 160 godz. przepracowanych, aby zaliczyć miesiąc rozliczeniowy. Dokument ten sprawdził się w dodatkowej roli, a mianowicie umożliwiał bardzo precyzyjną ewidencję i kontrolę pobytu studenta na praktyce[8].

Najważniejszym dokumentem prowadzonym przez praktykanta był dziennik praktyki. Student dokumentował w nim wszystkie wykonywane prace, opisując je w taki sposób, aby mógł udowodnić, że osiągnął wszystkie zakładane efekty uczenia się. Załącznikami do dziennika były różne opracowania wykonane w trakcie praktyki, np. rysunki, programy sterujące obrabiarki numeryczne, instrukcje itp. Wszystko to razem tworzyło portfolio praktykanta. Wszystkie wykonane prace, w podziale na kolejne dni kalendarzowe, były potwierdzane przez ZOPPZ. W sytuacji, gdy praktyka odbywała się w kilku instytucjach, dziennik musiał być prowadzony odrębnie dla każdej z nich.

Efekty uczenia się, które student miał osiągnąć podczas pobytu w instytucji odbywania praktyki, były weryfikowane na bieżąco przez ZOPPZ, który ponadto miał obowiązek weryfikacji wybranych, nabytych przez praktykanta umiejętności, poprzez zlecanie mu do rozwiązania praktycznych zadań zawodowych (minizadań zawodowych), powiązanych z głównymi zakładanymi efektami uczenia się.

[8] Dotychczas informacja o rzeczywistym czasie trwania praktyki była podawana w zaświadczeniu wystawianym przez zakład po zakończeniu praktyki oraz w dzienniku praktyki, w postaci dziennych wpisów studenta, także dostępna dopiero po zakończeniu praktyki.

Po zakończeniu praktyki student przygotowywał sprawozdanie, w którym m.in. przygotował krótki opis i analizę wykonywanych prac, odnosząc się do odpowiednich zapisów w dzienniku praktyki. Porządkowało to opis przebiegu praktyki i wykonywanych prac, gdyż zapisy w dzienniku były podporządkowane harmonogramowi praktyki i możliwościom organizacyjnym instytucji odbywania praktyki w określonym okresie. Często pobyt w jakiejś komórce zakładu pracy był „przedzielany" innymi zadaniami, co m.in. utrudniało UOPPZ analizę i ocenę praktyki. Najważniejszym punktem sprawozdania był punkt „Wiedza i umiejętności uzyskane w trakcie praktyki", w ramach którego student dokonywał samooceny, w jakim stopniu osiągnął zakładane efekty uczenia się. W opisie odnosił się do prac wykonywanych na praktyce i udokumentowanych w dzienniku praktyki. W sytuacji gdy praktyka odbywała się w kilku instytucjach, sporządzane było jedno sprawozdanie, a wszystkie dzienniki praktyk stanowiły jego załączniki.

Na zakończenie PPZ student otrzymywał z zakładu potwierdzenie odbycia PPZ. Opiekunowie praktyk oceniali pobyt studenta na praktyce, a UOPPZ dodatkowo oceniał sprawozdanie z praktyki. Sposób wystawiania ocen przez opiekunów praktyk jest opisany w załączniku do regulaminu PPZ, w którym opiekunowie praktyk mieli podane w formie tabelarycznej „walory" podlegające ocenie. Były one powiązane z efektami uczenia się zakładanymi dla praktyki na kierunku studiów. Uczelniany opiekun pilotażowych praktyk zawodowych dokonywał oceny na podstawie zapisów zamieszczonych w dzienniku PPZ i w sprawozdaniu z PPZ oraz własnych spostrzeżeń poczynionych w trakcie nadzoru przebiegu praktyki (tab. 9). Zakładowy opiekun pilotażowych praktyk zawodowych wystawiał oceny na podstawie własnych obserwacji zebranych w trakcie odbywania praktyki przez studenta oraz oceny zadań stawianych praktykantowi do rozwiązania (tab. 10). Określono także kryteria oceny sprawozdania z praktyki, dokonywanej przez UOPPZ (tab. 11).

Tabela. 9. Wytyczne dla uczelnianego opiekuna pilotażowych praktyk zawodowych (UOPPZ) do oceny PPZ na kierunku studiów *budownictwo* [4]

Lp.	Nazwa ocenianego waloru odbywania praktyki	Ocena cząstkowa
1	Potrafi zidentyfikować problem techniczny występujący w zakładzie, opisać go oraz przedstawić koncepcję rozwiązania	
2	Potrafi rozwiązać zadanie inżynierskie z zakresu działalności firmy. Zadanie nr 1	
3	Potrafi rozwiązać zadanie inżynierskie z zakresu działalności firmy. Zadanie nr 2	
4	Współpraca praktykanta z uczelnianym opiekunem praktyki	
5	Wypracowanie tematu i okoliczności wykonywania aplikacyjnej pracy dyplomowej (ocena: 5, gdy praca jest w pełni określona; w innym przypadku ocena nie jest uwzględniana w ocenie zbiorczej)	
Ocena zbiorcza (średnia arytmetyczna ocen cząstkowych)		**F1 = …**

Tabela. 10. Wytyczne dla zakładowego opiekuna pilotażowych praktyk zawodowych (ZOPPZ) do oceny PPZ na kierunku studiów *budownictwo* [4]

Lp.	Nazwa ocenianego waloru odbywania praktyki	Ocena cząstkowa
1	Ma doświadczenie w eksploatacji obiektów budowlanych i systemów technicznych stosowanych w budownictwie	
2	Potrafi zidentyfikować problem techniczny występujący w zakładzie, opisać go oraz przedstawić koncepcję rozwiązania	
3	Potrafi rozwiązać rzeczywiste zadanie inżynierskie z zakresu działalności firmy. Zadanie nr 1	
4	Potrafi rozwiązać rzeczywiste zadanie inżynierskie z zakresu działalności firmy. Zadanie nr 2	
5	Potrafi komunikować się w środowisku zawodowym, stosując różne techniki i z użyciem specjalistycznej terminologii	
	Potrafi przygotować specjalistyczną informację z zakresu projektowania elementów lub obiektów budowlanych; przygotowania realizacji procesów budowlanych; organizacji i kierowania pracami budowlano-montażowymi i przekazać ją innym pracownikom	
6	Jest gotów do przestrzegania zasad postępowania gwarantujących właściwą jakość działań zawodowych oraz bezpieczeństwo	
	Jest gotów do utrzymywania właściwych relacji w środowisku zawodowym	
	Jest gotów do pracy w zespole i przestrzegania zasad etyki zawodowej	
Ocena zbiorcza (średnia arytmetyczna ocen cząstkowych)		**G1 = …**

Tabela 11. Wytyczne dla uczelnianego opiekuna pilotażowych praktyk zawodowych (UOPPZ) do oceny sprawozdania z PPZ [4]

Lp.	Nazwa ocenianego waloru odbywania praktyki	Ocena cząstkowa
1	Merytoryczna zawartość dziennika praktyki	
2	Opis i analiza wykonanych prac – zamieszczone w sprawozdaniu	
3	Samoocena osiągniętych kompetencji w odniesieniu do zakładanych efektów kształcenia – zamieszczona w sprawozdaniu	
Ocena zbiorcza (średnia arytmetyczna ocen cząstkowych)		**E2 = …**

Po zakończeniu PPZ opiekunowie praktyk wspólnie przygotowywali minizadania zawodowe na zaliczenie komisyjne.

Minizadania zawodowe to „narzędzia" weryfikujące efekty uczenia się uzyskane podczas praktyki zawodowej, a w szczególności służące do weryfikacji nabytych przez studenta umiejętności zawodowych. Powinny być tak sformułowane, aby 3 z nich umożliwiły weryfikacje wszystkich efektów uczenia się, przewidzianych na zaliczenie komisyjne (tab. 4). Ponadto nakład pracy na ich rozwiązanie powinien umożliwiać studentowi udzielenie odpowiedzi na każde z nich w ciągu ok. 5 minut.

Poniżej przedstawiono przykłady minizadań stosowanych na zaliczeniach PPZ na poszczególnych kierunkach studiów prowadzonych w PWSZ w Elblągu:

- ***administracja***: „Przygotować umowę najmu lokalu mieszkalnego na zasadach określonych w uchwale Rady Miejskiej w sprawie zasad wynajmowania lokali wchodzących w skład mieszkaniowego zasobu gminy Nowy Dwór Gdański",
- ***budownictwo***: „Dobierz odpowiednią grubość warstwy termoizolacji dla ściany zewnętrznej budynku mieszkalnego wg wymogów na dzień 1.04.2017 przy

założeniu, że współczynnik przewodności cieplnej dla materiału termoizolacyjnego wynosi 0,031 W/(m*K)",

- ***ekonomia***: „Wskaż, na którą pozycję RZiS i w jakiej wartości wpłynie poniższa operacja gospodarcza: Firma XX dokonała w dniu 31.08.2017 sprzedaży maszyny ujętej w ewidencji środków trwałych (wartość sprzedaży netto 30 000 zł. Maszyna wprowadzona do ewidencji w wartości 45 000 zł, oddana do użytkowania 20.12.2014. Stosowano liniową stawkę amortyzacji w wysokości 14%. Amortyzacja naliczana była także w miesiącu sprzedaży maszyny",
- ***filologia***: „Proszę określić i opisać etapy planowania i realizacji wybranych treści kształcenia w zakresie nauczania języka angielskiego w jednym zespole klasowym", „Proszę sformułować po polsku i przetłumaczyć na język angielski pismo z prośbą o przesłanie faktury pro forma",
- ***filologia polska***: „W jaki sposób można pracować z uczniami, indywidualizując zadania i dostosowując metody oraz treści do potrzeb i możliwości uczniów", „Napisać komentarz odredakcyjny do opublikowanego artykułu",
- ***informatyka***: „Telefon IP A (VLAN A) dzwoni do telefonu IP B (VLAN B). Serwer telefoniczny to VLAN C. Połączenie głosowe zestawia się, lecz rozmówca A nie słyszy rozmówcy B. Podać przyczynę i rozwiązanie",
- ***mechanika i budowa maszyn***: „Dobrać materiały dodatkowe do spawania dwóch części wykonanych z materiału X22CrMoV12-1 (złącze doczołowe). Dla podanego połączenia podać wymaganą po spawaniu obróbkę cieplną oraz wyjaśnić, w jakim celu była stosowana",
- ***pedagogika***: „Zaproponować scenariusz zajęć pozalekcyjnych poświęconych zadanemu tematowi",
- ***pedagogika specjalna***: „Podaj i omów kilka ćwiczeń usprawniających aspekt języka dla dziecka z rotacyzmem".

2.5. Zaliczanie pilotażowych praktyk zawodowych w PWSZ w Elblągu

Pilotażowe praktyki zawodowe zaliczane były komisyjnie. Skład komisji i sposób ich powołania każda uczelnia określała indywidualnie. Przykładowo w Instytucie Politechnicznym PWSZ w Elblągu komisję powoływał dyrektor instytutu w składzie: przewodniczący komisji – dyrektor lub wicedyrektor instytutu, UOPPZ, ZOPPZ, członek komisji – nauczyciel akademicki reprezentujący dany kierunek studiów i związany z kształceniem zawodowym (prowadzi przedmiot o charakterze zawodowym) co najmniej ze stopniem naukowym doktora.

W trakcie zaliczenia przewodniczący komisji zapoznawał praktykanta z ocenami wystawionymi przez opiekunów oraz oceną sprawozdania z praktyki. W przypadku obniżonej oceny opiekunowie przedstawiali swoje zastrzeżenia i uwagi.

Następnie student rozwiązywał trzy minizadania zawodowe przygotowane przez opiekunów praktyk. Odpowiedzi oceniane były komisyjnie po wyjściu studenta.

Ocena zaliczająca PPZ wystawiana była jako suma iloczynów ocen cząstkowych i współczynników wagowych: ocena UOPPZ (waga 0,2), ocena ZOPPZ (waga 0,3), ocena sprawozdania z PPZ (waga 0,1), ocena z zaliczenia komisyjnego (waga 0,4). Przewodniczący komisji zapoznawał studenta z oceną zaliczającą praktykę zawodową. Czas zaliczenia praktyki przez jednego studenta wynosił od 25 do 30 minut.

Po zaliczeniu praktyki student oraz opiekunowie praktyki wypełniali ankiety wyrażające ich opinie na temat wzajemnej współpracy:

- praktykant oceniał współpracę z obydwoma opiekunami,
- UOPPZ oceniał współpracę z instytucją prowadzącą praktykę oraz z ZOPPZ,
- ZOPPZ oceniał współpracę z uczelnią i z UOPPZ.

Ankiety te były źródłem ważnych informacji i były analizowane przez kierownictwo instytutu prowadzącego PPZ, służyły doskonaleniu systemu praktyk. W zdecydowanej większości były to opinie pozytywne. W przypadku zgłaszanych drobnych zastrzeżeń były one wyjaśniane i uwzględniane w kolejnej edycji praktyk.

2.6. Aplikacyjne prace dyplomowe w PWSZ w Elblągu

Aplikacyjna praca dyplomowa to taka, w ramach której student rozwiązuje rzeczywisty problem praktyczny, uzgodniony z instytucją, w której odbywał praktykę zawodową, lub w szczególnych przypadkach uzgodniony z inną instytucją. Ponadto zakłada się, że rozwiązanie proponowane w aplikacyjnej pracy dyplomowej jest przewidziane do wdrożenia przez instytucję lub mogłoby być wdrożone, gdyby były spełnione dodatkowe warunki. Tematem pracy dyplomowej może być np. opracowanie części większego problemu, dla którego kwestia wdrożenia jest otwarta, lub praca studialna rozwiązująca wariant, który w ostateczności może nie być wdrażany.

W PWSZ w Elblągu tematy aplikacyjnych prac dyplomowych były określane w trakcie praktyki zawodowej w ramach współpracy studenta z UOPZZ i ZOPPZ oraz opiekunem pracy dyplomowej. Temat pracy był zatwierdzany wg zasad obowiązujących w uczelni, jednakże nowym istotnym elementem były załączane oświadczenia instytucji o przydatności podejmowanego tematu pracy dyplomowej, a po ukończeniu pracy, w jakim stopniu rozwiązania w niej zawarte są dla instytucji przydatne i jak będą wykorzystane.

Nowym doświadczeniem, wynikającym z prowadzenia aplikacyjnych prac dyplomowych, było wprowadzenie „funkcji" pomocniczego opiekuna pracy dyplomowej. Zgodnie z najnowszym Regulaminem studiów w PWSZ w Elblągu może to być:

- przedstawiciel zakładu pracy, spełniający wymagania stawiane na stanowisku wykładowcy prowadzącego zajęcia o charakterze praktycznym lub
- wykładowca ze znacznym doświadczeniem zawodowym zdobytym poza szkolnictwem wyższym.

Jego obowiązki związane są głównie ze wspieraniem studenta w wykonywaniu części praktycznej aplikacyjnej pracy dyplomowej. Współpracuje on ściśle z opiekunem pracy dyplomowej, który jest etatowym nauczycielem akademickim zatrudnionym co najmniej na stanowisku starszego wykładowcy. Współpraca doświadczonego „praktyka", np. inżyniera z wieloletnim stażem zawodowym, z doświadczonym nauczycielem akademickim sprawdziła się bardzo dobrze. Doświadczenia zdobyte w tym zakresie wpłynęły na zwiększenie zainteresowania kadry dydaktycznej współpracą z firmami i prowadzeniem aplikacyjnych prac dyplomowych.

W ramach Projektu PPZ podjęto 105 tematów aplikacyjnych prac dyplomowych. Poniżej zamieszczono przykłady tematów aplikacyjnych prac dyplomowych na poszczególnych kierunkach studiów, a ich liczbę podano w nawiasach:

- ***administracja*** (6): „Konfiguracja i funkcjonowanie struktury organizacyjnej Pionu Prewencji Komendy Miejskiej Policji w Elblągu",
- ***budownictwo*** (8): „Projekt zagospodarowania placu budowy na terenach miejskich w aspekcie minimalizacji kosztów" dla Przedsiębiorstwa Budowlanego Grzegorz Jankowiak w Elblągu,
- ***ekonomia*** (12): „Analiza wybranych procesów magazynowych na przykładzie 21 Wojskowego Oddziału Gospodarczego w Elblągu",
- ***filologia polska*** (1): „Wizerunek medialny drużyny Trefl Gdańsk w odbiorze uczestników turnieju męskiej siatkówki w Elblągu",
- ***informatyka*** (45): „Aplikacja monitorująca pracę przełączników sieciowych w firmie Lacroix Electronics",
- ***mechanika i budowa maszyn*** (21): „Opracowanie układu sterowania automatu lakierniczego" dla firmy PATREX w Elblągu,
- ***pedagogika*** (5): „Trudności dzieci sześcioletnich w osiąganiu dojrzałości szkolnej na podstawie badań w Przedszkolu Nr 17 w Elblągu",
- ***pedagogika specjalna*** (7): „Czas wolny uczniów niepełnosprawnych intelektualnie w SOSW w Nowym Dworze Gdańskim".

3. Pierwsze rezultaty i wnioski do dalszych działań

Po zamknięciu dwóch pełnych cykli PPZ, uruchomionych w PWSZ w Elblągu, w ramach pierwszego naboru do Projektu PPZ (okres od listopada 2016 do czerwca 2018), można sformułować następujące spostrzeżenia i wnioski.

Szkolenia opiekunów praktyk, o których była mowa w punkcie 2.3, były bardzo cennym wkładem Projektu PPZ w przygotowanie zasobów kadrowych do obsługi praktyk zawodowych – szczególnie ZOPPZ. Ułatwi to uczelniom uruchamianie i prowadzenie praktyk zawodowych.

Opracowywanie przez opiekunów praktyk i praktykanta szczegółowych programów praktyk zawodowych, z uwzględnieniem efektów uczenia się, dotychczas nie było stosowane w uczelniach lub było stosowane w znikomym zakresie. Ze zdobytych doświadczeń wynika, że znacznie ułatwia to etap przygotowywania praktyki i jej prowadzenia. Zakłady pracy nie muszą samodzielnie wymyślać, jakiego typu zadania zlecać praktykantom, lecz otrzymują w tym zakresie wsparcie uczelnianego opiekuna praktyk. Ponadto student, uczestnicząc w opracowaniu programu praktyki, ma wpływ na planowany przebieg praktyki i dokładnie pozna to, z czego będzie rozliczany. W pierwszej turze PPZ[9] opracowywanie szczegółowych programów i harmonogramów praktyk stwarzało opiekunom praktyk trochę problemów, lecz w kolejnych proces ten przebiegał sprawniej. Docelowo wypracowane rozwiązanie będzie stałym elementem przygotowywania praktyk zawodowych.

Zastosowany w PPZ system rozliczania czasu trwania praktyki poprzez stosowanie tzw. miesiąca rozliczeniowego, a nie miesiąca kalendarzowego, znacząco ułatwiał i uelastyczniał organizację praktyk zawodowych oraz ich prowadzenie. Uczelnia zawierała umowy z instytucjami odbywania praktyk zawodowych na okres dłuższy, niż wynikało to z wymaganej liczby dni PPZ. Umożliwiało to studentom uzgadnianie z zakładem pracy indywidualnych terminów pobytu na praktyce, np. w okresie sesji egzaminacyjnej, a w wyjątkowych sytuacjach „składanie" jednego dnia rozliczeniowego poprzez 2- lub 3-dniowy pobyt na praktyce, ale w skróconym wymiarze godzin.

Wprowadzenie do sprawozdania z praktyki samooceny praktykanta przyniosło pozytywne skutki. Sam fakt autorefleksji studenta nad tym, w jakim stopniu osiągnął określone efekty uczenia się, posiada duży walor dydaktyczny. Student, wie o tym, że na zakończenie praktyki będzie musiał dokonać takiej samooceny, a taka informacja przekazywana na wstępnej odprawie z UOPPZ działa dyscyplinująco na studenta i skłania do bardziej sumiennego udziału w praktyce oraz skrupulatniejszego dokumentowania jej przebiegu w dzienniku praktyki.

Wprowadzenie minizadań zawodowych do systemu zaliczenia praktyki początkowo sprawiało opiekunom praktyk znaczne trudności przy ich formułowaniu, jednakże pomysł sprawdził się. Pytania stosowane na zaliczeniach były przemyślane, gdyż nie były tworzone *ad hoc* podczas zaliczenia, odnosiły się one do prac wykonywanych w trakcie praktyki i uwzględniały zakładane efekty uczenia się. Ten sposób weryfikacji efektów uczenia się jest rozwijany w szerszym zakresie. Na przykład w Instytucie Politechnicznym PWSZ w Elblągu przebudowywane są zestawy pytań dyplomowych dla poszczególnych kierunków studiów z uwzględnieniem koncepcji minizadań zawodowych.

Aplikacyjne prace dyplomowe, a w szczególności koncepcja definiowania tematu pracy dyplomowej w trakcie odbywania praktyki zawodowej, przy współpracy z zakładem pracy, sprawdziła się i będzie rozwijana w PWSZ

[9] W trakcie przygotowania niniejszego opracowania w PWSZ w Elblągu przeprowadzono trzy edycje PPZ, w ramach dwóch umów zawartych z MNiSW, które w uczelni określano jako tury praktyk.

w Elblągu. Studenci bardziej utożsamiają się z tak wypracowanym tematem pracy dyplomowej i mają satysfakcję, że wykonują użyteczną pracę. Ponadto wsparcie ze strony zakładu pracy znacząco wpływa na wzrost ich kompetencji zawodowych. Dodatkowym efektem prowadzenia aplikacyjnych prac dyplomowych było wprowadzenie w PWSZ w Elblągu „funkcji" pomocniczego opiekuna pracy dyplomowej ze strony zakładu pracy, o czym była mowa w punkcie 2.6. Rozwiązanie to sprawdziło się w praktyce, gdyż ułatwia kontakt kadry nauczycielskiej z pracodawcami, a także umożliwia im oraz praktykantom dostęp do technologii i rozwiązań aktualnie stosowanych w przemyśle lub innych instytucjach.

Pewien niedosyt uczestników Projektu PPZ dotyczył braku zapowiadanego systemu informatycznej obsługi praktyk zawodowych, który znacząco ułatwiłby operowanie dokumentami. Szczególnie duże oczekiwania dotyczyły elektronicznego dziennika praktyk, który miał być przygotowany w formie aplikacji mobilnej na smartfony.

Długoterminowe praktyki zawodowe są pozytywnie odbierane przez pracodawców regionu elbląskiego. Umożliwia im to przygotowanie potencjalnych pracowników dokładnie na ich potrzeby. Jest to szczególnie efektywne w połączeniu z aplikacyjną pracą dyplomową przygotowywaną na potrzeby firmy. Ponadto 6-miesięczny pobyt praktykanta skłania zakład do zainwestowania w jego doszkolenie w pierwszych miesiącach trwania praktyki zawodowej, tak aby mieć do dyspozycji dodatkowego, użytecznego pracownika w drugiej połowie praktyki.

W trakcie przeprowadzonych komisyjnych zaliczeń PPZ zaobserwowano znacznie wyższy poziom kompetencji zawodowych wykazywany przez studentów w porównaniu z tymi, którzy odbywali praktyki zawodowe w czasie przed realizacją Projektu PPZ, co potwierdza skuteczność opracowanego systemu długoterminowych praktyk zawodowych będących istotą Projektu PPZ.

Literatura

1. Walczyk Z., *Nieodzowne narzędzie kształcenia zawodowego*, „Forum Akademickie" 2015, nr 2.
2. Walczyk Z., *Pilotażowe praktyki zawodowe*, „Forum Akademickie" 2017, nr 3.
3. *Regulamin i instrukcje pilotażowych praktyk zawodowych w projekcie: Program praktyk zawodowych w Państwowych Wyższych Szkołach Zawodowych*, http://www.bip.nauka.gov.pl/g2/oryginal/2017_05/a6e052455ec6a3d191a7e1d6a2a8803b.pdf [dostęp: 20.12.2018].
4. https://pwsz.elblag.pl/8856.html [dostęp: 20.12.2018].

NEW PROFESSIONAL PRACTICE SYSTEM ON STUDIES WITH A PRACTICAL PROFILE PROPOSED BY THE PWSZ IN ELBLĄG

Abstract: *The article presents the results of testing new practical training concept which was prepared by University of Applied Sciences in Elbląg. The testing were conducted at the State University of Applied Sciences in Elbląg within the project "Professional practice program at the State University of Applied Sciences", supervised by the Ministry of Science and Higher Education. There were presented preparing, conducting and accounting methods previous applied at the University, new solutions resulting from project assumptions and acquired experience and conclusions.*

NOTA O AUTORACH

Czyżak Maciej, Instytut Informatyki Stosowanej im. K. Brzeskiego, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Elblągu

Dąbrowski Tomasz, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Elblągu

Domsta Joachim, Instytut Informatyki Stosowanej im. K. Brzeskiego, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Elblągu

Drobniewska Eliza

Iskra-Świercz Dominika, Instytut Politechniczny, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Elblągu

Kabecki Karol

Kierończyk Marek, Instytut Politechniczny, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Elblągu

Korzeniowski Piotr, Instytut Politechniczny, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Elblągu

Kwitnewski Stanisław, Instytut Politechniczny, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Elblągu

Marcinkowski Tadeusz, Instytut Technologiczno-Przyrodniczy w Falentach

Meuś Aleksandra

Niedojadło Jarosław, Instytut Politechniczny, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Elblągu

Olchawa Andrzej, Instytut Politechniczny, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Elblągu

Olszak Dorota

Olszewski Henryk, Instytut Informatyki Stosowanej im. K. Brzeskiego, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Elblągu

Orlikowski Cezary, Instytut Politechniczny, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Elblągu

Ożga Paweł

Paluszak Jacek, Instytut Informatyki Stosowanej im. K. Brzeskiego, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Elblągu

Rehmus-Forc Anna, Instytut Politechniczny, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Elblągu

Rybarczyk Daria, Instytut Informatyki Stosowanej im. K. Brzeskiego, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Elblągu

Sikora Jan, Instytut Politechniczny, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Elblągu

Smyk Robert, Katedra Elektrotechniki, Systemów Sterowania i Informatyki**,** Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Politechnika Gdańska

Sokołowski Stefan, Instytut Informatyki Stosowanej im. K. Brzeskiego, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Elblągu

Staszewska Sara

Wojnicz Wiktoria, Katedra Mechaniki i Mechatroniki, Wydział Mechaniczny, Politechnika Gdańska

ROZPRAWY NAUKOWE I ZAWODOWE PWSZ W ELBLĄGU
Profil czasopisma

Tematyka czasopisma obejmuje szerokie spektrum zainteresowań pracowników instytutów: Ekonomicznego, Pedagogiczno-Językowego, Informatyki Stosowanej i Politechnicznego. Profil czasopisma określają przede wszystkim zagadnienia z zakresu dyscyplin nauk humanistycznych i społecznych, jednak dopuszcza się publikacje z dziedzin informatyki i techniki.

W *Rozprawach Naukowych i Zawodowych PWSZ w Elblągu* publikowane są artykuły o charakterze naukowym oraz poświęcone problemom zawodowym, opracowane zarówno przez pracowników PWSZ w Elblągu, jak i autorów spoza Uczelni.

Artykuły naukowe prezentowane w tym periodyku oceniane są przez recenzentów pod względem oryginalności rozwiązań naukowych w akademickim rozumieniu tego pojęcia. W przypadku prac technicznych wymagana jest prezentacja oryginalnych rozwiązań konstrukcyjnych, technologicznych, diagnostycznych bądź eksploatacyjnych, przy czym wnioski wypływające z analiz, statystyk i innych opracowań powinny wnosić nowe spojrzenie na zagadnienie.

Z kolei artykuły poświęcone problemom zawodowym skupiają się wokół spraw praktyk zawodowych, staży, kompetencji zawodowych związanych z określonym kierunkiem studiów oraz analiz i rokowań dotyczących rynku pracy. Poruszane są w nich tematy dotyczące kształcenia zawodowego.

W *Rozprawach* zamieszczane są również krótkie informacje o organizowanych konferencjach, spotkaniach lub zapowiedzi wydarzeń naukowych czy kulturalnych, recenzje i omówienia. Zamieszczane recenzje monografii powinny zawierać zwięzły opis ich zawartości i wyraźnie sformułowaną ocenę własną autora.

Rozprawy Naukowe i Zawodowe PWSZ w Elblągu ukazują się dwa razy w roku (półrocznik).

Czasopismo wydawane jest w wersji drukowanej (wersja pierwotna).

LISTA RECENZENTÓW CZASOPISMA
„ROZPRAWY NAUKOWE I ZAWODOWE PWSZ W ELBLĄGU”
W 2018 ROKU

Dr hab. inż. Jerzy Balicki, prof. nadzw. (Politechnika Warszawska)

Dr hab. inż. Andrzej Borys, prof. nadzw. (Uniwersytet Morski w Gdyni)

Dr hab. inż. Maciej Czyżak, prof. nadzw. (Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Elblągu)

dr hab. Krzysztof Dobrowolski, prof. nadzw. (Uniwersytet Gdański)

Dr inż. Michał Dobrzyński (Politechnika Gdańska)

Dr hab. inż. Aleksander Gwiazda, prof. nadzw. (Politechnika Śląska)

Dr inż. Marcin Jaskólski (Politechnika Gdańska)

Dr hab. Krzysztof Kalka, prof. nadzw. (Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Pile)

Dr hab. Marcin Kamiński, prof. nadzw. (Uniwersytet Jagielloński)

Prof. dr hab. Roman Kisiel (Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie)

Dr inż. Krzysztof Klempka (Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie)

Dr hab. Grzegorz Krzykowski prof. nadzw. (Wyższa Szkoły Bankowa w Gdańsku)

Prof. dr hab. inż. Maciej Kumor (Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy)

Dr inż. Jacek Lebiedź (Politechnika Gdańska)

Dr hab. Wiesława Lizińska (Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie)

Dr hab. inż. Jacek Łubiński (Politechnika Gdańska)

Dr hab. Renata Marks-Bielska, prof. nadzw. (Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie)

Dr inż. Adam Młyński (Politechnika Gdańska)

Dr Danuta Oleksiak (Warmińsko-Mazurski Ośrodek Doskonalenia Nauczycieli)

Dr hab. Jan Papież, prof. nadzw. (Uniwersytet Gdański)

Prof. dr hab. Mirosław Patalon (Uniwersytet Gdański)

Dr hab. inż. Stefan Pietrzak, prof. nadzw. (Instytut Technologiczno-Przyrodniczy w Falentach)

Dr inż. Andrzej Rypulak (Lotnicza Akademia Wojskowa)

Dr inż. Rajmund Rytlewski (Politechnika Gdańska)

Dr inż. Lucjan Setlak (Lotnicza Akademia Wojskowa)

Prof. dr hab. Józef E. Sienkiewicz (Politechnika Gdańska)

Dr inż. Sylwester Smoroń (Instytut Technologiczno-Przyrodniczy w Falentach MOB w Krakowie)

Dr inż. Robert Smyk (Politechnika Gdańska)

Dr hab. inż. Piotr Srokosz (Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie)

Dr hab. Tomasz Szewc (Politechnika Śląska)

Dr hab. inż. Santina Topolska (Politechnika Śląska)

Prof. dr hab. inż. Michał Wasilczuk (Politechnika Gdańska)

Dr inż. Marek Wesołowski (Politechnika Gdańska)

Dr hab. Krystyna Żołądkiewicz, prof. nadzw. (Uniwersytet Gdański)