

**ROZPRAWY NAUKOWE I ZAWODOWE  
PAŃSTWOWEJ WYŻSZEJ SZKOŁY ZAWODOWEJ  
W ELBLĄGU**

**Zeszyt 23**



**PWSZ**  
w ELBLĄGU

**Elbląg 2016**

**PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO WYDAWNICTWA  
PWSZ W ELBLĄGU**

*Dr hab. inż. Jerzy Łabanowski*

**REDAKTORZY NAUKOWI**

*Dr inż. Jerzy Buriak,*

*Dr Agata Rychter*

**RECENZENCI**

*Dr hab. inż. Andrzej Borys, prof nadzw. AMG*

*Dr Maciej Brzozowski*

*Dr Robert Fidytek*

*Dr hab. Mirosław Grzybowski*

*Prof. dr hab. inż. Tomasz Kacprzak*

*Dr hab. inż. Andrzej Karbowski*

*Dr inż. Krzysztof Klempka*

*Dr Jacek Lebieź*

*Prof. dr hab. inż. Danuta Leśniewska*

*Dr hab. inż. Zbigniew Lubniewski*

*Dr hab. inż. Leszek Małyżko, prof. UWM*

*Dr hab. inż. Bernard Quant*

*Dr inż. Anna Rehmus-Forc*

*Dr inż. Robert Smyk*

*Dr hab. inż. Piotr Srokosz*

*Dr hab. inż. Waldemar Świdziński, prof. nadzw. IBW PAN*

*Dr Michał Twardochleb*

*Dr Tomasz Winnicki*

*Dr hab. inż. Ryszard Wojtyna prof. nadzw. UTP*

*Dr Adrian Zwolicki*

**REDAKCJA, KOREKTA I SKŁAD**

*Wydawnictwo Techniczno-Naukowe JAS*

*e-mail: jagoda.szczerkowska@gmail.com*

**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

## Część I. INFORMATYKA

Andrzej Borys	O szeregu Volterra i jego zbieżności, a także o zakresie dynamicznym układów, kompensacji nieliniowości i systemach prawie bez pamięci .....	7
Zdzisław Szczerbiński	Optimizing loop distribution as a method for efficient program parallelization.....	21
Katarzyna Wasielewska	Li-Fi – nowa technologia transmisji bezprzewodowej.....	35
Łukasz Żołędziwski	Wykorzystanie nadajników radiowych jako przykład rozwiązań Internetu rzeczy .....	43
Tomasz Rogacewicz	Metody symulacji ruchu drogowego w pierwszym polskim trenerze motorniczych.....	51
Daria Rybarczyk	Mobilny system zarządzania operacjami na terminalu kontenerowym.....	61
Marzanna Skowrońska	Trafność wydatków budżetowych na turystyczny system informatyczny.....	73

## Część II. NAUKI PRZYRODNICZO-TECHNICZNE

Piotr Korzeniowski, Marek Wesołowski, Jan Grzybowski	Badania eksperymentalne jednoprzęsłowych płyt betonowych zbrojonych siatkami kompozytowymi z włókna bazaltowego .....	85
Kamil Żyliński, Jarosław Przewłócki	Nośność podłoża gruntowego pod ławą fundamentową w ujęciu niezawodnościowym.....	99
Andrzej Wróblewski, Agata Rychter	Podciśnienie w samozasysającym mieszadle śmigłowym ....	117
Bartłomiej Brzeziński, Dominika Iskra-Świercz	Badanie ściśliwości materiałów kompozytowych torf – popiół lotny – wapno .....	123
Malwina Marciniuszyn- Jedeszko, Agata Rychter, Izabela Jabłońska-Barna	Rozmieszczenie stanowisk bobra europejskiego ( <i>Castor fiber</i> ) na obszarze Wysoczyzny Elbląskiej.....	131



**Część I**

# **INFORMATYKA**



**Andrzej Borys**

## **O SZEREGU VOLTERRY I JEGO ZBIEŻNOŚCI, A TAKŻE O ZAKRESIE DYNAMICZNYM UKŁADÓW, KOMPENSACJI NIELINIOWOŚCI I SYSTEMACH PRAWIE BEZ PAMIĘCI**

*W artykule wykazano, że problem obliczania promienia zbieżności szeregu Voltery opisującego układ wykazujący słabe nieliniowości nie jest tożsamy z określaniem zakresu, w którym posiada on tę własność (małych nieliniowości). Na przykładzie zilustrowano zależności istniejące pomiędzy tymi dwoma zagadnieniami. Przedyskutowano również związki zachodzące pomiędzy zwiększaniem zakresu dynamicznego układu a kompensacją nieliniowości w układzie. Ponadto zwrócono uwagę na konieczność śledzenia zmian zakresu obowiązywania własności małych nieliniowości, związanych z wyżej wymienioną kompensacją, w celu prawidłowego określenia zakresu dynamicznego układu. Na koniec przedstawiono argumenty przemawiające za bezzasadnością używania określenia „systemy prawie bez pamięci” bez podania ilościowego kryterium dla odróżnienia takich systemów od tych posiadających pamięć.*

### **Wprowadzenie**

Autor niniejszego artykułu przeze wiele lat zajmował się analogowymi i cyfrowymi układami i systemami elektronicznymi, a także telekomunikacyjnymi, z tzw. małymi nieliniowościami. W pracach badawczych i projektowych prowadzonych w powyższej tematyce wykorzystywał przeważnie szereg Voltery [1-3] do analizy, syntezy oraz projektowania wymienionej klasy układów i systemów. Wyniki swoich badań opublikował w paru dziesiątkach artykułów (niektóre z nich to [4-7]) oraz w trzech monografiach [8-10]. Zdobyta wiedza w tym obszarze pozwalała mu na sformułowanie różnego rodzaju wniosków natury ogólnej, wynikających z rezultatów otrzymanych przez innych naukowców zajmujących się układami (systemami) elektronicznymi i telekomunikacyjnymi z tzw. małymi nieliniowościami, a przede wszystkim ze swoich własnych. Wnioski te dotyczą następujących zagadnień: szereg Voltery w opisie układów (systemów) z tzw. małymi (niewielkimi) nieliniowościami a problem jego zbieżności, maksymalizacja zakresu dynamicznego układu (systemu), kompensacja nieliniowości oraz klasa układów (systemów) nieliniowych rozpatrywanych jako obiekty, które w przybliżeniu nie posiadają pamięci. Zostaną one kolejno przedstawione i omówione w dalszej części artykułu. Do tej pory nie były one nigdzie publikowane.

W dalszej części pracy dla uproszczenia będzie stosowane tylko słowo „układ”, gdyż omawiane wnioski oraz wyprowadzone wzory (dla układów) będą również słuszne w odniesieniu do większych obiektów, tj. systemów.

## 1. Szereg Volterry, problem jego zbieżności w opisie układów ze słabymi nieliniowościami oraz związek z tzw. zakresem małoliniowości układu

Dowolny liniowy i stacjonarny układ fizyczny można opisać za pomocą następującej całki spłotowej [11]

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau)x(t-\tau)d\tau, \quad (1)$$

w której to  $y(t)$  utożsamiamy z sygnałem na wyjściu układu, natomiast  $x(t)$  z sygnałem na jego wejściu. Ponadto zmienna  $t$  we wzorze (1) oznacza ciągły czas, a  $h(\tau)$  jest tzw. odpowiedzią impulsową układu.

Rozszerzeniem opisu za pomocą całki spłotowej (1) na przypadek nieliniowy jest szereg Volterry [1-3]. Stanowi on nieskończoną sumę odpowiedzi częściowych układu  $y^{(n)}(t)$  związanych z nieliniowościami kolejnych rzędów  $n = 1, 2, 3, \dots$ , to znaczy

$$y(t) = y^{(1)}(t) + y^{(2)}(t) + y^{(3)}(t) + \dots = \sum_{n=1}^{\infty} y^{(n)}(t), \quad (2)$$

gdzie kolejne składniki wyrażają się poprzez wielowymiarowe całki spłotowe o postaci

$$y^{(1)}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h^{(1)}(\tau_1) x(t-\tau_1)d\tau_1 = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) x(t-\tau)d\tau, \quad (3)$$

$$y^{(2)}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h^{(2)}(\tau_1, \tau_2) x(t-\tau_1)x(t-\tau_2)d\tau_1d\tau_2, \quad (4)$$

$$y^{(3)}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h^{(3)}(\tau_1, \tau_2, \tau_3) x(t-\tau_1)x(t-\tau_2)x(t-\tau_3)d\tau_1d\tau_2d\tau_3 \quad (5)$$

itd., co w przypadku ogólnym pozwala napisać



$$y^{(n)}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} h^{(n)}(\tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots, \tau_n) x(t-\tau_1)x(t-\tau_2)x(t-\tau_3)\dots x(t-\tau_n) d\tau_1 d\tau_2 d\tau_3 \dots d\tau_n \quad (6)$$

dla  $n \geq 1$ . Funkcje  $h^{(n)}(\tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots, \tau_n)$ , gdzie  $n = 1, 2, 3, \dots$ , które występują w powyższych wzorach, są nazywane nieliniowymi odpowiedziami impulsowymi rzędów pierwszego, drugiego, trzeciego itd. [1-3]. Oczywiście, jak wskazuje wzór (3), rząd nieliniowości  $n = 1$  należy rozumieć jako tożsamy z aproksymacją w postaci całki spłotowej (1).

Układy nieliniowe z tzw. małymi (niewielkimi, słabymi) nieliniowościami, opisywane za pomocą szeregu Voltery, definiuje się w literaturze [12-14] jako takie, dla których ten opis można ograniczyć do trzech pierwszych wyrazów w rozwinięciu (2). Wyrazić można to także tak: układ można uważać za układ z małymi nieliniowościami, gdy suma wyrazów rzędów wyższych niż trzeci w sumie danej wzorem (2) jest pomijalnie mała (zgodnie z przyjętym kryterium) w porównaniu z sumą trzech pierwszych składników, tj. składnika pierwszego rzędu (liniowego) oraz rzędów drugiego i trzeciego. W praktycznych zastosowaniach powyższy warunek definicyjny umożliwia określenie dwuwymiarowego zbioru, składającego się z amplitud i częstotliwości sygnału wejściowego (lub wyjściowego), dla których rozpatrywany układ może być uważany za niewiele odbiegający od liniowego [15], tj. wykazujący tylko małe nieliniowości.

W ostatnich trzech dekadach ubiegłego wieku i na początku obecnego w Polsce (w tym kraju szczególnie, ale również i gdzie indziej) niektórzy badacze bardzo akcentowali związek zbieżności szeregu Voltery z analizą zniekształceń nieliniowych w układach z małymi nieliniowościami. Wykażemy tutaj, że takie podejście (postawienie problemu) jest pozbawione większego sensu z punktu widzenia inżyniera projektującego układy z założenia liniowe, które, wchodząc w nieznaczny stopniu w swoje zakresy pracy nieliniowej, wytwarzają niepożądane produkty ograniczające od góry zakres dynamiczny pracy danego układu.

Wspomniana powyżej grupa badaczy bardzo podkreślała małą przydatność szeregu Voltery w analizie układów nieliniowych – w związku z, jak to określano, słabą jego zbieżnością. To stwierdzenie rozciągała także na analizę układów z małymi nieliniowościami. W dalszej części artykułu pokażemy, że w tym przypadku doszło do nieporozumienia. Wykażemy, że zbieżność szeregu Voltery nie ma większego związku z jego przydatnością w analizie zniekształceń nieliniowych występujących w układach ze słabymi nieliniowościami.

Wyżej wspomniani naukowcy, akcentując małą przydatność szeregu Voltery do analizy zniekształceń nieliniowych w układach z małymi nieliniowościami, nie potrafili jednakże zaproponować lepszego rozwiązania. Niektórym z nich wydawało się, że opracowali lepszą metodę analizy niż szereg Voltery, lecz później okazywało się, że były to tylko warianty tej metody. Przykładowo G. Palumbo i wsp. [16-18] opracowali metodę, którą nazwali analizą zniekształceń harmonicznym z wykorzystaniem wskazów i bilansu harmonicznym. Autor tego artykułu wykazał w kilku pracach [19-21], że ich metoda to tylko szczególnie wariant ogólnego podejścia bazującego na szeregu Voltery.

Zauważmy teraz, że wyżej przytoczona definicja układu z małymi nieliniowościami jako opisywanego szeregiem Voltery o skończonej liczbie wyrazów (trzech) oznacza tym samym, że jest to szereg zbieżny. Oczywiście, pod warunkiem że nie wykraczamy poza określony zbiór amplitud i częstotliwości sygnału wejściowego, dla którego ta definicja jest słuszna.

Na powyższe stwierdzenie można spojrzeć również z innej strony. A mianowicie z tego, co już zostało powiedziane wynika, że rozbieżny szereg Voltery nie może opisywać układu z małymi nieliniowościami. Aby mógł opisywać taki układ, musi być zbieżny. Jednakże podanie jego promienia zbieżności nie jest tożsame z podaniem zbioru amplitud i częstotliwości sygnału wejściowego, w którym rozpatrywany układ może być uważany za układ z małymi nieliniowościami. Innymi słowy, problem określenia zakresu, w którym układ posiada cechy układu ze słabymi nieliniowościami, jest osobnym zagadnieniem.

Aby zilustrować i uwypuklić te powyżej opisane różnice, posłużmy się teraz prostym przykładem. A zatem rozpatrzmy układ nieliniowy, który można opisać, przynajmniej w jakimś zakresie, następującym szeregiem potęgowym o nieskończonej liczbie wyrazów

$$y(t) = a_1 x(t) + a_1 x^2(t) + a_1 x^3(t) + \dots, \quad (7)$$

gdzie współczynnik  $a_1$  oznacza stałą będącą liczbą rzeczywistą. Przyjmijmy dalej w opisie (7), że sygnał wejściowy układu  $x(t) = q$  nie zależy od zmiennej czasowej, z tym, że  $q$  może przyjmować różne wartości rzeczywiste. Ograniczmy się tutaj do wartości rzeczywistych nieujemnych.

Powyższe założenia pozwalają przepisać (7) w postaci

$$y = a_1 q + a_1 q^2 + a_1 q^3 + \dots. \quad (8)$$

Zauważmy dalej, że wzór (8) przedstawia sobą sumę nieskończonego szeregu (ciągu) geometrycznego; sygnał wyjściowy układu  $y$  ma wartość stałą równą tej sumie. Oznaczmy ją jako  $y_\infty$ , a ze znanych wzorów wynika, że będzie ona równa

$$y = y_\infty = \frac{a_1 q}{1 - q}. \quad (9)$$

Ponadto szereg geometryczny (8) będzie zbieżny dla wartości  $0 \leq q < 1$  (uwaga: powyżej przyjęliśmy, że  $q$  może przyjmować tylko wartości nieujemne). Innymi słowy promień zbieżności tego szeregu będzie wynosił  $r_u = 1$ . Oznacza to również, że opis (8) rozpatrywanego układu nieliniowego ma sens w zakresie nieujemnych wartości  $0 \leq q < 1$  sygnału wejściowego.

Dokonajmy teraz „małosygnalowego” obciążenia w rozwinięciu (8), zgodnie z podaną powyżej definicją układu z małymi nieliniowościami. Wtedy opis za pomocą szeregu (8) zredukuje się do następującej postaci

$$y_m = a_1q + a_1q^2 + a_1q^3, \quad (10)$$

gdzie  $y_m$  oznacza wartość sygnału wyjściowego wynikającą z tego opisu małosygnalowego. Zatem, biorąc to pod uwagę, będzie można przepisać (8) tak

$$y = y_m + a_1q^4 + a_1q^5 + a_1q^6 + \dots = y_m + y_r, \quad (11)$$

gdzie  $y_r$  oznacza wartość sygnału resztkowego. Zgodnie z definicją ten resztkowy sygnał ma być pomijalnie mały w stosunku do  $y_m$ . Warunek ten możemy wyrazić w następujący sposób

$$\frac{y_r}{y_m} = \frac{y - y_m}{y_m} = \frac{a_1q^4 + a_1q^5 + a_1q^6 + \dots}{a_1q + a_1q^2 + a_1q^3} \leq \alpha, \quad (12)$$

gdzie współczynnik  $\alpha$  określa, jaki co najwyżej ułamek może stanowić  $y_r$  w stosunku do  $y_m$ . Przykładowo możemy przyjąć  $\alpha_1 = 1/10$  (10%),  $\alpha_2 = 1/20$  (5%),  $\alpha_3 = 1/100$  (1%) lub jakąś inną wartość. Korzystając ze wzoru (9) w (12) i wiedząc, że  $y_m = a_1q(1 - q^3)/(1 - q)$  (jako suma skończonego szeregu geometrycznego), można przekształcić nierówność (12) do postaci

$$\frac{y_r}{y_m} = \frac{q^3}{1 - q^3} \leq \alpha. \quad (13)$$

Przekształcając dalej (13), otrzymamy ostatecznie

$$q \leq \sqrt[3]{\frac{\alpha}{1 + \alpha}}. \quad (14)$$

Podstawiając w (14) kolejno przykładowe wartości  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  i  $\alpha_3$ , otrzymamy odpowiadające im nierówności dla sygnału wejściowego  $q$ :  $q_1 \leq 0,45$ ,  $q_2 \leq 0,36$  i  $q_3 \leq 0,22$ . Oznacza to, że przy wyborze kryterium „małosygnalowości” układu  $\alpha_1 = 1/10$  (10%), układ opisany zależnością (8) może być uważany za układ małosygnalowy dla sygnału wejściowego  $q$  spełniającego warunek  $q_1 \leq 0,45$ . Podobnie przy wyborze kryterium  $\alpha_2 = 1/20$  (5%) lub  $\alpha_3 = 1/100$  (1%) mamy odpowiednio:  $q_2 \leq 0,36$  i  $q_3 \leq 0,22$ . Wyniki te pokazują, że zaostrzając kryterium małosygnalowości układu, tj. wybierając mniejszą wartość współczynnika  $\alpha$ , otrzymuje się mniejsze zakresy wartości amplitud sygnału wejściowego  $q$ , dla których to (zgodnie z wybranym kryterium) rozpatrywany układ może być uważany za układ małosygnalowy.

## 2. Zakres dynamiczny układu (prawie) liniowego

Jeżeli mówimy o zakresie dynamicznym układu liniowego, to w tym momencie zdajemy sobie sprawę, że nie do końca taki on jest. Przyjmujemy, że jest on prawie liniowy, co oznacza, że dla odpowiednio małych wartości amplitud sygnału wejściowego (które dla różnych układów są różne) zachowuje się w pełnej zgodności z jego liniowym opisem. Lecz zaczyna coraz mocniej odbiegać od tego opisu wraz ze wzrostem wartości amplitudy sygnału wejściowego, co generuje na wyjściu układu tzw. zniekształcenia nieliniowe. Można je w układzie pomierzyć i policzyć ich wielkość, korzystając z nieliniowego opisu układu (opis liniowy oczywiście nie daje takich możliwości) – na przykład za pomocą szeregu Voltery [1-3].

Zniekształcenia nieliniowe w układzie (prawie) liniowym są oczywiście zjawiskiem niekorzystnym. Możemy je tolerować, ale tylko do pewnej wartości. Tę maksymalną tolerowaną wartość zniekształceń nieliniowych na wyjściu układu można zawsze przeliczyć na opowiadającą im amplitudę sygnału wejściowego, która ogranicza zakres dynamiczny układu od góry. Oznaczmy ją jako  $\max(AMP_x)$ .

W każdym układzie elektronicznym występują szумы [22]. Ograniczają one jego poprawną pracę od dołu. To stwierdzenie oznacza, że amplituda sygnału na wyjściu układu nie może być mniejsza od wartości skutecznej amplitudy szumów – również na wyjściu układu. (Tak możemy przyjąć w uproszczeniu; czasem dopuszcza się, że amplituda szumów może być trochę mniejsza od amplitudy sygnału użytecznego, a niekiedy żąda się, aby była nieco większa). I tak jak poprzednio, można przeliczyć ją na odpowiadającą jej amplitudę skuteczną szumów na wejściu układu. Oznaczmy tę ostatnią jako  $ASSZ_x$ .

W układach elektronicznych amplituda  $ASSZ_x$ , wyrażająca poziom szumów termicznych w układzie, nie zależy od poziomu sygnału użytecznego, tj. amplitudy sygnału wejściowego  $AMP_x$ . Jej wartość będzie zależała jedynie od charakterystyki rozpatrywanego układu (kształtowana przez charakterystykę układu, będącego np. filtrem).

Zakres dynamiczny układu (prawie) liniowego – odniesiony do wejścia układu – zdefiniujemy [23] jako zakres amplitud sygnału wejściowego, w którym to praca układu będzie mogła być uważana za niezakłóconą ani przez szумы (od dołu), ani przez zniekształcenia nieliniowe (od góry). Oznaczmy ten zakres jako  $ZD_x$ .

Zatem, przy wykorzystaniu powyżej zdefiniowanych amplitud  $\max(AMP_x)$  i  $ASSZ_x$ , określa go następujący wzór

$$ZD_x = \frac{\text{górną granicę } ZD_x}{\text{dolną granicę } ZD_x} = \frac{\max(AMP_x)}{ASSZ_x} \quad (15)$$

Na marginesie zauważmy, że przy uwzględnieniu addytywnych szumów termicznych w układzie (prawie) liniowym, jego opis, dany uprzednio wzorem (2), będzie teraz miał postać

$$y(t) = y^{(1)}(t) + y^{(2)}(t) + y^{(3)}(t) + \dots + n_y(t) = \sum_{n=0}^{\infty} y^{(n)}(t) + n_y(t), \quad (16)$$

gdzie  $n_y(t)$  oznacza sygnał szumów na wyjściu układu, a opisy pozostałych składników pozostają bez zmian – patrz wzory (1) i (3-6).

Dobre układy elektroniczne (prawie) liniowe to takie, które charakteryzują się dużą wartością zakresu dynamicznego. Zatem w ich projektowaniu należy zwracać uwagę na minimalizację amplitudy  $ASSZ_x$  oraz maksymalizację amplitudy  $\max(AMP_x)$ , aby osiągnąć jak największą wartość współczynnika  $ZD_x$  – patrz wzór (15).

Minimalizację amplitudy  $ASSZ_x$  można przeprowadzić poprzez odpowiedni dobór topologii układu i parametrów jego elementów składowych. Tę samą procedurę można również zastosować do maksymalizacji amplitudy  $\max(AMP_x)$ . Wynika stąd wniosek, że dobór topologii układu i parametrów jego elementów składowych należy przeprowadzać jednocześnie pod kątem minimalizacji  $ASSZ_x$  i maksymalizacji  $\max(AMP_x)$ . W pracy [23] wykazano, że w przypadku filtrów aktywnych RC sprowadza się to do optymalizacji z tylko jednym kryterium, a tym kryterium jest tzw. iloczyn wzmocnienia i wrażliwości filtra  $GSP$  (*gain-sensitivity product*) [24]. Wtedy należy minimalizować miarę  $GSP$ .

W literaturze znane jest także inne podejście do zagadnienia zwiększania zakresu dynamicznego  $ZD_x$  – poprzez kompensację nieliniowości w układzie. Polega ono na eliminacji nieliniowości drugiego, trzeciego rzędu, a czasem również wyższych rzędów z układu w celu zwiększenia jego zakresu liniowości. Przekłada się to na zwiększanie wartości amplitudy  $\max(AMP_x)$  przy niezmięnionej wartości  $ASSZ_x$  (związanej z szumami). Innymi słowy, można to także wyrazić następująco: w kompensacji nieliniowości powiększamy górną granicę ( $\max(AMP_x)$ ) zakresu dynamicznego przy pozostawionej bez zmian granicy dolnej ( $ASSZ_x$ ). Tym sposobem zwiększania wartości współczynnika  $ZD_x$  zajmiemy się w następnym punkcie, jak również jego wpływem na promień zbieżności szeregu Voltery i zakres tzw. małonieliniowości układu.

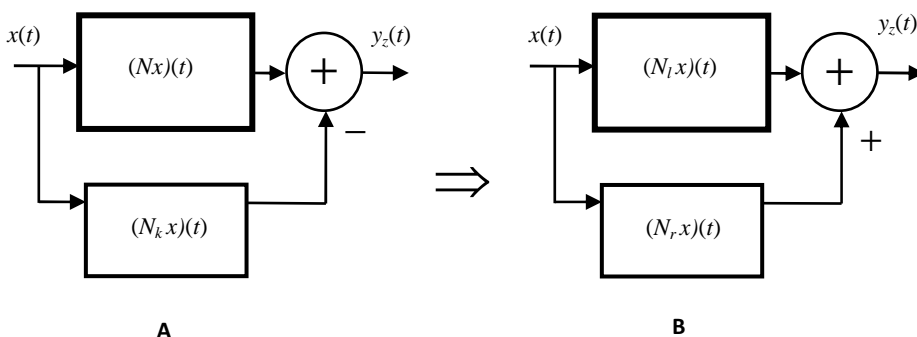
### 3. Kompensacja nieliniowości a promień zbieżności szeregu Voltery i zakres tzw. małonieliniowości układu

Zacznijmy od rozważenia kompensacji nieliniowości w układzie, który może, ale nie musi, być opisany szeregiem Voltery, co oznacza przypadek ogólniejszy. Załóżmy, że układ ten jest opisany operatorem nieliniowym  $N$  (w ogólności z pamięcią) określonym zależnością

$$y(t) = N(x(t)) = (Nx)(t), \quad (17)$$

gdzie  $y(t)$  oznacza sygnał na wyjściu układu, natomiast  $x(t)$  jest sygnałem na jego wejściu. Ponadto w zapisie we wzorze (17)  $Nx$  oznacza operator złożony (użycie tej formy pozwala na skrócenie zapisu).

Ogólny schemat kompensacji nieliniowości przedstawiono na rysunku 1A.



**Rysunek 1.** Ogólny schemat kompensacji nieliniowości (A); równoważny schemat z blokiem liniowym i blokiem opisującym nie do końca skompensowane produkty operacji kompensacji (resztkowe) (B)  
Źródło: opracowanie własne.

Na rysunku 1A kompensator układu nieliniowego opisanego wzorem (17) jest oznaczony jak  $N_k$ . Jego zadanie polega na kompensacji sygnału  $y(t)$  określonego wzorem (17) dla wszystkich sygnałów wejściowych  $x(t)$  z pewnego założonego zbioru w taki sposób, aby otrzymać sygnał wypadkowy  $y_z(t)$  powiązany z sygnałem  $x(t)$  za pomocą operatora liniowego. Ten operator liniowy został oznaczony jako  $N_l$  na rysunku 1B, a całą powyżej opisaną operację kompensacji nieliniowości możemy zapisać za pomocą następującego wzoru

$$y_z(t) = (Nx)(t) - (N_k x)(t) = (N_l x)(t) \quad (18)$$

Wiemy jednakże z praktyki, że opisana w ten sposób operacja kompensacji nie będzie realizowana w sposób idealny. Zatem aby uwzględnić jej nieidealność, modyfikujemy równość (18) do postaci

$$y_z(t) = (Nx)(t) - (N_k x)(t) \cong (N_l x)(t) \quad (19)$$

co oznacza, że równość (18) jest spełniona tylko w przybliżeniu. I tak będziemy przyjmować w dalszej części artykułu, a żeby przejść z postaci (19) do pełnej równości, posłużymy się dodatkowym operatorem nieliniowym opisującym nie do końca skompensowane produkty operacji kompensacji (resztkowe). Operator ten na rysunku 1B został oznaczony jako  $N_r$ . Korzystając z niego, możemy przepisać (19) tak

$$y_z(t) = (Nx)(t) - (N_k x)(t) = (N_l x)(t) + (N_r x)(t) . \quad (20)$$

Prawa strona zależności (2) została zilustrowana za pomocą schematu na rysunku 1B.

Zauważmy również, że równość po lewej stronie zależności (20) można rozpiścić w następujący sposób

$$\begin{aligned} y_z(t) &= (Nx)(t) - (N_k x)(t) = (Nx)(t) - (N_l x)(t) + (N_l x)(t) - (N_k x)(t) = \\ &= (N_l x)(t) + ((Nx)(t) - (N_l x)(t) - (N_k x)(t)) . \end{aligned} \quad (21)$$

Porównanie zaś wyrażenia po prawej stronie (20) z wyrażeniem po prawej stronie (21) – w drugiej linijsce – pokazuje, że zachodzi

$$(N_r x)(t) = (Nx)(t) - (N_l x)(t) - (N_k x)(t) . \quad (22)$$

Przejdźmy teraz od ogólnego schematu kompensacji nieliniowości, przedstawionego na rysunku 1 i opisanego zależnościami (17-22), do przypadku szczególnego, w którym odwołujemy się do tego, że operator nieliniowy  $N$  opisujący układ posiada rozwinięcie w szereg typu potęgowego (jakim jest np. szereg Voltery [11]) oraz że można w nim wziąć pod uwagę tylko skończoną liczbę składników (przypadek małosygnałowy). Taki przypadek – w różnych wariantach – jest najczęstszym przypadkiem rozpatrywanym w literaturze. Zauważmy, że zakładając w nim istnienie rozwinięcia operatora  $N$  w szereg nieskończony, wymagamy jednocześnie, aby ten szereg był zbieżny. A zatem wniosek stąd też jest taki, że każda metoda kompensacji nieliniowości oparta na powyższych założeniach powinna „kontrolować” zakres swojej stosowalności poprzez sprawdzanie, czy przyjęte amplitudy sygnału w układzie z kompensatorem nie przekraczają wartości promienia zbieżności przedmiotowego szeregu. Pokażemy tutaj, że nie można wykroczyć poza ten promień zbieżności również w układzie zawierającym kompensator nieliniowości (co być może nie jest takie oczywiste).

Zauważmy, że w przypadku, gdy operator  $N$  opisujący układ nieliniowy posiada rozwinięcie w postaci szeregu Voltery danego wzorami (2) i (1) oraz (3-6), tj. gdy można napisać

$$y(t) = (Nx)(t) = y^{(1)}(t) + y^{(2)}(t) + y^{(3)}(t) + \dots = \sum_{n=1}^{\infty} y^{(n)}(t) , \quad (23)$$

gdzie poszczególne składniki w tym szeregu są określone wzorami (1) oraz (3-6), pozostałe operatory występujące we wzorach (18-22) są zdefiniowane następująco

$$(N_l x)(t) = y^{(1)}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau)x(t-\tau)d\tau , \quad (24)$$

$$\begin{aligned}
(N_k x)(t) &= y_k^{(2)}(t) + y_k^{(3)}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h_k^{(2)}(\tau_1, \tau_2) x(t-\tau_1)x(t-\tau_2) d\tau_1 d\tau_2 + \\
&+ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h_k^{(3)}(\tau_1, \tau_2, \tau_3) x(t-\tau_1)x(t-\tau_2)x(t-\tau_3) d\tau_1 d\tau_2 d\tau_3 = \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h^{(2)}(\tau_1, \tau_2) x(t-\tau_1)x(t-\tau_2) d\tau_1 d\tau_2 + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h^{(3)}(\tau_1, \tau_2, \tau_3) x(t-\tau_1) \cdot \\
&\cdot x(t-\tau_2)x(t-\tau_3) d\tau_1 d\tau_2 d\tau_3 = y^{(2)}(t) + y^{(3)}(t)
\end{aligned} \tag{25}$$

oraz

$$(N_r x)(t) = y^{(4)}(t) + y^{(5)}(t) + y^{(6)}(t) + \dots = \sum_{n=4}^{\infty} y^{(n)}(t) . \tag{26}$$

We wzorze (25) funkcje  $h_k^{(2)}(\tau_1, \tau_2)$  i  $h_k^{(3)}(\tau_1, \tau_2, \tau_3)$  oznaczają odpowiedzi impulsowe odpowiednio drugiego i trzeciego rzędu zastosowanego w układzie kompensatora nieliniowości. Zauważmy dalej, że kompensator ten kompensuje nieliniowości rzędów drugiego i trzeciego – nic więcej; w związku z tym wszystkie jego pozostałe odpowiedzi impulsowe są tożsamościowo równe zero. Poprzez  $y_k^{(2)}(t)$  i  $y_k^{(3)}(t)$  oznaczono w (25) odpowiedzi częściowe kompensatora. Zatem całkowita odpowiedź kompensatora równa się  $y_k(t) = y_k^{(2)}(t) + y_k^{(3)}(t)$ . Ponadto w celu uproszczenia dalszych wywodów przyjęto w (25), że rozpatrywany kompensator nieliniowości kompensuje w sposób perfekcyjny nieliniowości drugiego i trzeciego rzędu układu, tj. mamy  $y^{(2)}(t) = y_k^{(2)}(t)$  i  $y^{(3)}(t) = y_k^{(3)}(t)$ .

Zilustrujmy teraz powyżej przedstawioną procedurę kompensacji nieliniowości w schemacie z szeregiem Voltery za pomocą prostszego szeregu potęgowego. Taki szereg – szereg geometryczny dany wzorem (8) – wykorzystywaliśmy w przykładzie rozpatrywanym w punkcie 1. Zauważmy, że dla tego przykładu odpowiedniki wzorów (24-26) przyjmą postać

$$(N_r x)(t) \Rightarrow N_r q = y^{(1)} = a_1 q , \tag{27}$$

$$(N_k x)(t) \Rightarrow N_k q = y_k^{(2)} + y_k^{(3)} = a_{1k} q^2 + a_{1k} q^3 = a_1 q^2 + a_1 q^3 = y^{(2)} + y^{(3)} \tag{28}$$

oraz

$$(N_r x)(t) \Rightarrow N_r q = a_1 q^4 + a_1 q^5 + a_1 q^6 + \dots = y^{(4)} + y^{(5)} + y^{(6)} + \dots , \tag{29}$$



gdzie dodatkowy indeks  $k$  przy  $y_k^{(2)}$ ,  $y_k^{(3)}$  i  $a_{1k}$  oznacza, że te wielkości odnoszą się do kompensatora. Ponadto założono w (28), że  $\alpha_{1k} = \alpha_1$ , czyli przyjęto perfekcyjną kompensację nieliniowości drugiego i trzeciego rzędu rozpatrywanego układu.

Zauważmy również, że zmodyfikowany układ, tj. układ z dołączonym kompensatorem, będzie w naszym przykładzie opisany następującym operatorem

$$N_{uk}q = N_lq + N_rq = a_1q + a_1q^4 + a_1q^5 + a_1q^6 + \dots \quad (30)$$

Szereg nieskończony – jako zmodyfikowany nieskończony szereg geometryczny we wzorze (8) – posiada ten sam promień zbieżności  $r_{uk} = 1$ , tj.  $r_{uk} = r_u = 1$ . Oznacza to, że operacja kompensacji nieliniowości bazująca na wykorzystaniu opisu za pomocą szeregu typu potęgowego nie zmienia zakresu stosowalności opisu układu zmodyfikowanego. Na przykład nie rozszerza tego zakresu w stosunku do układu bez kompensacji. Z powyższego wynika również, że powyżej opisany schemat kompensacji nieliniowości jest poprawny tylko w zakresie  $0 \leq q < 1$ ; poza tym zakresem może prowadzić do niepożądanych wyników.

Założmy teraz, że kompensację nieliniowości w naszym przykładowym układzie przeprowadzamy tylko w zakresie spełniania przez niego warunku małoliniowości przy przyjęciu współczynnika  $\alpha$  na poziomie  $\alpha_1 = 1/10$  (10%),  $\alpha_2 = 1/20$  (5%) i  $\alpha_3 = 1/100$  (1%) (patrz poprzedni punkt). I sprawdzimy, co się dzieje z tym zakresem po wykonaniu kompensacji nieliniowości, jak się zmienia. W tym celu policzmy zakres małonieliniowości układu zmodyfikowanego opisanego zależnością (30). Przeprowadzając podobne rozumowanie jak w punkcie 1, odpowiednik wzoru (10) będziemy mogli wtedy zapisać tak

$$y_{muk} = a_1q + a_1q^4 + a_1q^5, \quad (31)$$

gdzie  $y_{muk}$  oznacza wartość sygnału wyjściowego wynikającą z opisu małosygnałowego (bierzemy w nim pod uwagę tylko trzy pierwsze wyrazy szeregu) układu zmodyfikowanego (tj. z dołączonym kompensatorem nieliniowości). Zatem, biorąc to pod uwagę, odpowiednik wzoru (11) będzie miał postać

$$y_z = y_{muk} + a_1q^6 + a_1q^7 + a_1q^8 + \dots = y_{muk} + y_{ruk}, \quad (32)$$

gdzie  $y_{ruk}$  oznacza wartość sygnału resztkowego w układzie z kompensatorem. Zgodnie z definicją ten resztkowy sygnał powinien być pomijalnie mały w stosunku do  $y_{muk}$ . Zatem warunek (12) będzie teraz wyglądał tak

$$\frac{y_{ruk}}{y_{muk}} = \frac{y_z - y_{muk}}{y_{muk}} = \frac{a_1q^6 + a_1q^7 + a_1q^8 + \dots}{a_1q + a_1q^4 + a_1q^5} \leq \alpha. \quad (33)$$

Dalej, po przekształceniach, z (33) otrzymamy

$$\frac{y_{ruk}}{y_{muk}} = \frac{q^5}{(1-q)(1+q^3(1+q))} \leq \alpha. \quad (34)$$

Rozwiązując nierówność (13) numerycznie, otrzymano kolejno:  $q_{1uk} \leq 0,56$  przy  $\alpha_1 = 1/10$  (10%),  $q_{2uk} \leq 0,49$  przy  $\alpha_2 = 1/20$  (5%) oraz  $q_{3uk} \leq 0,37$  przy  $\alpha_3 = 1/100$  (1%). Porównanie tych wartości z ich odpowiednikami:  $q_1 \leq 0,45$ ,  $q_2 \leq 0,36$  oraz  $q_3 \leq 0,22$  otrzymanymi w punkcie 1 dla układu bez kompensatora nieliniowości pokazuje wyraźnie, że kompensacja nieliniowości w układzie (prawie) liniowym skutkuje poszerzeniem jego tzw. zakresu małoliniowego.

#### 4. Systemy prawie bez pamięci

W literaturze funkcjonuje pojęcie systemów prawie bez pamięci. Jednakże najczęściej używane jest ono bez jakiegokolwiek ilościowego odniesienia do tego, co takie określenie ma oznaczać. W tej części podamy propozycję ilościowej miary dla tego pojęcia, przy czym ograniczymy się tutaj tylko do rozpatrzenia systemów liniowych.

Jak wiemy, system liniowy jest jednoznacznie opisany przez podanie jego odpowiedzi impulsowej. Korzystając z tego pojęcia w odniesieniu do tzw. systemów prawie bez pamięci, możemy intuicyjnie powiedzieć tak: im bardziej ta odpowiedź jest zbliżona do tzw. impulsu Diraca (delty Diraca  $\delta(t)$ ), jeżeli chodzi o oś czasową, to tym bardziej też ta odpowiedź świadczy o tym, że opisywany przez nią system jest systemem prawie bez pamięci. Ilościowo moglibyśmy to sformułować tak:

- a) układ, którego odpowiedź impulsowa  $h(t) = \delta(t)$  ma postać impulsu Diraca, jest z definicji układem z zerową pamięcią;
- b) jeżeli nie zachodzi przypadek a), wyznacz maksymalną wartość czasu  $t_m$ , dla którego spełniona jest następująca nierówność

$$\left( \int_0^{t_m} |h(\tau)| d\tau \right) / \left( \int_0^{\infty} |h(\tau)| d\tau \right) \leq \beta, \quad (35)$$

gdzie współczynnik  $\beta$  określa, jaki procentowy wkład odpowiedzi impulsowej uważamy za istotny dla określenia parametru  $t_m$ . Na przykład możemy przyjąć  $\beta = 90\%$ .

Porównaj otrzymaną w punkcie b) wartość parametru  $t_m$  z wartością  $t_{gr}$ , którą uważasz za graniczną w rozpatrywanej klasie systemów liniowych dla rozróżnienia układów z pamięcią od tych prawie nieposiadających pamięci. Jeżeli będzie zachodzić  $0 < t_m \leq t_{gr}$ , uważaj analizowany układ za prawie nieposiadający pamięci.

## Podsumowanie

W artykule przedstawiono, bez stosowania zaawansowanych narzędzi matematycznych, ważne relacje wiążące ze sobą takie zagadnienia, jak: zbieżność szeregu Voltery w opisie układów ze słabymi nieliniowościami a ich zakres tzw. małonieliowości, zakres dynamiczny układu a kompensacja nieliniowości oraz jej wpływ na zmianę wyżej wymienionego zakresu małonieliowości. Na koniec przedstawiono również propozycję ścisłego określenia pojęcia „system prawie bez pamięci”.

## Literatura

1. Rugh W.J., *Nonlinear system theory: the Volterra/Wiener approach*, Johns Hopkins Univ. Press, Baltimore (MD) 1981.
2. Schetzen M., *The Volterra and Wiener theories of nonlinear systems*, John Wiley & Sons, New York 1980.
3. Weiner D.D., Spina J., *Sinusoidal analysis and modeling of weakly nonlinear circuits*, Van Nostrand, New York 1980.
4. Borys A., *Distortion-induced d.c. offset analysis using Volterra-Wiener series approach*, „Electronics Letters” 1978, vol. 14, no. 25, s. 817-818.
5. Borys A., *On intermodulation and harmonic distortion in single-amplifier active filters*, „Journal of the Audio Engineering Society” 1980, vol. 28, no. 10, s. 706-712.
6. Borys A., *The relationships between different measures of nonlinear distortion in single-amplifier active filters*, „IEEE Trans. Circuits and Systems” 1983, vol. 11, s. 842-846.
7. Borys A., *Some considerations on nonlinear echo cancellation and discrete Volterra series for binary signals*, „ntzArchiv” 1989, vol. 11, s. 73-76.
8. Borys A., *Wybrane zagadnienia analizy nieliniowych, analogowych układów elektronicznych z wykorzystaniem szeregu Voltery*, Wydawnictwa Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy, Bydgoszcz 1996.
9. Borys A., *Nonlinear aspects of telecommunications: discrete Volterra series and nonlinear echo cancellation*, CRC Press, Florida 2000.
10. Borys A., *Podstawowe analogowe i cyfrowe układy elektroniczne z małymi nieliniowościami stosowane w telekomunikacji*, Wydawnictwa Uczelniane UTP w Bydgoszczy, Bydgoszcz 2007.
11. Boyd S., Chua L.O., *Fading memory and the problem of approximating nonlinear operators with Volterra series*, „IEEE Trans. on Circuits and Systems” 1985, vol. 32, s. 1150-1161.
12. Narayanan S., *Transistor distortion analysis using Volterra series representation*. „The Bell Syst. Tech. Journal” 1967, vol. 46, s. 991-1024.
13. Bussgang J.J., Ehrman L., Graham J.W., *Analysis of nonlinear systems with multiple inputs*, „Proceedings of the IEEE” 1974, vol. 62, s. 1088-1119.

14. Meyer R., Stephens M., *Distortion in variable-capacitance diodes*, „IEEE Journal of Solid-State Circuits” 1975, vol. 10, s. 47-54.
15. Borys A., *An analysis of slew-induced distortion in single-amplifier active filters using the Volterra-Wiener series technique*, „Int. Journal of Circuit Theory and Applications” 1982, vol. 10, s. 81-94.
16. Palumbo G., Pennisi S., *High-frequency harmonic distortion in feedback amplifiers: analysis and applications*, „IEEE Trans. Circuits and Systems” 2003, vol. 50, s. 328-340.
17. Cannizzaro S.O., Palumbo G., Pennisi S., *Effects of nonlinear feedback in the frequency domain*, „IEEE Trans. Circuits and Systems” 2006, vol. 53, s. 225-234.
18. Cannizzaro S.O., Palumbo G., Pennisi S., *An approach to model high-frequency distortion in negative-feedback amplifiers*, „Journal of Circuit Theory and Applications” 2008, vol. 36, s. 3-18.
19. Borys A., *On correctness of the basics of Palumbo and Pennisi’s means of harmonic distortion calculation in analog integrated circuits*, „Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Informatyki w Łodzi” 2009, vol. 8, nr 2, s. 5-16.
20. Borys A., *Exploiting admittance formalism in the nonlinear analysis*, „Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Informatyki w Łodzi” 2009, vol. 8, nr 2, s. 17-39.
21. Borys A., *On influence of feedback on harmonics in mildly nonlinear analog circuits*, „Zeszyty Naukowe UTP” (seria Telekomunikacja i Elektronika) 2009, z. 12, s. 5-20.
22. Hasse L., Spiralski L., *Szumy elementów i układów elektronicznych*, WNT, Warszawa 1981.
23. Borys A., Weiss L.J., *Zakres dynamiczny a iloczyn wzmocnienia i wrażliwości filtru aktywnego RC*, „Zeszyty Naukowe ATR” (seria Telekomunikacja i Elektronika) 1986, z. 6.
24. Moschytz G.S., *The gain-sensitivity product: a figure of merit for hybrid integrated filters using single operational amplifiers*, „IEEE J. Solid-State Circuits” 1971, vol. 6, s. 103-110.

## ON VOLTERRA SERIES AND ITS CONVERGENCE AS WELL AS ABOUT CIRCUIT DYNAMIC RANGE, COMPENSATION OF NONLINEARITIES, AND ALMOST MEMORYLESS SYSTEMS

**Abstract:** *In this paper, without using any advanced mathematical tools, such important topics like: Volterra series convergence in description of mildly nonlinear systems and range of validity of weak nonlinearity property, dynamic range of a system and compensation of its nonlinearities, and relation of the latter with change of the range of validity of weak nonlinearity property have been presented. Finally, a proposal for precise defining of the notion of an almost memoryless system has been discussed.*

Zdzisław Szczerbiński

## OPTIMIZING LOOP DISTRIBUTION AS A METHOD FOR EFFICIENT PROGRAM PARALLELIZATION

*The article is concerned with the issues of optimal execution of loops in parallel programs. Upon introduction to data dependences, the loop distribution method is described. Next, the optimal distribution for parallelizing loops whose dependence graphs are acyclic is elaborated on. In the following section, an algorithm is presented which generates the optimal distribution for loops which may contain dependence cycles. Theoretical considerations are accompanied by practical examples.*

### Introduction

In this paper we describe a method of optimal loop parallelization in numerical programs, executed in parallel computing systems (shared- and distributed-memory multiprocessor computers, workstations with multicore processors, computing clusters including supercomputers). The method is based on the concept of loop distribution, with additional optimization techniques applied.

As a natural consequence of the flow of data in a program, a *data dependence* [1] (or simply *dependence*) exists between two statements if they both access the same variable and at least one access results in assigning a new value to the variable. Let us denote the statement executed earlier by  $S_a$  and the one executed later by  $S_b$ . We call  $S_a$  the *source* and  $S_b$  the *sink* of the dependence, and denote the dependence by  $S_a \rightarrow S_b$ . This paper is concerned with *true dependences* i.e. dependences in which the assignment of the new value is in the source only, as opposed to *false dependences*, in which the assignment is in the sink or in both the source and the sink. In fact, an overwhelming majority of dependences in practical programs are of the true type. Besides, false dependences may be disposed of altogether by renaming variables.

In the parallelization process of a program, it is most important to analyze dependences between statements executed within a *loop*. We limit our analysis to *numerical loops* i.e. loops with an (integer) control variable and a defined (while commencing the execution) number of *iterations*. Dependences inside loops are categorized into *loop-independent* (the accesses of  $S_a$  and  $S_b$  to the variable are in the same iteration) and *loop-carried* (the access of  $S_b$  is at least one iteration later than that of  $S_a$ ) [2]. For a dependence in a single (not nested) loop we define its *distance* as the number of iterations between its source and sink. We limit our attention to the most common cases of loops where dependence distances are

constant throughout loop execution. It is also assumed that the analyzed loops are *structured* i.e. they contain no backward branches and, for a given loop, the lexical order of statements in its body corresponds to the order of execution in a single iteration. Under these assumptions, loop-carried dependences can be further classified into forward and backward ones. A *forward* dependence occurs if the source lexically precedes the sink. In a *backward* dependence the sink lexically precedes the source or they are the same statement ( $S_a = S_b$ ). Statement  $S_a$  in a loop is said to be involved in a *dependence cycle* if there exist statements  $S_{b1}, S_{b2}, \dots, S_{bn}$  such that  $S_a \rightarrow S_{b1} \rightarrow S_{b2} \rightarrow \dots \rightarrow S_{bn} \rightarrow S_a$ , where the arrows symbolize dependences, both loop-independent and loop-carried. A special case is the absence of the intermediate statements i.e. the cycle is due to a loop-carried backward dependence whose source and sink are the same statement ( $S_a \rightarrow S_a$ ). A classical example here is the *linear recurrence* where consecutive elements of an array are assigned new values which are read, in the same statement, in one or more of the next iterations (see the loop in section 1 and example 1 in section 4).

## 1. Loop parallelization

A loop to be parallelized is commonly represented as a labeled, directed *dependence graph* whose vertices are the loop body's statements, edges symbolize dependences, and labels are dependence distances. Figure 1 shows the dependence graph for an example loop given below, which contains two dependence cycles. Throughout this article we shall use the Fortran notation for loops.

```

do i = 2, 9999
S1:   a(i) = b(i) + z(i)
S2:   c(i) = d(i) - a(i) + 5.0
S3:   f(i) = c(i-1) + z(i)
S4:   d(i+1) = f(i) - g(i)
S5:   x(i+1) = x(i) + e(i-1)
S6:   y(i) = a(i-1) + 3.0
S7:   b(i+1) = z(i)
end do

```

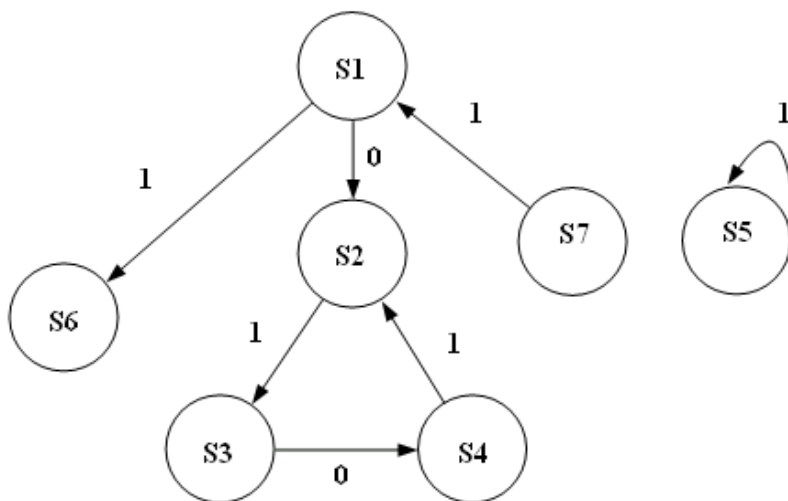
If a loop contains no dependence cycles then its dependence graph is *acyclic* and, by sorting the graph topologically, the loop may be restructured into a form in which all dependences are forward (even if, in its original form, the loop contained some backward ones).

*Loop parallelization* consists in breaking the natural sequence of iterations in a conventional, *sequential* loop and assigning them, either as single iterations or (which is more common in practice) as groups of iterations to consecutive processors or cores. The resulting *parallel* loop is executed faster which is obvious since all the processors/cores work simultaneously. We shall use OpenMP [3]

compiler directives for parallelization, i.e. in the structure below the internal do statement is a sequential loop while the whole construct is the corresponding parallel loop.

```
!$omp parallel do
    do ...
    ⋮
    end do
!$omp end parallel do
```

If a loop-carried dependence occurs in a parallelized loop, the execution of the loop's iterations must be synchronized so that the source of the dependence is executed before its sink. We call it *synchronizing a dependence*. There are a number of techniques leading to the correct execution of loops in such cases. This paper is concerned with the issue of employing the technique of loop distribution for optimally restructuring the parallelized loop into a form which ensures implicit synchronization of all the dependences inside the loop.



**Figure 1.** The dependence graph for an example loop

Source: P. Maciulewicz, *Wyznaczanie optymalnej kolejności instrukcji w pętach równoległych o cyklicznych grafach zależności*, praca dyplomowa inżynierska, PWSZ w Elblągu, Instytut Informatyki Stosowanej, Elbląg 2012.

## 2. Loop distribution

The *loop distribution* (also called *loop fission* and *loop splitting*) method [4, 5] consists in decomposing a “large” loop into a sequence of “smaller” ones. Each of the resulting new loops contains a sequence of statements which is a subset of the

original loop's body. The usefulness of this technique follows from its ability to transform a loop whose iterations cannot be run in parallel into several loops, some (if not all) of which lend themselves to parallelization. In the following example:

```
do i = 2,n
  a(i) = 3.0*b(i) + 2.0*c(i) - d(i)
  e(i) = f(i)*a(i-1)
end do
```

the loop cannot be parallelized without the synchronization of the loop-carried dependence due to the use of the same element of array *a* in two consecutive iterations. However, the loop may be distributed and either of the elementary loops may be run in parallel mode since their iterations are now thoroughly independent of one another:

```
do i = 2,n
  a(i) = 3.0*b(i) + 2.0*c(i) - d(i)
end do
do i = 2,n
  e(i) = f(i)*a(i-1)
end do
```

If a loop contains branches, distribution may require *if-conversion* i.e. conversion of branches to conditional assignment statements [2].

As it can be seen from the above example, loop distribution eliminates the need for explicit synchronization of a forward loop-carried dependence. In fact, the dependence is no longer loop-carried: its source and sink are now in two separate loops. Since the loops are carried out one after another (all parallelism is within the loops only), the dependence is synchronized thanks to the sequential nature of statement execution in the non-parallelized sections of the program.

Obviously, loops may contain far more statements and dependences than in the above simple example. Numerous distributions are then possible, having in common correct execution of the resulting loops but differing in the total execution time. It is then nontrivial to select the optimal distribution. Additionally, in the presence of dependence cycles it is sometimes impossible to even partially parallelize the loop. We shall address these problems in the following two sections.

### 3. Distribution of loops containing no dependence cycles

As stated earlier, in the loops whose dependence graphs are acyclic all loop-carried dependences are forward dependences – either already in the loop's original form or after *statement reordering* [6] whose purpose is to transform the originally backward dependences into forward ones. For example, the order of statements in the loop from section 2 could have originally been reverse:



```

do i = 2,n
  e(i) = f(i)*a(i-1)
  a(i) = 3.0*b(i) + 2.0*c(i) - d(i)
end do

```

which would have no significance for sequential execution. However, loop distribution is here impossible; the obstacle is the backward dependence from the second statement to the first one. Nevertheless, the statements may be swapped which results in the form shown in section 2, leading to the distribution and subsequent parallel execution. In this way, the backward dependence has been transformed into a forward one and this has been possible because of the absence of a loop-independent dependence between the statements; only the presence of such a dependence would impose an order of execution, in a single iteration, of the two statements. Transformations of this kind for the general case of a loop with multiple statements and dependences are equivalent to the *topological sorting* of the loop's dependence graph. Since the graph is here acyclic, such sorting is always possible.

An intuitive, simple method of distribution is as follows: a loop consisting of  $r$  statements is split into  $r$  loops, each containing a single statement. For example, the loop:

```

do i = 2,n
S1:  a(i) = c(i-1) + 10.0
S2:  b(i) = a(i)*c(i-1)
S3:  c(i) = sin(c(i))/c(i)
end do

```

may be distributed into:

```

do i = 2,n
S3:  c(i) = sin(c(i))/c(i)
end do
do i = 2,n
S1:  a(i) = c(i-1) + 10.0
end do
do i = 2,n
S2:  b(i) = a(i)*c(i-1)
end do

```

since the three dependences (two loop-carried and one loop-independent) form no cycle and the statements  $S_1$ ,  $S_2$  and  $S_3$  may be reordered so as to transform the initially backward dependences into forward ones. However, this method of distribution is inefficient due to the introduced overhead associated with loop organization, repeated for each loop. A more efficient way to distribute the above loop is to group statements  $S_1$  and  $S_2$  and contain them in one loop:

```

do i = 2,n
S3:  c(i) = sin(c(i))/c(i)
end do
do i = 2,n
S1:  a(i) = c(i-1) + 10.0
S2:  b(i) = a(i)*c(i-1)
end do

```

The above process of concatenating adjacent loops, known in the literature as *loop fusion* [7], is in fact the opposite of loop distribution. At this point, a question arises: to what extent should a loop be distributed? This may be formally expressed as the following optimization problem.

**Optimal distribution problem.** Given a loop containing no dependence cycles, find its distribution which:

- ensures synchronization of all dependences, and
- generates the minimum number of resulting loops.

The above problem was solved in [9] where, basing on the technique of *dependence folding* and a specific algorithm for topological sorting named ELMAX [8], the algorithm LOOPDIST for optimal loop distribution was described and results from applying its program implementation to parallelization of example loops presented. The parallel loop execution times on a 136-processor distributed-memory supercomputer were significantly smaller than those obtained while running the loops in the unchanged form after merely selecting the parallelization options in a commercial Fortran compiler [9].

#### 4. Loop distribution in the presence of dependence cycles

In the loops whose dependence graphs are cyclic the distribution problem becomes more difficult. At least one loop-carried dependence is now a backward one irrespective of the statement order permitted by the existing loop-independent dependences. It is obvious that loop distribution resulting in a backward dependence's sink being inside a loop executed earlier than the loop containing the source will lead to erroneous results, even without subsequent loop parallelization. For example, the loop

```

do i = 2,n
  a(i) = b(i-1) + c(i)
  b(i) = a(i)*e(i)
end do

```

may not be distributed since, in the loops

```
do i = 2,n
  a(i) = b(i-1) + c(i)
end do
do i = 2,n
  b(i) = a(i)*e(i)
end do
```

the access order to the elements of array  $b$  is different from that in the original loop. Let us note that it is now impossible to transform the backward dependence into a forward one because of the loop-independent dependence from the first statement to the second. The two dependences form a cycle; the loop may not be parallelized and must be executed sequentially. For a general case of a loop containing a backward dependence and statements other than the dependence's source and sink, only the part(s) of the loop's body preceding the sink and/or succeeding the source may be parallelized, provided there are no more backward loop-carried dependences in the loop.

In the presence of dependence cycles, the widely adopted technique in loop analysis is to identify, in the loop's body, the so-called  $\pi$ -blocks. A  $\pi$ -block [4] is a set of statements involved in a *maximal* dependence cycle i.e., for a given statement in a  $\pi$ -block, any cycle it is involved in is contained within the  $\pi$ -block. A single statement involved in no dependence cycle is considered an *elementary*  $\pi$ -block. Referring to graph theory,  $\pi$ -blocks correspond to *strongly connected components* in the loop's dependence graph. It is thus necessary at this stage to employ an algorithm for finding strongly connected components in cyclic graphs, e.g. the one presented in [10].

We put forward a new concept here. It consists in applying topological sorting to the graph of whole  $\pi$ -blocks rather than single statements. The latter is, obviously, impossible here since the loop's dependence graph is cyclic. But sorting a graph whose vertices are  $\pi$ -blocks is always possible since all the dependence cycles are now contained within the  $\pi$ -blocks; hence, this new graph is definitely acyclic. Moreover, if the sorting is done by means of the algorithm ELMAX, mentioned earlier, one obtains the sequence of  $\pi$ -blocks which is optimal for parallelization. The following rule is the basis for loop distribution and formation of output loops:

- parallel loops are formed from elementary  $\pi$ -blocks,
- sequential loops are formed from non-elementary  $\pi$ -blocks.

The above process is further optimized. The optimization, implemented in the earlier algorithm LOOPDIST (see the previous section), is applied here to  $\pi$ -blocks rather than single statements as in the original version. As a result, if possible, there will be less parallel loops than elementary  $\pi$ -blocks in the final form of the code. This is achieved since the algorithm couples loop distribution with loop fusion i.e. performs the distribution to the optimal (rather than maximal) extent. Let us only note that for all the resulting sequential loops containing more than one statement, the order of statements in a given loop is determined by the loop-independent dependences in the loop. One may thus simply adopt the statement order as it was

in the original loop; other variants, provided they are legal, have no influence on the sequential nature of loop execution. Below we present the formal notation of the resulting new algorithm named GENDIST. We would like to emphasize the novelty of our approach since, to our knowledge, there have been made no previous attempts to optimize loop distribution for loops which are arbitrary i.e. may contain dependence cycles.

**Algorithm GENDIST:** Loop distribution for optimal parallelization.

*Input:*

Loop  $L$  containing a sequence of statements  $(S_1, S_2, \dots, S_n)$ ,  $n \geq 1$ .

*Output:*

Sequence of parallel and/or sequential loops  $(L_1, L_2, \dots, L_r)$ ,  $r \leq n$  containing, collectively, statements  $S_1, S_2, \dots, S_n$ .

*Method:*

build the dependence graph  $G$  of loop  $L$ ;

find the strongly connected components of  $G$ ;

build the graph  $G'$  such that its vertices are the above components and its edges are the dependences between statements in different components;

sort  $G'$  topologically with ELMAX;

{sequence of  $\pi$ -blocks  $(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_m)$ ,  $m \leq n$  has been generated with sources and sinks of condensations tagged}

$j := 1$ ;

$k := 0$ ;

**while**  $j \leq m$  **do**

$k := k + 1$ ;

**if**  $\pi_j$  is elementary **then**

        build parallel loop  $L_k$  around  $\pi_j$ ;

$j := j + 1$ ;

$cond := false$ ;

**while**  $\pi_j$  is elementary **and**  $j \leq m$  **and not**  $cond$  **do**

            append  $\pi_j$  to  $L_k$ ;

$j := j + 1$ ;

**if**  $\pi_j$  is the source of a condensation **then**

$cond := true$

**end if**

**end while**

**else** { $\pi_j$  is not elementary}

        write the statements of  $\pi_j$  in the order in which they appear in  $L$  and build sequential loop  $L_k$  around them;

$j := j + 1$

**end if**

**end while.**

As a short explanation, *condensations* are (sometimes nonexistent yet generated for the purpose of optimization) forward loop-carried dependences nested in the possibly maximal number of (actually existing) forward dependences. The above nesting is defined as follows: for a group of forward dependences, the source of the group's condensation is the (lexically) last of all the sources in the group or succeeds them all, while the condensation's sink precedes all the sinks in the group or is the first of them. Condensations are generated so as to optimize parallelization since synchronizing a group's condensation eliminates the need for separate synchronization of each dependence in the group. Further details are given in [8].

Below we present two examples of applying the above algorithm in practice. Note that the produced form is optimal in that as many statements as possible are grouped together in a single parallel loop, which results in the number of final loops as small as possible.

#### *Example 1.*

For the loop as follows:

```

do i = 4,1000
S1:  a(i) = a(i-1) + c(i-2) + 5.0
S2:  b(i) = b(i)*x(i)
S3:  c(i) = b(i-1) - a(i)/d(i-3)
S4:  d(i) = c(i) + y(i)
end do

```

GENDIST identifies the  $\pi$ -blocks:

- $\{S_2\}$  (elementary),
- $\{S_1, S_3, S_4\}$  (contains internal dependence cycles, e.g.  $S_1 \rightarrow S_1$  due to a linear recurrence).

Subsequently, it sorts the graph of  $\pi$ -blocks topologically and performs loop distribution, generating two loops, the former of which is parallel and the latter sequential:

```

!$omp parallel do
do i = 4,1000
S2:  b(i) = b(i)*x(i)
end do
!$omp end parallel do
do i = 4,1000
S1:  a(i) = a(i-1) + c(i-2) + 5.0
S3:  c(i) = b(i-1) - a(i)/d(i-3)
S4:  d(i) = c(i) + y(i)
end do

```

*Example 2.*

For the following loop:

```

do i = 2,n
S1:  a(i) = b(i-1) + t
S2:  b(i) = g(i)*z
S3:  d(i) = a(i) + b(i)
S4:  f(i) = b(i) - x
S5:  h(i) = f(i)/g(i)
S6:  c(i) = h(i) + f(i-1)
S7:  e(i) = c(i) + h(i-1) + b(i-1)
end do

```

GENDIST first identifies the  $\pi$ -blocks:  $\{S_1, S_2, S_3\}$ , and elementary  $\{S_4\}$ ,  $\{S_5\}$ ,  $\{S_6\}$ ,  $\{S_7\}$ . Next, it sorts the graph of  $\pi$ -blocks topologically, generating for loop-carried dependences  $S_2 \rightarrow S_7$ ,  $S_4 \rightarrow S_6$  and  $S_5 \rightarrow S_7$  their condensation  $S_5 \rightarrow S_6$  and utilizing it in the process of building the output loops. The final form is then as follows:

```

do i = 2,n
S1:  a(i) = b(i-1) + t
S2:  b(i) = g(i)*z
S3:  d(i) = a(i) + b(i)
end do
!$omp parallel do
do i = 2,n
S4:  f(i) = b(i) - x
S5:  h(i) = f(i)/g(i)
end do
!$omp end parallel do
!$omp parallel do
do i = 2,n
S6:  c(i) = h(i) + f(i-1)
S7:  e(i) = c(i) + h(i-1) + b(i-1)
end do
!$omp end parallel do

```

The algorithm GENDIST has been implemented as a computer program which has, in turn, successfully passed numerous tests for a wide range of loops [11]. In its current form, the program is so far incapable of processing the complete text of a loop (e.g in Fortran or C/C++). Hence, its input data are the (already identified) dependences inside the analyzed loop, denoted by pairs of statement numbers (source  $\rightarrow$  sink); the necessary additional information accompanying each pair is the dependence's type (loop-independent or loop-carried, denoted by 0 and 1, respectively). The output is a sequence of statement numbers, grouped as they would appear in the resulting loops (after the optimal distribution); each group is preceded by the information whether the respective loop is parallel or sequential.

The program's outcome for an example loop is given below. For clarity, the input data are shown in Figure 2 as the corresponding dependence graph, with a small difference: since the exact values of dependence distances greater than 0 are not important, the 0/1 labels here denote the dependences' types, as stated above, rather than their distances, as in the actual dependence graph.

Parallel loop

S1

Sequential loop

S3

Parallel loop

S9

S2

S4

Sequential loop

S6

S7

S8

Parallel loop

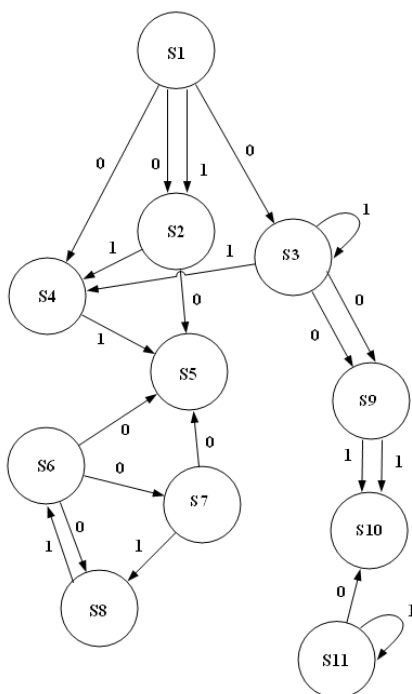
S5

Sequential loop

S11

Parallel loop

S10



**Figure 2.** An example input for the program implementation of GENDIST

Source: P. Maciulewicz, *Wyznaczanie optymalnej kolejności instrukcji w pętach równoległych o cyklicznych grafach zależności*, praca dyplomowa inżynierska, PWSZ w Elblągu, Instytut Informatyki Stosowanej, Elbląg 2012.

## 5. Conclusion and future work

We have proposed a method for optimal parallelization of loops with general dependence graphs. The basic issues of loop-carried dependence synchronization and the idea of loop distribution as a synchronization method are presented. The optimal distribution method for the case of an acyclic dependence graph is recalled. Next, an adequate method for loops containing dependence cycles is elaborated on. Finally, a new algorithm is described which produces the optimal code for parallelization of an arbitrary single loop. Theoretical considerations are illustrated by examples.

The program which implements the algorithm GENDIST is being further developed. Currently under way is its important extension: text processing coupled with identifying dependences in a loop coded in Fortran. The ultimate objective is an experimental optimizing precompiler which would be a useful teaching aid in the computer science course on parallel and distributed processing [12], as well as a basis for future academic research. As for the latter, it is planned to run the fully-fledged tool through a series of tests, involving typical computationally intensive numerical programs, in a multiple-core environment, e.g. a large computing cluster. It would be undoubtedly interesting to compare the obtained timing results with the ones produced while running these programs translated by parallelizing compilers (commercial or open-source) [13] available in this environment; such compilers usually employ alternative loop transformation techniques, best described in [2].

## Bibliography

1. Kuck D.J., *The Structure of Computers and Computations*, Vol.1, John Wiley & Sons, New York 1978.
2. Allen R., Kennedy K., *Optimizing Compilers for Modern Architectures: a Dependence-Based Approach*, Morgan Kaufmann, San Francisco 2002.
3. Dagum L., Menon R., *OpenMP: an Industry-Standard API for Shared Memory Programming*, "Computational Science and Engineering" 1998, vol. 5, no. 1, p. 46-55.
4. Kuck D.J., *A Survey of Parallel Machine Organization and Programming*, "ACM Computing Surveys" 1977, vol. 9, no. 1, p. 29-59.
5. Kuck D.J., Kuhn R.H., Padua D., Leasure B., Wolfe M., *Dependence Graphs and Compiler Optimizations*, Proc. 8<sup>th</sup> ACM Symposium on Principles of Programming Languages, Williamsburg, Virginia 1981.
6. Zima H., Chapman B., *Supercompilers for Parallel and Vector Computers*, Addison-Wesley, New York 1991.
7. Wolfe M., *Optimizing Supercompilers for Supercomputers*, Pitman Publishing, London and the MIT Press, Cambridge, Massachusetts 1989.



8. Szczerbiński Z., *An Algorithm for Elimination of Forward Dependences in Parallel Loops*, Proc. 2<sup>nd</sup> International Conference on Parallel Processing and Applied Mathematics PPAM'97, Zakopane 1997.
9. Szczerbiński Z., *Loop Distribution as an Optimization Method in Loop Parallelization*, Proc. 3<sup>rd</sup> International Conference on Parallel Processing and Applied Mathematics PPAM'99, Kazimierz Dolny 1999.
10. Tarjan R.E., *Depth First Search and Linear Graph Algorithms*, "SIAM Journal of Computing" 1972, vol. 1, no. 2, p. 146-160.
11. Maciulewicz P., *Wyznaczanie optymalnej kolejności instrukcji w pętłach równoległych o cyklicznych grafach zależności*, praca dyplomowa inżynierska, PWSZ w Elblągu, Instytut Informatyki Stosowanej, Elbląg 2012.
12. <http://www.pwsz.elblag.pl/sylab/przetwarzanie%20rownolegle.pdf> [dostęp: 15.01.2017].
13. Wolfe M., *Compilers and More: The Past, Present and Future of Parallel Loops*, HPCwire, April 6, 2015, <http://www.hpcwire.com/2015/04/06/compilers-and-more-the-past-present-and-future-of-parallel-loops> [dostęp:15.01.2017].

## OPTIMALIZACJA PODZIAŁU PĘTLI JAKO METODA WYDAJNEGO ZRÓWNOLEGLANIA PROGRAMÓW

**Streszczenie:** Artykuł jest poświęcony zagadnieniom optymalnego wykonywania pętli numerycznych w programach realizujących obliczenia równoległe. Po wprowadzeniu w tematykę zależności danych przedstawiono metodę podziału pętli. Następnie opisano metodę optymalnego, dla zrównoleglenia, podziału pętli o acyklicznych grafach zależności. W dalszej części przedstawiono algorytm generujący optymalny podział dla pętli mogących zawierać cykle zależności. Rozważania teoretyczne uzupełniono przykładowymi zastosowaniami.



Katarzyna Wasielewska

## LI-FI – NOWA TECHNOLOGIA TRANSMISJI BEZPRZEWODOWEJ

*W niniejszym artykule omówiono innowacyjną technologię Li-Fi, która zapewnia szybkie połączenia bezprzewodowe, stanowiąc konkurencję dla technologii Wi-Fi. Li-Fi umożliwia przesyłanie danych za pomocą diod LED, które emitują światło z dużą prędkością. Podczas gdy Wi-Fi jest bezprzewodową technologią powszechnie stosowaną w budynkach, Li-Fi stanowi idealne rozwiązanie w zamkniętych pomieszczeniach, gdzie nie ma żadnych przeszkód. Li-Fi zapewnia lepsze pasmo oraz większą wydajność niż Wi-Fi. Wszystko wskazuje na to, że w pewnych warunkach Li-Fi wkrótce wyprze technologię Wi-Fi.*

### Wprowadzenie

Li-Fi (*Light Fidelity*) jest systemem komunikacji za pomocą światła widzialnego (VLC, *Visible Light Communications*) umożliwiającym nawiązanie bardzo szybkich połączeń bezprzewodowych. Technologia ta została zaprezentowana w 2011 r. przez niemieckiego fizyka Profesora Haralda Haasa z Uniwersytetu w Edynburgu podczas konferencji TEDGlobal w Edynburgu [1], kiedy to naukowiec zademonstrował prototyp systemu Li-Fi. Haas wykorzystał lampę z zamontowaną żarówką LED do przesłania filmu na komputer ustawiony pod lampą. Podczas prezentacji co jakiś czas przysłał żarówkę dłonią, aby pokazać, że transmisja jest przerywana i że to właśnie żarówka jest źródłem transmisji danych. Uzyskał wtedy prędkość transmisji ponad 10 Mb/s. W tym miejscu warto wspomnieć, że pierwsze publikacje Haasa dotyczące Li-Fi pojawiły się już w 2006 r. – kilka lat przed przełomowym wystąpieniem [2].

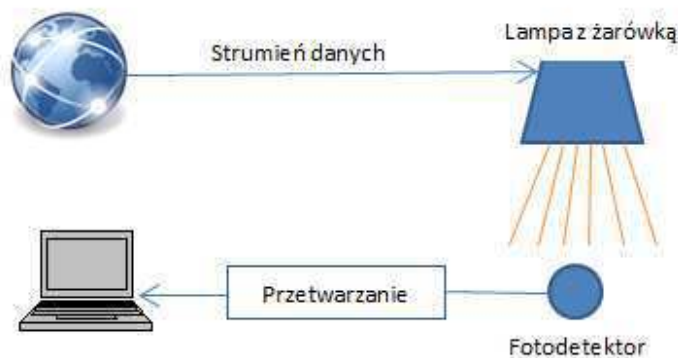
Li-Fi zamiast sygnału radiowego wykorzystuje światło emitowane przez diody LED, które umożliwiają wykorzystanie widzialnej części spektrum elektromagnetycznego. Technologia ta stanowi przewagę nad technologią Wi-Fi, gdyż niweluje niektóre jej ograniczenia. Wi-Fi wykorzystuje częstotliwości 2,4 oraz 5 GHz i ogranicza pasmo do 300 Mb/s, obniżając prędkość transmisji wraz ze wzrostem liczby punktów dostępowych i natężenia ruchu. Ponadto transmisja Wi-Fi jest narażona na ataki ze względu na przenikliwość fal radiowych przez ściany, a bezpieczeństwo danych stanowi dziś kluczową kwestię.

Według Haasa technologia Wi-Fi obarczona jest na tyle dużymi wadami, że powinna zostać zastąpiona inną. Po pierwsze, fale radiowe wykorzystywane przez Wi-Fi wprowadzają ograniczenia transmisyjne i ze względu na zajętość są kosztowne. Wraz z wprowadzeniem technologii telefonii komórkowej 3G oraz 4G

zakresy dostępnego widma są już naprawdę na wyczerpaniu. Po drugie, na świecie istnieje prawie 1,5 miliona masztów sieci komórkowych, które zużywają ogromne ilości energii w związku z koniecznością chłodzenia stacji bazowych. Po trzecie, fale radiowe nie mogą być używane w każdym miejscu, np. w samolotach czy zakładach energetycznych. I po czwarte, jak już wspomniano, fale radiowe przenikają przez ściany, co stanowi problem związany z zagrożeniem przechwycenia danych. Technologia Li-Fi eliminuje wymienione wyżej problemy w następujący sposób. Spektrum światła widzialnego jest około 10 000 razy szersze niż spektrum fal radiowych, zatem Li-Fi dysponuje większym pasmem. Żarówki LED są coraz bardziej popularne i już w wielu miejscach zainstalowane, co ogranicza koszty wdrożenia technologii w postaci braku konieczności zakupu dodatkowych elementów. Następną zaletą to fakt, że światło LED pobiera zdecydowanie mniej energii. Natomiast jeśli chodzi o dostępność, to instalacje żarówkowe dostępne są praktycznie w każdym miejscu na świecie, trzeba byłoby jedynie zastąpić zwykłe żarówki żarówkami LED, które są coraz tańsze. Z punktu widzenia bezpieczeństwa danych światło nie przenika przez ściany, co powoduje, że transmisja za pomocą fal świetlnych jest bardziej bezpieczna.

## 1. Architektura systemu Li-Fi

Sercem systemu Li-Fi jest światło pochodzące z żarówek LED. Ogólna zasada działania systemu jest prosta. Dioda LED emituje światło w sposób przerywany (bardzo szybkie migotanie). Aby przetworzyć dane, żarówka LED musi zostać wyposażona w microchip, który konwertuje dane na światło. Fotodetektor odbiera sygnały świetlne, kodując je na binarną jedynekę (1), albo binarne zero (0). Następnie ciągi binarne są interpretowane przez urządzenia końcowe, które prezentują dane użytkownikom.



**Rysunek 1.** Schemat systemu Li-Fi  
Źródło: opracowanie własne.

W praktyce implementacja technologii Li-Fi nie jest skomplikowana. Schemat wdrożenia został zaprezentowany na rysunku 1. Lampę zawieszoną pod sufitem należy wyposażyć w żarówkę LED z zaimplementowaną technologią przetwarzania sygnałów. Żarówka obsługuje strumień danych i przekazuje je do fotodetektora. Następnie odbiornik konwertuje zmiany sygnału na sygnał elektryczny, który jest konwertowany z powrotem na strumień danych i przekazywany do obsługi na urządzeniu końcowym.

## 2. Podstawy teoretyczne technologii Li-Fi

Diody LED, emitując światło, mogą je włączać i wyłączać szybciej, niż może to wykryć ludzkie oko. Dzieje się tak dlatego, że opóźnienie w działaniu diody LED jest mniejsze niż 1  $\mu$ s, co powoduje, że źródło światła wydaje się świecić bez przerwy. I właśnie ta niezauważalna aktywność (*on-off*) umożliwia transmisję danych za pomocą kodu binarnego. Włączona dioda LED reprezentuje binarną 1, wyłączona – binarne 0. A to pozwala kodować dane w postaci ciągów binarnych składających się z 0 i 1. Fotodetektory odbierają tak zakodowany sygnał i konwertują go do oryginalnej postaci danych. Metoda, która stosuje szybkie impulsy świetlne do przekazywania informacji bezprzewodowo, nazywana jest metodą VLC [3]. Jako nośnik optyczny do transmisji danych Li-Fi wykorzystuje światło widzialne pomiędzy 380 nm a 780 nm. Prędkość transmisji danych powyżej 100 Mb/s można osiągnąć za pomocą diod LED o małych czasach narastania i opadania w połączeniu z odpowiednim multipleksowaniem. Równoległa transmisja danych wymaga użycia macierzy diod LED, w których każda dioda transmituje odseparowany strumień danych. Pozwala to zwiększyć prędkość ich transmisji. Aby transmisja danych była możliwa, światło musi być obecne.

### 2.1. Aspekty techniczne

Komunikacja VLC jest standardem i należy do grupy IEEE 802 [3]. Standard ten został zatwierdzony w 2011 r. Dotyczy on komunikacji M2M (*Mobile-to-Mobile*), F2M (*Fixed-to-Mobile*) oraz I2M (*Infrastructure-to-Mobile*). Głównym celem VLC jest obsługa komunikacji średniego zasięgu dla inteligentnych systemów ruchu przy niskiej prędkości oraz komunikacji krótkiego zasięgu dla M2M oraz F2M z wysoką prędkością. Z pomocą różnych schematów modulacji początkowo VLC obsługiwało prędkości transmisji od 100 kb/s do 100 Mb/s. Dziś te prędkości są już znacznie wyższe, o czym będzie mowa w dalszej części artykułu.

Komunikacja Li-Fi jest modelowana protokołami opracowanymi przez grupę roboczą IEEE 802, które definiują warstwy PHY oraz MAC. Warstwa MAC

obsługuje trzy technologie wielodostępu: *peer-to-peer*, konfigurację gwiazdy oraz tryb rozgłoszeń. Zajmuje się ona również zarządzaniem warstwą fizyczną: adresowaniem, unikaniem kolizji i potwierdzaniem odbioru danych. Wyróżnia się trzy typy warstwy fizycznej: PHY I, PHY II oraz PHY III, które stosują kombinację różnych schematów modulacji.

Do poprawnego wysyłania danych przez diody LED niezbędne jest modulowanie sygnału nośnego. Sygnał nośny składa się z impulsów świetlnych, które wysyłane są w krótkich odstępach czasu. Sposób, w jaki to się odbywa, zależy od zastosowanego schematu modulacji.

## 2.2. Schematy modulacji wykorzystywane w Li-Fi

Aby dane mogły być transmitowane przez diody LED, konieczne jest dokonanie modulacji z wykorzystaniem sygnału fali nośnej. W Li-Fi można zastosować zarówno techniki modulacji pojedynczej nośnej, jak i techniki modulacji z wieloma nośnymi, które są bardziej wydajne obliczeniowo. Systemy Li-Fi wykorzystują następujące schematy modulacji [4]:

- OOK (*On-Off Keying*) – najprostsza forma modulacji cyfrowej z kluczowaniem amplitudy (ASK, *Amplitude-Shift Keying*), która interpretuje dane cyfrowe jako obecność lub nieobecność fali nośnej. W technologii Li-Fi sygnał informacyjny jest kodowany za pomocą kodu Manchester. Zmienna szybkość transmisji danych realizowana jest poprzez przygaszanie światła. Odpowiada za to rozszerzenie OOK, które zagregowaną moc wyjściową dostosowuje do właściwego poziomu,
- PWM (*Pulse Width Modulation*) – modulacja szerokości impulsu umożliwiająca bardzo szybką obsługę włączania i wyłączania światła. Stosowana jest do regulacji jasności diod LED przy częstotliwości modulacji na tyle wysokiej, żeby ludzkie oko nie zauważyło efektu migotania (w praktyce co najmniej 300 Hz),
- PPM (*Pulse Position Modulation*), czyli modulacja położenia impulsu – jest to modulacja cyfrowa sygnału, w której dane kodowane są za pomocą położenia impulsu. Pozycja impulsu jest proporcjonalna do amplitudy modulowanego sygnału. Li-Fi stosuje modulację VPPM (*Variable Pulse Position Modulation*) – rodzaj modulacji PPM, w której szerokość impulsu jest zmienna, co umożliwia kontrolowanie poziomu jasności światła, a amplituda jest stała, co w konsekwencji zabezpiecza przed migotaniem. VPPM jest elementem standardu IEEE 802.15.7 dla VLC i może być uważane za kombinację technik PPM i PWM,
- PAM (*Pulse Amplitude Modulation*) – technika modulacji amplitudy impulsu. Polega na zmianie amplitudy impulsów generowanych ze stałą częstotliwością, proporcjonalnie do próbkowanych wartości analogowego sygnału wejściowego,
- SIM-OFDM (*Sub-carrier Index Modulation Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) – modulacja przestrzenna z wieloma nośnymi umożliwiająca przesyłanie tysięcy strumieni danych równolegle. Jest to metoda, która dodaje dodatkowy wymiar do technik modulacji amplitudy/fazy, takich jak QAM

(*Quadrature Amplitude Modulation*) i ASK (*Amplitude-Shift Keying*). W przeciwieństwie do tradycyjnej techniki OFDM technika SIM-OFDM rozdziela szeregowy strumień bitów na dwa podstrumienie bitów o tej samej długości. Modulacja SIM-OFDM jest praktycznym rozwiązaniem dla Li-Fi,

- FSK (*Frequency-Shift Keying*) – w tej metodzie dane są reprezentowane za pomocą zmiany częstotliwości sygnału fali nośnej. Do transmisji dwóch różnych wartości (0 i 1) potrzebne są dwie różne częstotliwości,
- CSK (*Colour-Shift Keying*) – technika ta jest unikalna dla systemów Li-Fi (dane są modulowane w oparciu o chwilowe zmiany kolorów) i może być stosowana, pod warunkiem że diody LED mogą świecić w różnych kolorach (tzn. jeśli działają w systemie RGB). Przychodzące bity są mapowane na różne kolory. Każdy kolor jest reprezentowany przez wymiar  $[x, y]$ . W CSK ogólna intensywność koloru wyjściowego jest stała, ale względne intensywności pomiędzy wieloma używanymi kolorami są zmieniane. Wadą tej techniki jest duża złożoność obliczeniowa.

Szczegółowy opis wszystkich wykorzystywanych w Li-Fi technik i modulacji oraz ich odmian można znaleźć w [4].

### 3. Wady i ograniczenia Li-Fi

Anurag i wsp. [5] wymieniają następujące wady i ograniczenia technologii Li-Fi:

- światło nie może przenikać przez ściany oraz wymaga bezpośredniej widoczności, co powoduje, że jeśli pomiędzy odbiornikiem a nadajnikiem pojawi się fizyczna przeszkoda, połączenie zostanie natychmiast przerwane,
- chcąc zapewnić usługi VLC, należy pamiętać o możliwości zakłóceń pochodzących z zewnętrznych źródeł światła (np. światło słoneczne czy zwykłe żarówki),
- ograniczenie może stanowić wysoki koszt instalacji systemu, choć podczas projektowania należy pamiętać o oszczędnościach wynikających z mniejszych opłat za zużycie energii elektrycznej,
- Wi-Fi i systemy komórkowe nadal będą niezbędne na obszarach zadrzewionych lub drobno i gęsto zabudowanych, na których ludzie zmieniają swoje położenie. W takich miejscach instalacja systemu Li-Fi z dużą liczbą komponentów może być nieopłacalna.

Do wymienionych wyżej ograniczeń można dodać co najmniej jeszcze jedno. A mianowicie dostępność do usługi w trybie 24/7, co oznacza utrzymywanie włączonego światła bez przerwy, tzn. 24 godziny na dobę.

## 4. Li-Fi a Wi-Fi

Podstawowe cechy technologii Li-Fi i Wi-Fi przedstawiono w tabeli 1.

**Tabela 1.** Porównanie technologii Li-Fi oraz Wi-Fi

Parametr	Li-Fi	Wi-Fi
Urządzenie transmitujące	Żarówka LED	AP Wi-Fi
Max uzyskana prędkość transmisji	224 Gb/s	10 Gb/s
Zasięg	10 metrów	100 metrów
Medium	Światło widzialne	Fale radiowe
Dysponowane pasmo	10 000 razy szersze od Wi-Fi	Spektrum fal radiowych
Topologia	Punkt–punkt	Punkt–wielopunkt
Zakres częstotliwości	Kilkaset THz	2,4 i 5 GHz
Praca pod wodą	Możliwa	Niemożliwa
Prywatność	Światło nie przenika przez ściany	Sygnal radiowy przenika przez ściany
Komponenty systemu	Żarówka LED, sterownik i fotodetektor	Punkt dostępu

Źródło: opracowanie własne.

## 5. Zastosowania technologii Li-Fi

Ze względu na łatwą implementację technologia Li-Fi może być szeroko stosowana. Począwszy od instytucji, szkół, gdzie może zastąpić obecną technologię Wi-Fi i zaferować szybkie połączenia, poprzez rozwiązania medyczne, w pociągach i na pokładach samolotów – oferując podróżnym dostęp do internetu, po wykorzystanie w czasie klęsk żywiołowych czy w systemach nawigacji satelitarnej. Ze względu na oszczędność energii technologia Li-Fi pozwala wyeliminować rozwiązania sieci komórkowych instalowane na masztach.

Z powodu obaw związanych z promieniowaniem w salach operacyjnych w szpitalach nie można używać Wi-Fi. Zakłócenia pochodzące z komputerów i telefonów komórkowych mogą wpływać na działanie urządzeń medycznych. Li-Fi eliminuje te problemy i nie zakłóca ich działania. Lampy LED są coraz częściej montowane w pomieszczeniach i Li-Fi może je wykorzystać do obsługi nowoczesnych urządzeń medycznych.

Podobnie jest w przypadku korzystania z technologii Wi-Fi w samolotach. Ze względów bezpieczeństwa Wi-Fi jest zabronione podczas podróży, zastosowanie Li-Fi może rozwiązać ten problem. Wi-Fi nie jest rekomendowane również do użytkowania w elektrowniach. Takie obszary potrzebują jednak szybkich i bezpiecznych systemów łączności, np. do monitorowania, i Li-Fi może być dobrą alternatywą, gdy występują zakłócenia elektromagnetyczne.

Sklepy, kawiarnie czy restauracje są wyposażone w lampy oświetleniowe i wykorzystanie ich do celów monitoringu i obsługi klientów, usprawnienia robienia



zakupów, udostępnienia klientom szybkiego Internetu może podwyższyć jakość przedsiębiorstwa i zwiększyć zadowolenie klientów.

Technologię Li-Fi można też wykorzystać do zdalnego sterowania i działania pod wodą, gdzie fale radiowe nie mogą być stosowane ze względu na silne tłumienie. Urządzenia wyposażone w lampy LED oprócz oświetlania dna mogą komunikować się ze sobą i przysyłać dane na powierzchnię wody.

Li-Fi można też wykorzystać na drogach w celu zwiększenia bezpieczeństwa ruchu drogowego. Samochody wyposażane są w reflektory, sygnalizacja na drogach, ale także inne oświetlenie: znaki drogowe czy latarnie, również mogą być wyposażone w lampy LED. Dzięki temu pojazdy mogą komunikować się między sobą, np. ułatwiając w ten sposób parkowanie, wyprzedzanie czy mijanie. Mogą komunikować się z diodami LED zainstalowanymi na drodze, a to, oprócz zwiększenia poziomu bezpieczeństwa, może pozwolić monitorować ruch czy zarządzać ruchem drogowym. Poza tym lampy oświetleniowe stojące przy drogach mogłyby służyć jako hotspoty i zapewniać podróżującym dostęp do internetu.

Początkowo technologia Li-Fi zapewniała transfer danych z prędkością 10 Gb/s [5]. Naukowcy zapowiadali, że będzie ona jeszcze wyższa. W 2015 r. opublikowano wyniki badań [6], z których wynika, że Li-Fi może zapewnić transfer z prędkością nawet 224 Gb/s [7].

Li-Fi zapewnia bardzo szybkie i bezpieczne transmisje danych w systemach, gdzie prędkość transmisji, jej jakość oraz bezpieczeństwo są kluczowe. Połączenia Li-Fi między laptopami, smartfonami, tabletami mogą zapewnić ogromne prędkości wymiany danych. Duże prędkości umożliwiają przesyłanie zaawansowanych animacji 2D/3D czy prowadzenia wideokonferencji w wysokiej jakości i bez potrzeby korzystania z okablowania sieci LAN.

System GPS (*Global Positioning System*) jest dziś jedną z najważniejszych technologii wykorzystywanych do lokalizacji osób i obiektów. Li-Fi może mieć zastosowanie do precyzyjnej lokalizacji osób lub obiektów np. wewnątrz budynków [8]. Podobnie jak GPS, system z Li-Fi może wykryć kierunek poruszania się obiektu i wyznaczyć jego trasę, jak również przewidzieć ścieżkę na podstawie zebranych informacji. Nad takim rozwiązaniem pracuje obecnie firma ByteLight.

Systemy Li-Fi są już na rynku. Instalacje gotowe do użytku domowego oferuje np. firma PureLiFi – przedsiębiorstwo stworzone przez zespół Haasa, a rozwiązania dla szpitali dostarcza największy dziś producent rozwiązań Li-Fi – firma Oledcomm. Z kolei firma Casio produkuje smartfony zintegrowane z systemem Li-Fi. Natomiast Huawei oraz Samsung posiadają patenty związane z technologią Li-Fi.

## Podsumowanie

Czy żarówka może transmitować dane? Okazuje się, że tak i to z dużym powodzeniem. Transmisja ta może osiągać ogromne prędkości i służyć przesyłaniu

tysięcy strumieni danych jednocześnie. Dzieje się to z pomocą światła, dedykowanych modulacji i unikalnych technologii przetwarzania sygnałów. Dzięki technologii Li-Fi żarówki LED wyposażone w microchipy uzyskały zdolność przesyłania danych. Li-Fi wykorzystuje widzialne spektrum światła, które stanowi niewykorzystaną część spektrum elektromagnetycznego, co ma ogromne znaczenie w przypadku agregacji ruchu sieciowego i problemu wykorzystania pasma. Poziom bezpieczeństwa transmisji w systemie Li-Fi jest wysoki: nie widzisz światła – nie masz dostępu do danych. Jednak mimo tych zalet podczas projektowania systemu Li-Fi należy pamiętać o jego ograniczeniach, m.in. o stosunkowo krótkim zasięgu oraz wymaganej bezpośredniej widoczności.

## Literatura

1. [https://www.ted.com/talks/harald\\_haas\\_wireless\\_data\\_from\\_every\\_light\\_bulb?language=pl](https://www.ted.com/talks/harald_haas_wireless_data_from_every_light_bulb?language=pl) [dostęp: 10.11.2016].
2. Afgani M., Haas H., Elgala H., Knipp D., *Visible light communication using OFDM*, 2nd International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities, IEEE Xplore, 2006.
3. IEEE Standard for local and metropolitan area networks, Part 15.7: Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light, IEEE 802.15.7, 2011.
4. Islim M.S., Haas H., *Modulation techniques for Li-Fi*, „ZTE Communications” 2016, vol. 14, no. 2, s. 29-40.
5. Anurag S., Shalabh A., Asoke N., *Li-Fi Technology: Data Transmission through Visible Light*, „International Journal of Advance Research in Computer Science and Management Studies” 2015, vol. 3, no. 6, s. 1-12.
6. Gomez A., Shi K., Quintana C. et al., *Beyond 100-Gb/s Indoor Wide Field-of-View Optical Wireless Communications*, „IEEE Photonics Technology Letters” 2015, vol. 27, no. 4, s. 367-370.
7. <http://www.eng.ox.ac.uk/about/news/next-generation-of-optical-wireless-systems-will-ease-our-use-of-gadgets-in-the-workplace-and-in-our-homes> [dostęp: 10.11.2016].
8. Aneja A., Sharma A., *Light fidelity (LiFi): Future of Wireless Technology*, „International Journal of Computer Science Trends and Technology” 2016, vol. 4, no. 2, s. 343-345.

## LI-FI – NEW TECHNOLOGY OF WIRELESS TRANSMISSION

**Abstract:** *This paper focuses on Li-Fi – an innovative technology of wireless communication. Li-Fi is light-based technique, which uses the light waves instead of radio technology to deliver the data. It provides high speed transmission by LED bulb. This solution is the competition for Wi-Fi technology. While Wi-Fi is a wireless technology widely used in buildings, Li-Fi is ideal for confined spaces where there are no obstacles. Li-Fi provides better band width and higher performance than Wi-Fi. Everything indicates that under certain conditions soon Li-Fi technology will replace Wi-Fi.*

**Łukasz Żołędziewski**

## **WYKORZYSTANIE NADAJNIKÓW RADIOWYCH JAKO PRZYKŁAD ROZWIĄZAŃ INTERNETU RZECZY**

*Ostatnie dziesięciolecie, określane jest mianem „era mobile”, gdyż w sposób znaczący zmienił się sposób funkcjonowania naszego życia, w szczególności komunikacji z otoczeniem. Internet rzeczy rewolucjonizuje pojęcie sieci globalnej i wyznacza nowe kierunki rozwoju. W artykule przedstawiono koncepcję wykorzystania komunikacji radiowej, opartej na standardzie BLE, na przykładzie nadajników iBeacon.*

### **Wprowadzenie**

Efektywne funkcjonowanie we współczesnym społeczeństwie informacyjnym wymaga permanentnego podążania za zmianami, dostosowywania się do potrzeb i wymagań rynku. Informacja stymulowana odpowiednią technologią, w szczególności technikami informatycznymi, stała się jednym z fundamentalnych zasobów społecznych. Rewolucja informacyjna zaowocowała m.in. zwiększeniem dostępności do informacji, powstaniem nowych usług i produktów, doprowadziła do cyfryzacji życia. Jednym z elementów obrazującym jej skalę jest liczba urządzeń mobilnych określanych mianem „smart”. Według najnowszego raportu Ericsson Mobility Report w ubiegłym roku na globalnym rynku było 10,3 mld smart-przedmiotów. W 2021 r. takich urządzeń będzie już blisko 28 mld [1]. Tak dynamiczny rozwój urządzeń mobilnych wyposażonych w coraz większą liczbę sensorów, przetwarzających terabajty danych, umożliwia realizację wizji stworzonej przez Kevina Ashtona określonej terminem „Internet rzeczy” (IoT, *Internet of Things*).

Jak wynika z raportu Gartnera, IoT dysponuje potencjałem, który w najbliższej dekadzie nie tylko zmieni przemysł, ale także sposób naszego życia. Według Cyklu Popularności Gartnera (GHC, *Gartner Hype Cycle*) IoT znajduje się na szczycie, a jednym z rozwiązań będących na fali wznoszącej są systemy ERP wspierane przez IoT (IoT-Enabled ERP) czy też inteligentne biznesowe systemy analityczne (IoT Business Solution) [2]. Potencjał ten dostrzegły także duże korporacje informatyczne, modyfikując swoje usługi i procesy biznesowe. Zdaniem Tanji Rueckert – Wiceprezes Działu Zasobów Cyfrowych i Internetu Rzeczy SAP, wartością nie jest samo posiadanie danych, ale łączenie procesów biznesowych z dostawami, zamówieniami i produkcją czy harmonogramem prac utrzymaniowych. To zmiany w tych dziedzinach sprawiają, że system staje się coraz bardziej inteligentny. Internet rzeczy umożliwia rozwój systemów ERP, w naszym przypadku S/4HANA [3].

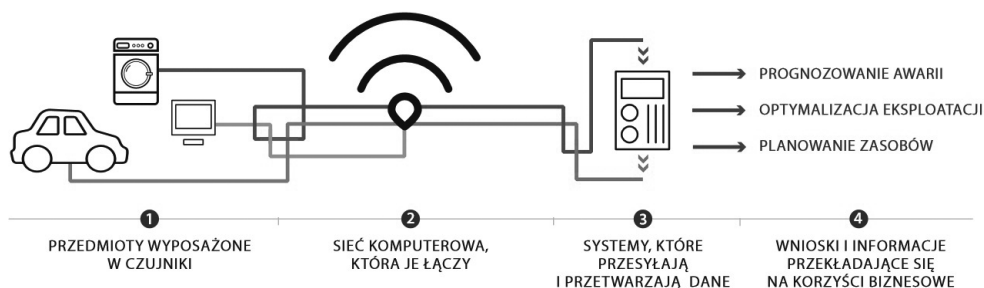
Wykorzystanie IoT nie tylko przyczynia się do zwiększenia produktywności, wydajności i szybkości pomiaru kluczowych wskaźników, ale także stwarza możliwość kreacji nowych modeli biznesowych. Celem artykułu jest próba przedstawienia Internetu rzeczy, a także jego obecnych i potencjalnych zastosowań, ze szczególnym uwzględnieniem technologii BLE.

## 1. Internet rzeczy – nowy wymiar internetu

Ostatnie dziesięciolecie określane jest mianem „*era mobile*”, gdyż w sposób znaczący zmienił się sposób funkcjonowania większości populacji naszej planety. Obecnie trudno funkcjonować zawodowo bez smartfonów, stałego łącza internetowego czy sieci społecznościowych. Terminu „Internet rzeczy” użył po raz pierwszy w 1999 r. Kevin Ashton jako tytułu prezentacji dla Procter & Gamble. Podkreślił, że obecnie komputery, a zatem i Internet, są niemal całkowicie zależne od ludzi, od informacji przez nich dodawanych do sieci, niemniej w najbliższych latach to właśnie „inteligentne urządzenia” będą zbierać, analizować i dostarczać treści do zasobów sieciowych [4].

Istnieje wiele definicji. Według Cisco Internet Business Solutions Group (Cisco IBSG) o Internecie rzeczy można mówić od 2009 r., kiedy to liczba rzeczy i obiektów podłączonych do Internetu przekroczyła ogólną liczbę ludności [5]. Jest to sieć połączonych ze sobą obiektów oparta na standardowych protokołach komunikacyjnych. Inną definicję przedstawia IERC: „rzeczy są aktywnymi uczestnikami procesów biznesowych, informacyjnych i społecznych oraz są zdolne do wzajemnej komunikacji poprzez wymianę danych zebranych za pomocą sensorów” [6]. Internet rzeczy jest stanem, w którym urządzenia wyposażone w sensory są połączone w sieci, mają stały dostęp do Internetu oraz cały czas wymieniają dane między sobą. Taki rodzaj komunikacji opisuje model 4A, zakładający iż jest ona możliwa zawsze (*anytime*) i wszędzie, czyli w dowolnym miejscu (*anywhere/anyplace*), za pomocą każdego nośnika informacji (*anymedia*) i czegokolwiek, czyli wszystkiego (*anything*) [7]. Korzyści wynikające z tworzenia „IoT ekosystemów” są olbrzymie, począwszy od możliwości monitoringu wiedzy na temat stanu produktu, poprzez kontrolę jego funkcji, skończywszy na jego optymalizacji. Przykładem rozwiązań, gdzie z sukcesem wykorzystano koncepcję IoT, są farmy wiatrowe, które mogą w czasie rzeczywistym korygować ustawienie śmigieł w celu pozyskania maksymalnej energii.

Proces wymiany informacji bazuje na trzech kluczowych elementach, jakimi są urządzenie, oprogramowanie pośredniczące oraz aplikacja. Warstwa sprzętu składa się ze wszystkich urządzeń oferujących transmisję danych, czy to przez RFID (*Radio-frequency Identification*), czy też Bluetooth, ZigBee, NFC, Wi-Fi. Cechą wspólną jest wsparcie dla procesu identyfikacji, pomiaru i komunikacji. Warstwa aplikacji to oprogramowanie służące do wizualizacji, interpretowania i przetwarzania pozyskanych danych. Oprogramowanie pośredniczące stanowi rodzaj „mostu” pomiędzy sensorem a interpretatorem.



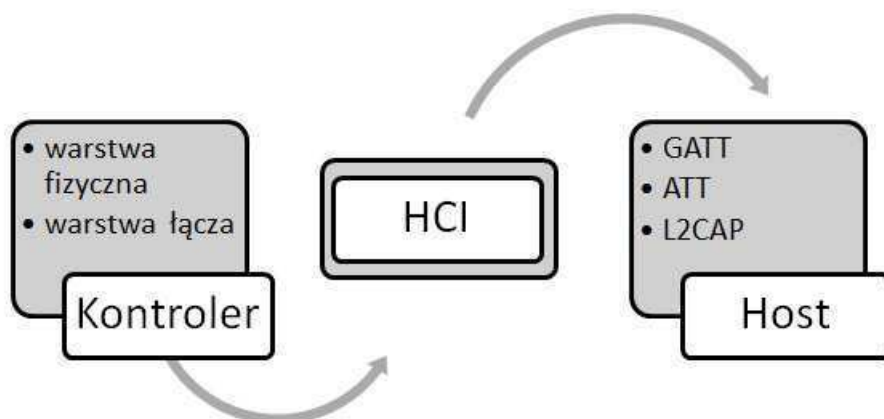
**Rysunek 1.** Idea funkcjonowania Internetu rzeczy

Źródło: B. Charoś, *Internet Rzeczy w Polsce*, <http://iab.org.pl/wp-content/uploads/2015/09/Raport-Internet-Rzeczy-w-Polsce.pdf> [dostęp: 20.10.2016].

Obecnie najbardziej rozpowszechnioną technologią transmisji danych jest Bluetooth. Wyposażonych jest w nią większość telefonów komórkowych i urządzeń peryferyjnych dla komputerów, technologię tę wykorzystują także niektórzy producenci urządzeń AGD. Pozwala ona m.in. na podłączenie telefonu do systemu stereo, pobranie plików MP3 lub wysłuchanie ich z pamięci telefonu. Słuchawki w technologii Bluetooth, urządzenia typu hands-free czy klawiatury i myszy – to tylko nieliczne przykłady jej wykorzystania.

## 2. Transmisja danych w protokole BLE

W 1994 r. firma Ericsson rozpoczęła wdrażanie technologii Bluetooth, a cztery lata później, wraz z firmami IBM, Nokia, Intel oraz Toshiba utworzyła konsorcjum SIG, które w 2010 r. opracowało standard *Bluetooth Low Energy* (BLE) wykorzystywany do komunikacji krótkiego zasięgu. W przeciwieństwie do poprzednich wersji Bluetooth, BLE został zaprojektowany jako rozwiązanie o niskim poborze mocy dla aplikacji sterujących i monitorujących. BLE jest charakterystyczną cechą specyfikacji Bluetooth od wersji 4.0 [9]. Pojawienie się BLE nastąpiło równocześnie z prezentacją innych rozwiązań tego typu, takich jak ZigBee, 6LoWPAN lub Z-Wave, które w transmisji bezprzewodowej wykorzystują techniki multi-hop, obarczone wysokim ryzykiem błędu [10, 11]. BLE wykorzystuje metodę przełączania częstotliwości (*frequency hopping*). Polega ona na transmisji informacji w każdym z kanałów przez określony czas na przemian, przez co jest ona bezpieczniejsza. Podobnie jak w klasycznym Bluetooth [12], w BLE stos protokołu składa się z dwóch głównych części: kontrolera i hosta. Pierwszy jest fizycznym urządzeniem zapewniającym transmisję danych. Może to być zarówno interfejs portu komputera, jak i moduł bezpośrednio wbudowany w urządzenie mobilne. Bluetooth Host jest zestawem protokołów odpowiedzialnym za prawidłowość transmisji.



**Rysunek 2.** Model struktury protokołów BLE

Źródło: C. Gomez, J. Paradells, *Overview and Evaluation of Bluetooth Low Energy: An Emerging Low-Power Wireless Technology*, <http://www.mdpi.com/1424-8220/12/9/11734/html> [dostęp: 20.10.2016].

Zintegrowany z radiem kontroler zawiera warstwę fizyczną, która wykorzystuje pasmo częstotliwości 2,4 GHz, wolne od opłat licencyjnych w większości krajów świata i przeznaczone do celów przemysłowych, naukowych i medycznych (ISM, *Industrial, Scientific, Medical*). Pasma to jest podzielone na 40 kanałów o szerokości 2 MHz – 37 kanałów używanych jest do transmisji danych, pozostałe to kanały rozgłoszeniowe (*advertising*), z których korzysta się przy wyszukiwaniu innych węzłów i nawiązywaniu połączeń. Warstwa łącza odpowiada za komunikację. W celu nawiązania zespolecia kontroler (*advertiser*) rozgłasza gotowość do nawiązania połączenia. Węzły (*scanners*), które odbierają ten komunikat, w odpowiedzi przesyłają wiadomość z żądaniem autoryzacji (*connection request*). Wyróżnia się dwa rodzaje węzłów: *master* oraz *slave*. Ten pierwszy może jednocześnie komunikować się z większą liczbą węzłów *slave*, natomiast każdy z tych ostatnich może nawiązać połączenie naraz tylko z jednym węzłem *master*. W taki sposób tworzona jest pikosieć w topologii gwiazdy [14].

Warstwa HCI (*Host Controller Interface*) stanowi interfejs pomiędzy hostem i kontrolerem. Jest on jednolitym otwartym standardem określającym współpracę urządzeń. Oznacza to, że w przeciwieństwie do innych urządzeń sieciowych, BLE nie wymaga instalacji dodatkowych sterowników, aby nawiązać transmisję z niejednorodnymi modelami sprzętu różnych producentów.

Strukturę hosta inicjuje protokół łącza logicznego L2CAP (*Logical Link Control and Application Layer Protocol*), wykorzystywany w połączeniach asynchronicznych, odpowiedzialny za multipleksację przesyłanych pakietów pochodzących z warstwy wyższej do rozmiaru ramki kontrolera, oraz wymiana informacji dotyczących jakości usług (QoS, *Quality of Service*). Poziom wyżej znajduje się protokół atrybutów ATT (*Low Energy Attribute Protocol*) określający parametry komunikacji między dwoma urządzeniami pełniącymi funkcję serwera i klienta,

pozwała to zdefiniować, jakie usługi są obsługiwane wzajemnie i jakie warunki muszą być spełnione, aby proces parowania zakończył się sukcesem. Na samym szczycie stosu znajduje się protokół atrybutów ogólnych GATT (*Generic Attributes*). Określa on hierarchiczną strukturę danych odpowiedzialną za wymianę atrybutów z jednego urządzenia na drugie. Pełni funkcję rejestru wszystkich usług, jakie są dostępne w danym urządzeniu, i protokołem, który umożliwia elastyczny i prosty dostęp do tego rejestru [14].

Obecnie model struktury protokołów BLE bazuje na wersji 4.2, która umożliwia zwiększenie transmisji danych poprzez protokół IPv6 oraz znacznie redukuje pobór mocy. Zgodnie z zapowiedziami Bluetooth Special Interest Group (SIG) w 2017 r. zostanie zaprezentowany nowy standard 5.0, który czterokrotnie zwiększy zasięg transmitowanego sygnału, podwoi się wówczas prędkość transmisji danych oraz ośmiokrotnie wzrośnie szybkość protokołów bezpołączeniowych, np. do transmisji multimedialnych [15]. Ma to kluczowe znaczenie szczególnie przy rozwiązaniach komunikacyjnych stosowanych w systemach telematycznych, których wykorzystanie z roku na rok jest coraz większe.

### 3. Beacon – technologia i zastosowanie

*Beacon* w języku angielskim oznacza radiolatarnia, czyli urządzenie emitujące sygnał użyteczny w nawigacji morskiej czy powietrznej. Popularność tego typu urządzeń wiąże się z rozwojem systemów telematycznych, które możemy zdefiniować jako rozwiązania telekomunikacyjne, informatyczne i informacyjne oraz rozwiązania automatycznego sterowania dostosowane do potrzeb obsługiwanych systemów fizycznych – wynikających z ich zadań, infrastruktury, organizacji, procesów utrzymania oraz zarządzania – i zintegrowane z tymi systemami [16]. Beacons stosuje się z dużym powodzeniem do budowania systemów telematycznych w skali mikro, które obejmują swoim zasięgiem jedno lotnisko, szpital czy galerię handlową, tworząc sieć wspomagającą szeroki zakres usług, począwszy od lokalizacji w obiektach zamkniętych, skończywszy na akcjach marketingowych. Jednym z większych przykładów wdrożenia technologii jest Apple Store. Dzięki urządzeniom typu iBeacon rozsyłane są powiadomienia o ofertach specjalnych wszystkim klientom, których smartfon obsługuje BLE oraz ma zainstalowaną aplikację Apple Store. Ponadto programowanie pozwala przywołać obsługę oraz dokonać transakcji przez iTunes Store bez bezpośredniego użycia karty płatniczej.

Nadajnik emituje okresowy sygnał w przedziale od 20 ms do 10 s. Wykorzystanie BLE sprawia, że urządzenie zasilane baterią litową może pracować bez jej wymiany nawet rok, w zależności od mocy sygnału radiowego. Struktura wysyłanego pakietu składa się z nagłówka, adresu dostępu, pakietu danych oraz cyklicznego kodu nadmiarowego.

Nagłówek – 1 bajt	Adres dostępu – 3 bajty	Pakiet danych – do 39 bajtów			Cykliczny kod nadmiarowy – 3 bajty
		Nagłówek – 2 bajty	MAC Adres – 6 bajtów	Dane – do 31 bajtów	

**Rysunek 3.** Struktura pakietu BLE

Źródło: R. Czajkowski, W. Nowakowski, *iBeacons – mobilne usługi lokalizacyjne*, „Technika Informatyczna” 2015, no. 4, s. 48.

Z pola danych aplikacja mobilna jest w stanie odczytać unikalny identyfikator urządzenia (Proximity UUID), który odróżnia sygnał jednego beaconsa od drugiego. Ponadto posiada cechę Major umożliwiającą grupowanie zestawów nadajników oraz Minor służącą do identyfikacji poszczególnych beaconsów. Co więcej, możliwe jest określenie mocy TX, czyli sygnału RSSI (*Received Signal Strength Indication*), co pozwala na ustalenie pozycji od urządzenia.

Dzięki mało skomplikowanej architekturze budowanie środowisk telematycznych opartych na beaconsach jest coraz bardziej popularne. Z powodzeniem wykorzystano je w sektorze transportu publicznego – w metrze w Londynie, przy akcjach promocyjnych m.in. firmy Nivea czy też w inteligentnych restauracjach w Nowym Yorku czy San Francisco, gdzie menu potraw jest dostosowane i rozsyłane do indywidualnych klientów. Na bazie beaconsów funkcjonują już dedykowane rozwiązania do lokalizacji przedmiotów, a nawet zwierząt. Najpopularniejszym przykładem jest Tile czy też TrackR bravo. W Polsce wiodącymi liderami są takie firmy, jak: Estimote, Comarch czy Infinity, a jednym z większych projektów jest Muzeum Sztuki Współczesnej w Krakowie. Dedykowana aplikacja umożliwia wskazanie umiejscowienia wybranej ekspozycji, dodatkowo dostarczając multimedialne informacje na temat konkretnych dzieł.

Rozwój technologii BLE to nie tylko domena dużych firm IT, ale także szansa dla młodych start-upów. Przykładem tego może być elbląska firma El-Help, będąca beneficjentem Akademickiego Inkubatora Przedsiębiorczości Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej w Elblągu. Obecnie realizuje ona projekt badawczo-rozwojowy mający na celu dostosowanie przestrzeni publicznej do potrzeb osób niepełnosprawnych. Przykładem takiego rozwiązania jest montaż nadajników na przystankach autobusowych, informujących poprzez aplikację głosową o rozkładzie jazdy poszczególnych linii.

## Podsumowanie

Internet zmienia się nieustannie. Z projektu akademickiego skierowanego do naukowców stał się globalną siecią ukierunkowaną na konsumenta. Nieograniczona czasem i przestrzenią informacja i komunikacja obejmuje już nie tylko ludzi, ale także przedmioty, tworząc nową przestrzeń określaną mianem Internetu rzeczy.



Według raportu „Worldwide Internet of Things Forecast, 2015–2020” w zeszłym roku wartość IoT szacowano na 655,8 mld USD, ale w 2020 r. ma ona sięgnąć już 1,07 bln USD. Wydatki na technologie smart-rzeczy najszybciej będą rosły w obszarach: inteligentnych urządzeń gospodarstwa domowego (52%), pojazdów (tzw. *Internet of Vehicles*, 48%) oraz inteligentnych budynków (34%). Jednym z głównych czynników przyczyniających się do tak dynamicznego wzrostu będzie pojawienie się nowych standardów komunikacyjnych (wspomniany już Bluetooth 5) czy też telefonii 5G umożliwiającej plasterkowanie sieci.

## Literatura

1. Raport Ericsson Mobility, *On the pulse of the networked society*, <https://www.ericsson.com/res/docs/2016/ericsson-mobility-report-2016.pdf> [dostęp: 20.10.2016].
2. Velosa A., *Hype Cycle for the Internet of Things*, <https://www.gartner.com/doc/3371743> [dostęp: 20.10.2016].
3. Pietruszyński P., *Internet Rzeczy na fali wznoszącej*, 2016, <http://www.computerworld.pl/news/406464/Internet.Rzeczy.na.fali.wznoszacej.html> [dostęp: 20.10.2016].
4. Ashton K., *That ‘Internet of Things’ Thing. In the real world, things matter more than ideas*, „RFID Journal” 2009, <http://www.rfidjournal.com/articles/pdf?4986> [dostęp: 20.10.2016].
5. Evans D., *The Internet of Things – How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything*, CISCO Internet Business Solutions Group (IBSG) White Paper, 04.2011, [http://www.cisco.com/web/about/ac79/docs/innov/IoT\\_IBSG\\_0411FINAL.pdf](http://www.cisco.com/web/about/ac79/docs/innov/IoT_IBSG_0411FINAL.pdf) [dostęp: 20.10.2016].
6. Sundmaeker H., Guillemin P., Friess P., Woelfflé S., *Vision and challenges for realising the Internet of Things*, Cluster of European Research Projects on the Internet of Things-CERP IoT, [http://www.internet-of-things-research.eu/pdf/IoT\\_Clusterbook\\_March\\_2010.pdf](http://www.internet-of-things-research.eu/pdf/IoT_Clusterbook_March_2010.pdf) [dostęp: 20.10.2016].
7. Atzori L., Iera A., Morabito G., *The Internet of Things: A survey*, „Computer Networks” 2010, vol. 54, s. 2803.
8. Charoś B., *Internet Rzeczy w Polsce*, <http://iab.org.pl/wp-content/uploads/2015/09/Raport-Internet-Rzeczy-w-Polsce.pdf> [dostęp: 20.10.2016].
9. Specification of the Bluetooth System, Covered Core Package, Version: 4.0; The Bluetooth Special Interest Group: Kirkland, WA, USA, 2010.
10. Gomez C., Paradells J., *Wireless home automation networks: A survey of architectures and technologies*, „IEEE Communications Magazine” 2010, vol. 48, no. 6, s. 92-101.
11. Ludovici A., Calveras A., Casademont J., *Forwarding techniques for IP fragmented packets in a real 6LoWPAN network*, „Sensors” (Basel) 2011, vol. 11, no. 1, s. 992-1008.
12. Haartsen J.C., *The Bluetooth radio system*, „IEEE Pers. Commun.” 2000, vol. 7, no. 1, s. 28-36.
13. Gomez C., Paradells J., *Overview and Evaluation of Bluetooth Low Energy: An Emerging Low-Power Wireless Technology*, <http://www.mdpi.com/1424-8220/12/9/11734/htm> [dostęp: 20.10.2016].

14. Qiaoyun Z., *Piconet construction and restructuring mechanisms for interference avoiding in bluetooth PANs*, „JNCA” 2016, vol. 75, s. 89-100.
15. Gilbert D., *Bluetooth 5.0: Here's Why The New Wireless Standard Matters*, International Business Times, 2016, <http://www.ibtimes.com/bluetooth-50-heres-why-new-wireless-standard-matters-2383305> [dostęp: 20.10.2016].
16. Satler S., *Augmenting Beacons with Cellular Network Technologies*, [In:] *Beacon Technologies*, Apress, New York 2016, s. 333-345.
17. Czajkowski R., Nowakowski W., *iBeacons – mobilne usługi lokalizacyjne*, „Technika Informatyczna”, 2015, s. 47-50.

## USE OF RADIO TRANSMITTERS SOLUTIONS AS AN EXAMPLE OF THE INTERNET OF THING

**Abstract:** *The last decade, is referred to as "mobile era", which in a significant way has changed mode of operation our lives, especially communication with the environment. Internet of things is revolutionizing the concept of global network and sets new trends. The article presents the concept of using radio communication, based on the standard BLE, for example transmitters iBeacon.*

**Tomasz Rogacewicz**

## **METODY SYMULACJI RUCHU DROGOWEGO W PIERWSZYM POLSKIM TRENAŻERZE MOTORNICZYCH**

*W artykule opisano metody symulacji oraz algorytmy decyzyjne oparte na wyuczonej sieci neuro-  
nowej w odwzorowaniu rzeczywistego ruchu drogowego w przestrzeni miejskiej na potrzeby  
trenażera motorniczych. Omówiono także dostępne dane charakteryzujące ruch drogowy, na których  
opiera się symulacja.*

### **1. Symulator**

W procesie szkolenia operatorów maszyn i pojazdów coraz częściej stosuje się symulatory. Nie zastąpią one szkolenia na prawdziwym sprzęcie, jednak mają kilka zalet, które zwiększają efektywność i bezpieczeństwo szkolenia. Pierwszą jest możliwość szkolenie nowych osób – na symulatorze zdobywają one doświadczenie, nie niszcząc sprzętu i nie stanowiąc zagrożenia dla innych uczestników ruchu. Wsiadając do pojazdu, kursant jest już obeznany z przyrządami sterowniczymi w kabinie i podstawowymi procedurami, więc skraca się czas używania pojazdu, co ma znaczenie szczególnie w mniejszych przedsiębiorstwach niedysponujących osobnym pojazdem przeznaczonym do szkoleń. Koszt działania symulatora jest niższy niż koszt jazdy rzeczywistym pojazdem. Największa zaleta to możliwość odwzorowania sytuacji wyjątkowych i niebezpiecznych, które nie są możliwe do przećwiczenia podczas tradycyjnego szkolenia. Mogą one się wydarzyć w rzeczywistości i gdy kursant przećwiczył podobne sytuacje, zwiększa się szansa na to, że zminimalizuje lub uniknie strat.

W latach 2007-2016 przy współpracy Miejskiego Przedsiębiorstwa Komunikacyjnego Spółka Akcyjna w Krakowie (PMK S.A.) powstał pierwszy w Polsce symulator szkoleniowy przeznaczony do szkolenia motorniczych pracujących w miejskich przedsiębiorstwach komunikacyjnych. Prototypowy symulator został zaprezentowany komisji do spraw organizacji szkoleń dla prowadzących pojazdy komunikacji miejskiej na konferencji Izby Gospodarczej Komunikacji Miejskiej w Krakowie w dniach 13-14 maja w 2010 roku [1]. Oprogramowanie symulatora zostało stworzone od podstaw przez autora niniejszego artykułu.

Jednym z podstawowych modułów wizualizacji miasta na potrzeby trenażera motorniczych jest moduł generujący wirtualny ruch uliczny. To od tego modułu zależy, czy życie miasta będzie wiarygodne oraz czy ruch uliczny będzie realny i czy da się za jego pomocą przećwiczyć sytuacje pożądane przez instruktorów

jazdy. Przy dzisiejszych możliwościach komputerów nie da się symulować zachowania kierowcy technikami wykorzystywanymi przy próbach stworzenia samochodu bez kierowcy, biorącego udział w ruchu drogowym. Algorytmy te są wymagające obliczeniowo dla jednego samochodu, a w wizualizacji trenera komputer kieruje setkami, a nawet tysiącami pojazdów na całej scenarii. Dlatego algorytm sterowania pojazdem musi być uproszczony obliczeniowo, co nie oznacza uproszczeń w wirtualnym ruchu drogowym.



**Rysunek 1.** Wierna replika kabiny tramwaju Bombardier NGT6, z projekcją obrazu na trzy ściany kabiny, perspektywa ustawiona jest tak, by osoba siedząca na fotelu odbierała obraz jako spójny  
Źródło: opracowanie własne.

## 2. Pozyskiwanie danych do symulacji

Aby realnie odwzorować specyfikę ruchu drogowego w miastach, powinno się oprzeć symulację na rzeczywistych danych charakteryzujących ten ruch. Podstawowe dane to geometria układów drogowych i torowych. Określa ona charakterystyczny wygląd środowiska w systemie wizualizacji przestrzeni i przydatna jest przy tworzeniu trójwymiarowego modelu tejże przestrzeni. Jako że problem jest szeroko opisany w literaturze [np. 2, 3], dalej zostaną przedstawione dane dotyczące samego ruchu drogowego.

### 2.1. Natężenie i rodzaj ruchu

Wydziały komunikacji w urzędach miejskich posiadają informacje o natężeniu ruchu drogowego. Informacje te obejmują dane o liczbie samochodów przejeżdżających przez główne węzły komunikacyjne miasta. Są one zróżnicowane dla konkretnych pór dnia, a czasem nawet dni tygodnia, albo podzielone na dni

robocze i wolne. Niektóre dane wyróżniają także klasy przejeżdżających samochodów [np. samochody osobowe, ciężarowe, autobusy lub bardziej szczegółowe: motocykle, samochody osobowe, lekkie samochody ciężarowe (dostawcze) o masie całkowitej do 3,5 ton, pozostałe samochody ciężarowe bez przyczep, samochody ciężarowe z przyczepami, autobusy i ciągniki] albo zawierają procentowy udział pojazdów ciężkich. Informują o liczbie samochodów przyjeżdżających i odjeżdżających z węzła w danym kierunku, a także pokazują przepływ samochodów wewnątrz węzła.

Używając tych danych w węzłach decyzyjnych, można stworzyć model odwzorowujący rzeczywisty ruch pojazdów w realnej scenerii z uwzględnieniem natężenia ruchu w danych godzinach i danym dniu.

W przypadku braku takich danych można samemu je zgromadzić. Najwygodniej jest ustawić przy skrzyżowaniu kamerę, tak żeby obejmowała całe skrzyżowanie. Odtwarzając film przy użyciu komputera, można wyliczyć natężenie ruchu, zmieniając prędkość odtwarzanego filmu i stosując pauzę.

## 2.2. Dane cykli sygnalizacji świetlnej

Następnymi danymi dostępnymi w wydziałach komunikacji w urzędach miejskich są wykresy cykli sygnalizacji świetlnej. Tworząc rzeczywistą trasę, na podstawie tych danych, można zaprogramować działanie sygnalizacji tak jak w rzeczywistości. Na głównych arteriach miasta cykle te mogą być zsynchronizowane, tworząc tzw. zieloną falę, czyli ustawiając na danej drodze zawsze zielone światło, pod warunkiem że jedziemy z prędkością właściwą dla tejże „zielonej fali”.

Te dane również można zdobyć samemu, kręcąc filmy pokazujące sygnalizatory. Tu najlepiej nagrywać po dwa cykle, z różnych pozycji, tak aby zawsze widzieć kilka sygnalizatorów. Trzeba się postarać, by z nowej pozycji było widać przynajmniej jeden sygnalizator nagrany na poprzednim stanowisku, dzięki niemu będzie można filmy zsynchronizować. Analiza filmów pozwoli na narysowanie wykresu cyklu sygnalizacji na danym skrzyżowaniu.

## 2.3. Dokumentacja kolizji i wypadków

Wydziały ruchu drogowego przy urzędach miejskich prowadzą dokumentację kolizji i wypadków. Zdarzenia są nanoszone na dane w systemie informacji geograficznej (GIS, *Geographic Information System*) w postaci obrysów pojazdów po kolizji. Dokumentacja może być tworzona również w innym oprogramowaniu [4].

Ośrodki szkoleniowe wraz z przewoźnikami mogą posiadać dokumentację filmową kolizji i wypadków. Ten typ dokumentacji robi się coraz bardziej powszechny, gdyż panuje tendencja wprowadzania jako standardowego wyposażenia nowych pojazdów rejestratorów zdarzeń obrazu z kamery pokazującej widok sprzed pojazdu. Wraz z modernizacją i wymianą taboru na nowy coraz więcej

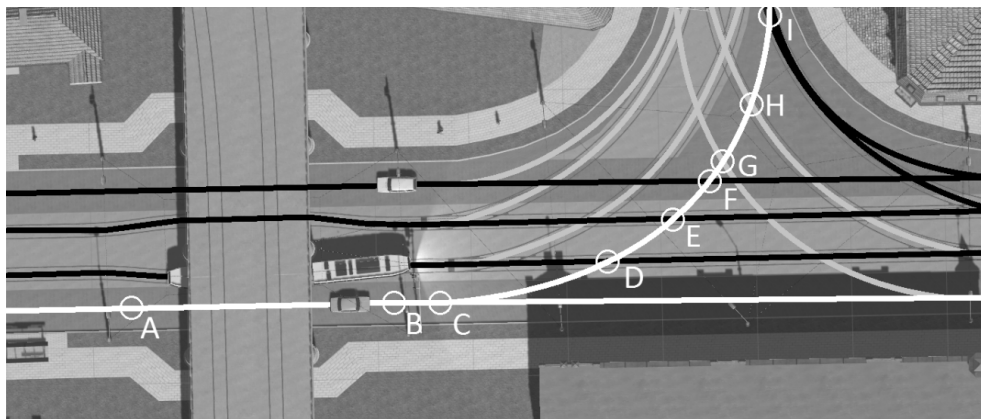
pojazdów jest w nie wyposażonych. Niektóre zakłady komunikacji całkowicie wyposażyły swój tabor w rejestratory. Z racji ochrony wizerunku uczestników zdarzeń dokumentacja ta nie jest przekazywana osobom trzecim, jednak podejmując współpracę z ośrodkiem szkolenia, można otrzymać pozwolenie na wgląd w tę dokumentację. Na podstawie filmów można przeanalizować przyczyny prowadzące do kolizji, a także stworzyć statystykę najniebezpieczniejszych miejsc na danej trasie oraz schematy zachowań kierowców doprowadzających do powtarzających się w danym miejscu incydentów. Odwzorowując, czy to realną trasę, czy dane miejsce jako element fikcyjnej trasy szkoleniowej, można zaprogramować wirtualny ruch uliczny, tak aby odwzorowywał rzeczywistą sytuację poprzedzającą kolizję.

### 3. Model ruchu drogowego

Aby symulacja ruchu drogowego była efektywna, algorytm poruszania się pojazdów musi wykorzystywać uprzednio przygotowaną mapę dróg, której dane są zorientowane na szybkie przełożenie ich na ruch pojazdu. Dane te powinny także zawierać podstawowe informacje o zachowaniu się pojazdów oraz posiadać punkty decyzyjne, by uprościć obliczenia decyzyjne do wymaganego minimum.

Na rysunku 2 pokazano działanie systemu decyzyjnego opartego na trasach z punktami zdarzeń. Biała trasa to trasa rozpatrywanego pojazdu. Droga między punktem A i B przebiega pod wiaduktem, który nie ma wpływu na decyzje pojazdu. Czarne trasy to trasy kolizyjne, natomiast szare trasy to trasy, które będą używane dopiero po zmianie fazy na sygnalizatorach. Pojazd przejeżdżający przez zdarzenie A decyduje, czy na najbliższym skrzyżowaniu ma pojechać prosto, czy w lewo. Decyzja jest losowa, ale według rozkładu odwzorowującego rzeczywiste dane opisane w podpunkcie 2.1 zapada decyzja jazdy w lewo, w zdarzeniu zawarto informację, jak daleko jest rozjazd jezdni, na tej podstawie i własności kierowcy opisanych w podpunkcie 3.1 podejmowana jest decyzja po przejechaniu jakiej odległości włączyć kierunkowskaz i czy go włączyć – instruktor może zwiększyć odsetek piratów drogowych. Zdarzenie B to sygnalizator S-1 sygnalizacji świetlnej. To typ zdarzenia, które wywołuje reakcję przed sobą, więc samochód wjeżdżając na drogę, dostaje wskaźnik na to zdarzenie i w przypadku sygnału „stój”, zwalnia z wyprzedzeniem. Jeśli sygnalizator pokazuje zielone światło, pojazd przejeżdża zdarzenie B i wskaźnik na zdarzenie B jest zastępowany następnym wskaźnikiem na zdarzenie, na które trzeba reagować wcześniej. Będzie to zdarzenie D – skrzyżowanie drogi z tramwajem. Zdarzenie C decyduje, z której drogi pobrać następane zdarzenie (pojazd wybrał skręt w lewo w punkcie decyzyjnym A). Ustawienia zadane przez instruktora mogą zostawić zdarzenie bez reakcji, wtedy samochód zajędzie drogę kursantowi – co przy tak rozwiązanej organizacji ruchu na skrzyżowaniu jest częstym powodem kolizji. Zdarzenie C rozdziela pojazdy na dwie drogi – według podjętej decyzji w punkcie A samochód jedzie drogą w lewo.

Następnie dostaje kolejne wskaźniki na zdarzenia: E, F, G, H, I, które to są punktami przecięcia tras pojazdów. Każde z tych zdarzeń posiada wskaźniki na przecinane trasy wraz z danymi próbkowania, które zwracają odległość najbliższego dojeżdżającego i odjeżdżającego pojazdu. Jeśli odjeżdżający pojazd jest dalej od punktu kolizji niż jego długość i szerokość stycznej skrajni, to jest pomijany. Na podstawie mechanizmu opisanego w podpunkcie 3.1 pojazd decyduje czy jechać, czy się zatrzymać.



**Rysunek 2.** Model jazdy wykorzystujący mapę odcinków dróg wraz ze zdarzeniami

Źródło: opracowanie własne.

Każdy pojazd powinien przechowywać wskaźnik na pojazd go poprzedzający. Mając dostęp do danych poprzedzającego pojazdu, wirtualny kierowca może na bieżąco odczytywać odległość i przyspieszenie, do których może się dostosować. Jest to szczególnie ważne podczas hamowania – jeśli ruch ma być odwzorowany w przekonujący sposób, pojazdy nie mogą zatrzymywać się w miejscu, gdy wystąpi niekorzystna sytuacja, lub mieć nienaturalnie krótką drogę hamowania, dlatego wirtualny samochód powinien kontrolować poprzedzający go pojazd i odpowiednio wcześniej zmniejszać prędkość lub hamować, przewidując dłuższą drogę hamowania. Niektóre pojazdy z racji swojej charakterystyki mają dłuższą drogę hamowania, są to pojazdy szynowe, ciężarówki z ładunkiem, przyczepami, naczepami, autobusy komunikacji miejskiej, w przypadku których nagłe hamowanie mogłoby skutkować odniesieniem obrażeń przez pasażerów. Kontrola parametrów jazdy poprzedniego pojazdu przydaje się także w momencie ruszania ciągu pojazdów, np. spod świateł na skrzyżowaniu. Pojazdy mogą wtedy w miarę płynnie ruszać, tak jak odbywa się to w rzeczywistości. Bez płynnego ruszania samochody ruszają jeden po drugim, jest to nienaturalne zachowanie, dodatkowo rozładowanie zatoru przed sygnalizatorem odbywa się wolno, przez co proces ten szybko zostanie zatrzymany kolejną zmianą światła.

### 3.1. Sieć neuronowa w procesie podejmowania decyzji przez wirtualnych kierowców

Aby komputerowy ruch uliczny przypominał ten rzeczywisty, należy dla uczestników ruchu wprowadzić mechanizmy, które nie zawsze podejmą właściwą decyzję, tak jak to mogą robić mniej doświadczeni kierowcy oraz działania łamiące przepisy ruchu drogowego. Zamiar złamania przepisów drogowych może podjąć każdy kierowca, gdy się spieszy albo gdy jego doświadczenie podpowiada mu, że złamanie przepisu będzie korzystne dla płynności jazdy i nie wpłynie zbyt mocno na bezpieczeństwo. Mogą być też inne powody, np. zmęczenie, jazda pod wpływem alkoholu lub narkotyków czy, szczególnie wśród osób młodych, chęć zaimponowania pasażerom.

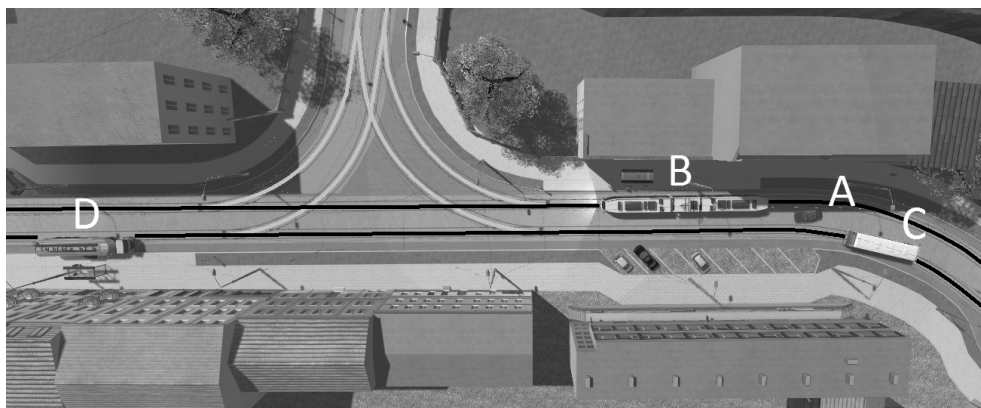
Idealnym mechanizmem mającym zdecydować, czy wykonać manewr, czy nie, jest sieć neuronowa [5]. Na wejściu sieci podawane są parametry jazdy i zagrożeń wykonania manewru, do tego wchodzić cechy charakterystyczne kierowcy i pojazdu. Na wyjściu sieci jest decyzja binarna, czy wykonać manewr, czy nie. Aby proces decyzyjny był szybki w docelowej symulacji, sieć neuronowa musi być wytuczona.

Realizując praktycznie program symulujący ruch uliczny, autor zastosował parametry z zakresu od 0 do 1 na tyle gęste, na ile pozwala precyzja zmiennej typu zmiennoprzecinkowego *float*. Dla pojazdu są to trzy parametry: umiejętności kierowcy, presja czasu działająca na kierowcę i możliwości techniczne pojazdu. Z programu symulującego pojazd otrzymuje wskaźniki na pojazdy, które mogą być zagrożeniem, istotne są głównie: ich typ, prędkość i odległość od potencjalnego punktu przecięcia trasy. Dane o warunkach atmosferycznych również dla uproszczenia zostały sprowadzone do zmiennej z zakresu od 0 do 1.

Parametrami umiejętności kierowcy są doświadczenie i stopień opanowania kierowania pojazdem oraz znajomość ruchu drogowego, a co za tym idzie przewidywanie groźnych lub niedogodnych sytuacji. Dla samochodów osobowych parametr ten ma wartości zbliżone do rozkładu normalnego z zakresu od 0 do 1 i wartością średnią 0,5. Dla samochodów ciężarowych i autobusów rozkład jest zmodyfikowany, tak by generował wartości wyższe, gdyż doświadczenie kierujących takimi pojazdami jest większe. Im wyższa wartość, tym lepsza decyzja i wykonanie manewru. Niski poziom umiejętności może też skutkować niedopełnieniem wszystkich czynności przy danym manewrze, np. brakiem zasygnalizowania kierunkowskazem zamiaru skrętu.

Presja czasu wiąże się z pośpiechem kierowcy. Im współczynnik jest wyższy, tym większa skłonność do złamania przepisów lub wykonania ryzykownych manewrów, które mogą wpływać na bezpieczeństwo innych uczestników ruchu lub ich spowolnić. Przy dużych umiejętnościach kierowca może wykonać szybki manewr zakończony powodzeniem, ale stresujący pozostałych użytkowników drogi. Kierowca z niskim współczynnikiem umiejętności może rozpocząć wykonywanie manewru i nie dokończyć go, powodując np. blokadę drogi i zmuszając innych uczestników ruchu do gwałtownego hamowania.





**Rysunek 3.** Pokazanie sytuacji, gdy pojazd A podejmuje decyzję wyprzedzenia stojącego pojazdu B  
Źródło: opracowanie własne.

Możliwości techniczne pojazdu, a właściwie możliwości techniczne pojazdu w mniemaniu kierowcy, wpływają na decyzję o wykonaniu manewru, gdyż przykładowo niektóre ryzykowne manewry kierowca wykona bez problemu samochodem sportowym, ale wykonanie tego samego manewru starą ciężarówką z przyczepą i ciężkim ładunkiem doprowadzi do katastrofy.

Żeby odzwierciedlić zachowanie pijanych kierowców lub kierowców pod wpływem narkotyków, należy obniżyć parametr umiejętności i zwiększyć parametry presji czasu i możliwości technicznych pojazdu. W skrajnym przypadku wektor tych cech będzie miał wartości:  $[0,1,1]$ , czyli minimalne umiejętności, duża presja czasu oraz duża wiara w możliwości techniczne swojego pojazdu. Pojazd taki będzie wykonywał ryzykowne manewry, ignorując pozostałych uczestników ruchu drogowego i będzie stanowił ciągle zagrożenie dla wirtualnego ruchu drogowego.

Na rysunku 3 pokazano podjęcie decyzji ominięcia stojącego tramwaju B przez pojazd A. Czarnymi liniami zaznaczono trasę wspólną pojazdów szynowych i kołowych, szare linie to dojazd z drogi podporządkowanej. Na ulicy z ruchem dwukierunkowym obydwie trasy posiadają informację, że między trasami możliwy jest swobodny przejazd. Ruch odbywa się w przeciwnych kierunkach. Pojazd A, odczytujący dane spod wskaźnika poprzedzającego go pojazdu, wie, że jego prędkość wynosi 0 oraz że jest w trybie stania na przystanku. Podejmuje decyzję o wyminięciu pojazdu, więc następuje próbkowanie przeciwnej trasy. Jeśli wyniki próbkowania dają negatywną decyzję, pojazd oczekuje pewien czas i ponawia próbkowanie. Jeśli tramwaj blokujący ruszy, samochód podąży za nim. Jeśli wcześniej decyzja na podstawie próbkowania i charakterystyki kierowcy da pozytywny wynik, samochód omija tramwaj. W przypadku pokazanym na rysunku próbkowanie zwróciło dane pojazdowi C, który już ominął pojazd A i nie blokuje manewru, oraz dane pojazdowi D, który porusza się wolno i nie przyspiesza. Pojazd A dysponuje dużym przyspieszeniem i jest krótki, więc wyliczony czas omijania będzie sporo krótszy, nim pojazd D uniemożliwi manewr. Gdy umiejętności kierowcy nie są bliskie minimum, próbkowanie zwróci wskaźnik na najbliższy

pojazd, uwzględniając podporządkowaną drogę, z której może wyjechać nieświadomy wyprzedzania pojazd. Ominięcie polega na przejeździe na drugą trasę i powrót z niej, gdy próbkowanie w drugą stronę zwróci lukę, w którą może wjechać pojazd A.

## Podsumowanie

Przedstawione powyżej podejście do algorytmicznej realizacji symulacji rzeczywistego ruchu drogowego w środowisku miejskim pozwoliło na stworzenie działającego modelu, spełniającego wymagania stawiane przez instruktorów jazdy z polskich ośrodków szkoleń motorniczych. Użyte algorytmy decyzyjne potrafią wygenerować niespodziewane sytuacje w ruchu drogowym spowodowane przez wirtualnych kierowców. Symulator został przetestowany przez MPK S.A. w Krakowie [6] i prowadzone są rozmowy w sprawie wdrożenia urządzenia w środowisku docelowym. Obecnie trwają prace nad automatyzacją tworzenia nowych scenarii oraz scenariuszy szkoleniowych.

## Literatura

1. Adamski J., *Konferencja Komisji Szkolenia Zawodowego IGKM*, „Przewoźnik Krakowski” 2010, nr 2, s. 29.
2. Rogacewicz T., *Dynamiczna wizualizacja trójwymiarowa środowiska miejskiego w symulacji pojazdów szynowych*, materiały konferencyjne „Diagnostyka Procesów i Systemów” 2007, nr 7.
3. Rogacewicz T., *Dynamiczna wizualizacja terenu i infrastruktury na podstawie danych GIS*, „Rozprawy Naukowe i Zawodowe PWSZ w Elblągu” 2010, z. 8, s. 5-14.
4. *Materiały szkoleniowe dla uczestników studiów podyplomowych „Diagnostyka, mechatronika, rzeczoznawstwo samochodowe i ubezpieczenia” – Opis i rekonstrukcja wypadków drogowych*, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, Zakład Inżynierii Eksploatacji Pojazdów, Politechnika Warszawska, Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, Warszawa 2006, s. 277-289.
5. Rutkowski L., *Metody i techniki sztucznej inteligencji*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2005.
6. *MPK szkoli motorniczych w symulatorze jazdy tramwajem*, <http://www.mpk.krakow.pl/pl/aktualnosci/news,3924,mpk-szkoli-motorniczych-w-symulatorze-jazdy-tramwajem.html> [dostęp: 24.11.2016].

---

## METHODS OF TRAFFIC SIMULATION IN FIRST POLISH TRAM SIMULATOR

**Abstract:** *The article describes methods of simulation and decision algorithms using artificial neural network in simulation of city road traffic, for the needs of simulator to motormen training. Also discussed available data, characterizing real traffic, which are used in simulation.*



**Daria Rybarczyk**

## **MOBILNY SYSTEM ZARZĄDZANIA OPERACJAMI NA TERMINALU KONTENEROWYM**

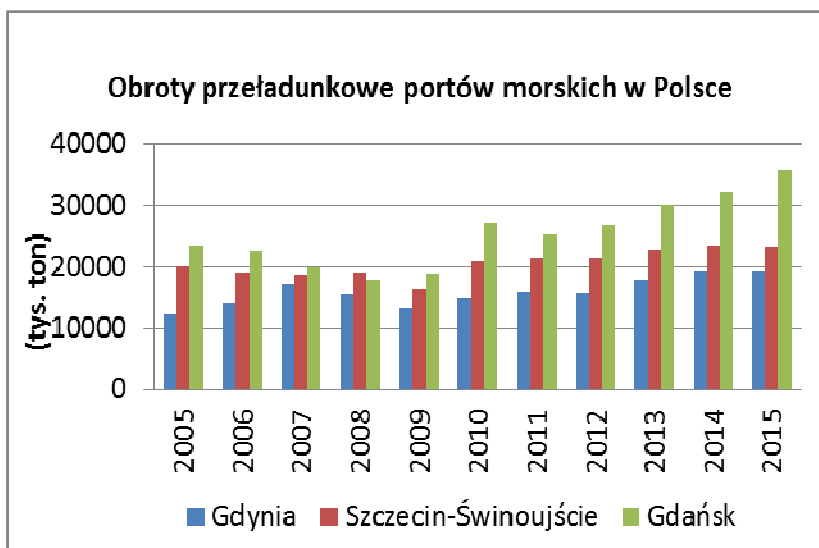
*W pracy przedstawiono mobilną część (przeznaczoną na urządzenia mobilne – tablety, smartfony) systemu informatycznego wspomagającego pracę terminala kontenerowego. Prezentowana aplikacja jest rozszerzeniem tworzonego systemu typu TOS (Terminal Operating System). Działa na tabletach zamontowanych na maszynach pracujących na terminalach kontenerowych. Ponadto zaproponowano uzupełnienie systemu mobilnego o automatyczne odczytywanie danych zapisanych w znacznikach RFID.*

### **Wprowadzenie**

Obecnie coraz bardziej popularne stają się aplikacje mobilne wspierające różne obszary biznesu. Do niedawna wykorzystywane były głównie w handlu. Jednak rozwój urządzeń mobilnych (tabletów, smartfonów), ich jakość, parametry techniczne oraz dostępność – sprawiły, że takie rozwiązania mają uzasadnienie biznesowe. Aplikacje mobilne znajdują coraz to nowe zastosowania: w kontroli produkcji, śledzeniu obiegu materiałów i produktów, wsparciu pracy magazynów, obsłudze konferencji biznesowych, wykonywaniu operacji bankowych. Bardzo dynamicznie rozwija się tzw. Internet rzeczy (*Internet of Things*). Jest to idea, która zakłada, że przedmioty mogą komunikować się za pomocą sieci komputerowej. Jest to możliwe, pod warunkiem że włączane do globalnej sieci urządzenia są wyposażone w tzw. obiekty inteligentne, czyli elementy elektroniczne składające się z jednostki transmisyjnej oraz sensorów różnych wielkości fizycznych mierzalnych czy mikroprocesorów lub urządzeń wykonawczych. Sensory pozwalają inteligentnym obiektom zbierać informacje o otaczającym świecie, natomiast moduły wykonawcze umożliwiają im reakcję na zebrane i przeanalizowane dane. Inteligentne obiekty mogą być wbudowane niemal w każdy rodzaj urządzenia: maszyny przemysłowe, sprzęt domowy, sprzęt sportowy, przełączniki światła, silniki, zabawki, ubrania i wiele innych. Współczesne smartfony mogą łączyć się z systemem centralnego ogrzewania, sprzętem radiowo-telewizyjnym, kamerami monitoringu czy różnego rodzaju czujnikami i silnikami.

W połowie lat pięćdziesiątych wdrożono koncepcję formowania dużych i jednolitych jednostek ładunkowych, która miała za zadanie przyspieszyć i uprościć prace przeładunkowe w porcie. Zaczęto stosować kontenery – duże metalowe konstrukcje o kształcie prostopadłościanu – jako pojemniki na dowolne przedmioty. Wprowadzono normy dotyczące ich rozmiarów i konstrukcji. Konstrukcja

kontenera gwarantuje jego wielokrotny użytek oraz łatwy przewóz i przeładunek pomiędzy różnymi środkami transportu bez konieczności przeładowywania przewożonych towarów. Od tamtego czasu obserwuje się stały wzrost obrotów kontenerowych na świecie. Podobna tendencja utrzymuje się w rozwoju portów kontenerowych i kontenerowców (rys. 1).



**Rysunek 1.** Obroty przeładunkowe portów morskich w Polsce w okresie 2005-2015 (w tys. ton)

Źródło: M. Matczak, P. Ołdakowski, *Polskie porty morskie w 2006. Podsumowanie i perspektywy na przyszłość. Raport rynkowy*, Wydawnictwo Actia Forum, Gdynia 2007, M. Matczak, P. Ołdakowski, M. Rozmarynowska, *Polskie porty morskie w 2012. Perspektywy rozwoju*, Wydawnictwo Actia Forum, Gdynia 2013, M. Matczak, *Polskie porty morskie w 2015. Podsumowanie i perspektywy na przyszłość. Raport rynkowy*, Wydawnictwo Actia Forum, Gdynia 2016.

Bardzo dynamicznie rozwija się transport intermodalny. Należy on do złożonych procesów transportowych, w których ładunki przemieszczane są środkami przewożowymi różnych gałęzi. Środkiem transportu, którym przewożony jest towar, może być: statek, pojazd kolejowy, pojazd drogowy lub barka rzeczna. Globalni operatorzy logistyczni świadczą usługi określane mianem *door-to-door*, tj. dostarczanie towarów bezpośrednio od i do klienta. Wymaga to dobrze rozwiniętej infrastruktury: linii kolejowych oraz terminali kontenerowych [4]. Na początku XXI wieku do wyżej wymienionej integracji dołączył towarowy transport lotniczy. Towary są dostarczane statkami z jednego portu morskiego do drugiego, za pomocą transportu lotniczego, a następnie rozwożone w głąb lądu. W ten sposób poszukuje się rozwiązania optymalnego z punktu widzenia kosztów i czasu dostawy w ramach łańcucha transportowego [5].

Jednym ze sposobów zwiększenia efektywności terminali kontenerowych jest ich automatyzacja. Dotyczy to samych urządzeń przeładunkowych, a także systemów zarządzania terminalem. Kontenery są przyjmowane na plac i przekazywane dalej lub składowane na placu. Dzięki odpowiedniemu wyposażeniu terminala

możliwy jest rozładunek i załadunek statków, pociągów kolejowych czy samochodów. Zwykle przesyłane towary są importowane lub eksportowane pomiędzy różnymi państwami czy kontynentami. Towary takie muszą być poddawane odprawom celnym i niezbędnym procedurom, dokonywane są usługi rzeczoznawstwa i kontroli ładunków (kontrola sanitarna, weterynaryjna i inne). Dodatkowo wykonuje się naprawy kontenerów, czyszczenie czy plombowanie. Dla każdego z kontenerów musi być stworzona odpowiednia dokumentacja zawierająca szczegółowe informacje o jego pochodzeniu, miejscu docelowym, przewożonych towarach i dokumentacja celna.

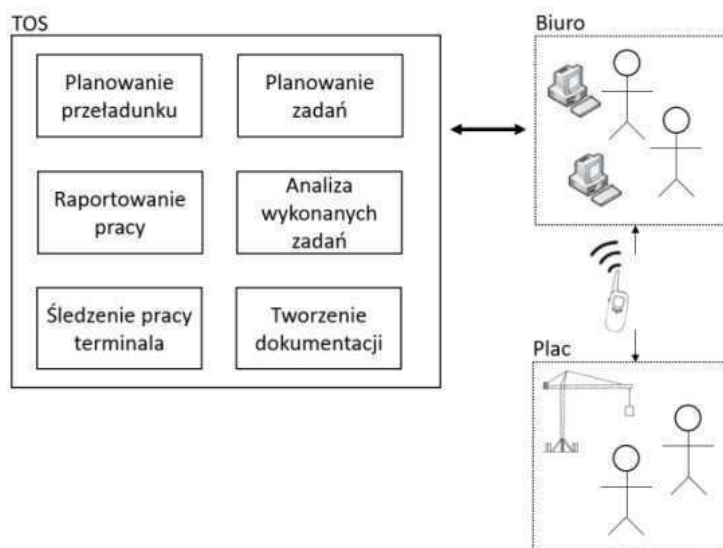
Współczesny rynek usług transportowych jest wymagający dla przedsiębiorstw ze względu na dużą konkurencyjność. Firmy muszą wciąż doskonalić procesy związane ze swoją działalnością, aby podnieść własną atrakcyjność rynkową. Głównym celem pracy terminala jest zapewnienie jak najszybszej obsługi kontenera. Skala operacji oraz ilość informacji, którą należy tu przetworzyć, jest ogromna.

Terminale kontenerowe od lat wspierane są technologiami informatycznymi pomagającymi zarządzać spedycją. Systemy takie ogólnie nazywane są systemami operacyjnymi terminala. Stają się obecnie podstawowym narzędziem optymalizacji procesów przeładunkowych. Stanowią podstawowe narzędzie ewidencji, planowania, kontroli oraz monitoringu dla terminali kontenerowych. Wybór systemu typu TOS (*Terminal Operating System*) ma duży wpływ na strategiczne oraz taktyczne działania, których celem jest zwiększenie efektywności pracy terminala oraz poprawa współpracy z klientami [6]. Systemów tego typu jest wiele. Różnią się stosowanymi technologiami, są tworzone dla indywidualnego odbiorcy lub dla konkretnej branży. Oprogramowanie Solvo.TOS produkcji rosyjskiej, system CatOS (*Computer Automated Terminal Operating System*) koreańskiej firmy Total Soft Bank to systemy stacjonarne ze scentralizowaną bazą danych. System Navis 4 oraz Grot Vanguard amerykańskiej firmy TideWorks Technology stworzyły aplikacje częściowo pracujące w technologiach webowych.

Systemy te głównie oferują planowanie zadań związanych z obsługą kontenerów, analizę wykonanych zadań, raportowanie. Jednak bardzo istotny jest sposób przekazywania zadań do realizacji. Zwykle osoba pracująca z takim systemem musi komunikować się za pomocą krótkofalówki, aby przekazywać informacje z systemu na plac terminalowy i oczekiwać informacji zwrotnych, aby wprowadzić je do systemu (rys. 2).

Mobilny system zarządzania operacjami na terminalu kontenerowym ma za zadanie przenieść obsługę operacji wykonywanych bezpośrednio na placu składowym na urządzenia mobilne.

Propozycję mobilnego systemu wspomagającego pracę terminala kontenerowego zaprezentowano poniżej.



**Rysunek 2.** Komunikacja między użytkownikami systemu TOS  
Źródło: opracowanie własne.

## 1. System KROL (Komputerowy Rejestr Operacji Logistycznych)

System KROL typu TOS powstaje na potrzeby spółki PCC Intermodal S.A., która organizuje krajowy i międzynarodowy transport kontenerów. Zarządza ona operacjami na pięciu lądowych terminalach przeładunkowych: w Kutnie, Brzegu Dolnym, Gliwicach, Dębicy oraz we Frankfurcie nad Odrą. Spółka zdecydowała się na stworzenie systemu dedykowanego sprzęgającego wszystkie aspekty pracy przedsiębiorstwa od obsługi terminala począwszy, a skończywszy na rozliczeniach finansowych. W skład systemu wchodzi następujące części (zwane dalej modułami) obsługujące poszczególne działy: sprzedaży, finansowy, techniczny, operacyjny, obsługi klienta, terminalowy, administracyjny (rys. 3).

Poszczególne moduły służą do realizacji zadań związanych z funkcjonowaniem firmy, takich jak planowanie załadunku/rozładunku pociągów i samochodów, planowanie tras dla kontenerów, ofertowanie, przygotowywanie kontraktów na podstawie zatwierdzonych ofert, tworzenie zleceń na podstawie zamówień bieżących i obowiązujących kontraktów, rozliczenia zleceń, integracja z programem finansowo-księgowym Enova, raportowanie na poziomie kolejnych etapów działania.

Moduł terminalowy jest bezpośrednio związany z prezentowaną aplikacją mobilną. Pozwala na definiowanie placu składowego, procedur składowania kontenerów na danym placu, zadań dla operatorów maszyn pracujących na placu, podgląd realizacji zadań, podgląd obłożenia placu z możliwością edycji, podgląd pociągów znajdujących się na terminalu oraz ich składu. Ponadto moduł ten



umożliwia zarządzanie awariami maszyn oraz uszkodzeniami kontenerów znajdujących się na wybranym terminalu.



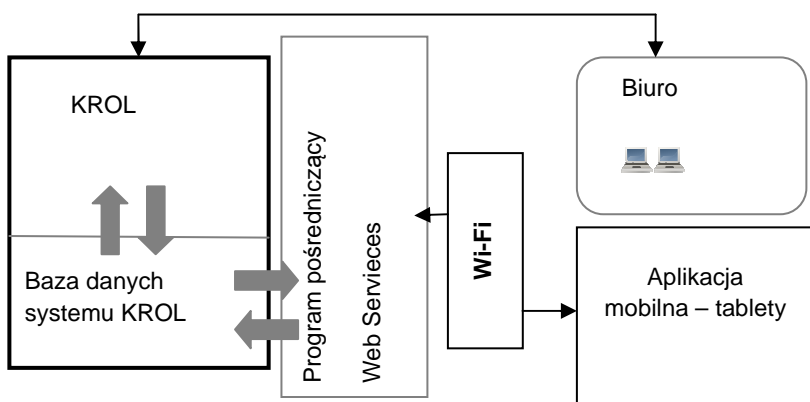
**Rysunek 3.** Ekran główny systemu KROL  
Źródło: materiały PCC Intermodal S.A.

Aby rozpocząć pracę z aplikacją mobilną należy przygotować terminal przeładunkowy do pracy z nią. Przede wszystkim trzeba przygotować oznaczenia dla elementów placu składowego, tj. podzielić go na sektory, kolumny, rzędy i warstwy. Za pomocą odpowiedniej opcji modułu terminalowego należy nazwy sektorów oraz odpowiadające im liczby kolumn, rzędów i warstw wprowadzić do systemu. Następnie trzeba zdefiniować procedury składowania kontenerów dla placu składowego. Procedury składowania określają, jakie kontenery mogą być składowane w poszczególnych miejscach na placu. Wymagają one wprowadzenia szeregu parametrów, od których zależeć będzie wyliczenie przez system miejsca składowania danego kontenera. Przykładowe parametry to: miejsce obowiązywania (zakres sektorów, kolumn, rzędów i warstw), typ kontenera, kod ISO, nazwa klienta, terminal macierzysty, armator, maksymalna waga, status kontenera (pusty/pełny), klasa ADR/RID (określa klasę niebezpiecznej zawartości kontenera w skali 1-9), podłączenie prądu (określa, czy procedura ma składować kontenery wymagające podłączenia prądu), miejsce podstawienia, które ma być zrealizowane w kolejnym ruchu danego kontenera, terminal kontenerowy, na który kontener będzie jechał w następnym ruchu. Ponadto dla danej procedury składowania należy podać priorytet oraz określić, czy procedura ma być zależna od liczby kontenerów stojących już na placu składowym.

## 2. Budowa aplikacji mobilnej

System KROL jest aplikacją internetową działającą na komputerach w głównej siedzibie spółki w Gdyni oraz w biurach terminali kontenerowych będących własnością spółki. Prezentowana w pracy aplikacja jest rozszerzeniem tworzonego systemu typu TOS. Działa na tabletach zamontowanych na maszynach pracujących na terminalach, tj. na maszynach przeładunkowych typu *reachstaker* i suwnicach bramowych typu RMG (*rail mounted gantry*). Zastosowano tablety przemysłowe z wyświetlaczem o wielkości 10 cali charakteryzujące się wysoką odpornością na niekorzystne warunki pracy. Cechują się one odpornością na upadki, wstrząsy, zalanie wodą, zapylenie, niskie i wysokie temperatury. Charakteryzują się stopniem ochrony IP67, zgodnie z normą PN-EN 60529:2003, w której zostały sklasyfikowane wymagania techniczne dotyczące stopni ochrony IP zapewnianych przez obudowy urządzeń elektrycznych. Ponadto producent tabletek gwarantuje zgodność z normą MIL-STD 810G, według której testowana jest wytrzymałość jego produktów.

Aplikacja mobilna łączy się z serwerem głównym aplikacji webowej za pośrednictwem Wi-Fi. Wykorzystuje program pośredniczący napisany na platformie ASP.NET, który dostarcza danych za pomocą usług sieciowych (rys. 4).



**Rysunek 4.** Schemat systemu obsługi terminali  
Źródło: opracowanie własne.

W połączeniu z budowanym systemem webowym znacznie przyczynia się do zwiększenia wydajności obsługi na terminalu. Zawiera następujące moduły (rys. 5):

- Obsługa zadań,
- Inwentaryzacja,
- Rejestracja uszkodzeń,
- Monitoring temperatur,
- Brama wejście/wyjście.



**Rysunek 5.** Ekran główny aplikacji mobilnej  
Źródło: opracowanie własne.

Głównym modułem jest **Obsługa zadań**. Wyświetlana jest w nim lista zadań dla operatorów znajdujących się na placu (rys. 6). System tworzy listę zadań do wykonania, tj. listę kontenerów do rozładowania lub załadowania na podstawie zatwierdzonych zleceń znajdujących się w bazie danych systemu KROL oraz na podstawie inwentaryzacji pociągu znajdującego się aktualnie na terminalu. Zadania budowane są w czasie rzeczywistym, z uwzględnieniem bieżących ruchów na placu, które w każdej chwili zmieniają jego stan. Lista zawiera numery kontenerów oraz informację o miejscu, skąd należy je podjąć i gdzie przełożyć. Dla danego kontenera wyświetlany jest również cel kolejny, czyli miejsce, do którego ma trafić w dalszej kolejności, oraz czas, kiedy ma to nastąpić. Numer kontenera to unikalny identyfikator składający się z czterech liter i siedmiu cyfr, z czego ostatnia jest sumą kontrolną, wykorzystywaną w aplikacji do weryfikacji podejmowanego kontenera w celu uniknięcia pomyłek.

Miejsca na placu wyznaczone są przez wcześniej zdefiniowane sektory, rzędy, kolumny i warstwy. Dodatkowo mają one swoje odpowiedniki wyrażone w metrach mierzonych od początku placu, co daje suwnicy możliwość automatycznego przesunięcia się w odpowiednie miejsce. Dla placu kontenerowego definiowane są procedury składowania kontenerów, na podstawie których system odnajduje miejsca dla nowych kontenerów. Algorytm wyznaczający miejsce dla rozładowywanego kontenera analizuje parametry wprowadzone do procedur składowania, odległość od miejsca, w którym aktualnie znajduje się kontener, do najbliższego możliwego miejsca jego postawienia oraz czas następnego ruchu kontenera, czyli wyjścia z placu składowego. Chodzi o to, aby nie przykryć kontenera innymi, jeśli w krótkim czasie ma opuścić plac. Podobnie dla kontenerów ładowanych na pociąg lub samochód algorytm wyznacza kolejność ich przewożenia do miejsca załadowania na wyznaczoną przez system KROL platformę pociągu lub na samochód w taki sposób, aby najpierw wybrane zostały kontenery z warstw najwyższych. Należy minimalizować liczbę ruchów maszyny służących tylko do

odstawienia kontenerów w celu podjęcia kontenera, który ma właśnie opuścić plac.

Wykonywane zadanie:  
Brak

Kalmar Kontener Szukaj Pociąg Samochód Plac

Kontener	Skład	Dokąd	Cel kolejny	Data kolejna
MSCU568300 40DV 4000 kg	K-DB 814-1-4-40 Metry: 581	C-63-A-1 Metry: 417		
MSKU510318 20DV 22160 kg	K-DB 814-1-24-60 Metry: 117	C-63-A-1 Metry: 417	Truck	2015-08-13 00:00:00
MSKU766724 20DV 22160 kg	K-DB 814-1-23-40 Metry: 142	C-63-A-1 Metry: 417	Truck	2015-08-13 00:00:00
MRKU828043 20DV 22160 kg	K-DB 814-1-22-40 Metry: 163	C-63-A-1 Metry: 417	Truck	2015-08-13 00:00:00
PONU013624 20DV 22160 kg	K-DB 814-1-20-40 Metry: 204	C-63-A-1 Metry: 417	Truck	2015-08-13 00:00:00
CLHU403574 40DV 4000 kg	K-DB 814-1-8-0 Metry: 496	C-63-A-1 Metry: 417		
MSCU585493 40DV 4000 kg	K-DB 814-1-8-40 Metry: 484	C-63-A-1 Metry: 417		

Rozpocznij zadanie

Zakończ zadanie

Info o kontenerze

Odśwież

Rysunek 6. Lista zadań w module Obsługa zadań

Źródło: opracowanie własne.

Operatorzy po zalogowaniu się do systemu wybierają pojazd z listy dostępnych na terminalu pojazdów, następnie wpisują stan licznika. Rejestrują na tablicie moment wybrania zadania, czyli kontenera, który zamierzają przestawić (wówczas inny operator tego zadania już nie widzi), moment podjęcia kontenera oraz odłożenia go na miejsce docelowe. W związku z tym zawsze można policzyć, ile czasu potrzeba na załadowanie lub rozładowanie pociągu, ile ruchów wykonała maszyna oraz ile czasu pracowała ogółem. Można także przeanalizować pracę maszyny pod kątem ruchów pełnych i pustych, tj. takich, w których wiezie kontener, i takich, w których jedzie bez kontenera. Analizę żądanych danych można otrzymać w tworzonej aplikacji webowej, która pracuje na tej samej bazie danych co aplikacja mobilna.

Moduł **Inwentaryzacja** służy do sprawdzania rzeczywistego stanu na placu – jakie kontenery znajdują się na danej pozycji, pozycji wybranego kontenera, wyświetlenia listy kontenerów zagubionych, tj. takich, które znajdują się w wykazie kontenerów dla danego terminala, ale nie mają określonej pozycji. Kontrolerzy zaopatrzeni w tablety mogą dokonać spisu z natury bezpośrednio na placu. Ważnym elementem w tym module jest **Inwentaryzacja pociągu**, która wyświetla informacje o składzie wybranego pociągu oraz pozwala na ich weryfikację (rys. 7). Pociąg wjeżdżający na terminal musi być sprawdzony przed rozładowaniem. Ekspedytor kontroluje każdy pojedynczy kontener znajdujący się na poszczególnych platformach. Sprawdza, czy na danej platformie w określonym miejscu znajduje się właściwy kontener. Jeżeli numer wyświetlony z bazy jest zgodny z rzeczywistym numerem kontenera na danej platformie, należy zweryfi-

kować jeszcze prawidłowość wpisanego w bazie typu kontenera i numeru plomby oraz wprowadzić stan ogólny kontenera oraz przeznaczenie i temperaturę. Dopiero po sprawdzeniu i uzupełnieniu danych dotyczących kontenera można zatwierdzić zgodność. Spowoduje to zaznaczenie w bazie, że dokonano weryfikacji tego kontenera. System umieści go na liście zadań do rozładowania. Podczas inwentaryzacji pociągu rejestrowane są również uszkodzenia kontenerów (po przejściu do modułu Rejestracja uszkodzeń).

Numer wagonu	Typ wagonu	Numer platformy	Inny	Brak	Zgodny	Pozycja na wagonie	Numer kontenera	Typ kontenera	Brak	Inny	Zgodny
50	60	378045581154	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	40	TEST3030057	22G1	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Stan ogólny: OK    Empty    Plomba    Uszkodzenia  
 Przeznaczenie: spożywka    Temperatura: 10    zgodna

Rysunek 7. Fragment ekranu głównego Inwentaryzacji pociągu

Źródło: opracowanie własne.

Moduł **Rejestracja uszkodzeń** pozwala na ewidencję uszkodzeń kontenerów. Po stwierdzeniu uszkodzenia trzeba wprowadzić odpowiednią informację do systemu. Należy podać miejsce uszkodzenia (dach, podłoga, ściana, segment na ścianie), typ uszkodzenia (wgniecenie, wybrzuszenie, otwór, plamy oleju i inne) oraz dodatkowy opis. Istnieje możliwość wykonania zdjęcia uszkodzonego kontenera za pomocą aplikacji w tablecie i przesłania go do bazy danych. Jeśli kontener zostanie naprawiony, należy ten fakt również odnotować w systemie.

Moduł **Monitoring temperatury** umożliwia kontrolowanie temperatury w kontenerach wymagających utrzymania zadanych temperatur bądź to przez grzanie, bądź to przez chłodzenie. Okresowo kontrolowana jest temperatura i dokonywane są wpisy do systemu. Rejestr zawiera historię temperatur i dyspozycji podłączeń i odłączeń od prądu.

Moduły **Brama wejście/Brama wyjście** służą do weryfikacji kontenerów przyjeżdżających lub wyjeżdżających samochodami. W oknie głównym znajdują się zlecenia dla kontenerów. Po wybraniu zlecenia następuje przejście do okna pozwalającego sprawdzić dane dotyczące kontenera ujętego w zleceniu. Po zatwierdzeniu zgodności danych rzeczywistych z danymi w zleceniu weryfikowany kontener trafia na listę zadań do wykonania.

### 3. Rozwiązanie z wykorzystaniem systemu identyfikacji radiowej

System identyfikacji radiowej (RFID, *Radio-Frequency Identification*) jest technologią umożliwiającą zdalny zapis i odczyt danych (poprzez fale radiowe) z wykorzystaniem specjalnych układów elektronicznych (zwanymi znacznikami

lub tagami) przytwierdzonych do monitorowanych towarów. System RFID składa się z dwóch komponentów:

- znacznika umieszczonego na obiekcie identyfikowanym,
- czytnika, którego rolą jest odczytanie zawartych w znaczniku danych.

Znacznik RFID to element, który przechowuje dane umożliwiające identyfikację oznakowanego przedmiotu oraz przesyła je do czytnika za pomocą fal radiowych. Składa się z układu elektronicznego (zawierającego pamięć i mikroprocesor) odpowiedzialnego za przechowywanie i przetwarzanie danych oraz z anteny komunikacyjnej służącej do wysyłania i odbierania sygnałów. Dzielą się one na znaczniki pasywne (nieposiadające własnego zasilania) oraz aktywne (posiadające własne źródło zasilania). Czytnik RFID jest urządzeniem, które może odczytywać oraz wysyłać dane do znaczników RFID. Czytnik zawiera moduł transmisji radiowej (antenę) i układ sterowania. Ponadto czytniki posiadają interfejsy łączące je z komputerami lub urządzeniami automatyki przemysłowej: RS-232, RS-485, USB, LAN, Wi-Fi, które pozwalają na przesyłanie danych [7].

Identyfikacja radiowa to obecnie jedna z najszybciej rozwijających się technik automatycznej identyfikacji. Znajduje zastosowanie w wielu obszarach gospodarki, np. w:

- zarządzaniu procesami produkcyjnymi, logistycznymi oraz magazynowymi,
- identyfikacji osób, kontroli dostępu,
- identyfikacji pojazdów,
- obsłudze kart wstępu na obiekty sportowe (wyciągi narciarskie, baseny, lodowiska),
- obsłudze przesyłek kurierskich,
- identyfikacji zwierząt.

W zaprojektowanym uzupełnieniu mobilnego systemu zarządzania terminalem kontenerowym zaproponowano użycie znaczników aktywnych pracujących w paśmie UHF, które charakteryzują się dużą odległością odczytu (ok. 100 m) [8]. Tablety przemysłowe używane do rejestrowania zdarzeń na placu kontenerowym za pomocą stworzonej aplikacji mobilnej posiadają czytniki RFID. Do aplikacji mobilnej dołączono moduł umożliwiający zapis odczytanych przez czytnik RFID danych do bazy systemu KROL. Moduł ten wykorzystuje stworzone wcześniej serwisy sieciowe dostępne przez Wi-Fi. Dodatkowo zaproponowano użycie tzw. bramy RFID (tj. zestawu czytników wyposażonych w różne konfiguracje anten) ustawionej przy bramie wjazdowej na place kontenerowe.

## Podsumowanie

Intermodalny transport kontenerowy rozwija się bardzo dynamicznie. Celem konkurujących ze sobą na rynku firm jest skrócenie czasu obsługi kontenerów na terminalu i obniżenie kosztów związanych z działalnością. Istniejące systemy

zarządzania pracą na terminalach są rozszerzane o moduły mobilne do bezpośredniej pracy na placu składowym.

Spółka PCC Intermodal S.A. zdecydowała się na dedykowane rozwiązanie kompleksowe, tj. na stworzenie systemu webowego KROL i współpracującej z nim aplikacji mobilnej. Autorka miała za zadanie wykonanie części modułu terminalowego systemu KROL, programu pośredniczącego dostarczającego danych do aplikacji mobilnej za pomocą usług sieciowych oraz wykonanie aplikacji mobilnej. Aplikacja pozwoliła na skrócenie czasu obsługi kontenerów. Dzięki niej znane jest bieżące położenie kontenerów na wszystkich depotach należących do spółki. Daje to możliwość elastyczniejszego dysponowania zasobami. Już podczas testów aplikacji na terminalu w Kutnie zaobserwowano zmniejszenie liczby ruchów, w których maszyna przeładunkowa jedzie bez kontenera. Wyeliminowano sytuacje konfliktowe, w których dwie maszyny jadą po ten sam kontener. Zmniejszono liczbę ruchów odstawczych, tj. takich, których celem jest dotarcie do właściwego kontenera. Przyspieszono weryfikację kontenerów rozładowywanych z pociągu. Skrócono czas oczekiwania samochodów z kontenerami na wjazd na depot.

Dynamika zmian w rozwiązaniach technologicznych jest imponująca. Prezentowana aplikacja mobilna działa na terminalach spółki PCC Intermodal S.A. dopiero rok. W momencie wdrożenia stanowiła istotny przełom w funkcjonowaniu terminali. Znacznie usprawniła obsługę przeładunków kontenerów. Szybki rozwój technologii radiowej spowodował, że zaczęto rozważać zastosowanie jej zdobyczy. Pierwsze rozwiązania już podjęto. Stąd tylko krok do kolejnych modernizacji: elektronicznych plomb zamiast tradycyjnych ołowianych, wreszcie, do inteligentnych kontenerów. Te ostatnie wyposażone w urządzenia i czujniki pozwalające na śledzenie zmian temperatury oraz innych czynników, alarmujące o nieuprawnionym otwarciu drzwi oraz umożliwiające określenie aktualnej pozycji czy monitorowanie zawartości to niedaleka przyszłość. Postępu technologicznego nie da się zatrzymać.

## Literatura

1. Matczak M., Ołdakowski P., *Polskie porty morskie w 2006. Podsumowanie i perspektywy na przyszłość. Raport rynkowy*, Wydawnictwo Actia Forum, Gdynia 2007.
2. Matczak M., Ołdakowski P., Rozmarynowska M., *Polskie porty morskie w 2012. Perspektywy rozwoju*, Wydawnictwo Actia Forum, Gdynia 2013.
3. Matczak M., *Polskie porty morskie w 2015. Podsumowanie i perspektywy na przyszłość. Raport rynkowy*, Wydawnictwo Actia Forum, Gdynia 2016.
4. Antonowicz M., Zielaskiewicz H., *Kolejowo-morskie łańcuchy logistyczne szansą na zwiększenie przewozów z wykorzystaniem ekologicznego transportu*, Szczecin 2005 (materiały z IV Konferencji Naukowej – Porty Morskie 2004).
5. Blaik P., *Koncepcja zintegrowanego zarządzania*, Warszawa 2010.

6. Ward T., *Terminal Operating System Selection*, Port Technology International 58 Edition, <http://www.porttechnology.org/> [dostęp: 10.10.2016].
7. Godniak M., *Technologia Radio Frequency Identification w zastosowaniach komercyjnych*, „Roczniki Informatyki Stosowanej Politechniki Szczecińskiej” 2004, nr 6.
8. Finkenzeller K., *RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification*, John Wiley & Sons Ltd., Chichester 2010.

## MOBILE TERMINAL OPERATIONS MANAGEMENT SYSTEM

**Abstract:** *The paper presents the mobile part of the system supporting the work of container terminal. Presented an application is an extension of the created system type TOS. It works on tablets mounted on machines working at container terminals. Moreover proposed a supplement mobile system for automatic reading of data stored in RFID tags.*



## TRAFNOŚĆ WYDATKÓW BUDŻETOWYCH NA TURYSTYCZNY SYSTEM INFORMATYCZNY

*Z uwagi na swoją specyfikę projekt informatyczny, którego celem jest dostarczenie nowego systemu oprogramowania, wymaga dużego doświadczenia i specjalistycznej wiedzy wszystkich udziałowców. W wielu projektach informatyzacji sfery publicznej obserwuje się brak gruntownej fazy feasibility study z analizą gotowych rozwiązań na rynku. Prowadzi to w rezultacie do nieracjonalnych wydatków budżetowych. Zjawisko to doskonale widać w ostatnich latach na przykładzie komputerowego systemu informacji turystycznej. Każde z województw na własną rękę tworzy nowe, unikalne rozwiązania, ignorując istniejące, już wdrożone. Zazwyczaj w założeniach projektowych nie wspomina się także o kosztach rozwoju i utrzymania oprogramowania.*

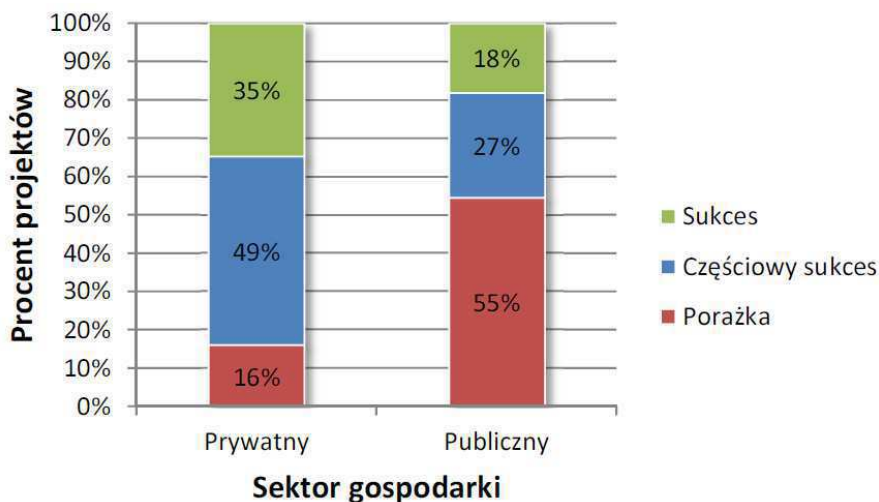
*Podstawy inżynierii oprogramowania zakładają, by przed przystąpieniem do tworzenia nowego rozwiązania programowego zrobić analizę istniejących gotowych systemów i sprawdzić, na ile one pokrywają zapotrzebowanie i czy nabycie ich nie jest tańszym rozwiązaniem. W ramach badań dokonano analizy podstawowych dokumentów przetargowych (specyfikacji istotnych warunków zamówienia — SIWZ) systemów informacji turystycznej. Studium dokumentów prowadzi do zbieżnych oczekiwań funkcjonalnych zamawianego systemu oraz jego architektury, co sugeruje, że tworzenie jednego wspólnego systemu informacji o regionie, unikalnego w zakresie danych przy zachowaniu identycznej funkcjonalności jest możliwe. W artykule zaproponowano jego koncepcję. Prawidłowy dobór koncepcji rozwiązania przekłada się z kolei na koszty wytwarzania i rozwoju, co wpływa na trafność wydatków budżetowych.*

### Wprowadzenie

Od zarania dziejów technologiczne innowacje nieodłącznie towarzyszyły człowiekowi w jego działalności gospodarczej. Można rzec, że były one wręcz siłą napędową biznesu. Wdrażanie technologicznej innowacji miało i ma na celu osiągnięcie korzyści. Można je określić jako korzystną zmianę technologiczną i współgrającą z nią korzystną zmianę biznesową. Fascynacja techniką i nowinkami technologicznymi choć może wystąpić, to nie jest kluczową determinantą decyzji inwestycyjnej właściciela biznesu. Każda nietrafiona inwestycja jest jego stratą, a jako taka ujemnie wpływa na jego kondycję finansową. W skrajnym przypadku może nawet doprowadzić go do bankructwa. Zatem aby uniknąć ryzyka, zanim inwestor zaangażuje swoje środki finansowe, przeprowadza się *feasibility study*, czyli studium możliwości. W ramach tego etapu przedinwestycyjnego dokonuje się analizy możliwych rozwiązań oraz poszukuje tych propozycji, które mieszczą się w finansowych, technicznych i innych ograniczeniach funkcjonujących w danym kraju czy regionie [1].

Od ćwierćwiecza technologiczne innowacje w biznesie utożsamia się z systemem komputerowym. W ostatnich latach w Polsce obserwuje się wielką hossę projektów informatycznych finansowanych z funduszy europejskich. Łatwość uzyskania środków wyzwała lawinę mniej lub bardziej racjonalnych zapotrzebowań na nowatorskie rozwiązania tytułowane hasłem „informatyzacja”. Najczęściej proceder ten jest związany z wdrożeniem nowego, często dedykowanego systemu informatycznego. Samo wdrożenie, późniejsza eksploatacja, a przede wszystkim uprzednia implementacja i projekt, stanowią ogromne wyzwanie dla inwestorów. Z uwagi na swoją specyfikę projekt informatyczny, którego celem jest dostarczenie nowego systemu oprogramowania, wymaga dużego doświadczenia i specjalistycznej wiedzy wszystkich udziałowców.

Powyższych wątpliwości zdają się nie dostrzegać sektory finansowane z pieniędzy publicznych, szczególnie administracja publiczną i samorządowa. Nieudolność w zarządzaniu publicznym pieniądzem najbardziej obrazowo prezentuje wykres przedstawiony na rysunku 1 – wynik badań Dabińskiego i Grzesiaka [2].



**Rysunek 1.** Sektor publiczny i prywatny a rezultat finalny projektów informatycznych

Źródło: A. Dabiński, M. Grzesiak, *Raport z polskiego badania projektów IT 2010*, Wrocław, 2011.

O ile w sektorze prywatnym średnio 35% projektów kończy się pełnym sukcesem, a 49% częściowym, czyli ulega zmianie w trakcie realizacji, to w sektorze publicznym oba wyniki są o połowę mniejsze. Ponadto ponad połowa wszystkich zawieranych kontraktów (55%) w sektorze publicznym kończy się kompletną porażką, czyli w ogóle nie jest osiągnany żaden rezultat pierwotnie zakładany.

Potwierdzeniem łatwości w wydawaniu budżetowego pieniądza i braku ponoszenia konsekwencji niekompetentnych decyzji są projekty spisane na straty. Media nie donoszą o odszkodowaniach lub utracach stanowisk z tytułu niefrasobliwych decyzji w obszarze systemów informatycznych. Nieformalna lista porażek systemów dla polskiej administracji publicznej i samorządowej jest bardzo długa

i ciągle aktualizowana. Listę otwiera niechlubny projekt Poltax systemu podatkowego dla Ministerstwa Finansów realizowany przez francuską firmę Bull, który miał być wdrażany wraz z reformą systemu podatkowego z 1991 r. „Umowa została podpisana 10 lipca 1990 r. Jej wartość wynosi około 30 mln USD. Jest to duże zamówienie, gdyż dotychczasowe obroty firmy w Polsce były rzędu 3-4 mln USD rocznie. W myśl zawartego kontraktu Grupa Bull zainstaluje zdecentralizowane systemy komputerowe w Ministerstwie Finansów i we wszystkich 367 Izbach Skarbowych w całej Polsce. W skład kontraktu wchodzi przygotowanie oprogramowania uwzględniającego polskie przepisy podatkowe i szkolenie personelu” [3]. Niestety, poza sprzętem ostatecznie firma Bull nie dostarczyła systemu podatkowego, a zawirowania wokół jego wytworzenia ciągnęły się latami. Najwyższa Izba Kontroli w 2003 r. zarzucała zleceniodawcy – Ministerstwu Finansów – brak kontroli wydatków do tego stopnia, że nie można było nawet ustalić ostatecznej kwoty wydanej na komputeryzację resortu [4].

Z ostatnich doniesień można odnotować jako porażkę ogłoszoną w lutym 2015 r. przez dolnośląski urząd marszałkowski decyzję o rezygnacji z projektu platformy informacyjnej e-DolnySlask, choć przy zawieraniu kontraktu w 2013 r. nastroje były optymistyczne. „Opiewający na blisko 65 mln złotych kontrakt z firmą Qumak obejmuje wykonanie, uruchomienie, promocję oraz nadzór nad platformą do końca 2019 roku. Portal powstanie w ciągu 18 miesięcy, a jego budowa współfinansowana jest w 85% przez Unię Europejską. Pozostałą kwotę pokryje budżet samorządu województwa dolnośląskiego” [5] – twierdził ówczesny wicemarszałek Jerzy Łuźniak. Platforma informacyjna miała dostarczać kompleksowych i aktualnych informacji o regionie oraz przyczynić się do jego promocji zarówno pod względem biznesowym, jak i turystycznym. Być może bardzo kosztowny projekt e-DolnySlask można by uznać po prostu za jedną z wielu nieudanych propozycji potwierdzających niechlubną statystykę, gdyby nie fakt, że projekt o zadanym temacie nie był ani pierwszy, ani jedyny w skali kraju w ostatnich latach.

## **1. Badanie wokół systemów informacji turystycznej o regionie**

Niezależnie od siebie na przestrzeni kilku ostatnich lat urzędy wojewódzkie lub marszałkowskie ogłaszały przetargi na systemy informacji turystycznej, nie bacząc na istniejące rozwiązania zrealizowane w innym województwie. W tabeli 1 zamieszczono niektóre z tych projektów, te które poddano badaniu. W zestawieniu starano się zdefiniować projekt przez oficjalną nazwę projektu, całkowitą wycenę w PLN, rok rozpoczęcia oraz źródło informacji.

Niektóre projekty zostały ukończone, np. dla województwa pomorskiego czy śląskiego. Inne są w toku realizacji, np. dla województwa zachodniopomorskiego, czy zerwane, np. dla województwa dolnośląskiego. Lista projektów systemów informacji turystycznej dla regionu jest pogładowa i nie wyczerpuje wszystkich przypadków województw. Studium dokumentów z ich postępowań przetargowych

jest wystarczające, by dać obraz wyraźnej zbieżności zachowań, trendów i decyzji. Jako dopełnienie mogą posłużyć informacje z portali już stworzonych.

**Tabela 1.** Przykładowe projekty systemów informacji turystycznej regionie

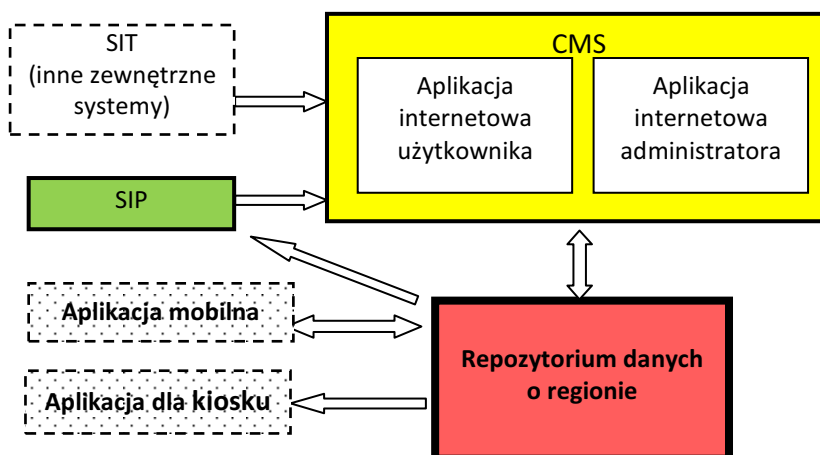
Nazwa systemu	Wartość projektu w PLN	Rok	www info (data odczytu: marzec/kwiecień 2015)
System Informacji Turystycznej w Wielkopolsce	1 554 423,99	2011	<a href="http://www.mapadotacji.gov.pl/projekt/1157651">http://www.mapadotacji.gov.pl/projekt/1157651</a>
Małopolski System Informacji Turystycznej	1 710 177,88	2011	<a href="https://www.bip.krakow.pl/?dok_id=29591">https://www.bip.krakow.pl/?dok_id=29591</a>
Zintegrowany System Informacji Turystycznej Województwa Pomorskiego	12 899 260,70	2012	<a href="http://www.gdansk.pl/ue,1216,17081.html">http://www.gdansk.pl/ue,1216,17081.html</a>
Portal turystyczny Warmia i Mazury	1 733 739,84	2012	<a href="http://bip.warmia.mazury.pl/morag_gmina_miejaska/171/918/Projekt_Modernizacja_i_rozbudowa_regionalnego_systemu_informacji_turystycznej_RPO_Warmia_i_Mazury_na_lata_2007-2013/">http://bip.warmia.mazury.pl/morag_gmina_miejaska/171/918/Projekt_Modernizacja_i_rozbudowa_regionalnego_systemu_informacji_turystycznej_RPO_Warmia_i_Mazury_na_lata_2007-2013/</a>
Śląski System Informacji Turystycznej	14 530 000,00	2013	<a href="http://www.aktualnosciturystyczne.pl/slaskie/lski-system-informacji-turystycznej">http://www.aktualnosciturystyczne.pl/slaskie/lski-system-informacji-turystycznej</a>
Platforma e-DolnySlask	65 928 000,00	2013	<a href="http://bip.umwd.dolnyslask.pl/dokument.php?iddok=18162&amp;idmp=12&amp;r=r">http://bip.umwd.dolnyslask.pl/dokument.php?iddok=18162&amp;idmp=12&amp;r=r</a>
e-Turystyka wraz z Systemem Informacji Przestrzennej (SIP) dla województwa zachodniopomorskiego	5 338 200,00	2014	<a href="http://bip.rbip.wzp.pl/artukul/11032014-rwynik-postepowania-na-uslugi-budowy-wdrozenia-i-dostosowania-systemow">http://bip.rbip.wzp.pl/artukul/11032014-rwynik-postepowania-na-uslugi-budowy-wdrozenia-i-dostosowania-systemow</a>

Źródło: opracowanie własne.

Zamówienie na każdy z systemów realizowane było poprzez przetarg publiczny. Każde posiada analogiczną do pozostałych strukturę dokumentów przetargowych. Przedmiot zamówienia określano w dokumencie „Specyfikacja istotnych warunków zamówienia” (SIWZ), a szczegóły w załącznikach. Zazwyczaj w pierwszym załączniku znajduje się analiza przedwstępna tworzonego rozwiązania. Dodatkowy dokument: „Informacja o wyborze najkorzystniejszej oferty” wskazuje wykonawcę oraz wartość kontraktu. Zawsze przedmiotem zamówienia jest portal wiedzy o regionie z treściami turystyczno-informacyjnymi. Opcjonalnie najczęściej jego uzupełnieniem są aplikacje mobilne czy kioski internetowe. Oczywiście dodatkowym uzupełnieniem kontraktu są szkolenia, wdrożenia czy sprzęt. Te aspekty projektu w niniejszych rozważaniach zostają pominięte, gdyż mają one sens tylko w kontekście wytworzonego oprogramowania, które jest istotą całego projektu. Przedwstępna analiza udostępniona w procesie przetargowym zawiera zdefiniowane *a priori* ogólne założenia funkcjonalne oraz architektoniczne. Wśród nich określa się jako obligatoryjne zarządzanie regionalną informacją o kulturze, zabytkach, dziedzictwie kulturowym regionu, noclegach, lokalach gastronomicznych, handlowych, szlakach, innych atrakcjach turystycznych, wydarzeniach czy rekreacji. Oczywiście wymienia się też podkłady mapowe czy planer podróży, elementy systemu informacji przestrzennej (SIP) czy informacji o lokalnym transporcie (SIT). Wśród oferentów zainteresowanych przetargami pojawiają się często te same

firmy: Qumak, Sprint, Comarch, Bull (okryta niechlubną chwałą w projekcie Poltax), generalnie duże firmy branży IT.

Niektóre portale turystyczne, które zdążyły powstać w ramach projektów – np. dla województwa pomorskiego (pomorskie.travel), śląskiego (slaskie.travel), mazowieckiego (mazowsze.travel) – zawierają podobny zestaw funkcjonalny, mają podobny design, mimo że wykonawcami były różne firmy i tworzone były w różnym czasie. Zatem tym, co znacząco dywersyfikuje zamawiane systemy oprogramowania, są treści, czyli dane. To dane o regionie różnicują w stopniu zasadniczym omawiane projekty, natomiast funkcjonalności oprogramowania są zbieżne i przypominają konstrukcją systemy zarządzania treścią (CMS, *Content Management System*) współpracujące z SIP oraz opcjonalnie uzupełnione przez aplikacje mobilne lub kioskowe. Można to wyrazić ogólnym modelem jak na poniższym schemacie (rys. 2).



Rysunek 2. Model konceptualny systemu obsługi informacji turystycznej  
Źródło: opracowanie własne.

Sercem rozwiązania jest centralna baza danych o regionie. Korzystają z niej aplikacje webowe i mobilne, a z nimi kooperują systemy informacji przestrzennej (mapowe) i inne zewnętrzne systemy, np. informacji o transporcie.

Celem powyższego rozważania nie jest dogłębna analiza kosztów, czasu, sprawności realizacji projektu czy dokładne studium porównawcze funkcjonalności informatycznych systemów obsługi informacji o regionie, ale rozważanie nad samym sensem uruchamiania tego typu projektów informatycznych finansowanych z budżetu państwa i Unii Europejskiej. Za każdym z tych projektów stoją przecież jakieś przedwstępne analizy, a zatem już jakieś wydatki. Za każdą z mniej lub bardziej solidnych faz *feasibility study* kryje się decyzja o uruchomieniu nowego projektu, którego główną istotą jest stworzenie nowego systemu oprogramowania wypełnionego treściami turystycznymi i informacyjnymi o regionie, a nie wdrożenie gotowego.

## 2. Systemy dedykowane a systemy gotowe

Podstawy inżynierii oprogramowania zakładają, by przed przystąpieniem do tworzenia nowego rozwiązania programowego zrobić analizę istniejących gotowych rozwiązań i sprawdzić, na ile one pokrywają generowane zapotrzebowanie i czy nabycie ich nie jest tańszym rozwiązaniem. Turysta czy mieszkaniec przeszukujący zasoby systemu w poszukiwaniu pożądanej informacji nie zmienia swoich upodobań w sferze funkcjonalności oprogramowania w zależności od regionu, gdzie przebywa, i na granicy województw nie przechodzi „resetu mózgu”, generując nowe oczekiwania.

Dlaczego więc we wszystkich projektach znajdujemy nie tylko wspólny mianownik, którym jest system oprogramowania o zbieżnej funkcjonalności, ale i założenie o tworzeniu kompletnie nowego oprogramowania dedykowanego danemu województwu (mowa o projektach, których decydentami są urzędy wojewódzkie lub marszałkowskie), skoro istnieje przesunięcie czasowe i projekty nie startowały równocześnie oraz istnieje nadzór centralny w różnych ministerstwach oraz instytucjach związanych z turystyką?

W najbardziej typowym i powszechnym cyklu życia systemu (najczęściej niedookreślonym w powyższych postępowaniach przetargowych i pozostawionym w sferze konsultacji z konkretnym wykonawcą, a zatem objętych już tajemnicą biznesową) występują fazy wzajemnie po sobie następujące na wzór kaskady. Te fazy układają się w ciąg: analiza – projektowanie – kodowanie – testowanie – wdrożenie – pielęgnacja i utrzymywanie. Przy czym najbardziej czasochłonna, newralgiczna dla powodzenia całości, kosztowna, ryzykowna, jest faza wytwarzania, czyli projektowania i implementacji oraz testowania i poprawiania nowego oprogramowania. Zastosowanie gotowego rozwiązania „z półki” (COTS, *commercial off-the-shelf*) w sposób znaczący skraca czas, redukuje koszty i ryzyko niepowodzenia, które maleje wraz z rosnącym podobieństwem do wzoru oczekiwań zamawiającego. Kosztowne systemy dedykowane na zamówienie tworzy się, gdy dziedziny problemowe nie mają pokrycia w systemach oprogramowania dostępnych na rynku lub te są nieporównywalnie drogie w stosunku do ich wytworzenia. Każda eliminacja zadań poprzez adopcję rezultatów osiągniętych w innych projektach, rozwiązaniach uprzednich do bieżącego, skraca czas, a tym samym redukuje nakłady finansowe ponoszone na poczet bieżącego projektu. W związku z tym realizacja projektu polegającego na wdrożeniu systemu oprogramowania staje się mniej czaso- i kosztochłonna niż projekty, których celem jest wytworzenie i wdrożenie nowego systemu oprogramowania.

Dobrze ilustruje tę tęzę przykład rozwoju systemów wspomagających zarządzanie firmą. Około 25 lat temu, gdy zaczynał się ich rynek, były tworzone na zamówienie przez firmy, które mogły sobie finansowo na nie pozwolić poprzez zlecenie zadania na outsourcing lub zatrudnianie własnej kadry deweloperskiej. Obecnie firmy korzystają z gotowych rozwiązań firm informatycznych, które utrzymują się ze sprzedaży systemów zarządzania firmą i ich polis serwisowych.

Redukuje to koszty wytwarzania ponoszone przez nabywcę oprogramowania, a także widziane z jego perspektywy koszty utrzymania i rozwoju kodu, które w całości pokrywa wytwórca. Ten z kolei, dzięki małym a regularnym przychodom może skupić się na rozwoju i doskonaleniu produktu programowego bądź dostosowywaniu go do nieustannie ewoluujących środowisk wytwarzania oprogramowania i warstw pośrednich między hardware'em a software'em użytkowym.

Systemy oprogramowania są jednymi z najbardziej skomplikowanych i dynamicznie zmieniających się narzędzi wspomagających człowieka w jego różnorodnej działalności. Ponadto po ich wytworzeniu i dostarczeniu użytkownikowi końcowemu nie kończy się proces ich rozwoju. Zmiana nie musi być generowana przez konsumenta systemu, ale może być wymuszona zmianą sprzętu i oprogramowania warstw pośrednich. Zatem każdy złożony funkcjonalnie system oprogramowania zawsze wymagać będzie pielęgnacji i utrzymania, co kosztuje. Jak bardzo drogo, można się przekonać na przykładzie systemu informatycznego funkcjonującego w Zakładzie Ubezpieczeń Społecznych (ZUS). „[...] prezes ZUS Zbigniew Derdziuk poinformował o sumie rocznego utrzymania informatycznego systemu ZUS, kwota to bagatela 800 mln złotych. Wynika z tego, że każda sekunda pracy systemu informatycznego ZUS kosztuje podatnika 25 zł, natomiast jedna godzina to już kwota 90 tys. złotych” [6].

Zatem wymieniona zmiana systemów oprogramowania jest stałym czynnikiem, który trzeba przewidzieć *a priori*, podejmowanej decyzji o tworzeniu nowego systemu. Wiedzą o tym aż za dobrze firmy, które dawniej jako anioły biznesu IT finansowały tworzenie systemów wspomagających ich działalność, a dziś lokują się na listach klientów firm informatycznych tworzących rozwiązania „z półki”. Oczywiście jest, że nie zawsze gotowe rozwiązanie pokrywa w całości procesy danej firmy przeznaczone do wsparcia programowego. Nic nie stoi na przeszkodzie na dodaniu jakiegoś dedykowanego modułu, o ile klient jest gotów za to zapłacić, a wykonawca widzi sens w jego dalszym utrzymaniu, bo będzie musiał gwarantować jego żywotność przy każdej zmianie wersji swojego głównego systemu. Uzyskuje się wówczas rozwiązanie hybrydowe: standardowe, duże jądro systemu plus dedykowany podsystem. Wyczerpanie obu postępowań: adopcja gotowego rozwiązania oraz wdrażanie gotowego z częściową modernizacją dedykowaną powinno poprzedzić trzecie podejście – tworzenie zupełnie nowego dedykowanego rozwiązania programowego, którego tworzenie jest ostatecznością.

## Podsumowanie

Studium przedinwestycyjne z analizą korzyści pomiędzy systemem gotowym a nowo tworzonym nie jest czymś oczywistym dla decydentów wspomnianych projektów współfinansowanych przez Unię Europejską z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego na lata 2007-2013. Grupa owych podmiotów władna

podejmować decyzję w kontekście projektów informatycznych dla Polskiego Systemu Informacji Turystycznej jest liczna. Tworzą ją:

- Polska Organizacja Turystyczna (POT), jej regionalne oddziały (ROT) i lokalne organizacje turystyczne (LOT),
- samorząd gospodarczy: gminny, powiatowy i wojewódzki,
- administracja publiczna, ministrowie: sportu i turystyki, administracji i cyfryzacji, kultury i ochrony dziedzictwa narodowego, finansów, infrastruktury, gospodarki, spraw zagranicznych, ochrony środowiska,
- inne instytucje: Forum Informacji Turystycznej, Polska Agencja Rozwoju Turystyki S.A. (PART S.A.), Związek Miast Polskich, Związek Gmin Wiejskich Rzeczypospolitej Polskiej, Związek Województw Rzeczypospolitej Polskiej, Związek Powiatów Polskich [7].

Niestety, wyżej wymienione organizacje nie widzą problemu w dublowaniu rozwiązań programowych i niewłaściwym wydatkowaniu z budżetu państwa. Pojawiają się dwie wątpliwe kwestie:

- Czy organizacja turystyki w każdym województwie działa inaczej i wymaga innego systemu informatycznego?
- Czy zamawiane nowe systemy są/były potrzebne i komu, skoro 18 maja 2005 r. na łamach kujawsko-pomorskiego Biuletynu Informacji Publicznej Czarnecki stwierdza: „Internetowy system informacji turystycznej w skrócie ISIT jest systemem pełniącym funkcję ogólnopolskiej informacji turystycznej. Został stworzony przez Polską Organizację Turystyczną i dziś funkcjonuje pod adresem internetowym: [www.poland-tourism.pl](http://www.poland-tourism.pl). W ramach systemu funkcjonują wszystkie województwa w Polsce” [8].

Takie pytania są retoryczne dla inżynierów oprogramowania. Analiza dokumentów przetargowych, a szczególnie SIWZ wspomnianych projektów, prowadzi do zbieżnych wymagań na oczekiwany system oprogramowania. Racjonalnym zatem byłoby zintegrowanie wysiłków i stworzenie jednego, dwóch, pilotażowych rozwiązań, a następnie „sklonowanie” ich dla pozostałych województw, czyli postępowanie takie jak przy wdrożeniu jednego systemu zarządzania firmą w korporacji. Tym bardziej że dla osób z branży IT nie jest tajemnicą, że często za wysoko bezzasadnie wycenionymi projektami software’owymi stoją całkiem małe zespoły projektowe lub małe firmy zatrudnione na outsourcingu, zaś duże pieniądze trafiają do dużych podmiotów, które są stroną w umowie.

Negatywnym aspektem systemów tworzonych dla każdego regionu osobno jest trudność w promocji takich produktów w porównaniu z jednym systemem zintegrowanym, co przekłada się na promocję Polski w ogóle. Pierwszym zwiastunem tego braku jest zignorowanie sukcesu młodych obywateli. W 2014 r. polski komputerowy system informacji turystycznej został uhonorowany II miejscem za innowacje w turystyce w X konkursie o nagrodę Ulysses organizowanym przez Światową Organizację Turystyki (UNWTO, *United Nations World Tourism Organization*). Twórcami systemu informacji turystycznej wdrożonego w województwie pomorskim są absolwenci Instytutu Informatyki Stosowanej



im. Krzysztofa Brzeskiego Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej w Elblągu, tworzący własną firmę Vene Studio, podwykonawcy firmy Sprint [9].

Choć problem nieracjonalnych wydatków i realizacji projektów software'owych dofinansowanych z funduszy europejskich został przedstawiony na przykładzie sektora turystycznego, nie znaczy to, że w innych obszarach problem nie jest aktualny. Turystyka to ważna i ciągle rozwijająca się gałąź gospodarki, a system informatyczny jest tu istotnym czynnikiem rozwoju społeczeństwa informacyjnego. Z pewnością każdy racjonalnie myślący, kto miałby wydać pieniądze zgodnie z logiką, więcej uwagi i dbałości poświęciłby swoim decyzjom już w fazie *feasibility study*, która „musi dostarczyć wszelkich danych niezbędnych do podjęcia decyzji inwestycyjnej. Wszelkie handlowe, techniczne, finansowe, ekonomiczne [...] uwarunkowania projektu inwestycyjnego muszą być w nim określone i krytycznie przeanalizowane na podstawie oceny wariantów dokonanej we wstępnym studium przedrealizacyjnym” [10]. Rzetelne przeprowadzenie takiego studium gwarantuje bardziej racjonalne decyzje w sferze wytwarzania, wdrażania systemów informatycznych finansowanych z wydatków publicznych, co w konsekwencji przekłada się na zmniejszenie deficytu budżetu państwa. Każde takie studium przedinwestycyjne powinno obowiązkowo wymuszać sprawdzenie i ocenę:

- istniejących gotowych analogicznych rozwiązań programowych,
- adopcji i modyfikacji gotowych rozwiązań adekwatnie do potrzeb,
- nakłady i koszty utrzymania nowo tworzonych systemów oprogramowania w perspektywie co najmniej kilku lat.

W ramach dalszych badań wskazane jest przestudiowanie problemu tworzenia komputerowych systemów informacji turystycznej finansowanych z pieniędzy publicznych w innych państwach oraz dalsza obserwacja rynku krajowego, zarówno pod kątem rozwoju istniejących, pojawiania się nowych, jak i uruchamiania zintegrowanych projektów w skali kraju. Istnienie takich systemów jest kluczem rozwoju globalnego przemysłu turystycznego, gdyż przy obecnej technologii konsument chce szybko, samodzielnie, bezpośrednio dotrzeć do oferenta usługi turystycznej bez pośredników.

## Literatura

1. Komisja Europejska, Dyrekcja Generalna ds. Polityki Regionalnej, *Przewodnik do analizy kosztów i korzyści projektów inwestycyjnych*, 2008.
2. Dabiński A., Grzesiak M., *Raport z polskiego badania projektów IT 2010*, Wrocław 2011.
3. *Kontrakt w Polsce*, ComputerWorld, <http://www.computerworld.pl/artykuly/45560/Kontrakt.w.Polsce.html> [dostęp: 15.04.2015].
4. Skwirowski P., *POLTAX pod lupą NIK*, „Gazeta Wyborcza” nr z 08.04.2003, <http://wyborcza.pl/1,75248,1416979.html> [dostęp: 15.04.2015].

5. Matejuk T., *Marszałek wyda 65 mln złotych na portal o regionie. Eksperci: to astronomiczna kwota*, <http://www.tuwroclaw.com/wiadomosci,marszalek-wyda-65-mln-zlotych-na-portal-o-regionie-ekspceri-to-astronomiczna-kwota,wia5-3266-16692.html> [dostęp: 15.04.2015].
6. <http://www.dziennikzachodni.pl/artykul/901705,zus-drozszy-niz-marsjanska-sonda-roczne-utrzymanie-komputerow-kosztuje-800-mln-zlotych,id,t.html>, „Dziennik Zachodni” nr z 24.05.2013 [dostęp: 15.03.2015].
7. *Polski system informacji turystycznej*, red. M. Bucholz, Polska Organizacja Turystyczna, Warszawa 2010.
8. Czarnecki W., *Internetowy System Informacji Turystycznej*, [http://bip.kujawskopomorskie.pl/index.php?option=com\\_content&task=view&id=344](http://bip.kujawskopomorskie.pl/index.php?option=com_content&task=view&id=344) [dostęp: 01.04.2015].
9. <http://www.msport.gov.pl/article/wojewodztwo-pomorskie-wyroznione-przez-swiatowa-organizacje-turystyki> [dostęp: 15.10.2014].
10. Behrens W., Hawranek P.M., *Poradnik przygotowania przemysłowych studiów feasibility*, United Nations Industrial Development Organization, Warszawa 1993.

## APPROPRIATENESS OF TOURISM COMPUTER SYSTEM EXPENDITURE

**Abstract:** *To avoid the methodical feasibility study including the analysis of the ready-made solutions in the market of IT system projects leads to irrational public expenditure. In recent years it can be observe in tourism information systems. Each province creates a new, unique solution ignoring the ready, already implemented system and the cost of maintenance and development software.*

*Fundamentals of software engineering assume that to do an analysis of the existing ready-made systems and see how it fulfills demands and whether its acquisition is a cheaper option before a new software sytem project starting is obligatory.*

*The basic offered SIWZ documents of ordered tourist information systems were analysed. Study documents leads to common functional expectations of the ordered system and its architecture. It suggests to do the common region information management software system, unique in data but united in functions. In this article its conceptual idea is proposed. The proper concept of software and project affects the costs of the system production and development and in the result ensures the accuracy budget expenditure.*

**Część II**

**NAUKI  
PRZYRODNICZO-TECHNICZNE**



Piotr Korzeniowski  
Marek Wesołowski  
Jan Grzybowski

## BADANIA EKSPERYMENTALNE JEDNOPRZĘŚŁOWYCH PŁYT BETONOWYCH ZBROJONYCH SIATKAMI KOMPOZYTOWYMI Z WŁÓKNA BAZALTOWEGO

*W pracy przedstawiono wyniki badań jednoprzęsłowych płyt betonowych, w których zamiast siatek stalowych zastosowano siatki kompozytowe z włókna bazaltowego. Ideą przewodnią było poszukiwanie alternatywnego zbrojenia niemetalicznego dla takich konstrukcji z betonu, gdzie duża ich odkształcalność jest pożądana, np. w barierach drogowych. Uzyskane wyniki badań doprowadziły do wniosku, że zastosowane siatki bazaltowe miały stosunkowo niewielki wpływ na nośność elementów, jednak przy zagwarantowaniu ich dostatecznego przekroju pozwalały na dużą odkształcalność badanych płyt. Stwierdzona odkształcalność płyt z silniejszym zbrojeniem wskazuje na możliwość ich zastosowania jako płyt fasad budynków lub nawet barier ochronnych pod warunkiem potwierdzenia ich przydatności w testach dynamicznych. Dodatkowym warunkiem jest stosowanie siatek bazaltowych o znacznie większej wytrzymałości niż przyjęte w opisywanych badaniach.*

### Wprowadzenie

W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych ośmiu cienkich płyt betonowych zbrojonych siatkami polimerowymi z użyciem włókien bazaltowych, nazywanych dalej siatkami bazaltowymi. Badania te wykonano na Politechnice Gdańskiej w ramach projektu badawczego „Innowacyjne środki i efektywne metody poprawy bezpieczeństwa i trwałości obiektów budowlanych i infrastruktury transportowej w strategii zrównoważonego rozwoju”. Były one poprzedzone innymi badaniami prowadzonymi w ramach tego projektu, m.in. zginanych płyt betonowych, jedno- i dwuprzęsłowych, zbrojonych prętami z kompozytu bazaltowego [1]. Zaobserwowano wtedy znaczne ugięcia badanych płyt sięgające nawet, w przypadku płyt jednoprzęsłowych, 1/15 ich rozpiętości. Ugięcia te w znacznym stopniu miały sprężysty charakter. Tak duże ugięcia były skutkiem niskiego modułu sprężystości prętów z włókna bazaltowego (nominalnie według producenta 90 GPa, na podstawie badań eksperymentalnych 30-40 GPa), kilkakrotnie mniejszego niż dla stali. W związku z małym modułem sprężystości prętów z włókna bazaltowego i jednocześnie dużą wytrzymałością na rozciąganie zastosowanie ich jako prostej alternatywy dla prętów stalowych jest niemożliwe, ponieważ spełnienie warunków użyteczności (ugięć) wymagałoby znacznego

przebrożenia tych elementów w celu zwiększenia ich sztywności, a to z kolei byłoby nieekonomiczne. Bazując na wynikach dotychczasowych badań, autorzy postanowili sprawdzić, czy wspomniana wada elementów betonowych ze zbrojeniem polimerowym może być wykorzystana tam, gdzie duża odkształcalność jest pożądana, a więc w elementach barier drogowych czy w płytach fasad budynków. W tego typu elementach duża ich odkształcalność mogłaby służyć wytracaniu energii uderzenia pojazdu lub oddziaływania wiatru. Opisane w niniejszym artykule badania miały na celu sprawdzenie możliwości praktycznego wykorzystania dużej odkształcalności cienkich płyt betonowych zbrojonych siatkami bazaltowymi. Oczywiście tego typu elementy byłyby poddawane głównie oddziaływaniom dynamicznym, w pierwszej jednak fazie badań postanowiono poznać ich zachowanie się pod obciążeniem statycznym. Niewątpliwą zaletą cienkich płyt betonowych zbrojonych siatkami bazaltowymi jest przy tym ich duża odporność na korozję, zwłaszcza w agresywnym środowisku, co w przypadku cienkich płyt jest szczególnie ważne.

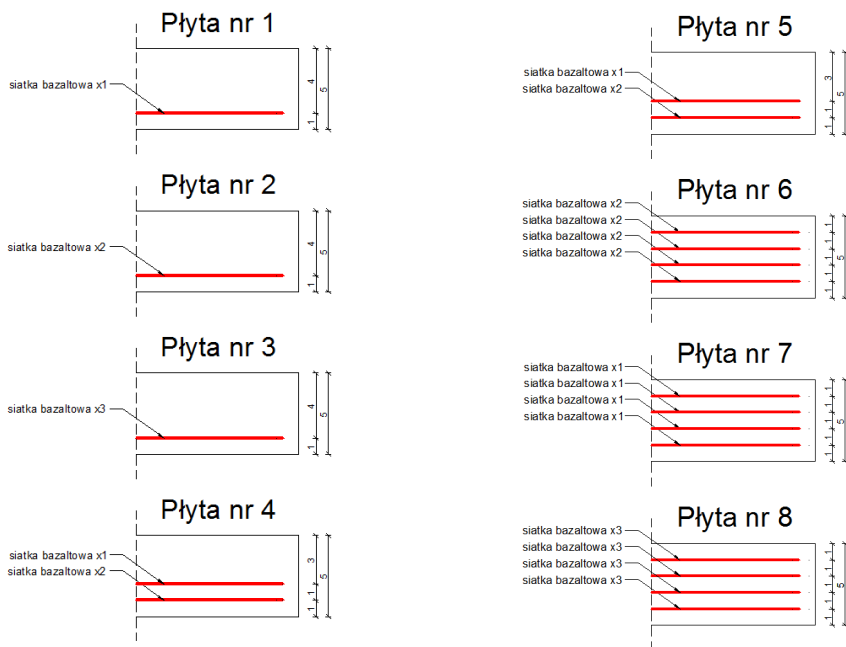
## 1. Program badań eksperymentalnych

### 1.1. Opis płyt i stanowiska badawczego

W pierwszej serii wykonano cztery płyty o wymiarach 1500 mm × 800 mm × 50 mm, które różniły się liczbą i rozmieszczeniem siatek bazaltowych (rys. 1). Drugą serię składającą się także z czterech elementów badawczych o takiej samej geometrii jak poprzednie, lecz odmiennym typie zbrojenia siatkami (rys. 1), wykonano w terminie późniejszym i zbadano na tym samym stanowisku badawczym.

Wszystkie płyty zbadano w schemacie elementów jednoprzęsłowych, swobodnie podpartych, poddanych statycznym obciążeniom doraźnym. Przyjęto obciążenie w postaci jednej siły skupionej, umieszczonej w środku rozpiętości przęsła, co zrealizowano w postaci przekazywania obciążeń z maszyny wytrzymałościowej za pomocą wałka stalowego o długości dostosowanej do nominalnej szerokości płyt, wynoszącej 800 mm. Przyjęto podparcie każdej z płyt w odległości 150 mm od jej czoła, w wyniku czego rozpiętość obliczeniowa wynosiła 1200 mm.

Do doraźnego obciążania statycznego elementów wykorzystano stacjonarne stanowisko badawcze, wyposażone w dwa niezależne siłowniki hydrauliczne o maksymalnej sile statycznej 500 kN każdy. Przykładowy widok stanowiska badawczego, podczas badania płyty nr 1 (pierwszej serii) oraz płyty nr 8 (drugiej serii), przedstawiono na fotografiach 1 i 2.



**Rysunek 1.** Schemat ułożenia siatek bazaltowych w elementach badawczych serii 1 (z lewej) oraz serii 2 (z prawej)

Źródło: opracowanie własne.



**Fotografia 1.** Płyta nr 1 na stanowisku badawczym

Źródło: opracowanie własne.



**Fotografia 2.** Płyta nr 8 na stanowisku badawczym  
Źródło: opracowanie własne.

## 1.2. Siatki zbrojeniowe

Do zbrojenia elementów obydwu serii badawczych zamówiono siatki kompozytowe z włókna bazaltowego, których charakterystyka według danych producenta odpowiadała typowi oznaczanemu jako SBP.50.50.30.30 (Siatka Budowlana Posadzkowa) o następującej charakterystyce:

- oczko siatki: 30 mm × 30 mm,
- masa:  $300 \pm 20$  g/m<sup>2</sup>,
- wytrzymałość na rozciąganie na wążku i osnowie: 50 kN/m,
- wydłużenie przy zerwaniu: 6,0%.

Według innych specyfikacji producenta powyższe siatki odpowiadały typowi alternatywnie oznaczonemu jako SKB.50.50.30.30 (Siatka Kompozytowa Budowlana), przy czym jedyną różnicą w stosunku do poprzedniego typu była ich zmniejszona wydłużalność, wynosząca 3,3%. W celu zweryfikowania parametrów siatek podawanych przez producenta przeprowadzono badania wytrzymałościowe 22 próbek, z czego połowę obciążano wzdłuż wążku, a pozostałe wzdłuż osnowy. Szerokość próbek wynosiła 100 mm, natomiast baza pomiarowa, za pomocą której mierzono moduł sprężystości, miała długość około 50 mm. Przykładano wstępne obciążenie równe 30 N, a następnie siatki były rozciągane z prędkością 20 mm/minutę. Uzyskano średni moduł sprężystości na poziomie 42 GPa na wążku i osnowie, a wytrzymałość na rozciąganie wynosiła: na osnowie 28 kN/m, na wążku 24 kN/m. Wartości te były równe odpowiednio 56% i 48% siły rozciągającej deklarowanej przez producenta.



### 1.3. Wykonywanie elementów badawczych

Płyty betonowano na podłożu ze sklejki budowlanej ułożonej na posadzce laboratorium. Na wstępie mocowano jedną warstwę listew do sklejki, a na jednej krawędzi przymocowano wszystkie siatki i listwy dla danej płyty. Betonowanie przeprowadzano etapami, w pozycji odwróconej, tzn. najpierw układano i zagęszczano warstwę betonu, później naciągano siatkę/siatki i za pomocą listew mocowano do pozostałych trzech krawędzi, a następnie dodawano kolejną warstwę betonu. W zależności od liczby warstw siatek powyższą procedurę powtarzano. Na fotografii 3 pokazano przykładowo jedną z płyt przed betonowaniem, w chwili ułożenia na niej siatek zbrojeniowych. Równoległe z betonowaniem płyt betonowano ciała kontrolne w postaci walców 15/30 cm w celu wyznaczenia wytrzymałości betonu na ściskanie oraz modułu sprężystości.



**Fotografia 3.** Jedna z płyt przed zabetonowaniem – widoczne listwy krawędziowe mocujące siatki bazaltowe

Źródło: opracowanie własne.

### 1.4. Przebieg badań

Zaplanowano obciążanie elementów poprzez sterowanie siłą statyczną o skoku co 0,50 kN, z sukcesywnymi pomiarami ugięć oraz odkształceń górnej i dolnej powierzchni badanych płyt. Do pomiaru ugięć użyto czujników zegarowych o dokładności 0,01 mm, natomiast do pomiaru odkształceń zastosowano ekstensometr mechaniczny o bazie pomiarowej wynoszącej 100 mm.

## 2. Wyniki badań eksperymentalnych

### 2.1. Seria nr 1

#### 2.1.1. Materiały

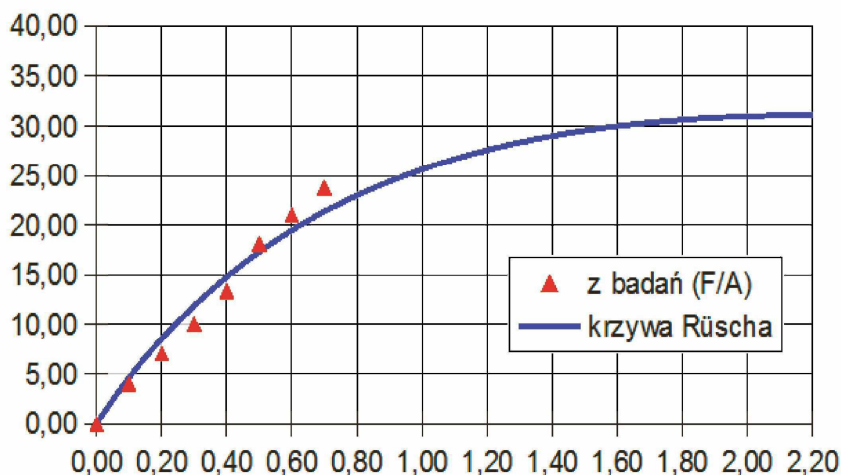
Parametry wytrzymałościowe betonu wyznaczono na podstawie sześciu próbek walcowych 150/300 mm, otrzymując średnią wytrzymałość na ściskanie wynoszącą 31,10 MPa (wyniki badań zestawiono w tab. 1). Na tej podstawie dokonano obliczenia wytrzymałości betonu na rozciąganie, która wyniosła 2,97 MPa.

**Tabela 1.** Wyniki badania wytrzymałości betonu

Oznaczenie próbki	F <sub>c</sub> [kN]	f <sub>c</sub> [MPa]
Walec 1	601,00	34,01
Walec 2	512,00	28,97
Walec 3	438,00	24,79
Walec 4	659,00	37,29
Walec 5	558,00	31,58
Walec 6	530,00	29,99
Wartość średnia	549,67	31,10

Źródło: opracowanie własne.

Moduł sprężystości wyznaczono doświadczalnie przy użyciu modułomierza z odczytem mechanicznym, na próbkach walcowych o wymiarach jak wyżej. Na podstawie średnich zależności  $\sigma$ - $\varepsilon$  z badanych walców betonowych można było wyznaczyć początkowy moduł sprężystości betonu, przyjmując aproksymację wyników eksperymentalnych krzywą Rüscha. Poszukiwano takiej wartości początkowego modułu sprężystości betonu, aby suma kwadratów z różnic między wyznaczonymi dla poszczególnych odkształceń naprężeniami ( $F/A$ ) a naprężeniami wyznaczonymi według krzywej Rüscha osiągnęła minimum. Założono przy tym, że odkształcenia towarzyszące maksymalnym naprężeniom przy niszczeniu próbki betonowej wynoszą 2,2‰. Według tej procedury uzyskano początkowy moduł sprężystości wynoszący 49,75 GPa. Graficzny obraz uzyskanych rezultatów badań przedstawiono na rysunku 2.



Rysunek 2. Wykres badania modułu sprężystości betonu serii nr 1  
Źródło: opracowanie własne.

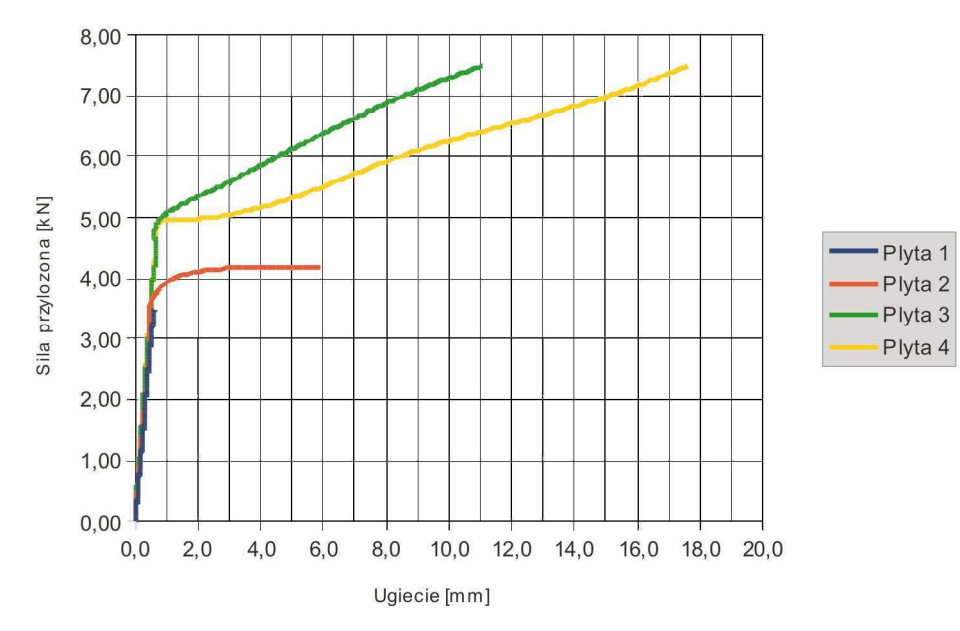
### 2.1.2. Przebieg badań

Wyniki pomiaru ugięć płyt w środku rozpiętości w funkcji siły obciążającej  $P$  przedstawiono na rysunku 3. Widoczne załamania wykresów siła – ugięcie pokrywają się z zaobserwowanymi momentami zarysowania płyt. W przypadku płyt nr 1 i 2 siła rysująca była niemalże równa sile niszczącej. Płyty nr 3 i 4 wykazały wzrost obciążenia po zarysowaniu o około 50%, natomiast maksymalne pomierzone ugięcie wynosiło 18 mm, tj. 1/70 rozpiętości.

Podobnego typu zależności stwierdzono również na wykresach odkształceń górnych i dolnych powierzchni poszczególnych płyt: w początkowej fazie, aż do zarysowania odkształcenia były niewielkie, oscylując wokół minimalnych wartości, a ich wahania mieściły się w granicach błędów pomiarowego ekstensometru.

Niszczenie wszystkich płyt miało miejsce wskutek powstania jednej rysy w środku rozpiętości (tylko dla płyty nr 4 rysa była przesunięta około 10 cm od środka). W momencie pojawienia się rys każda z nich przebiegała przez całą szerokość płyty. W przypadku płyt nr 1 i 2 niszczenie miało charakter kruchy i następowało dosyć gwałtownie po pojawieniu się jednej rysy, natomiast w przypadku płyt nr 3 i 4 było ono łagodniejsze, ponieważ dało się zaobserwować znaczny wzrost ugięć po zarysowaniu i pojawiła się większa liczba rys.

Mechanizm niszczenia we wszystkich płytach odpowiadał zerwaniu zbrojenia w strefie rozciąganej. W przypadku płyt z mniejszą liczbą siatek niszczenie miało charakter kruchy i pojawienie się pierwszej rysy było jednoznaczne ze zniszczeniem płyty. Przy zastosowaniu trzech siatek (płyty nr 3 i 4) niszczenie było sygnalizowane przez wzrost ugięć i pojawianie się kolejnych rys, niemniej wzrost obciążeń po zarysowaniu wynosił około 50% w stosunku do siły rysującej. Zniszczenie następowało poprzez zerwanie siatek bazaltowych. Dźwięki pęknięć sugerowały, że kolejne włókna pękały i następowało stopniowe rozrywanie siatki.



**Rysunek 3.** Wykresy ugięcia płyt w funkcji ich wyężenia  
Źródło: opracowanie własne.

**Tabela 2.** Porównanie wartości siły rysującej i niszczącej z obliczeń i badań dla deklarowanej przez producenta wytrzymałości siatek na rozciąganie 50 kN/m

Nr płyty	$P_{cr,calc}$ [kN]	$P_{cr,exp}$ [kN]	$P_{cr,exp}/P_{cr,calc}$	$P_{n,calc}$ [kN]	$P_{n,exp}$ [kN]	$P_{n,exp}/P_{n,calc}$
1	2,77	4,00	1,44	9,70	4,20	0,43
2	2,77	5,10	1,84	14,50	7,50	0,52
3	2,77	3,95	1,43	4,69	3,95	0,84
4	2,77	4,95	1,79	13,17	7,50	0,57

Źródło: opracowanie własne.

Do celów porównawczych obliczono teoretyczny moment rysujący i teoretyczną nośność analizowanych płyt. Moment i siłę rysującą obliczono bez uwzględnienia wpływu zbrojenia według zależności:

$$M_{cr} = W_c \cdot f_{ctm} \quad (1)$$

gdzie

$W_c$  – wskaźnik wytrzymałości przekroju,  
 $f_{ctm}$  – średnia wytrzymałość betonu na rozciąganie.

Moment i siłę niszczącą obliczono według [2], przyjmując równomierny rozkład naprężeń w strefie ściskanej betonu, na podstawie równania:

$$M_n = F_z \cdot \left( d - \frac{\beta_1 c_b}{2} \right) \quad (2)$$

gdzie

$F_z$  – średnia nośność siatki zbrojeniowej dla zadanej płyty

$d$  – wysokość użyteczna płyty

$$c_b = \left( \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}} \right) d \quad (3)$$

$$\beta_1 = 0,85 - 0,05 \left( \frac{f_{cm} - 28}{7} \right) \quad (4)$$

$\varepsilon_{cu}$ ,  $\varepsilon_{fu}$  – graniczne odkształcenia, odpowiednio betonu i włókien bazaltowych siatki.

Uzyskane wyniki wskazują, że zastosowana uproszczona procedura wyznaczania momentu rysującego (jako standardowa, stosowana także w Eurokodzie 2) sytuuje wyniki po stronie zdecydowanie bezpiecznej, ponieważ wszystkie płyty spełniły to wymaganie z nadmiarem wynoszącym od 43% do 85% (tab. 2).

**Tabela 3.** Porównanie wartości siły rysującej i niszczącej z obliczeń i badań dla rzeczywistej wytrzymałości siatek na rozciąganie 28 kN/m

Nr płyty	$P_{cr,calc}$ [kN]	$P_{cr,exp}$ [kN]	$P_{cr,exp}/P_{cr,calc}$	$P_{n,calc}$ [kN]	$P_{n,exp}$ [kN]	$P_{n,exp}/P_{n,calc}$
1	2,77	4,00	1,44	5,30	4,20	0,79
2	2,77	5,10	1,84	8,12	7,50	0,92
3	2,77	3,95	1,43	2,41	3,95	1,64
4	2,77	4,95	1,79	7,37	7,50	1,02

Źródło: opracowanie własne.

Biorąc pod uwagę siłę niszczącą, przy założeniu, że siatki bazaltowe posiadają wytrzymałość na rozciąganie 50 kN/m (deklarowaną przez producenta), mamy do czynienia ze znacznym przeszacowaniem teoretycznej nośności płyt. Było to bardzo niepokojące, aż do momentu uzyskania eksperymentalnych wyników badań wytrzymałości siatek bazaltowych na rozciąganie, gdy okazało się, że ich wytrzymałość wynosi 28 kN/m, a nie – jak deklarował producent – 50 kN/m. Na takiej podstawie skorygowane zestawienie przedstawiono w tabeli 3.

Przy tak skorygowanych wartościach siły niszczącej widać dużą zbieżność między badaniami a wynikami teoretycznymi. Większa różnica występuje jedynie w przypadku płyty nr 3, aczkolwiek należy zauważyć, że w tej sytuacji wystąpiło zbrojenie elementu mniejsze od minimalnego.

## 2.2. Seria nr 2

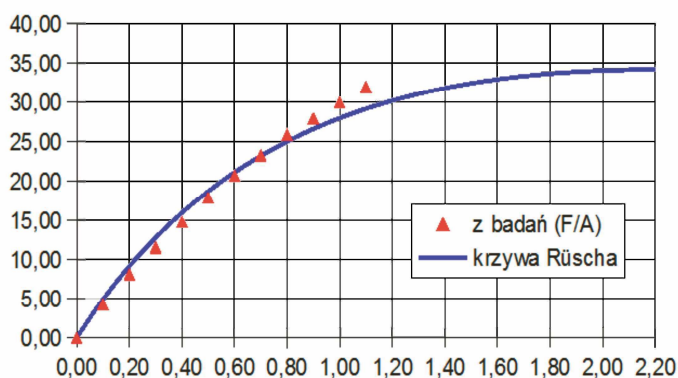
### 2.2.1. Materiały

Parametry wytrzymałościowe betonu wyznaczono na podstawie badań siedmiu próbek walcowych 150/300 mm, otrzymując średnią wytrzymałość na ściskanie 34,17 MPa (wyniki badań zestawiono w tab. 4). Na tej podstawie dokonano także obliczenia wytrzymałości betonu na rozciąganie, która wyniosła 3,16 MPa.

**Tabela 4.** Wyniki badania wytrzymałości betonu

Oznaczenie próbki	F <sub>c</sub> [kN]	f <sub>c</sub> [MPa]
Walec 1	620,00	35,09
Walec 2	571,00	32,31
Walec 3	616,00	34,86
Walec 4	618,00	34,97
Walec 5	721,00	40,80
Walec 6	551,00	31,18
Walec 7	530,00	29,99
Wartość średnia	603,86	34,17

Źródło: opracowanie własne.



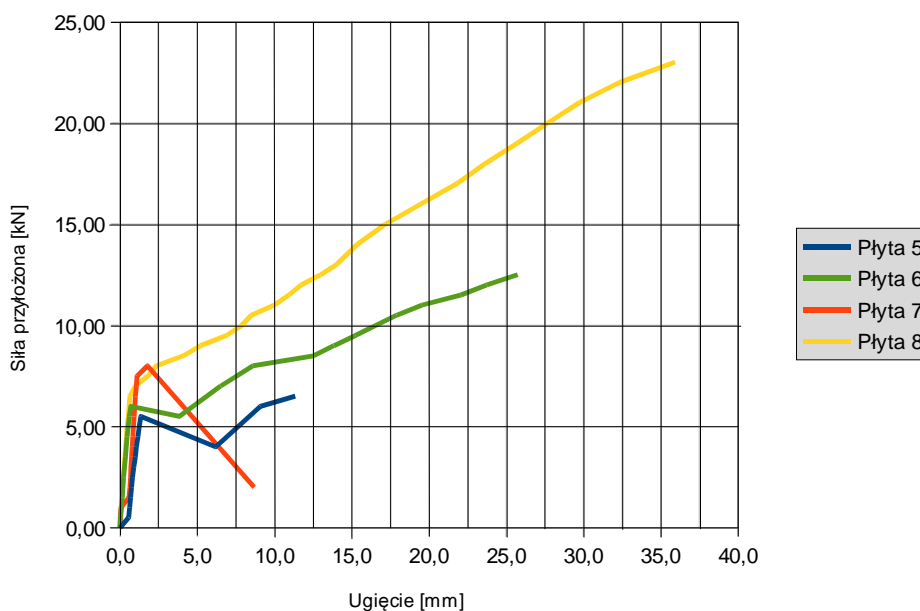
**Rysunek 4.** Wykres badania modułu sprężystości betonu serii nr 2

Źródło: opracowanie własne.

Moduł sprężystości wyznaczono, analogicznie jak dla serii 1, za pomocą modułomierza, na bazie próbek walcowych, aproksymując wyniki krzywą Rüscha, uzyskując początkowy moduł sprężystości o wartości 52,97 GPa. Graficzny obraz uzyskanych rezultatów badań przedstawiono na rysunku 4.

## 2.2.2. Przebieg badań

W przypadku wszystkich czterech płyt zarysowanie następowało na podobnym poziomie obciążenia: od 5 kN do 7 kN. W przypadku wszystkich płyt poza płytą nr 7 zaobserwowano wzrost obciążenia po zarysowaniu. Wzrost siły przenoszonej po zarysowaniu był tym większy, im więcej siatek zbrojeniowych zastosowano w danym elemencie. W przypadku słabiej zbrojonych płyt (nr 5 i nr 7) pojawiły się odpowiednio dwie rysy lub jedna, których rozwartość szybko wzrastała. Natomiast w przypadku płyt nr 6 i nr 8 wystąpiła większa liczba rys, która zwiększała się wraz ze wzrostem obciążenia, przy równocześnie zwiększającej się ich rozwartości.



**Rysunek 5.** Wykresy ugięcia płyt w funkcji ich wyężenia  
Źródło: opracowanie własne.

Ugięcia w przypadku płyt nr 6 i nr 8 były zauważalne gołym okiem, a ich maksymalna wartość wynosiła około 1/30 rozpiętości (dla płyty nr 8). W przypadku tej płyty zaobserwowano również podnoszenie się naroży płyt. Zestawienie graficzne uzyskanych wyników zaprezentowano na rysunku 5.

Na wykresach odkształceń płyt można było wyraźnie zauważyć, podobnie jak w płytach serii nr 1, że przed zarysowaniem były one niewielkie i oscylowały blisko zera. Natomiast po zarysowaniu nastąpił ich znaczny wzrost. Podobnie jak w serii 1, w serii 2 ogólny mechanizm niszczenia wszystkich płyt również odpowiadał zerwaniu zbrojenia w strefie rozciąganej.

**Tabela 5.** Porównanie wartości siły rysującej i niszczącej z obliczeń i badań dla deklarowanej przez producenta wytrzymałości siatek na rozciąganie 50 kN/m

Nr płyty	$P_{cr,calc}$ [kN]	$P_{cr,exp}$ [kN]	$P_{cr,exp}/P_{cr,calc}$	$P_{n,calc}$ [kN]	$P_{n,exp}$ [kN]	$P_{n,exp}/P_{n,calc}$
5	2,97	5,70	1,92	13,16	6,70	0,51
6	2,97	6,40	2,15	16,94	13,00	0,77
7	2,97	7,90	2,66	9,16	7,90	0,86
8	2,97	7,00	2,36	26,69	23,00	0,86

Źródło: opracowanie własne.

W przypadku analizowania uzyskanych wartości siły rysującej ponownie widać, że w doświadczeniach osiągnięto znacznie większe wartości, niż miało to miejsce w przypadku obliczeń (tab. 5). Przy wyznaczaniu teoretycznej nośności (do jej obliczenia uwzględniono, że trzy warstwy zbrojenia są rozciągane, ze względu na obserwowaną wysoką strefę rozciąganą) na bazie wytrzymałości siatki bazaltowej deklarowanej przez producenta mamy do czynienia z przeszacowaniem nośności, natomiast przy uwzględnieniu jej rzeczywistej wytrzymałości wyniki sytują się po stronie bezpiecznej (tab. 6).

**Tabela 6.** Porównanie wartości siły rysującej i niszczącej z obliczeń i badań dla rzeczywistej wytrzymałości siatek na rozciąganie 28 kN/m

Nr płyty	$P_{cr,calc}$ [kN]	$P_{cr,exp}$ [kN]	$P_{cr,exp}/P_{cr,calc}$	$P_{n,calc}$ [kN]	$P_{n,exp}$ [kN]	$P_{n,exp}/P_{n,calc}$
5	2,97	5,70	1,92	7,37	6,70	0,91
6	2,97	6,40	2,15	10,20	13,00	1,27
7	2,97	7,90	2,66	5,13	7,90	1,54
8	2,97	7,00	2,36	18,51	23,00	1,24

Źródło: opracowanie własne.

### 3. Wnioski z badań

Podsumowując rezultaty przeprowadzonych badań eksperymentalnych, można stwierdzić, że elementy konstrukcyjne zostały zaprojektowane i wykonane zgodnie z wytrzymałością siatek na rozciąganie, deklarowaną przez producenta, która w rzeczywistości była prawie dwukrotnie mniejsza, co w skrajnym przypadku doprowadziło do sytuacji, że zbrojenie jednej z płyt było mniejsze od minimalnego. Tego typu siatki charakteryzują się relatywnie małą wytrzymałością na rozciąganie – przykładowo: deklarowana przez producenta wytrzymałość jednostkowa siatek na rozciąganie 50 kN/m odpowiada przyjęciu 1 cm<sup>2</sup> zbrojenia stali AIII-N lub zbrojeniu płyty prętami o średnicy 4 mm w rozstawie co 12,5 cm. Można stąd łatwo zauważyć, że w celu uzyskania wystarczającej nośności należałoby w praktyce zastosować znaczną liczbę tego typu siatek.



W przypadku zbadanych płyt zaobserwowano nieznaczny zakres zachowania sprężystego płyt po odciążeniu. Mniejszy zakres sprężystego „cofnięcia” się przemieszczeń płyt po odciążeniu wynikał w głównej mierze z tego, że w przypadku płyt z siatkami bazaltowymi ułożonymi w kilku warstwach następowało stopniowe zrywanie poszczególnych włókien, począwszy od dolnych warstw, wraz ze wzrostem obciążenia. Ten mały zakres sprężystego zachowania po odciążeniu może budzić obawy w odniesieniu do możliwości zastosowania płyt betonowych zbrojonych siatkami bazaltowymi jako, przykładowo, płyt fasadowych budynków. Należy jednak pamiętać o tym, że obciążenie na nie działające będzie znacznie mniejsze od niszczącego, głównie ze względu na konieczność spełnienia stanu granicznego zarysowania. Odnośnie stosowania tych płyt jako energochłonnych barier drogowych wydaje się, że stwierdzona duża odkształcalność tych płyt, szczególnie po zarysowaniu, może skutecznie pochłaniać energię uderzenia. W tym wypadku sprężysty powrót przemieszczeń tych płyt po odciążeniu ma znacznie mniejsze znaczenie, ponieważ po kontakcie pojazdu z barierą ochronną musi ona być wymieniona. Oczywiście kwestię stosowania barier ochronnych w postaci płyt betonowych zbrojonych siatkami bazaltowymi rozstrzygną testy dynamiczne, ale już teraz można stwierdzić, że warunkiem takiego wykorzystania tych płyt musi być stosowanie siatek o znacznie większej wytrzymałości na rozciąganie.

Mankamentem tego typu płyt jest także znaczna czasochłonność wykonania elementów i konieczność zachowania odpowiednich procedur technologicznych. Niewielkie oczka siatek, mała otulina, wiele warstw siatek w niewielkich rozstawach wymuszają stosowanie betonów z kruszywami o niewielkich średnicach. Sam proces sukcesywnego nakładania warstw betonu na poszczególne siatki wymaga dodatkowo dużego nakładu pracy.

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że należałoby poszukiwać siatek o większej wytrzymałości na rozciąganie oraz usprawnić proces technologiczny w wykonywaniu tego typu płyt.

### **Podziękowania**

*Opisane w artykule badania były możliwe dzięki finansowemu wsparciu w ramach grantu „Innowacyjne środki i efektywne metody poprawy bezpieczeństwa i trwałości obiektów budowlanych i infrastruktury transportowej w strategii zrównoważonego rozwoju”; umowa o dofinansowanie POIG.01.01.02-10-106/09-01.*

### **Literatura**

1. Korzeniowski P., Wesołowski M., Abramski M., *Raport naukowy z realizacji celów naukowo-badawczych „Milestones”*, Gdańsk 2012 (maszynopis).
2. ACI.440-1R.06, *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforcement with FRP Bars*, American Concrete Institute, 2006.
3. Balaguru P., Nanni A., Giancaspro J., *FRP Composites for Reinforced and Prestressed Concrete Structures*, Taylor & Francis e-Library, New York–London 2008.

4. Ericson A.C., *Basalt FRP Rebar Presented for the FHWA Corrosion Resistant Reinforcing Bar Seminar*, Florida 2012.
5. Wu J., Li H., Xian G., *Influence of Elevated Temperature on the Mechanical and Thermal Performance of BFRP Rebar*, Beijing 2010.

## EXPERIMENTAL RESEARCH ON CONCRETE SLABS REINFORCED WITH COMPOSITE NETS MADE FROM BASALT FIBRE

**Abstract:** *The paper presents the result of the experimental research on the single span concrete slabs, where the steel reinforcement nets were replaced with the composite basalt-fibre ones. The idea behind the research was to find an alternative non-metal reinforcement for such concrete structures where the higher structural pliability is desirable, like the road barriers, etc. The result of the research leads to the conclusion that the basalt reinforcement nets had minor effect on the load bearing capacity, however with the provision of the appropriate section they helped to achieve higher pliability in the examined slabs. The stated pliability of the slabs with the stronger reinforcement indicates the possibility of their use in the building facades or even in the security barriers with the condition of the positive dynamic tests results. An additional condition would be the use of the basalt reinforcement nets with much higher strength than the ones described in the research.*

Kamil Żyliński  
Jarosław Przewłócki

## NOŚNOŚĆ PODŁOŻA GRUNTOWEGO POD ŁAWĄ FUNDAMENTOWĄ W UJĘCIU NIEZAWODNOŚCIOWYM

*Wymogi nowoczesnych konstrukcji inżynierskich sprawiają, że coraz częściej projektant staje przed wyzwaniem zapewnienia określonego stopnia bezawaryjności konstrukcji przy miarodajnie niskich kosztach jej wybudowania i eksploatacji. Powszechnie znane normy do projektowania, w tym Eurokody, powinny zapewnić poziom bezpieczeństwa konstrukcji poprzez korzystanie z częściowych współczynników bezpieczeństwa. Ich wykorzystanie z reguły nie odzwierciedla jednak zarówno rzeczywistego charakteru ośrodka tworzącego konstrukcję, jak i działającego na nią obciążenia. Szczególnie istotne jest to w przypadku podłoża gruntowego, gdzie zmienność parametrów geotechnicznych jest znacznie większa niż w przypadku innych materiałów konstrukcyjnych. Zmienność ta ma z natury rzeczy charakter przypadkowy, a biorąc pod uwagę najczęściej brak dostatecznego rozpoznania podłoża, niepewności dotyczące warunków wodnych, uwarstwienia, modelu obliczeniowego itp., uzasadnione jest rozpatrywanie podłoża gruntowego jako ośrodka losowego. W artykule przedstawiono zastosowanie metod probabilistycznych do oceny niezawodności konstrukcji na przykładzie ławy fundamentowej. Analizę rozpoczęto od procedury normowej zgodnie z Eurokodem 7, która w istocie jest tzw. metodą półprobabilistyczną. Z kolei do analizy probabilistycznej zastosowano metodę estymacji rozkładem dyskretnym, a uzyskane dzięki niej wyniki zweryfikowano metodą symulacyjną Monte Carlo. Wykazano dużą efektywność podejścia niezawodnościowego dla rozpatrywanego zagadnienia geotechnicznego.*

### Wprowadzenie

Akademicka praktyka inżynierska skupia się głównie na opanowaniu umiejętności korzystania z gotowych normatywów i wytycznych projektowych, tj. Eurokodów. Są to stypizowane wytyczne do projektowania różnego typu konstrukcji. Do tej pory opracowano dziesięć działów, poszczególne z nich zawierają dokładne kroki obliczeniowe dla danego zagadnienia. Jednym z uniwersalnych działów jest Eurokod 0, który skupia się na obciążeniach i sytuacjach obliczeniowych stosowanych do poszczególnych dziedzin praktyki inżynierskiej. Kolejne z nich są branżowe i pozwalają na zaprojektowanie konstrukcji w zależności od warunków, do jakich ma być przeznaczona. Dla ułatwienia i skrócenia procesu myślowego opracowano wiele programów komputerowych mających w sobie przepisane kody projektowe. Użytkownik, w konkretnym przypadku projektant, umieszcza dane wejściowe i otrzymuje gotowy wynik. Zdecydowanym plusem tychże programów jest skrócony czas wykonywania obliczeń i projektowania konstrukcji. Są jednak przypadki, w których standardowe podejście projektowe nie jest wystarczające i nie zapewnia wiarygodnego poziomu bezpieczeństwa konstrukcji [2]. Wówczas

inżynier może sięgnąć do metod probabilistycznych i wykorzystując m.in. rachunek prawdopodobieństwa, w prosty sposób wyznaczyć dodatkowe miary mówiące o bezpieczeństwie konstrukcji.

Zrozumienie probabilistycznych zagadnień wymaga poznania podstawowych pojęć z dziedziny niezawodności. Nomenklaturę probabilistyczną przedstawiono w dalszej części artykułu. Wyróżnia się trzy poziomy metod probabilistycznych. Każdy z nich zależy od stopnia złożoności zagadnienia, rodzaju oraz wielkości konstrukcji bądź analizowanego elementu. Metodę poziomą pierwszego stanowi Eurokod, który jest w zasadzie metodą półprobabilistyczną. Deterministyczne obliczenia mają z góry narzucony poziom bezpieczeństwa poprzez częściowe współczynniki bezpieczeństwa. Kolejne poziomy wykorzystują pierwsze momenty albo pełną informację o funkcji gęstości rozkładu prawdopodobieństwa nośności i obciążenia, które są traktowane jako zmienne losowe.

Przykładem metody poziomu drugiego jest estymacja rozkładem dyskretnym (PEM, *Point Estimate Method*). Metodę tę zaproponował Rosenblueth [11]; jest ona prostą i skuteczną metodą, niewymagającą specjalnej wiedzy z zakresu probabilistyki. W przypadku występowania większej liczby zmiennych losowych jej efektywność można poprawić poprzez modyfikację liczby kombinacji [5, 6]. Metoda ta odnalazła swoje zastosowanie w wielu dziedzinach, szczególnie w geotechnice [9]. Przykładowo, Suchomel i Maśin [11] przeprowadzili analizę niezawodnościową stopy fundamentowej posadowionej na poziomo uwarstwionym piaszczystym podłożu. Stosując kilka metod probabilistycznych, wykazali, że metoda PEM jest najbardziej dokładna. Również w pracach [1, 4, 5] zastosowano metodę PEM do oceny nośności podłoża pod stopą i łąwą fundamentową.

Charakterystyczną metodą poziomu trzeciego jest metoda symulacyjna Monte Carlo. Wykorzystuje się w niej generację zmiennych losowych (wytrzymałości materiałów i obciążenia) dla wcześniej przyjętych rozkładów prawdopodobieństwa. Kluczowym problemem tej metody jest wyznaczenie liczby symulacji potrzebnej do uzyskania zadowalającej dokładności prawdopodobieństwa.

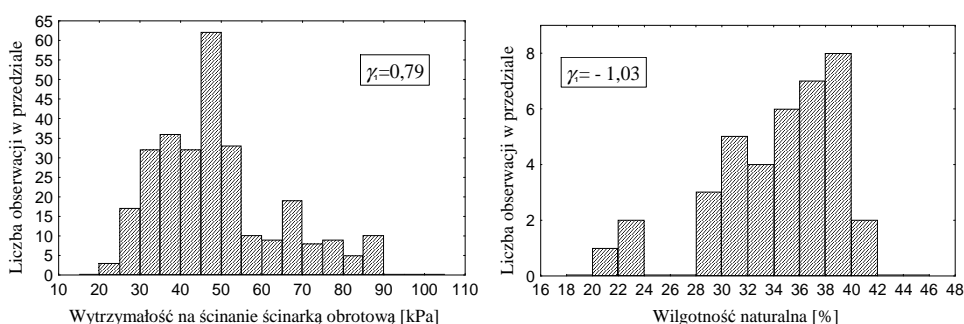
W niniejszej pracy przeprowadzono analizę niezawodnościową nośności podłoża gruntowego pod łąwą fundamentową kilkoma metodami probabilistycznymi. Obliczenia rozpoczęto od zaleceń normowych, postępując zgodnie z Eurokodem 7. Następnie wykorzystano metodę estymacji rozkładem dyskretnym. Uzyskane wyniki zweryfikowano przy użyciu metody symulacji Monte Carlo, wykonując 100 generacji dla poszczególnych zmiennych. Jako zmienne losowe przyjęto kąt tarcia wewnętrznego, spójność, ciężar objętościowy oraz obciążenie. Wykorzystując metodę PEM, badano wpływ zmienności poszczególnych zmiennych na wskaźnik niezawodności.

## 1. Podstawowe pojęcia

Pełne zrozumienie metod probabilistycznych wymaga znajomości podstawowych pojęć ze statystyki i rachunku prawdopodobieństwa. Kiedy analizowane

jest jakiegokolwiek zagadnienie, potrzebne są dane liczbowe. W zagadnieniach geotechnicznych parametry określa się na podstawie badań polowych lub laboratoryjnych. Bywa tak, że uzyskane wyniki znacznie różnią się od siebie i trudno jest na pierwszy rzut oka wybrać wartość najbardziej odpowiednią.

Narzędziem, które w przejrzysty i graficzny sposób obrazuje zakres danych, jest histogram (rys. 1). Wykres taki pozwala na wizualne wyobrażenie o zakresie danych, ich najczęściej występujących wartościach i stopniu rozproszenia wokół centralnych, czyli typowych wartości. Kolumny (słupki) histogramu określają liczbę wyników zawierających się w określonych przedziałach.



**Rysunek 1.** Histogramy o dodatniej i ujemnej skośności

Źródło: R. Suchomel, D. Mašin, *Probabilistic analyses of a strip footing on horizontally stratified sandy deposit using advanced constitutive model*, „Computers and Geotechnics” 2011, vol. 38, no. 3, s. 363-374.

Podstawową ilościową miarą statystyczną jest średnia arytmetyczna:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (1)$$

gdzie  $X_i$  oznacza  $i$ -tą wartość ze zbioru danych, a  $n$  liczbę danych.

Miarą rozproszenia wyników jest wariancja z próby:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{(n-1)} \quad (2)$$

Z wariancją ściśle wiąże się odchylenie standardowe, które jest jej pierwiastkiem kwadratowym.

Do porównania zmienności różnych parametrów używany jest bezwymiarowy współczynnik zmienności, będący ilorazem odchylenia standardowego i wartości średniej:

$$v = \frac{s}{\bar{X}} \quad (3)$$

Praktyczne wartości współczynnika  $\nu \leq 0,05$  mówią o małej zmienności danych, natomiast  $\nu > 0,25$  oznacza znaczną zmienność danych.

O stopniu wydłużenia ogonów rozkładu decyduje współczynnik skośności (asymetrii):

$$\gamma_1 = \frac{1}{n-1} \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3}{s^3} \quad (4)$$

Jego wartość jest dodatnia dla histogramów z dłuższymi ogonami po prawej stronie wykresu, równa zero dla histogramu symetrycznego i ujemna przy wydłużeniu lewego ogona (rys. 1).

Z kolei współczynnik kurtozy  $\gamma_2$  oznacza spłaszczenie wykresu w środkowej części:

$$\gamma_2 = \frac{1}{n-1} \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^4}{s^4} \quad (5)$$

Dla rozkładu normalnego  $\gamma_2 = 3$ . Jeżeli  $\gamma_2 < 3$ , oznacza to spłaszczenie w centralnej części wykresu, a  $\gamma_2 > 3$  oznacza wyższe słupki środkowe.

Często zmienne losowe  $X$  i  $Y$  zależą od siebie. Miarą określającą stopień ich wzajemnej zależności jest kowariancja z próby:

$$s_{X,Y} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) \quad (6)$$

W przypadku gdy nie zachodzi zależność pomiędzy zmiennymi, kowariancja jest równa zero. Jeśli jedna z wartości, większa lub mniejsza od wartości średniej, towarzyszy równoznacznie większej lub mniejszej od wartości średniej liczbie z drugiego zbioru, mówimy o kowariancji dodatniej, w przeciwnym wypadku ujemnej.

Znacznie częściej wykorzystywany jest współczynnik korelacji, który jest kowariancją podzieloną przez odchylenia standardowe:

$$r_{X,Y} = \frac{s_{X,Y}}{s_X s_Y} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left( \frac{X_i - \bar{X}}{s_X} \right) \left( \frac{Y_i - \bar{Y}}{s_Y} \right) \quad (7)$$

Ograniczeniem współczynnika korelacji jest zakres  $-1 \leq r_{X,Y} \leq 1$

W ujęciu probabilistycznym każdy pomiar traktuje się jako pewne doświadczenie, którego wynikiem jest zdarzenie. Przyporządkowując każdemu wynikowi  $\omega$  ze zbioru wszystkich zdarzeń liczbę  $X(\omega)$ , otrzymuje się funkcję, która nazywa się zmienną losową. Jej zachowanie jest najczęściej opisywane przez rozkład prawdopodobieństwa. Jeżeli zmienna losowa przyjmuje wartości ze zbioru

liczb rzeczywistych, to nazywa się ona zmienną typu ciągłego. Jej rozkład prawdopodobieństwa jest określony za pośrednictwem tzw. funkcji gęstości prawdopodobieństwa  $f_X(x)$ . W geotechnice, i nie tylko, najczęściej stosowana jest funkcja gęstości o rozkładzie normalnym (Gaussa):

$$f_X(x) = \frac{1}{\sigma_X \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{x - m_X}{\sigma_X} \right)^2 \right], \quad -\infty \ll x \ll \infty \quad (8)$$

gdzie  $m_X$  jest wartością oczekiwaną (średnią), a  $\sigma_X$  odchyleniem standardowym (pierwiastek kwadratowy z wariancji  $\sigma_X^2$ ) zmiennej losowej  $X$ . Charakterystyki te, zwane momentami pierwszego i drugiego rzędu zmiennej losowej, określone są wzorami:

$$m_X = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx, \quad \sigma_X^2 = \text{Var}[x] = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_X)^2 f(x) dx \quad (9)$$

Praktycznie momenty zmiennej losowej wyznacza się na podstawie wyników z próby o ograniczonej liczebności, czyli oszacowuje się je lub inaczej estymuje. Funkcję, która mówi jak estymować, nazywa się estymatorem, natomiast obliczony parametr – estymatą. Estymatorem wartości oczekiwanej z  $n$ -elementowej próby jest średnia arytmetyczna (1), natomiast estymatorem wariancji jest wielkość określona wzorem (2).

Aby uniknąć pomieszania pojęć, należy wyraźnie podkreślić, że np. średnia z próby jest obliczana na podstawie obserwacji, natomiast wartość średnią lub oczekiwaną wyznacza się na podstawie rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej.

Ważnym elementem probabilistycznej analizy jest znajomość funkcji stanu granicznego, zazwyczaj zapisana symbolem  $G(X)$ . Funkcja ta z kolei jest z góry przyjmowana dla danego zagadnienia i przedstawiana jako algorytm numeryczny lub postać jawna. Argumentem w tym przypadku jest wektor zmiennych losowych  $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ , którego współrzędne są zmiennymi losowymi modelującymi zadane obciążenie oraz parametry wytrzymałościowe materiału (w tym konkretnym przypadku gruntu). Funkcja stanu granicznego oddziela strefę bezpieczną od strefy zagrożenia, co w prosty sposób można przedstawić za pomocą zależności:

$$G(X) = \begin{cases} \geq 0 & \text{dla stanów bezpiecznych,} \\ \leq 0 & \text{dla stanów awaryjnych.} \end{cases} \quad (10)$$

Najczęściej funkcję tę przedstawia się za pomocą wzoru:

$$G_L(x) = x_1 - x_2 = r - s = 0 \quad (11)$$

gdzie  $x_1 = r$  jest nośnością (wypadkową sił i momentów utrzymujących), w tym konkretnym przypadku oporem gruntu, a  $x_2 = s$  jest wypadkową wszystkich sił i momentów dążących do zaburzenia równowagi.

Podstawowym identyfikatorem stanu bezpieczeństwa konstrukcji w zagadnieniach probabilistycznych jest wskaźnik niezawodności. Za jego pomocą można wprowadzić do konstrukcji pewne poziomy bezpieczeństwa, różnicując wymogi w zależności od skutków ekonomicznych zniszczenia oraz skutków społecznych w przypadku możliwości szkody na ludziach [2]. Analogiczne podejście wykorzystane jest w metodzie poziomu I – EC-7.

Najprostszym przypadkiem wskaźnika niezawodności jest wskaźnik Cornella [3]:

$$\beta_c = \frac{G(m)}{\sqrt{\text{var}[G(m)]}} \quad (12)$$

gdzie  $m$  jest wektorem wartości oczekiwanych bazowych zmiennych losowych.

W przypadku liniowego rozkładu funkcji stanu granicznego (11) wskaźnik ten jest równy:

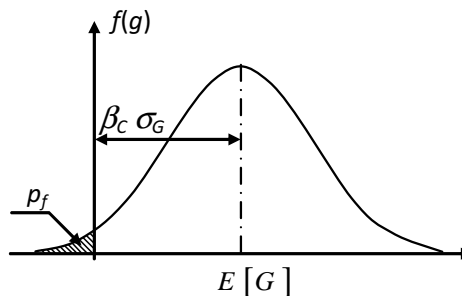
$$\beta_c = \frac{G[m]}{\sigma_m} = \frac{m_1 - m_2}{\sqrt{\sigma_R^2 - 2r_{R,S}\sigma_R\sigma_S + \sigma_S^2}} \quad (13)$$

Wskaźnik niezawodności  $\beta$  można równocześnie interpretować z obliczonym numerycznie prawdopodobieństwem awarii  $p_f$  z zależności odwrotnej:

$$\beta_c = -\Phi^{-1}(P_f) \quad (14)$$

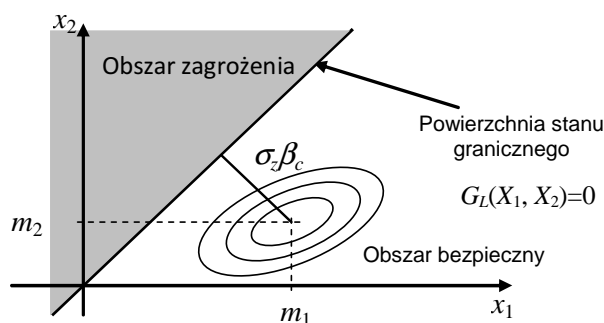
gdzie  $\Phi(*)$  jest funkcją odwrotną dystrybuanty rozkładu normalnego o średniej wartości równej zero i jednostkowym odchyleniu standardowym.

Na rysunku 2 pokazano rozkład zapasu bezpieczeństwa, gdzie prawdopodobieństwo wystąpienia awarii przedstawiono jako obszar zakreskowany. Należy podkreślić, że awaria nie musi koniecznie oznaczać katastrofy. Powinna być rozumiana jako niedopuszczalna różnica między przewidywanym a rzeczywistym zachowaniem się obiektu. Rysunek 3 przedstawia graficzną interpretację wskaźnika niezawodności. W przypadku dwóch zmiennych niezależnych oznacza on najmniejszą odległość punktu o współrzędnych równych wartościom oczekiwany poszczególnych zmiennych do powierzchni stanu granicznego.



**Rysunek 2.** Funkcja gęstości prawdopodobieństwa stanu granicznego  
Źródło: opracowanie własne.





**Rysunek 3.** Geometryczna interpretacja wskaźnika niezawodności Cornella dla liniowej funkcji stanu granicznego w układzie rzeczywistym  
Źródło: opracowanie własne.

W tabeli 1 przedstawiono wartości prawdopodobieństwa awarii odpowiadające odpowiednim wartościom wskaźnika niezawodności  $\beta_c$ . Wraz ze wzrostem  $\beta_c$  prawdopodobieństwo awarii maleje.

**Tabela 1.** Wskaźnik niezawodności i odpowiadające mu prawdopodobieństwo awarii

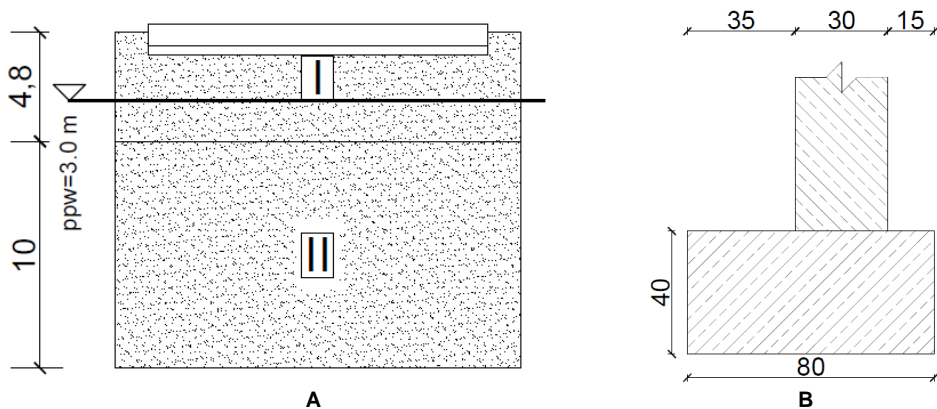
$\beta_c$	2,2	2,7	3,2	3,7	4,2	4,7	5,2
$P_f$	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$6,9 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$

Źródło: EN-ISO 2394, 2012. General principles on reliability for structures. 3. Histogramy rozkładów prawdopodobieństwa.

### Przykład obliczeniowy

Analizowana jest ława fundamentowa, posadowiona na gruncie o uwarstwieniu jak na rysunku 4A. Wymiary ławy w rzucie  $0,8 \times 15$  m. Parametry górnej warstwy:  $\varphi' = 21,5^\circ$ ,  $c_{uk} = 103$  kPa,  $c'_k = 18$  kPa,  $\gamma_k = 21$  kN/m<sup>3</sup> i miąższość 4,8 m, gdzie  $c_{uk}$  oznacza wytrzymałość przy szybkim ścinaniu bez odpływu. Poniżej znajduje się warstwa o parametrach:  $\varphi' = 22,3^\circ$ ,  $c'_k = 0$  kPa,  $\gamma_k = 20,2$  kN/m<sup>3</sup>. Efektywne parametry zostały zaczerpnięte z [8]. Przekrój ławy fundamentowej przedstawiono na rysunku 4B. Z uwagi na występowanie dolnej warstwy gruntu poniżej szerokości  $2B$  według [15] sprawdzanie stanów granicznych ograniczono do warstwy I. Występowanie wody gruntowej zaobserwowano na poziomie 3 m p.p.t. Nie uwzględniano jej wpływu na nośność gruntu pod fundamentem. Obciążenia stałe i zmienne działające na ławę przedstawiono w tabeli 2.

Współczynniki zmienności określono na podstawie [9, 13] i do analizy obliczeniowej przyjęto następujące wartości:  $v_{c'} = 0,3$ ,  $v_\varphi = 0,1$ ,  $v_\gamma = 0,05$ . Ze względu na charakter występujących obciążeń przyjęto wskaźniki zmienności obciążenia: stałego  $v_g = 0,05$  oraz zmiennego  $v_q = 0,3$  [14].



**Rysunek 4.** Przekrój: geotechniczny warstw gruntu (A), ławy fundamentowej (B)  
Źródło: opracowanie własne.

**Tabela 2.** Wartości obciążeń działających na ławę fundamentową

Obciążenie	Pionowe [kN]	Poziome [kN]	Moment [kNm]
Stałe	$V_{Gk} = 1570$	$H_{Gk} = 170$	$M_{Gk} = 200$
Zmienne	$V_{Qk} = 150$	$H_{Qk} = 83$	$M_{Qk} = 71$
Na 1 mb	[kN/m]	[kN/m]	[kNm/m]
Stałe	$V_{gk} = 104,67$	$H_{Gk} = 11,3$	$M_{Gk} = 13,3$
Zmienne	$V_{Qk} = 10$	$H_{Qk} = 5,53$	$M_{Qk} = 4,73$

Źródło: opracowanie własne.

## 2. Obliczenia według Eurokodu 7

Eurokod 7 rozróżnia trzy podejścia obliczeniowe różniące się między sobą rozkładem częściowych współczynników pomiędzy oddziaływania, efekty oddziaływań, parametry geotechniczne i inne właściwości materiałowe. Zestaw *A* odpowiada oddziaływaniom i efektom oddziaływań, zestaw *B* parametrom geotechnicznym, a zestaw *R* oporom i nośności.

Różnią się one kombinacją trzech grup częściowych współczynników bezpieczeństwa.

Według Eurokodu 7 nośność graniczną podłoża gruntowego sprawdzamy w jednym z pięciu stanów granicznych – GEO. W stanie tym należy sprawdzić nierówność:

$$V_d \leq R_d \quad (15)$$

gdzie  $R_d$  – wartość obliczeniowa oporu przeciw oddziaływaniom (obliczeniowa wartość oporu granicznego ośrodka gruntowego),  $V_d$  – wartość obliczeniowa obciążenia (składowej pionowej).

Nośność  $R_d$  można wyznaczyć metodą analityczną lub półempiryczną.

Eurokod 7 sugeruje używanie efektywnych parametrów wytrzymałościowych gruntu  $c'$  i  $\varphi'$ . Jednostkowy opór graniczny podłoża według EC-7 wyznacza się ze wzoru:

$$\frac{R_{k,v}}{A'} = c' * N_c * s_c * i_c * b_c + q' * N_q * s_q * i_q * b_q + 0,5 * B' * \gamma' * N_\gamma * s_\gamma * i_\gamma * b_\gamma \quad (16)$$

gdzie  $R_{k,v}$  – nośność fundamentu ustalona w oparciu o obliczeniowe wartości parametrów geotechnicznych gruntu, pozostałe wielkości opisane w [16] i wyznaczone w dalszej części pracy.

Określona wzorem (16) wielkość jest wartością charakterystyczną. Należy użyć kombinacji częściowych współczynników według podejścia obliczeniowego DA2. W przypadku podejścia DA2 współczynniki materiałowe nie zmieniają ich wartości, ponieważ są równe jedności. Procedurę wyznaczenia nośności gruntu pod ławą fundamentową przedstawiono poniżej.

Współczynniki dla obciążenia i nośności  $\gamma$  w podejściu DA2 wynoszą:  $\gamma_g = 1,35$ ;  $\gamma_q = 1,50$ ;  $\gamma_M = 1,00$ ;  $\gamma_{R,v} = 1,4$  i  $\gamma_{R,h} = 1,1$ . Podejście DA2 narzuca współczynniki materiałowe równe  $\gamma_M = 1,00$ , w wyniku tego wartości charakterystyczne parametrów geotechnicznych przyjmujemy jako obliczeniowe.

### Współczynniki nośności

$$N_q = e^{\pi \tan(\varphi')} * \tan\left(45 + \frac{\varphi'}{2}\right)^2 = e^{\pi \tan(21,5)} * \tan\left(45 + \frac{21,5}{2}\right)^2 = 7,4 \quad (17)$$

$$N_c = (N_q - 1) * \cot(\varphi') = (7,44 - 1) * \cot(21,5) = 16,34 \quad (18)$$

$$N_\gamma = 2 * (N_q - 1) * \tan(\varphi') = 2 * (7,44 - 1) * \tan(21,5) = 5,07 \quad (19)$$

### Współczynniki kształtu podstawy fundamentu

$$s_q = 1 + \frac{B'}{L'} * \sin(\varphi') = 1 + 0,04 * \sin(21,5) = 1,01 \quad (20)$$

$$s_\gamma = 1 - 0,3 * \frac{B'}{L'} = 1 - 0,3 * 0,04 = 0,99 \quad (21)$$

$$s_c = \left(\frac{s_q * N_q - 1}{N_q - 1}\right) = \left(\frac{1,01 * 7,44 - 1}{7,44 - 1}\right) = 1,02 \quad (22)$$

### Efektywne wymiary fundamentu z uwzględnieniem mimośrodków

$$B' = B - 2e_B = 0,8 - 2 * 0,1 = 0,6 \text{ m} \quad L' = L - 2e_L = 15 - 2 * 0 = 15 \text{ m} \quad (23)$$

### Efektywne pole fundamentu

$$A' = B' * L' = 0,6 * 15 = 9 \text{ m}^2 \quad (24)$$

**Współczynniki nachylenia obciążenia**

Warunek maksymalnego oddziaływania poziomego na podłoże:

$$H_k \leq V_k + A' * c' * \cot(\varphi') \quad (25)$$

$$H_k = 253 \text{ kN} \leq V_k + A' * c' * \cot(\varphi') = 2027,2 + 9 * 18 * \cot(21,5) = 2438,46 \text{ kN}$$

**Warunek spełniony**

Wykładnik  $m = m_l$  (rozpatrujemy oddziaływania poziome w płaszczyźnie  $d_f X_L$ ):

$$m = \frac{2 + \frac{L'}{B'}}{1 + \frac{L'}{B'}} = \frac{2 + 25}{1 + 25} = 1,04 \quad (26)$$

$$i_q = \left(1 - \frac{H_k}{V_k + A' * c' * \cot(\varphi')}\right)^m = \left(1 - \frac{253}{2438,46}\right)^{1,04} = 0,89 \quad (27)$$

$$i_\gamma = \left(1 - \frac{H_k}{V_k + A' * c' * \cot(\varphi')}\right)^{m+1} = \left(1 - \frac{253}{2438,46}\right)^{1+1,04} = 0,8 \quad (28)$$

$$i_c = i_q - \frac{1 - i_q}{N_c * \tan(\varphi')} = 0,79 - \frac{1 - 0,8}{16,34 * \tan(21,5)} = 0,88 \quad (29)$$

**Współczynniki nachylenia podstawy fundamentu**

Podstawa fundamentu jest pozioma, tzn.  $\alpha = 0$  rad:

$$b_q = b_\gamma = b_c = 1,00 \quad (30)$$

**Jednostkowy, charakterystyczny opór podłoża (16)**

$$\frac{R_{k,v}}{A'} = 18,00 * 16,34 * 1,02 * 0,88 * 1,0 + 25,2 * 7,44 * 1,01 * 0,89 * 1,00 + 0,5 * 0,6 * \\ * 21 * 5,07 * 0,99 * 0,8 * 1,0 = 457,83 \text{ kPa}$$

**Wypadkowy, charakterystyczny opór podłoża**

$$R_{k,v} = \frac{R_{k,v}}{A'} * A' = 457,83 * 9 = 4120,49 \text{ kN} \quad (31)$$

**Wypadkowy, obliczeniowy opór podłoża**

$$R_{d,v} = \frac{R_{k,v}}{\gamma_{R,v}} = \frac{4120,49}{1,4} = 2943,19 \text{ kN} \quad (32)$$

**Całkowite, obliczeniowe oddziaływanie pionowe**

$$V_d = \gamma_g * (V_{Gk} + V_{Gk,1} + V_{Gk,2}) + \gamma_q * V_{Qk} = \\ = 1,35 * (1570 + 187,2 + 120) + \\ + 1,5 * 150 = 2759,22 \text{ kN} \quad (33)$$

**Warunek nośności podłoża (15)**

$$V_d = 2759,22 \text{ kN} < R_{d,v} = 2943,19 \text{ kN}$$

**Warunek spełniony**

- wykorzystanie nośności podłoża:

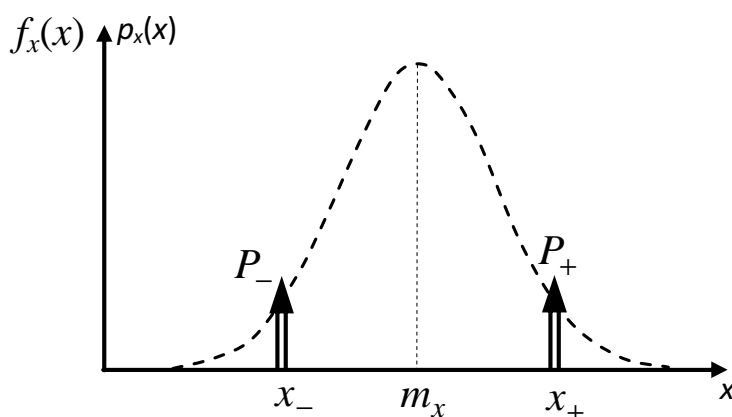
$$\frac{V_d}{R_{d,v}} * 100\% = \frac{2759,22}{2943,19} * 100\% = 93,75 \% \quad (34)$$

- zapas bezpieczeństwa nie przekracza 10%.

Ława została zaprojektowana na granicy wytrzymałości, czyli tak aby zapas nośności nie przekraczał 10%. Dlatego stopień wykorzystania nośności podłoża wyrażony wskaźnikiem  $\lambda$  wynosił  $\lambda = 94\%$ . Jest to zdroworozsądkowe podejście stosowane na co dzień przez projektantów, przede wszystkim ze względów ekonomicznych. W pracy uwzględniono jedynie wartość nośności pionowej, jednak obliczenia nie ograniczały się do sprawdzenia jednego warunku.

**3. Metoda estymacji rozkładem dyskretnym**

Metoda estymacji rozkładem dyskretnym (PEM) polega na wykorzystaniu kwadratury Gaussa; ciągłą zmienną losową zastępuje się zmienną dyskretną opisaną  $N$ -wagami, czyli impulsami (rys. 5).



**Rysunek 5.** Rozkłady masy prawdopodobieństwa

Źródło: R. Suchomel, D. Mašín, *Probabilistic analyses of a strip footing on horizontally stratified sandy deposit using advanced constitutive model*, „Computers and Geotechnics” 2011, vol. 38, no. 3, s. 363-374.

Warunek mówiący o sumie prawdopodobieństw równej jedności pozwala uzyskać punkty dyskretyzacji oraz przypisane im odpowiednie wagi. W przypadku zerowej skośności i, co za tym idzie, symetrycznego rozkładu punkty te oraz wagi przedstawia się za pomocą następujących wzorów:

$$x_- = m_x - \sigma_x, x_+ = m_x + \sigma_x, P_- = \frac{1}{2}, P_+ = \frac{1}{2} \quad (35)$$

gdzie  $m_x$  – wartość średnia,  $\sigma_x$  – odchylenie standardowe.

W przypadku funkcji  $k$ -zmiennych losowych:

$$y = g(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (36)$$

wartości funkcji  $y(\dots)$  oblicza się dla wszystkich możliwych kombinacji punktów dyskretyzacji. Wartość oczekiwaną i wariancję funkcji wyznacza się z następujących zależności:

$$m_y \approx \sum_{j=1}^{2^k} P^j y_j \quad (37)$$

$$\sigma_y^2 \approx \sum_{j=1}^{2^k} P^j y_j^2 - m_y^2 \quad (38)$$

gdzie:

$$P_{(s_1 s_2 \dots s_n)} = \frac{1}{2^n} \left[ 1 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k (s_i)(s_j) r_{x_i, x_j} \right] \quad (39)$$

$$s_i = \begin{cases} -1 & \text{dla } x_{i-} = m_{x_i} - \sigma_{x_i} \\ +1 & \text{dla } x_{i+} = m_{x_i} + \sigma_{x_i} \end{cases} \quad (40)$$

$r_{x_i, x_j}$  – korelacja wzajemna pomiędzy zmiennymi losowymi  $X_i$  i  $X_j$ .

Obliczenia metodą PEM wykonano, uwzględniając losowość trzech parametrów geotechnicznych: spójności, kąta tarcia wewnętrznego oraz ciężaru objętościowego [12]. Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 3.

Wskaźnik niezawodności Cornella obliczono na podstawie wzoru (13):

$$\begin{aligned} \beta_c &= \frac{m_R - m_S}{\sqrt{\sigma_R^2 - 2r_{R,S}\sigma_R\sigma_S + \sigma_S^2}} = \\ &= \frac{4199,06 - 2027,2}{\sqrt{1148465,6 - 2 * 0 * 1070,76 * 225 + 20611,93}} = 2,01 \end{aligned}$$

Odnosząc wynik do wzoru na prawdopodobieństwo awarii (14), wynosi ono  $P_f = 2,27 \times 10^{-2}$  Według normy [21] ewentualne zniszczenie wynikające

z prawdopodobieństwa awarii oznaczałoby umiarkowane skutki przy wysokich kosztach zapewnienia bezpieczeństwa konstrukcji. Biorąc jednak pod uwagę, że sprawdzany jest stan graniczny nośności, obliczony wskaźnik niezawodności jest mniejszy od zalecanego ( $\beta_c = 3,1$ ), zatem projektując fundament metodą estymacji rozkładem dyskretnym, otrzymujemy stan niebezpieczny.

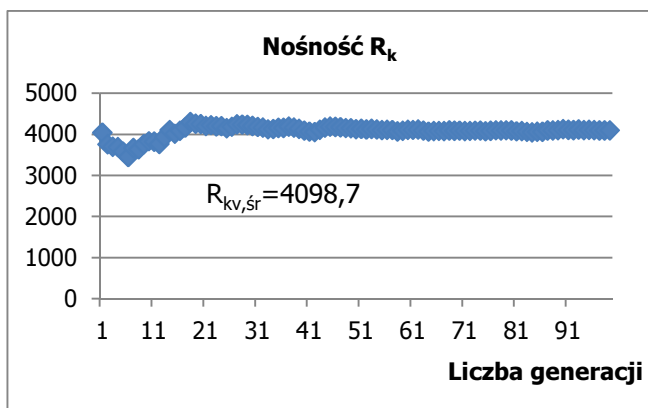
**Tabela 3.** Wyniki obliczeń metodą PEM dla trzech zmiennych losowych

Lp.	$x_1 = c'$	$x_2 = \varphi'$	$x_3 = \gamma$	$y = R_k$	$P(x_{i,j})$	$yp(x_{i,j})$	$y^2p(x_{i,j})$
1	$x_{1+} = 23,4$	$x_{2+} = 23,65$	$x_{3+} = 22,05$	5918,47	0,125	739,81	4378529,42
2	$x_{1+} = 23,4$	$x_{2+} = 23,65$	$x_{3-} = 19,95$	5694,77	0,125	711,84	4053793,7
3	$x_{1+} = 23,4$	$x_{2-} = 19,35$	$x_{3-} = 19,95$	4012,44	0,125	501,55	2012455,43
4	$x_{1+} = 23,4$	$x_{2-} = 19,35$	$x_{3+} = 22,05$	4152,56	0,125	519,07	2155467,77
5	$x_{1-} = 12,6$	$x_{2+} = 23,65$	$x_{3+} = 22,05$	4215,91	0,125	526,99	2221735,34
6	$x_{1-} = 12,6$	$x_{2+} = 23,65$	$x_{3-} = 19,95$	3995,09	0,125	499,39	1995095,65
7	$x_{1-} = 12,6$	$x_{2-} = 19,35$	$x_{3+} = 22,05$	2870,64	0,125	358,83	1030072,67
8	$x_{1-} = 12,6$	$x_{2-} = 19,35$	$x_{3-} = 19,95$	2732,55	0,125	341,57	933350,84
						$m_R = \sum \approx 4199,0157$	$\sum \approx 18780500,81$
$\sigma_R^2 = 18780500,81 - (4199,0157)^2 = 1148465,635 \text{ kN}^2 \sigma_R = 1071,66 \text{ kN}$							

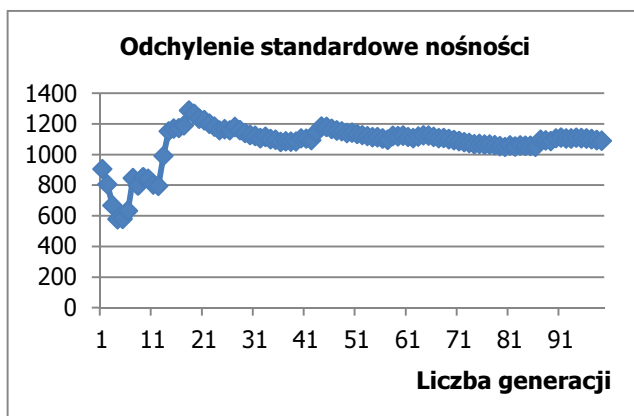
Źródło: opracowanie własne.

#### 4. Metoda Monte Carlo

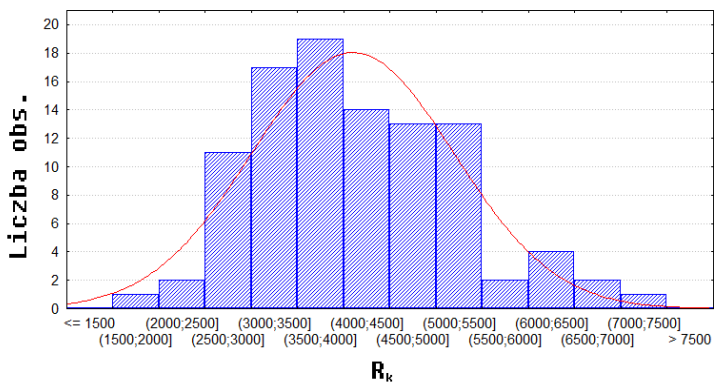
Aby zweryfikować poprawność metody PEM, wykorzystano metodę symulacyjną Monte Carlo. Nie stosuje się w niej żadnych uproszczeń, a symulacyjne podejście do zmiennych losowych pozwala na dokładne wyznaczenie prawdopodobieństwa awarii oraz wpływu poszczególnych parametrów (zmiennych losowych) na zachowanie się konstrukcji. Powszechne zastosowanie i badanie losowości zmiennych losowych odbywa się poprzez generację zmiennych losowych (wytrzymałości i obciążenia) dla wcześniej przyjętych rozkładów prawdopodobieństwa. Przybliżoną wartość prawdopodobieństwa awarii otrzymuje się na podstawie oszacowania wartości oczekiwanej funkcji charakterystycznej obszaru awarii otrzymanego przy pomocy estymatora. Metoda Monte Carlo charakteryzuje się największą dokładnością ze wszystkich metod niższych poziomów, jednak jej kluczowym problemem jest wyznaczenie liczby symulacji potrzebnej do uzyskania zadowalającej dokładności. W analizowanym przypadku wygenerowano po 100 zestawów dla trzech zmiennych losowych: spójności, kąta tarcia wewnętrznego i ciężaru objętościowego warstwy gruntu zalegającego bezpośrednio pod ławą. Wyniki symulacji metodą Monte Carlo zobrazowano na rysunkach 6-8.



**Rysunek 6.** Zbieżność wartości średniej nośności  $R_k$   
Źródło: opracowanie własne.



**Rysunek 7.** Zbieżność odchylenia standardowego nośności  
Źródło: opracowanie własne.



**Rysunek 8.** Histogram 100 generacji nośności wraz z rozkładem normalnym  
Źródło: opracowanie własne.



Jak widać (rys. 6, 7), zarówno wartość średnia, jak i odchylenie standardowe nośności stabilizują się już przy około 25 generacjach. Zbadano kształt histogramu danych otrzymanych poprzez symulację Monte Carlo (rys. 8). Współczynnik skośności  $\gamma_1 = 0,584$  mówi o wydłużonym końcu wykresu z prawej strony, a kurtozy  $\gamma_2 = 0,003$  o spłaszczeniu w części centralnej, podobnie jak rozkład normalny. Charakterystyki te potwierdzają, że przyjęcie rozkładu normalnego i uwzględnienie go w dalszej probabilistycznej analizie było poprawnym założeniem.

Zbiorcze zestawienie wyników otrzymanych metodą normową (Eurokod7), metodą PEM oraz Monte Carlo przedstawiono w tabeli 4.

**Tabela 4.** Różnice w wynikach metodami trzech poziomów

Metoda	$R_k$ [MPa]	$\sigma_x$ [MPa]	Błąd $R_k$ (%)	Błąd $\sigma_x$ (%)
EC-7	4120,49	–	0	–
PEM	4199,02	1071,66	1,91	–
Monte Carlo	4098,77	1074,05	0,53	0,22

Źródło: opracowanie własne.

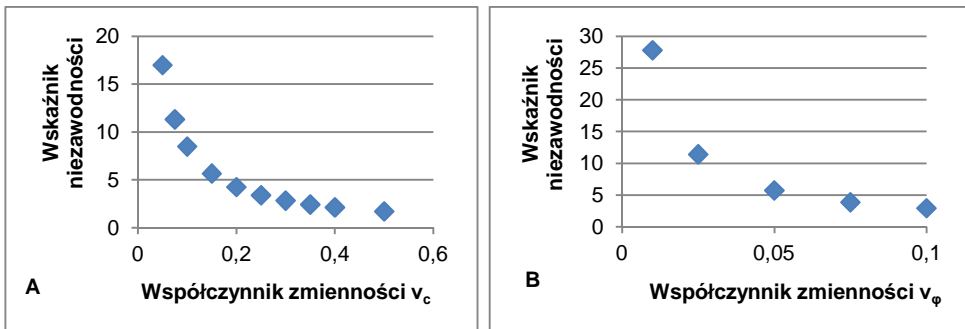
Skuteczność metod probabilistycznych została potwierdzona małym błędem odchylenia standardowego oraz wartości oczekiwanej. Mogło to wynikać z zaokrąglenia w programie obliczeniowym, jak również uwzględnienia zmienności w zagadnieniu. Pomimo zbliżonych wyników w ocenie bezpieczeństwa konstrukcji prawdopodobieństwo wystąpienia awarii jest wysokie jak dla fundamentu bezpośredniego, co może wiązać się ze skutkami w postaci strat rzeczowych i ludzkich.

## 5. Wpływ zmienności parametrów gruntowych na wskaźnik niezawodności

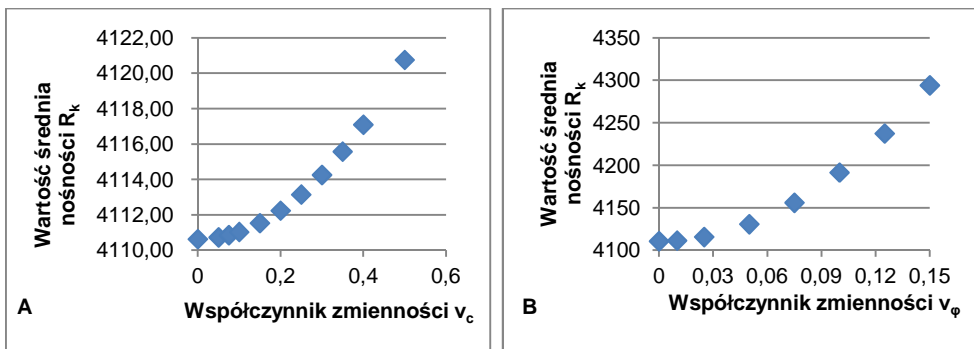
Wykonano analizę wpływu zmienności dwóch wiodących zmiennych losowych, tj. spójności i kąta tarcia wewnętrznego na wskaźnik niezawodności  $\beta_c$ . Wyniki przedstawiono na rysunku 9.

Zgodnie z danymi na rysunku 9 można zaobserwować nieliniową zmienność wskaźnika niezawodności w zależności od współczynnika zmienności poszczególnych parametrów geotechnicznych. W przypadku spójności znaczące obniżenie wskaźnika  $\beta$  następuje już przy 20% zmienności, natomiast w przypadku kąta tarcia wewnętrznego już 5%.

Z kolei z danych przedstawionych na rysunku 10 wynika, że przy mniejszej zmienności kąta tarcia wewnętrznego wyniki nośności różnią się między sobą o prawie 200 kN.



**Rysunek 9.** Wpływ zmienności spójności (A), kąta tarcia wewnętrznego (B) na wskaźnik niezawodności  
Źródło: opracowanie własne.



**Rysunek 10.** Wpływ zmienności spójności (A), kąta tarcia wewnętrznego (B) na wartość średnią nośności  $R_k$   
Źródło: opracowanie własne.

## 6. Wnioski

Projektowanie konstrukcji zgodnie z aktualnie obowiązującymi normami nie zawsze dostarcza wystarczającej informacji o bezpieczeństwie konstrukcji. Do obliczenia prawdopodobieństwa, a także wskaźnika niezawodności wykorzystano metodę estymacji rozkładem dyskretnym, której wyniki zweryfikowano metodą symulacyjną Monte Carlo. Analizowany w pracy przykład pokazuje, że pomimo spełnienia stanu granicznego, obliczonego zgodnie z Eurokodem 7, występuje duże prawdopodobieństwo wystąpienia awarii. Wykazano dużą efektywność zastosowanego w pracy niezawodnościowego podejścia, zwłaszcza prostoty wykorzystanych metod probabilistycznych oraz ich przydatności w analizie, a w konsekwencji i w projektowaniu zagadnień geotechnicznych. Należy podkreślić, że otrzymywane miary bezpieczeństwa uwzględniają losowości poszczególnych parametrów opisujących zarówno ośrodek gruntowy, jak i obciążenie, a także ich wzajemne zależności.

W rozpatrywanym przypadku ograniczono się jedynie do analizy niezawodnościowej nośności pionowej podłoża. Sprawdzenie stanu granicznego nośności, w przedstawionym ujęciu, dla innych przypadków jest analogiczne. Z całą pewnością pracę można rozszerzyć zarówno o kolejne przykłady, jak i inne metody do nich zaaplikowane. Ważnym dodatkowym elementem analizy jest zbadanie wpływu zmienności parametrów gruntu na wskaźnik niezawodności i wartość średnią nośności gruntu. Tego typu informacja była możliwa do uzyskania dzięki szerszemu użyciu metody estymacji rozkładem dyskretnym.

## Literatura

1. Baecher G.B., Christian J.T., *Reliability and statistics in geotechnical engineering*, John Wiley & Sons, Chichester 2003.
2. Brząkała W., Bezpieczeństwo i niezawodność w geotechnice Teoretyczne podstawy Eurokodu EC7-1, „Inżynieria Morska i Geotechnika” 2013, nr 1, s. 20-29.
3. Cornell C.A., *A Probability-Based Structural Code*, „American Concrete Institute Journal” 1969, vol. 66, s. 974-985.
4. Fenton G.A., Griffiths D.V., *Probabilistic Foundation Settlement on Spatially Random Soil*, „Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering” 2002, vol. 128, no. 5, s. 381-390.
5. Harr M.E., *Probabilistic estimates for multivariate analyses*, „Appl. Math. Modelling” 1989, vol. 13, no. 5, s. 313-318.
6. Hong H.P., *An efficient point estimate method for probabilistic analysis*, „Reliability Engineering and System Safety” 1998, vol. 59, no. 3, s. 261-267.
7. Olchawa A., Zawalski A., *Comparison of shallow foundation design using Eurocode 7 and Polish Standard*, Warsaw 2014.
8. Przewłócki J., *Problemy stochastycznej mechaniki gruntów. Ocena niezawodności*, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2006.
9. Puła W., *Zastosowanie teorii niezawodności konstrukcji do oceny bezpieczeństwa fundamentów*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2004.
10. Rosenblueth E., *Point estimates for probability moments*, „Proc. Nat. Acad. Sci.” 1975, vol. 72, no. 10, s. 3812-3814.
11. Suchomel R., Mašín D., *Probabilistic analyses of a strip footing on horizontally stratified sandy deposit using advanced constitutive model*, „Computers and Geotechnics” 2011, vol. 38, no. 3, s. 363-374.
12. Thao N.T.P., *Parametry statystyczne parametrów geotechnicznych wybranych warstw geologicznych podłoża gruntowego określonego rejonu m. Wrocławia*, „Prace Naukowe Instytutu Geotechniki Politechniki Wrocławskiej” 1984, nr 14.
13. EN-ISO 2394, 2012. General principles on reliability for structures. 3. Histogramy rozkładów prawdopodobieństwa.
14. PN-B-03020, 1981, Norma Budowlana, Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia.
15. PN-EN 1997-1, 2008. Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 1, Zasady ogólne.

## RELIABILITY ANALYSIS OF BEARING CAPACITY OF THE SUBSOIL UNDER STRIP FOOTING

**Abstract:** *The requirements of modern engineering structures force designer to ensure a certain safety level with low costs of construction and operation. Well known standards for the design, including the Eurocodes, should ensure proper security through the use of partial safety factors. However, their application does not necessarily reflect the real nature of both construction medium and acting loads. In a case of a subsoil of particularly importance is a fact that soil parameters have higher variability than other features of construction materials. This variability is inherently of random nature, and taking into account a lack of adequate recognition of subsoil, uncertainties relating to water conditions, stratification, computational model, etc., it is reasonable to consider the subsoil as a random medium. An application of probabilistic methods in reliability analysis on the example of strip footing was shown in the article. Analysis starts from Eurocode 7 procedure which is in fact half probabilistic method. In turn, the point estimate method was used to carry out the probabilistic analysis. Received results were verified by Monte Carlo method simulation. High efficiency of reliability approach dealing with the considered geotechnical problem is shown.*

Andrzej Wróblewski  
Agata Rychter

## PODCIŚNIENIE W SAMOZASYSAJĄCYM MIESZADLE ŚMIGŁOWYM

*Eksperymentalnie ustalono, że podciśnienie  $\Delta P$  na łopatkce mieszadła (i pęcherzykach kawitacyjnych za nią) rośnie ze zwiększeniem częstotliwości obrotów mieszadła śmigłowego. Na podstawie wyznaczonej wartości przyrostu podciśnienia  $\Delta P$  można obliczyć liczbę otworów  $n$  na wszystkich łopatkach mieszadła śmigłowego przy liniowej prędkości obrotów mieszadła:*

$$W_m = 2\pi \left( \frac{d}{2} - l \right) \text{ dla zadanej objętości zasysanego powietrza } Q.$$

### Wprowadzenie

W procesach biologicznego oczyszczania ścieków stosuje się napowietrzanie (aerację) do żywienia mikroorganizmów tlenem. Powszechnie stosuje się napowietrzanie sprężarkami pod ciśnieniem 0,15 MPa przez rury perforowane lub porowate płyty. Takie instalacje są skomplikowane i kosztowne, dlatego w nowoczesnych oczyszczalniach i przemyśle chemicznym zaproponowano stosowanie mieszalników samozasysających [1-6] z mieszadłem turbinowym. Takie mieszadła tworzą promieniowy strumień układu gaz–ciecz i nie zapewniają podnoszenia osadu mikroorganizmów z dna. Poza tym w procesie mieszania powietrza z wodą w mieszadle turbinowym tworzą się pęcherzyki powietrza o dużych średnicach, co jest przyczyną niewielkich powierzchni kontaktu wody z powietrzem. Szybkość wymiany masy między pęcherzykami gazowymi a cieczą rośnie wraz ze zwiększeniem powierzchni własnej kontaktu faz ( $m^2/m^3$ ) i prędkością ślizgania się pęcherzyków w cieczy [7]. Istnieją możliwości tworzenia warunków intensyfikacji wymiany masy (absorpcji tlenu z powietrza). Jedną z nich jest ruch obrotowy łopatki mieszadła z otworami na powierzchni, przez które zasysane jest powietrze. W tych warunkach z powierzchni łopatki mieszadła odrywają się pęcherzyki gazu o średnicach mniejszych niż w mieszadle turbinowym. Metoda ta jest szeroko wykorzystywana do ozonowania wody pitnej i badania absorpcji tlenu z powietrza w aeratorze z mieszadłem w postaci perforowanego stożka i cylindrów. Podobne zagadnienia były analizowane eksperymentalnie i numerycznie, ale dla innych geometrii mieszadeł [8-10].

Celem eksperymentu jest badanie podciśnienia  $\Delta P$  na powierzchni łopatki mieszadła z otworami w zależności od częstotliwości obrotów mieszadła śmigłowego

kawitacyjnego [3] z zastosowaniem aparatury pomiarowej [11]. Podciśnienie to jest podstawą do obliczenia prędkości zasysanego powietrza  $w$  [12]:

$$w = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}, \text{ m/s} \quad (1)$$

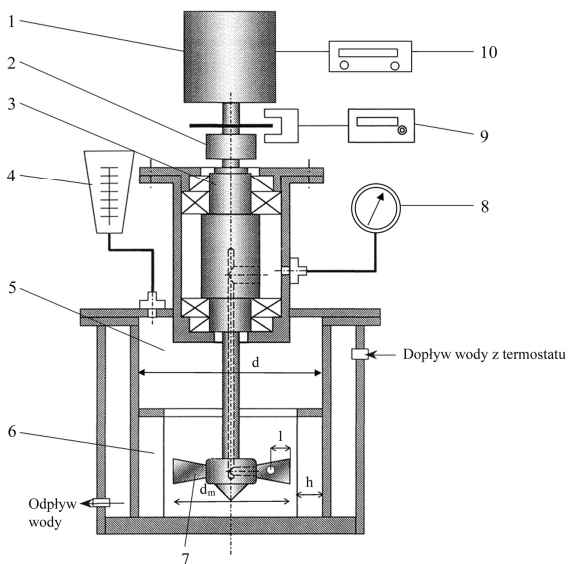
gdzie  $\rho$  oznacza gęstość powietrza [ $\text{kg/m}^3$ ].

Z warunków technologicznych wynika, jaką ilość powietrza  $Q$ ,  $\text{m}^3/\text{s}$ , należy zasysać. Wówczas liczba otworów  $n$  o średnicy  $d_0$  na wszystkich łopatkach mieszadła wynosi:

$$n = \frac{4Q}{\pi d_0^2 w} \quad (2)$$

## 1. Opis stanowiska laboratoryjnego i metod badań

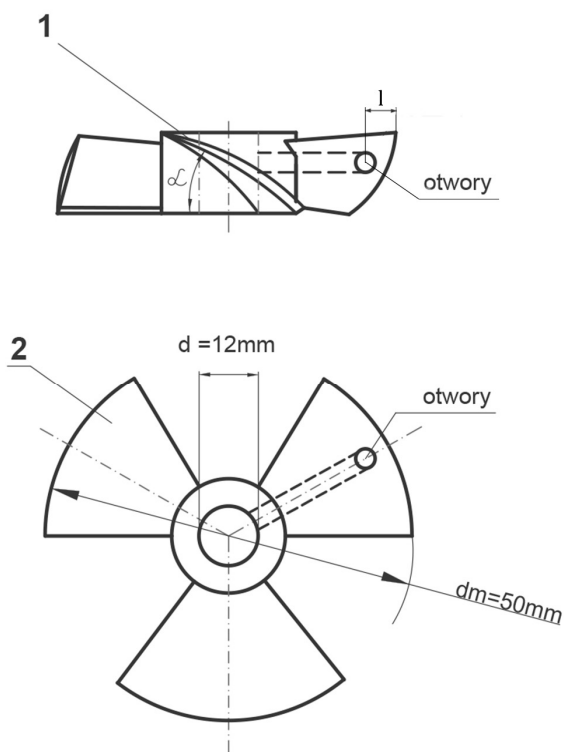
Schemat stanowiska laboratoryjnego przedstawionego na rysunku 1 składa się ze zbiornika z zamontowanym mieszalnikiem w postaci trzyłopatkowego mieszadła śmigłowego o średnicy  $n_m = 50 \text{ mm}$  [3], którego schemat zamieszczono na rysunku 2.



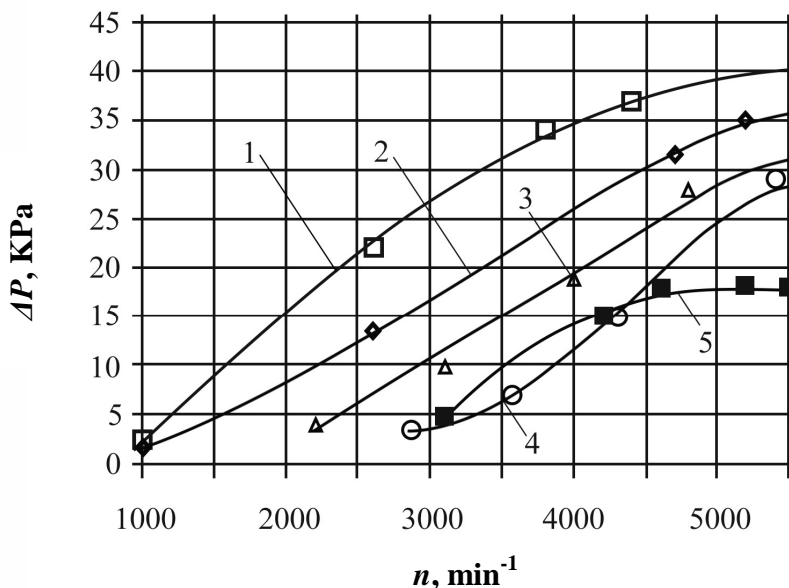
**Rysunek 1.** Schemat stanowiska laboratoryjnego mieszalnika śmigłowego;  
 1 – silnik, 2 – sprzęgło, 3 – wał,  
 4 – naczynek, 5 – zbiornik, 6 – żebra,  
 7 – mieszadło śmigłowe, 8 – miernik próżni, 9 – tachometr, 10 – miernik mocy  
 Źródło: opracowanie własne.

Silnik elektryczny (1) połączony jest sprzęgłem (2) z wałem (3), który zainstalowany jest na łożyskach w korpusie z kołnierzem. Pojemnik do wody wykonany ze stali nierdzewnej posiada płaszcz, do którego podłączony jest termostat. Mieszadła śmigłowe są eksploatowane przy dużych prędkościach obrotowych, dlatego powinny pracować bez połączeń reduktorowych lub pasowych. Ponadto takie prędkości generują wzrost temperatury, co spowodowałoby błędy pomiarowe. W celu ustabilizowania temperatury zastosowano układ z termostatem. Przy dużych prędkościach obrotowych mieszadeł tworzy się lej, który może odsłonić całe mieszadło. Zmniejsza się przy tym zapotrzebowanie mocy, zaczyna się zasysanie powietrza, a efektywność mieszania gwałtownie spada. W celu uniknięcia tworzenia się leja, na ściankach zbiornika zamocowane są cztery żebra (6). Ciśnienie za łopatką mierzy się próżniomierzem (8), częstotliwość obrotów tachometrem (9), a moc silnika watomierzem (10).

Metoda badań polegała na pomiarach podciśnienia  $\Delta P$  za łopatką mieszadła (7) przy różnych częstotliwościach jego obrotów  $n$  i zmiennej odległości  $l$  osi otworu od krawędzi łopatki mieszadła przy stałym ciśnieniu atmosferycznym. Rozpuszczone w cieczy gazy, które zostały zassane przez otwory w łopatkach mieszadła, gromadzą się w naczyniu (4), z którego woda trafia do zbiornika (5). Wodą ze zbiornika (5) zalewany jest sztucer z pokrywą (nie jest pokazany na rys. 1).



**Rysunek 2.** Schemat mieszadła śmigłowego; 1 – korpus, 2 – łopatką  
Źródło: opracowanie własne.



**Rysunek 3.** Zmiana ciśnienia próżniowego  $\Delta P$  na łopacie mieszadła w zależności od częstotliwości obrotów  $n$  [ $\text{min}^{-1}$ ] i odległości  $l$  [mm] osi otworu od krawędzi łopatki; 1 – 0 mm; 2 – 2 mm; 3 – 5 mm; 4 – 7 mm; 5 – 8 mm

Źródło: opracowanie własne.

## 2. Wyniki i omówienie

Na laboratoryjnym stanowisku badawczym (rys. 1) wykonano badania zmiany ciśnienia próżniowego  $\Delta P$  w zależności od częstotliwości obrotów  $n$  i odległości  $l$  otworu od krawędzi łopatki mieszadła śmigłowego (rys. 2). Eksperymentalne rezultaty badań przedstawiono na wykresie (rys. 3). Wynika z nich, że wraz ze zwiększeniem częstotliwości obrotów  $n$  wzrasta podciśnienie  $\Delta P$  na łopacie mieszadła. Na podstawie analizy uzyskanych wyników zauważa się, że najbardziej efektywne jest umiejscowienie otworu przy krawędzi łopatki (krzywa 1). Na wykresie widać, że takie rozwiązanie powoduje, iż zasysana jest największa ilość powietrza już przy małych częstotliwościach obrotów. Najmniejsze podciśnienie uzyskano przy ustawieniu otworu w łopacie mieszadła najdalej od jej krawędzi (krzywa 5). W takim przypadku powietrze jest zasysane dopiero po uzyskaniu około 3000 obr./minutę, natomiast przyrosty podciśnienia są niewielkie. Podsumowując, im bliżej krawędzi łopatki znajduje się otwór, tym większa ilość powietrza może być zasysana. Przy częstotliwości obrotów  $n > 5500$  obr./minutę i dla odległości osi otworu od krawędzi łopatki  $l = 5 \div 7$  mm wzrost podciśnienia  $\Delta P$  jest na tyle niewielki, że można go pominąć.



## Literatura

1. Karcz J., *Mieszanie układu ciecz–gaz w aparatach z mieszadłem szybkoobrotowym*. „Inżynieria i Aparatura Chemiczna” 2001, nr 1, s. 3-13.
2. Błasiński H., Michalski H., Rzycki E., Stelmach J., Urbanowicz T., „Wiadomości Urzędu Patentowego” 2010, nr 10 (nr patentu 148476).
3. Kowal O., *Wpływ kawitacji na charakterystyki reologiczne i hydrauliczne potęgowych płynów nienewtonowskich*, autoreferat pracy doktorskiej, Politechnika Kijowska, Kijów 2001.
4. Aksierud G., Molchanov A., *Rozpuszczanie ciał stałych*, WNT, Warszawa 1981.
5. Kożynow W.F., Kożynow I.W., *Ozonowanie wody*, Strojzdat, Moskwa 1974.
6. Kawecka-Typek J., *Badania mocy mieszania w mieszalniku z mieszadłem wahliwym*, „Inżynieria i Aparatura Chemiczna” 2005, nr 5, s. 32-35.
7. Wróblewski A., *Natlenianie cieczy rurkowym mieszadłem samozasysającym*, Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie, Olsztyn 2010.
8. Achouri R., Dhaouadi H., Mhiri H., Bournot P., *Numerical and experimental investigation of the self-inducing turbine aeration capacity*, „Energy Conversion and Management” 2014, vol. 83, s. 188-196.
9. Achouri R., Ben Hamza S., Dhaouadi H., Mhiri H., Bournot P., *Volumetric mass transfer coefficient and hydrodynamic study of a new self-inducing turbine*, „Energy Conversion and Management” 2013, vol. 71, s. 69-75.
10. Murthy B.N., Deshmukh N.A., Patwardhan A.W., Joshi J.B., *Hollow self-inducing impellers: Flow visualization and CFD simulation*, „Chemical Engineering Science” 2007, vol. 62, no. 14, s. 3839-3848.
11. Heim A., Rzycki E., Stelmach I., *Mieszanie z napowietrzeniem mieszadła samozasysającego*, „Inżynieria i Aparatura Chemiczna” 1995, nr 2, s. 20-22.
12. Koch R., Noworyta A., *Procesy mechaniczne w inżynierii chemicznej*, WNT, Warszawa 1998, s. 514.

## THE UNDERPRESSURE ON SELF-INDUCTION PROPELLER MIXER

**Abstract:** *It is experimentally ascertained that underpressure  $\Delta P$  on the moving blade of air screw agitator (and on cavitation bubbles) increase with revolutions of agitator. On the ground of evaluated magnitude increase in underpressure  $\Delta P$  it is possible to calculate amount of holes  $n$  on all moving blades of airscrew agitator with linear velocity of agitator revolutions:*

$$W_m = 2\pi \left( \frac{d}{2} - l \right) \text{ for given amount of sucked in air } Q.$$



**Bartłomiej Brzeziński**  
**Dominika Iskra-Świercz**

## **BADANIE ŚCIŚLIWOŚCI MATERIAŁÓW KOMPOZYTOWYCH TORF – POPIÓŁ LOTNY – WAPNO**

*W artykule przedstawiono wyniki badań edometrycznej odkształcalności kompozytu gruntowego, torf – popiół lotny – wapno hydratyzowane. Badania wykazały istotny wzrost wartości edometrycznego modułu ściśliwości wraz ze wzrostem zawartości popiołu lotnego i wapna hydratyzowanego w jednostkowej objętości materiału kompozytowego.*

### **Wprowadzenie**

Wprowadzenie do podłoża gruntowego materiałów kompozytowych jest często stosowanym zabiegiem mającym na celu zwiększenie jego nośności, zmniejszenie osiadania, jak również zapobieganie zjawiskom osuwiskowym [1].

Takie wzmacnianie podłoża jest coraz częściej alternatywą dla np. wymiany gruntu, wymiany dynamicznej czy pośredniego posadowienia konstrukcji budowli [2, 3].

Postępy w geoinżynierii dają możliwość wzmacniania słabonośnych gruntów poprzez ich mieszanie ze spoiwem w warunkach *in situ*. Mogą to być techniki powierzchniowego lub wglębnego mieszania [4]. Wglębne mieszanie gruntu (DSM, *deep soil mixing*) jest metodą wzmacniania polegającą na wymieszaniu gruntu z materiałem wiążącym, którym może być cement, wapno, a także dodatki, takie jak: gips, żużel czy popioły lotne. Spoiwa te mogą być podawane w postaci suchej (*dry mixing*) lub mokrej (*wet mixing*). Powstałe wskutek takiego mieszania kolumny mogą być rozmieszczone pojedynczo, a także wykonywane jako ściany, ruszty, szkielety czy bloki [5].

Stabilizację masową (*mass stabilization*), nazywaną także płytkim mieszaniem gruntu (SSM, *shallow soil mixing*), stosuje się w celu powierzchniowego wzmocnienia słabego podłoża organicznego. Uzyskuje się to poprzez wymieszanie gruntu organicznego z suchym stabilizatorem. Spoiwami stosowanymi do stabilizacji są: cement, wapno, gips, popioły lotne, jak również rozdrobniony żużel lub mieszaniny tych spoiw [5].

Wzmacnianie dla celów budownictwa liniowego i budownictwa ziemnego słabonośnych gruntów organicznych z obszarów Żuław Elbląskich z wykorzystaniem popiołów lotnych oraz wapna hydratyzowanego jest przedmiotem wieloletnich prac badawczych prowadzonych przez autorów w Państwowej Wyższej Szkole Zawodowej w Elblągu.

Jedną z istotnych właściwości gruntowego materiału kompozytowego jest jego odkształcalność pod wpływem przyłożonego obciążenia. W niniejszym artykule zaprezentowano wyniki badań edometrycznej odkształcalności kompozytu gruntowego torf – popiół lotny – wapno hydratyzowane.

## 1. Materiały i metody badań

Bazowym materiałem do wykonania kompozytu gruntowego był torf (T) pobrany świdrem z przelotu 0÷2 m z depresyjnego obszaru basenu jeziora Druzno w pobliżu miejscowości Komorowo Żuławskie.

Jednym z dwóch składników budujących szkielet gruntowy materiału kompozytowego jest popiół lotny (PL), który został pobrany ze składowiska Elektrociepłowni Elbląg. Drugim składnikiem gruntowego materiału kompozytowego jest wapno hydratyzowane sucho gaszone (WH) w postaci proszku o nazwie handlowej Bielik.

Dane dotyczące fizycznych i chemicznych cech popiołu przekazane zostały przez laboratorium Elektrociepłowni Elbląg.

Właściwości wyjściowego materiału, jakim jest torf, oznaczono w warunkach laboratoryjnych. Zawartość materii organicznej w torfach oznaczono metodą termogravimetryczną, mierząc względną stratę masy dla zakresu temperatur 378÷723 K [6] oraz 378÷923 K [7]. Zawartość jonów wodorowych określono na podstawie badania roztworu torfowego metodą potencjometryczną [8]. Wilgotność naturalną oznaczono na podstawie względnej straty masy w temperaturze 293÷378 K [7]. Gęstość objętościową torfu oznaczono, pobierając próbki *in situ* za pomocą cylindra pomiarowego o pojemności 100 cm<sup>3</sup>. Stopień rozkładu torfu oceniono w skali von Posta na 5 [9].

Gęstość właściwą szkieletu obliczono według wzoru Skempton i Petleya [10, 11]:

$$\rho_s = \frac{3,8}{(0,013 \times I_{OM} + 1,4)}$$

gdzie:

$I_{OM}$  – zawartość materii organicznej (%).

Przygotowano 15 mieszanek popiołu lotnego i wapna hydratyzowanego przy różnych stosunkach mas popiołu do masy wapna. Mieszanki te nazywane będą dalej stabilizatorem. Stosunek masy popiołu lotnego do torfu, wapna hydratyzowanego do torfu oraz wapna hydratyzowanego do popiołu lotnego zestawiono w tabeli 1.

**Tabela 1.** Skład kompozytu gruntowego torf – popiół lotny – wapno hydratyzowane

Kompozyt	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12	K13	K14	K15
PL/T	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
WH/T	0,0125	0,025	0,0375	0,05	0,0625	0,025	0,05	0,075	0,1	0,125	0,0375	0,075	0,1125	0,15	0,1875
WH/PL	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25

PL – popiół lotny, T – torf, WH – wapno hydratyzowane sucho gaszone

Źródło: opracowanie własne.

W celu uzyskania jednorodnych próbek z torfu usunięto naturalne zanieczyszczenia (kawałki drewna, korzenie, trzcinę), a następnie grunt został wymieszany ręcznie. Do torfu o naturalnej wilgotności dodawano stabilizator w ilości wyrażonej stosunkiem masy popiołu lotnego do torfu (PL/T) i masy wapna hydratyzowanego do torfu (WH/T). Torf ze stabilizatorem mieszany był ręcznie przez około 2 minuty, co zapewniło równomierne wymieszanie składników. Tak przygotowanych 15 kompozytów umieszczono w szczelnych pojemnikach w celu dystrybucji wody i wyrównania wilgotności. Czas przechowywania próbek w zamkniętym naczyniu wynosił dobę.

Następnie próbki kompozytów umieszczono w pierścieniach edometru typu EL – 1. Obciążono kolejno 12,5, 25, 50, 100 kPa. Pomiar osiadania próbek pod obciążeniem wykazały zakończenie procesu konsolidacji pierwotnej po upływie 48 godzin. W celu wyeliminowania zjawisk biochemicznych zachodzących w torfie szczelina między obejmą a tłokiem edometru wypełniana była na bieżąco wodą.

W obliczeniach edometrycznych modułów ścisłości materiału kompozytowego uwzględniono odkształcenia własne edometru, które pomierzono bezpośrednio przed wykonaniem badań. Wartości edometrycznych modułów ścisłości obliczono dla zakresu naprężeń ściskających 25-100 kPa.

## 2. Wyniki badań

Zawartość materii organicznej obliczonej na podstawie badań termogravimetrycznych, oznaczoną wartością stężenia jonów wodorowych oraz obliczoną gęstość właściwą szkieletu gruntowego torfu przedstawiono w tabeli 2.

**Tabela 2.** Właściwości fizyczne i chemiczne torfu

Cechy fizyczne i chemiczne	Wilgotność naturalna	Gęstość objętościowa	Gęstość właściwa szkieletu gruntowego	Zawartość części organicznych	Odczyn	Porowatość
Symbol	Wn	$\rho$	$\rho_s$	$l_{OM}$	pH	n
Jednostka	(%)	[g/cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]	(%)	[–]	[–]
Wartość	322,9÷376,4	0,89-0,92	1,71	60,42÷65,38	6,2÷6,8	0,88

Źródło: opracowanie własne.

Skład chemiczny popiołu lotnego stosowanego do wykonania materiału kompozytowego zestawiono w tabeli 3. W świetle przedstawionego składu, zgodnie z BN-79/6732.09, jest to popiół krzemianowy.

**Tabela 3.** Skład chemiczny popiołu lotnego z Elektrowni Elbląg

Składnik	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	BaO	SrO
Ilość (%)	56,5	6,9	18,6	0,12	0,86	4,74	2,81	0,48	0,41	0,72	3,08	0,16	0,07

Źródło: opracowanie własne.

Wyniki obliczeń edometrycznych modułów ścisłości kompozytów o różnych stosunkach mas PL/T i WH/T zaprezentowano w tabeli 4.

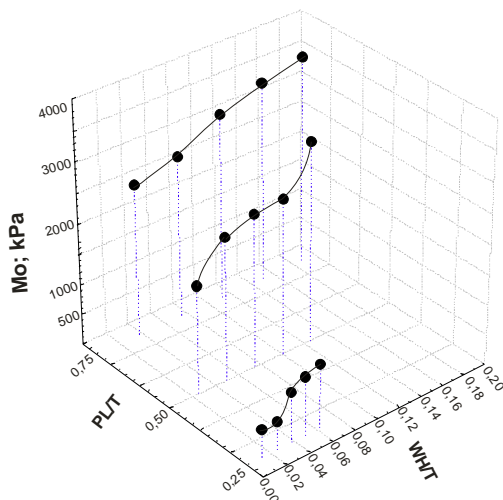
**Tabela 4.** Wartości edometrycznych modułów ścisłości ściskanych kompozytów

Numer kompozytu	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	K11	K12	K13	K14	K15
Wartość modułu M <sub>0</sub> [kPa]	461,7	469,7	850,7	970,4	1072,6	1788,7	2374,6	2532,2	2580,1	3300,9	2504,1	2673,2	3068,7	3318,8	3445,6

Źródło: opracowanie własne.

### 3. Analiza wyników i wnioski

Wartości edometrycznych modułów ścisłości zawierają się w przedziale 461,7-3445,6 kPa. Ich wartość zwiększa się wraz ze spadkiem zawartości torfu w jednostkowej objętości materiału kompozytowego. Na rysunku 1 przedstawiono wartości edometrycznych modułów ścisłości w zależności od stosunku PL/T i WH/T.



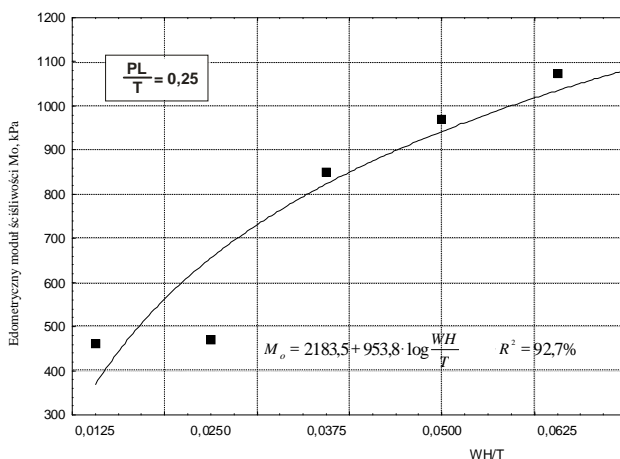
**Rysunek 1.** Wartości modułów ścisłości w materiałach kompozytowych w zależności od stosunku PL/T i WH/T; PL – popiół lotny, T – torf, WH – wapno hydratyzowane sucho gaszone

Źródło: opracowanie własne.

Z przedstawionego wykresu widać istotny wpływ stosunku PL/T na wartość  $M_o$ . Widoczny jest również wpływ stosunku masy WH/T na wartość  $M_o$ .

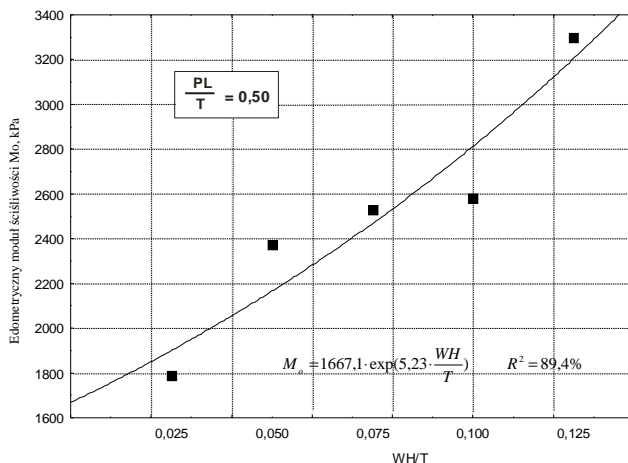
Na podstawie pięciu par otrzymanych w eksperymencie wartości ( $M_o$ ; WH/T) dla PL/T = 0,25, PL/T = 0,50, PL/T = 0,75, metodą najmniejszych kwadratów [12] wykonano próbę określenia funkcyjnej zależności zapisanej wzorem ogólnym:  $M_o = M_o(WH/T)$ .

Na rysunkach 2-4 przedstawiono położenie edometrycznych modułów ściśliwości  $M_o$  względem aproksymowanych funkcji  $M_o = M_o(WH/T)$ .



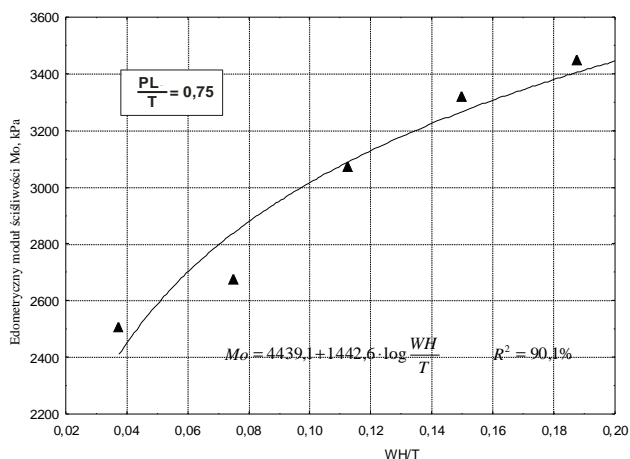
**Rysunek 2.** Położenie eksperymentalnych wartości  $M_o$  względem aproksymującej funkcji  $M_o = M_o(WH/T)$  dla stosunku PL/T = 0,25; PL – popiół lotny, T – torf, WH – wapno hydratyzowane sucho gaszone

Źródło: opracowanie własne.



**Rysunek 3.** Położenie eksperymentalnych wartości  $M_o$  względem aproksymującej funkcji  $M_o = M_o(WH/T)$  dla stosunku PL/T = 0,50; PL – popiół lotny, T – torf, WH – wapno hydratyzowane sucho gaszone

Źródło: opracowanie własne.



**Rysunek 4.** Położenie eksperymentalnych wartości  $M_o$  względem aproksymowanej funkcji  $M_o = M_o(WH/T)$  dla stosunku  $PL/T = 0,75$ ; PL – popiół lotny, T – torf, WH – wapno hydratyzowane sucho gaszone

Źródło: opracowanie własne.

Wszystkie zależności edometrycznych modułów ścisłości, jako funkcji stosunku  $WH/T$  przy stałym stosunku  $PL/T$ , wyznaczono przy współczynnikach determinacji  $R^2 > 89,4\%$ , co oznacza, że funkcje są dobrym predyktorem dla określenia zwiększania się edometrycznych modułów ścisłości w zależności od stosunku  $WH/T$ ,  $M_o = M_o(WH/T)$ .

Z danych przedstawionych w tabeli 4 wynika, że wartości modułów zwiększają się wraz ze zmniejszaniem się zawartości torfu w mieszance. Stosunek wartości modułów ścisłości kompozytu o najmniejszej zawartości torfu (K15) do modułu kompozytu o największej zawartości torfu (K1) wynosi 7,5.

Na podstawie analizy badań można wysunąć następujące wnioski:

- Wartość stosunku  $WH/T$  w kompozycie ma największy wpływ na zwiększenie się edometrycznego modułu ścisłości, gdy stosunek  $PL/T = \text{const}$ .
- Wraz ze zwiększeniem się zawartości wapna hydratyzowanego w kompozycie zwiększa się edometryczny moduł ścisłości.
- Wartości edometrycznych modułów ścisłości w kompozytach K1 i K2, w których stosunek  $PL/T = 0,25$  i  $WH/T \leq 0,025$ , są mniejsze od 500 kPa, co realnie eliminuje je z praktyki wykonawczej.
- Dalsze prace dotyczące analizowanego problemu powinny polegać na wykonaniu badań mających na celu uwzględnienie właściwości materiału bazowego, jakim jest grunt organiczny. Tymi właściwościami są zawartość materii organicznej i skład granulometryczny mineralnej części szkieletu gruntowego.



## Literatura

1. Gajewska B., Kłosiński B., *Wzmacnianie słabego podłoża kolumnami w budownictwie drogowym*, „Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne” nr lipiec-sierpień 2012, s. 56-62.
2. Gwizdała K., *Fundamenty palowe. Technologie i obliczenia*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010.
3. Masłowski E., Spiżewska D., *Wzmacnianie konstrukcji budowlanych*, Wydawnictwo Arkady, Warszawa 2000.
4. Topoliński S., Gorączko A., *Wzmacnianie słabonośnych podłoży organicznych przy użyciu metody mieszania gruntu in situ*, „Logistyka” 2014, nr 6, 10678-10683.
5. Madej J.S., *Ulepszanie podłoża. Materiały pomocnicze do wykładów z zakresu geotechniki*, Koszalin 2015.
6. *Standard Test Methods for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils*, ASTM D 2974-87, marzec-kwiecień 1993.
7. PN-B-04481:1988, *Grunty budowlane. Badania próbek gruntu*.
8. Karczewska A., Kabała C., *Metodyka analiz laboratoryjnych gleb i roślin*, wyd. 4, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wrocław 2008.
9. Żurek S., *Metody badań osadów bagiennych*, „Landform Analysis” 2010, vol. 12, s. 137-148.
10. Myślińska E., *Parametry fizyczne torfów i ocena metod ich oznaczania*, „Przegląd Geologiczny” 1999, vol. 47, nr 7, s. 676-682.
11. Skempton A.W., Petley D., *Ignition loss and Rother properties of peats and clays from Aronmouth King, Lynn and Cranberry Moss*, „Geotechnique” 1970, vol. 20, s. 343-356.
12. Draper N.R., Smith H., *Analiza regresji stosowana*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1973.

### COMPRESSIBILITY TESTING OF COMPOSITE MATERIALS PEAT – VOLATILE ASH – LIME

**Abstract:** *The article presents the test results of oedometric pliability of a soil composite, peat – volatile ash – hydrated lime. The tests have shown that the content of volatile ash and hydrated lime in the unit volume of the composite material significantly increases the value of oedometric compressibility modulus.*



Malwina Marciniszyn-Jedeszko  
Agata Rychter  
Izabela Jabłońska-Barna

## ROZMIESZCZENIE STANOWISK BOBRA EUROPEJSKIEGO (*CASTOR FIBER*) NA OBSZARZE WYSOCZYZNY ELBLĄSKIEJ

*Na podstawie obserwacji prowadzonych na terenie Wysoczyzny Elbląskiej w latach 2009-2011 zlokalizowano 15 stanowisk bobra europejskiego (*Castor fiber*). Spośród nich 11 opisano jako czynne stanowiska, ze świeżymi śladami aktywności. Większość stanowisk (10) znajdowała się na obszarze chronionym prawnie (Park Krajobrazowy Wysoczyzny Elbląskiej). W artykule zaprezentowano rozmieszczenie stanowisk, ich szczegółowy opis oraz rodzaj oddziaływania bobrów na najbliższe otoczenie.*

### Wprowadzenie

Bóbr europejski (*Castor fiber*) jest największym gryzoniem zamieszkującym obecnie Euroazję, należącym do rodziny bobrowatych *Castoridae* [1]. W Europie zasięg występowania bobra nie zmieniał się do XII wieku. Osobniki tego gatunku można było spotkać w całej Europie, z wyjątkiem Włoch, Grecji, Irlandii oraz Danii, w kolejnych stuleciach zniknęły z obszaru Anglii, Walii, Belgii i Transylwanii, zachodniej Francji i Półwyspu Iberyjskiego, oraz zmniejszyły swój zasięg w Finlandii. Dalsza redukcja liczebności populacji bobra europejskiego objęła obszar zachodniej Europy oraz Rosji. Na początku XX wieku działalność człowieka ograniczyła występowanie tego gatunku do małych kolonii [2]. W Polsce w latach powojennych populacja bobra liczyła zaledwie 130 osobników, co skłoniło do rozpoczęcia działań mających na celu jej odbudowanie. Prowadzone programy reintrodukcyjne i szeroka tolerancja ekologiczna bobra zapoczątkowały dynamiczny wzrost populacji tego gatunku w Polsce. Od kilkadziesiątu lat obserwuje się intensywny rozwój populacji – jedna z najbardziej zwartych i licznych zajmuje część północo-wschodnią Polski [3-5].

Bóbr europejski podlega obecnie ochronie określonej zarówno w prawie krajowym (ustawa z dnia 16 kwietnia 2004 roku o ochronie przyrody), jak i międzynarodowym (Konwencja Berneńska; Dyrektywa 92/43/EWG w sprawie ochrony siedlisk przyrodniczych oraz dzikiej fauny i flory; lista IUCN), co prawdopodobnie przyczyniło się do wzrostu jego populacji.

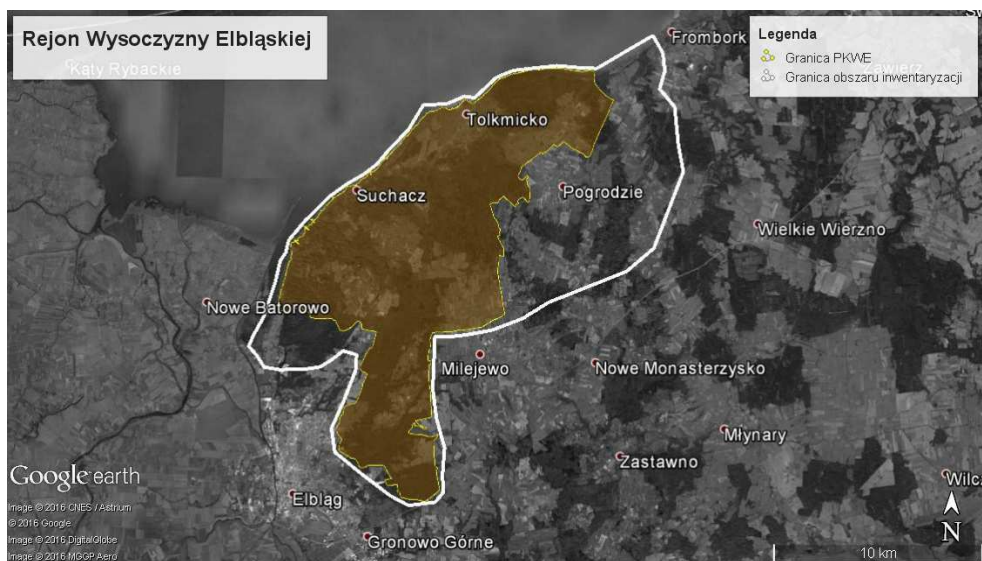
Prace inwentaryzacyjne pozwalają uzupełnić dane na temat występowania bobra. Informacje mogą być przydatne dla ochrony czynnej tego gatunku, jak również obszarów chronionych, na których on występuje. Od 2009 r. otrzymywano

liczne sygnały o pojawieniu się bobra na obszarze Wysoczyzny Elbląskiej, w tym na terenie Parku Krajobrazowego Wysoczyzny Elbląskiej (PKWE) (informacje ustne pracowników PKWE).

Celem pracy było zlokalizowanie stanowisk bobra na Wysoczyźnie Elbląskiej, w tym na terenach prawnie chronionych.

## 1. Charakterystyka rejonu badań

Badaniami zostały objęte Wysoczyzna Elbląska oraz południowe rubieże Pobrzeża Staropruskiego (kod: 313.57 – mezoregion fizycznogeograficzny). Wysoczyzna Elbląska położona jest w północnej części Polski, w województwie warmińsko-mazurskim (rys. 1). Zajmuje obszar o powierzchni około 450 km<sup>2</sup>. Region graniczy od wschodu i południa z Równiną Warmińską, od zachodu z Żuławami Wiślаныmi, a od północy z Pobrzeżem Staropruskim i Zalewem Wiślany [6].



**Rysunek 1.** Rejon Wysoczyzny Elbląskiej  
Źródło: [www.pkwe.pl](http://www.pkwe.pl) [dostęp: 02.11.2016].

Wysoczyzna Elbląska jest obszarem niezwykle różnorodnym pod względem ukształtowania terenu. W głębi obszaru występują liczne jary i wąwozy z różnicami w wysokościach terenu dochodzącymi do 40 i więcej metrów. Wysoczyzna Elbląska jest poprzecinana wieloma ciekami, w których poziom wód jest zmienny (Narusa, Stradanka, Olszanka, Kamienica, Grabianka, Rangóry, Kamionka, Dąbrówka, Danmówka, Kumiela, Srebrny Potok, Lisi Parów). Od strony Zalewu

Wiślanego występują wały przeciwpowodziowe chroniące przyległe tereny przed zalaniem. Buk zwyczajny (*Fagus sylvatica*), który stanowi 60% drzewostanu, jest gatunkiem dominującym w lasach Wysoczyzny Elbląskiej. Wzdłuż cieków można zaobserwować występowanie mozaiki leśnych siedlisk hydrogenicźnych, w tym głównie siedlisk łągowych i olsowych [7].

Fragmety Wysoczyzny Elbląskiej o wysokich walorach przyrodniczych, krajo-  
brazowych i kulturowych objęto ochroną prawną, powołując w 1985 r. PKWE oraz inne formy ochrony przyrody: obszar Natura 2000 PLH280029 Doliny Erozyjne Wysoczyzny Elbląskiej, pięć rezerwatów przyrody: Buki Wysoczyzny Elbląskiej, Kadyński Las, Nowinka, Dolina Stradanki, Pióropusznikowy Jar, dwa obszary chronionego krajobrazu: Wysoczyzny Elbląskiej – Wschód i Wysoczyzny Elbląskiej – Zachód. Teren badań objął obszar Natura 2000 PLH280007 Zalew Wiślany i Mierzeja Wiślana w części granicznej z Wysoczyzną Elbląską.

## 2. Metodyka badań

Obserwacje terenowe (inwentaryzację) na wybranych terenach reprezentatywnych w kierunku występowania bobra (wzdłuż linii brzegowych cieków oraz Zalewu Wiślanego) przeprowadzono raz w sezonie: jesienią 2009 r., wiosną i jesienią 2010 r. oraz wiosną, latem i jesienią 2011 r. W latach 2009-2010 odbyła się inwentaryzacja na ciekach Olszanka, Grabianka, Lisi Parów oraz ujściowym odcinku rzeki Narusa. W kolejnym roku (2011) inwentaryzacji poddano pas wybrzeża wzdłuż Zalewu Wiślanego od miejscowości Rubno Wielkie do Narusa oraz cieki: Narusa, Stradanka, Grabianka, Kamienica, Rangóry, Kamionka, Dąbrówka, Danmówka, Kumiela, Srebrny Potok. Obserwacje polegały na identyfikacji śladów aktywności bobra:

- charakterystyczne zgryzy na pniach drzew i towarzyszące im wióry drewna,
- stoliki pokarmowe (miejsce żerowania),
- ścieżki – wydeptane zejścia do wody,
- kanały służące do spławiania drewna,
- żeremia,
- tamy,
- stawy, w których rozwija się roślinność wodna i jest magazynowany pokarm na okres zimowy (magazyny żerowe),
- nory.

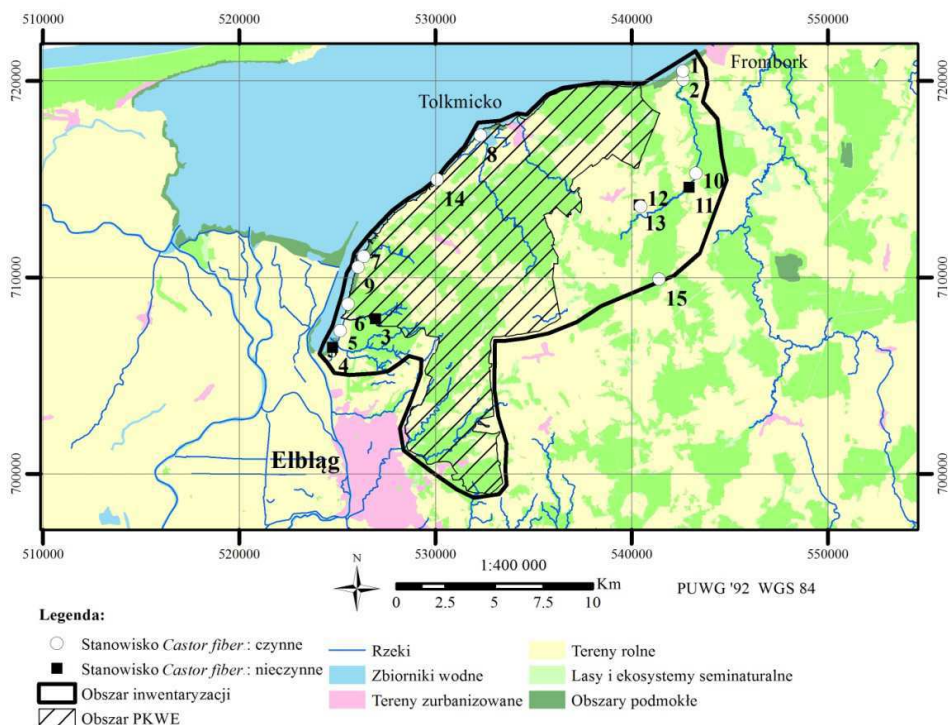
Przestrzenne rozmieszczenie stanowisk na podstawie śladów aktywności bobra zostało opisane w sposób punktowy za pomocą współrzędnych geograficznych. Pomiaru GPS były wykonywane zawsze przy charakterystycznym obiekcie na stanowisku (np. tama, staw bobrowy, żeremie, nora). Na trzech stanowiskach dokonano więcej niż jednego pomiaru GPS ze względu na obserwowany zespół tam (tab. 1). Do graficznego przedstawienia wyników wykorzystano oprogramowanie

ArcGIS Desktop firmy ESRI [8] i mapy ze zbiorów projektu „System informacji środowiskowo-przestrzennej jako podstawa do zrównoważonego gospodarowania ekosystemem Zalewu Wiślanego (VISLA) POKL 04.01.02-00-187/10”.

Do badań terenowych i ich dokumentacji wykorzystano sprzęt pomiarowy: miarka o długości 50 m, odbiornik GPS firmy Garmin oraz aparat fotograficzny.

### 3. Wyniki

W wyniku inwentaryzacji obszaru Wysoczyzny Elbląskiej w latach 2009-2011 wykazano obecność 15 stanowisk bobra. Spośród nich 11 opisano jako czynne, ze świeżymi śladami aktywności. W latach 2009-2010 zaobserwowano cztery stanowiska bobra, na których ślady aktywności wskazywały na zamieszkanie i czynną eksploatację przyległych terenów (stanowiska 8, 2, 14, 15). W sumie w 2011 r. oznaczono dziewięć czynnych stanowisk (numery: 1, 2, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12) oraz cztery stanowiska opuszczone (numery: 3, 4, 11, 13) (rys. 2).



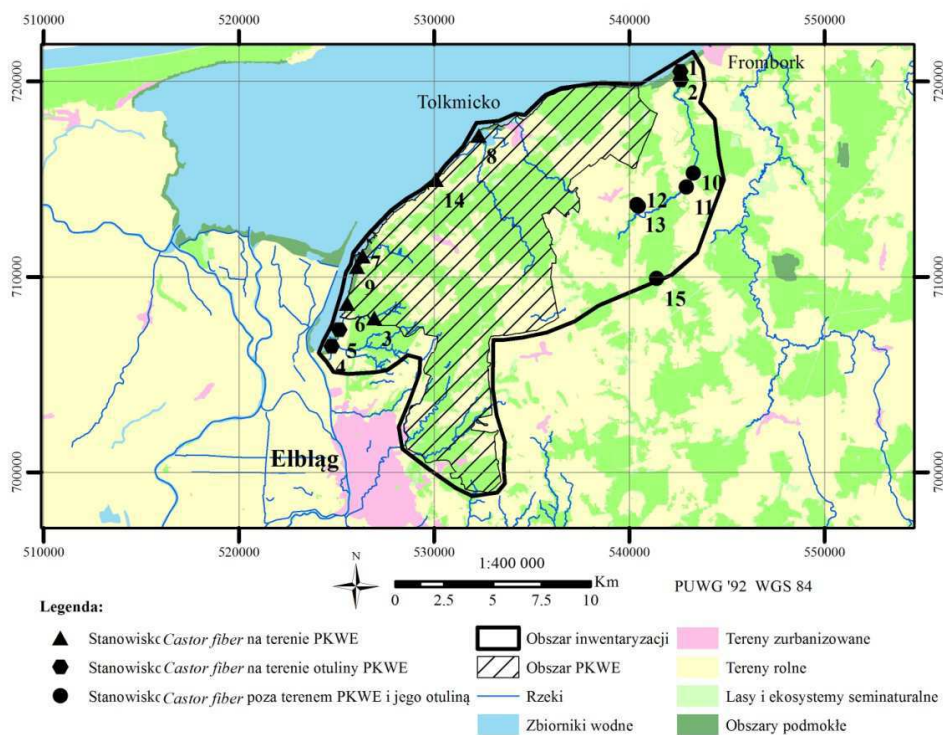
**Rysunek 2.** Stanowiska *Castor fiber* na Wysoczyźnie Elbląskiej w latach 2009-2011

Źródło: opracowanie własne.

Obok wałów przeciwpowodziowych i obwałowań rzek przy ich ujściu do Zalewu Wiślanego miejscem bytowania bobra na Wysoczyźnie Elbląskiej były ciekі o różnorodnym stopniu zasilania wodą (Kamionka, Grabianka, Olszanka, Lisi Parów), w tym na kilku odcinkach rzeki Narusa (tab. 1). W pasie przybrzeżnym Zalewu Wiślanego od Narusy do Tolkmicka (pas długości około 15 km, okolice Szlaku Kopernikowskiego) nie odnotowano śladów aktywności bobrów. Należy jednak dodać, że obszar ten był badany jednokrotnie (w dniu 09.07.2011) i sytuacja na tym obszarze w kolejnych miesiącach mogła ulec zmianie.

Na 13 stanowiskach (spośród 15 odnotowanych) zaobserwowano w sumie: dziewięć tam, jedno opuszczone żeremie, a także cztery stawy – zbiorniki utworzone przez bobry oraz liczne czynne i zapadnięte nory (tab. 1).

Spośród stwierdzonych stanowisk 10 (numery: 1-9, 14) znajdowało się na terenie PKWE i jego otuliny, a pięć stanowisk (numery: 10-13, 15) poza tym obszarem (rys. 3).



**Rysunek 3.** Stanowiska *Castor fiber* na Wysoczyźnie Elbląskiej w odniesieniu do obszaru chronionego (Parku Krajobrazowego Wysoczyzny Elbląskiej)

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 1. Opis stanowisk *Castor fiber* na obszarze Wysoczyzny Elbląskiej (2009-2011)

Pora/data obserwacji	Współrzędne punktu	Opis stanowiska
<b>STANOWISKO NR 1</b>		
11.07.2011	N 54° 20,572' E 19° 39,364'	Rzeka Narusa, rozlewisko o powierzchni około 50 m <sup>2</sup> , otoczone kanałami bobrowymi, którymi zostało splewione drewno. Teren po południowej stronie Kolei Nadzalewowej, w okolicy miejscowości Narusa i niewielkiego mostu kolejowego, Leśnictwo Nowy Wiek. Dawniej tama znajdowała się na rzece Narusa pod mostem w miejscowości Narusa (informacja ustna pracownika PKWE). Teren otuliny PKWE
<b>STANOWISKO NR 2</b>		
Jesień 2009; wiosna, jesień 2010; 11.07.2011	N 54° 20,805' E 19° 39,352'	Rzeka Narusa, rozlewisko – staw bobrowy widoczny, o powierzchni około 20-30 m <sup>2</sup> , tama około 10 m na północ, dojście do tamy niemożliwe z powodu bujnego rozrostu roślinności wokół stawu i wzdłuż cieku. Teren po północnej stronie Kolei Nadzalewowej, w okolicy miejscowości Narusa i niewielkiego mostu kolejowego, Leśnictwo Nowy Wiek. Teren otuliny PKWE
<b>STANOWISKO NR 3</b>		
26.07.2011	N 54° 14,066' E 19° 24,820'	Ślady aktywności bobrów wokół zbiornika wodnego (retencyjnego). Teren PKWE
<b>STANOWISKO NR 4</b>		
Maj 2011; 15.08.2011	N 54° 13,288' E 19° 22,801'	Stacja pomp w Rubnie Wielkim, ślady aktywności bobrów jeszcze do maja 2011 r. (okoliczna roślinność odrosła do tego stopnia, że dawne zgrzyzy były niewidoczne, pozostały jedynie kanały bobrowe, które też zaczynały zarastać). Teren otuliny PKWE
<b>STANOWISKO NR 5</b>		
26.08.2011	N 54° 13,745' E 19° 23,163'	Rubno Wielkie, strumień obwałowany, wały przecinają w kilku miejscach kanały do splewania drewna, widoczne były wydeptane ścieżki prowadzące do wody (rejon Zatoki Elbląskiej), bezpośrednie dojście niemożliwe z powodu zbyt wysokiego stanu wody. Teren otuliny PKWE
<b>STANOWISKO NR 6</b>		
26.08.2011	N 54° 14,474' E 19° 23,533'	Wał przeciwpowodziowy między miejscowościami Rangóry, Jagodno, składowiskiem popiołów a Zatoką Elbląską, wydeptane ścieżki wskazujące na przeciąganie drewna przez koronę wału na stronę Zatoki Elbląskiej; żeremie prawdopodobnie w pobliskim trzcinowisku, bezpośrednie dojście niemożliwe z powodu zbyt wysokiego stanu wody; możliwa również obecność nor wykopanych w wale (dawniej obserwowano bobry na terenie składowiska popiołów – informacja ustna pracownika PKWE). Teren PKWE
<b>STANOWISKO NR 7</b>		
26.08.2011	N 54° 15,780' E 19° 24, 290'	Port Kamienica Elbląska (Kamionek Wielki), obwałowanie wokół wejścia do portu, liczne kanały bobrowe po stronie północno-wschodniej (prawej, patrząc od przystani); ślady świeżych i starszych zgrzyzów na okolicznych wierzbach, widoczne wydeptane zejścia do wody, żeremie w pobliskim trzcinowisku; dojście bezpośrednie niemożliwe z powodu zbyt wysokiego stanu wody. Teren PKWE
<b>STANOWISKO NR 8</b>		
Jesień 2009; wiosna, jesień 2010; 26.08.2011	N 54° 19,086' E 19° 29,804'	Ujście rzeki Grabianka, obwałowania wokół rzeki po stronie północno-wschodniej (prawej, patrząc od strony źródła rzeki – czyli z nurtem) poprzecinane kanałami bobrowymi, zapadnięte nory w wale, po obu stronach widoczne wydeptane zejścia do wody. Teren PKWE



<b>STANOWISKO NR 9</b>		
26.08.2011	N 54° 15,490' E 19° 24,013'	Kamionek Wielki, rzeka płynąca od Wąwozu Menonitów uchodząca do Zatoki Elbląskiej (blisko umownej granicy między Zatoką Elbląską a Zalewem Wiślany) obwałowana po obu stronach, liczne zapadnięte nory w wale (nawet na około 1 m), na obu brzegach widoczne wydeptane zejścia do wody, prawdopodobnie żeremie znajdowało się przy ujściu rzeki po południowej stronie i/lub zachowały się nory w wale (co było w tym wypadku mniej prawdopodobne, ponieważ wał po stronie północnej został w znacznej części zniszczony przez wcześniejsze nory, które już się zapadły). Teren PKWE
<b>STANOWISKO NR 10</b>		
09.09.2011	N 54° 17,994' E 19° 39,929'  N 54° 18,001' E 19° 39,974'	Zespół tam na rzece Narusa: <ul style="list-style-type: none"> <li>• I tama o długości 5-6 m, przed tamą dużej wielkości zejście do wody, a za nim zespół kanałów do splawiania drewna podchodzących aż pod ścianę drzew</li> <li>• II tama umiejscowiona za zakolem rzeki, w linii prostej między tamami jest tylko kilka metrów odległości, tama o długości około 4 m, za nią dodatkowo niewielki uskok, przy brzegu widoczne zejście do wody</li> </ul> <p>Obie tamy wyraźnie spowolniły bieg rzeki, który musiał być na tym odcinku o wiele silniejszy, na co wskazuje wyrwa w brzegu przy kolejnym meandrze, znajdującym się za tamą II  Tamy znajdują się około 1 km na północny zachód od miejscowości Krzywiec  Bobra prawdopodobnie przeniosły się w górę rzeki, ich stanowiska znajdowały się we wcześniejszych latach w niższych partiach, tworząc zespół kilku tam z kanałami i stawem bobrowym (inf. ustna pracownika PKWE). Obszar poza terenem PKWE i jego otuliną</p>
<b>STANOWISKO NR 11</b>		
05.10.2011	N 54° 17,612' E 19° 39,589'	Stanowisko na rzece Narusa w okolicach miejscowości Krzyzewo, żeremie o wysokości około 1,5 m, liczne kanały, a także tama – grobla w rozpadzie; stanowisko zamieszkałe jeszcze do wiosny/lata 2011; tama o wymiarach: długość 11 m, wysokość 2,5 m, szerokość 2-3 m, tama zmieniła naturalny bieg rzeki, tworząc rozlewisko o powierzchni około 50 m <sup>2</sup> ; podczas badań zaobserwowano, że poziom wody w rozlewisku obniżył się, tama uległa zniszczeniu, wejście do żeremia zostało odsłonięte, a nora pod korzeniem drzewa zapadła się; z pozostałych śladów można wymienić także kanały i zejścia do wody. Obszar poza terenem PKWE i jego otuliną
<b>STANOWISKO NR 12</b>		
09.11.2011	N 54° 17,095' E 19° 37,312'  N 54° 17,064' E 19° 37,396'	Zespół tam na rzece Narusa między miejscowościami Wodynia i Brzezina Rzeka w tym miejscu znajduje się od strony południowej w obniżeniu terenu; podczas badania zaobserwowano rozległe obszary ze ściętymi przez bobry drzewami; tamę I długości 10-11 m tworzącą staw bobrowy o długości około 150 m i 2-3 m głębokości, a także mniejszą, o długości 1,5 m tamę (II) – w grobli znajdującej się około 150 m na wschód od poprzedniej, bobry przeniosły się na to stanowisko prawdopodobnie z pobliskiego zbiornika wodnego, gdy po przekopie do rzeki lustro wody w zbiorniku znacząco spadło. Obszar poza terenem PKWE i jego otuliną
<b>STANOWISKO NR 13</b>		
09.11.2011	N 54° 17,143' E 19° 37,231'  N 54° 17,211' E 19° 37,170'  N 54° 17,234' E 019° 37,147'	Zespół tam na rzece Narusa, między miejscowościami Wodynia i Brzezina Na zachód od zamieszkiwanego siedliska nr 12 znajduje się już opuszczone siedlisko z zespołem tam oraz dwie odnalezione nieczynne nory (wejścia powyżej stanu wody, sklepienia zapadnięte). Obszar poza terenem PKWE i jego otuliną

<b>STANOWISKO NR 14</b>		
Jesień 2009; wiosna, jesień 2010	N 54° 29,798' E 19° 46,257'	Ujście rzeki Olszanki Umiejscowienie stanowiska wskazuje na wykorzystanie tej rzeki do przemieszczania się osobników Teren PKWE
<b>STANOWISKO NR 15</b>		
Jesień 2009; wiosna, jesień 2010	N 54° 25,163' E 19° 63,575'	Zespół tam i kanałów w okolicy Rezerwatu Przyrody Pióropusznikowy Jar, na rzece Lisi Parów Obszar poza terenem PKWE i jego otuliną Inwentaryzacja wykonana w 2011 r. podaje: 4 tamy bobrowe, 1 żeremie [9]

PKWE – Park Krajobrazowy Wysoczyzny Elbląskiej

Źródło: opracowanie własne.

## 4. Dyskusja

Ślady aktywności bobra europejskiego na inwentaryzowanym obszarze Wysoczyzny Elbląskiej świadczą o większej liczbie stanowisk tych zwierząt niż podana przez Nadleśnictwo Elbląg (informacja ustna) – cztery czynne stanowiska. Prawdopodobnie liczba stanowisk bobra na tym terenie jest większa od odnotowanej podczas bieżącej inwentaryzacji (2009-2011). Podstawą do tego stwierdzenia jest trudność identyfikacji stanowisk ze względu na ich lokalizację w trudnodostępnych terenach (np. strome brzegi cieków).

Na terenie Polski bóbr europejski często zamieszkuje nory. Wyniki badań przeprowadzonych w województwie warmińsko-mazurskim wykazały, że ten rodzaj schronienia jest wykorzystywany przez około 65% subpopulacji [10]. Na terenie województwa mazowieckiego aż około 75% bobrów zamieszkiwało nory [11]. Tak duży udział nor jako bobrzyczych schronień wynika prawdopodobnie z faktu, że większa część populacji bytuje nad rzekami, których nabrzeża stwarzają dogodne warunki do wykopywania podziemnych tuneli [12]. Inwentaryzacja stanowisk bobra wskazuje na dominację stanowisk z norami na Wysoczyźnie Elbląskiej. Zasiedlanie nor może się wiązać z ukształtowaniem terenu monitorowanego obszaru – znaczne różnice w wysokościach na odcinkach bezpośredniej linii brzegowej cieków oraz obecność wałów przeciwpowodziowych. Należy dodać, że żeremia częściej niż nory są świadomie niszczone przez lokalną społeczność (informacja ustna pracowników Nadleśnictwa Elbląg).

Z powodu niewielkiej liczby obserwacji oraz braku dostępu do żeremi bobrów opracowanie ich charakterystyki morfometrycznej było niemożliwe. Jedynie na jednym opuszczonym stanowisku (nr 11) w okolicach miejscowości Krzyżewo udało się dokonać podstawowych pomiarów żeremia. Jego wysokość wynosiła 1,5 m a średnica u podstawy około 2 m. Wysokość ta jest przynajmniej o połowę mniejsza od maksymalnych podawanych w literaturze [1, 2, 13, 14].

Bóbr europejski zamieszkuje bardzo zróżnicowane siedliska: bagna naturalne, rowy melioracyjne, niewielkie cieki, rzeki i jeziora [15-17], bytuje wśród pól

uprawnych, w bezpośrednim sąsiedztwie gospodarstw rolnych, sadów [18]. Jednym z najczęściej notowanych miejsc jego występowania na Wysoczyźnie Elbląskiej, obok cieków, były wały przeciwpowodziowe na granicy z Zalewem Wiślanym, w których bóbr drążył nory. Działalność ta mogła mieć znaczący wpływ na podtapianie lokalnych terenów podczas wystąpienia gwałtownych wezbrań wody, co odnotowano w sierpniu 2011 r. w pobliżu stanowisk nr 4, 5, 6, 7, 8, 9.

Bóbr aktywnie przemieszcza się w poszukiwaniu dogodnych dla siebie obszarów, kierując się przy tym dostępem do odpowiedniej ilości pokarmu i lokalizacją zapewniającą bezpieczne schronienie. Potrafi w tym celu pokonywać nocą wiele kilometrów drogą wodną lub lądową [1, 2]. Bardzo często przenosi swoje stanowiska wzdłuż rzeki, po wyczerpaniu materiału roślinnego. Takie obserwacje poczyniono na rzece Narusa, gdzie zaobserwowano opuszczone stanowiska nr 11 i 12 oraz położone w odległości do kilkuset metrów od nich, stanowiska aktywne, odpowiednio 10 i 13 (rys. 2). Podobna zależność mogła mieć miejsce pomiędzy nieaktywnymi stanowiskami nr 3 i 4 a aktywnymi nr 5, 6, 7 oraz 9, umiejscowionymi w bezpośrednim sąsiedztwie Zatoki Elbląskiej (rys. 2). Opuszczone stanowiska szybko zarastają odtwarzającą się roślinnością, jak to miało miejsce na stanowisku nr 4 (tab. 1).

Na inwentaryzowanych rzekach Wysoczyzny Elbląskiej tamy bobrowe (zespoły tam) zmieniają znacznie ich nurt, spowalniając go (obserwacje na stanowiskach nr 10-13), co może ostatecznie spowodować zmianę charakteru terenu w pobliżu koryta cieków na podmokły. Dodatkowo powstałe stawy bobrowe (zbiorniki wodne) i kanały służące do spławiania drewna mogą stać się miejscem rozwoju roślinności wodnej i bagiennej. Podnoszenie poziomu wód powierzchniowych uznawane jest za najważniejszy efekt obecności bobra w zasiedlonym terenie [12].

Można przypuszczać, że jeśli obecna populacja z sukcesem odchowuje młode, to w kolejnych latach nastąpi dalsza ekspansja tych ssaków na teren Wysoczyzny Elbląskiej.

Obecność bobra europejskiego i jego aktywność na obszarze Wysoczyzny Elbląskiej może być korzystna dla środowiska przyrodniczego ze względu na obserwowane zmiany hydrologiczne. Jednakże ingerencja bobra w strukturę wałów przeciwpowodziowych znajdujących się na tym terenie znacznie zwiększa zagrożenie powodziowe pobliskich terenów, w dużej mierze zamieszkałych przez ludność.

## Literatura

1. Czech A., *Bóbr*, Wydawnictwo Lubuskiego Klubu Przyrodników, Świebodzin 2000.
2. Dzięciołowski R., *Bóbr*, Wydanie I, Wydawnictwo SGGW, Warszawa 1996.
3. Giżejowski Z., Goździewski J., *Zarządzanie populacją bobra europejskiego *Castor fiber*, Zarządzanie populacjami zwierząt*, Warszawa 2016, s. 61-69.
4. Dzięciołowski R., Goździewski J., *Bóbr *Castor fiber**. [w:] *Łowiectwo*, t. 1, Wydawnictwo Łowiec Polski, Warszawa 2011, s. 328-332.

5. Dzięciołowski R., *Reintrodukcja bobrów w Polsce – historia sukcesu*, „Agricola. Pismo SGGW. Suplement” 1999, nr 40, s. 9-11.
6. Kondracki J., *Geografia regionalna Polski*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2000.
7. <http://parkikrajobrazowewarmiimazur.pl/wysoczyznyelblaskiej/> [dostęp: 02.11.2016].
8. ESRI 2011. ArcGIS Desktop: Release 10. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.
9. Grzybowski M., Bałdyga T., *Inwentaryzacja przyrodnicza na potrzeby korekty granic rezerwatu przyrody „Pióropusznikowy Jar”*, RDOŚ, WFOŚiGW, Olsztyn 2011, s. 1-37.
10. Janiszewska L., Janiszewski P., *Bóbr na Warmii i Mazurach*, „Natura – Przyroda Warmii i Mazur” 2006, nr 2, s. 7-10.
11. Janiszewski P., Weigle A., Gugolek A., *Stan i rozmieszczenie bobra europejskiego (Castor fiber L.) w województwie mazowieckim*, „Roczniki Naukowe Polskiego Towarzystwa Zootechnicznego” 2007, s. 367-374.
12. Janiszewski P., Misiukiewicz W., *Bóbr europejski Castor fiber*, BTL Works, Warszawa 2012.
13. Lewandowska C., *Nad Pasłęką żyją bobry*, Wydawnictwo Nasza Księgarnia, Warszawa 1976.
14. Dehnel G., *Zamki na wodzie*, Państwowe Zakłady Wydawnictw Szkolnych, Warszawa 1958.
15. Misiukiewicz W., *Szkodnik bóbr*, „Brać Łowiecka” 2002, nr 5, s. 16-17.
16. Biały K., *Podstawy łowiectwa*, Wydawnictwo Łowiec Polski, Warszawa 1994.
17. Żurowski W., *Bóbr europejski w Polsce*, „Przegląd Hodowlany” 1980, nr 11, s. 18-24.

## DISTRIBUTION OF EUROPEAN BEAVER (*CASTOR FIBER*) IN THE ELBLĄSKIE UPLAND

**Abstract:** Observations of the Elbląg Upland area in the period 2009-2011 revealed fifteen European beaver *Castor fiber* sites. Of these, eleven territories were described as active. Most of the beaver sites (10) were situated in protected area (Elbląg High-Plain Landscape Park). The paper presents spatial distribution and description of the locations, as well as the environmental impact of beavers.

Praca została zrealizowana w ramach projektu „Bobry Wysoczyzny Elbląskiej” dofinansowanego ze środków Wojewódzkiego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej w Olsztynie w ramach konkursu Nasza Przyroda (umowa 00107/10/61011/OP-IN/D z roku 2010).

### Podziękowania

Składamy podziękowania Mateuszowi Sławińskiemu oraz pracownikom Parku Krajobrazowego Wysoczyzny Elbląskiej: Bartłomiejowi Bujnikowi i Tadeuszowi Taratyka za wsparcie w planowaniu inwentaryzacji obszaru. Dziękujemy dr inż. Magdalenie Mleczko za pomoc przy tworzeniu map.

## NOTA O AUTORACH

**Andrzej Borys**, Instytut Informatyki Stosowanej im. Krzysztofa Brzeskiego, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Elblągu

**Bartłomiej Brzeziński**, Instytut Politechniczny, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Elblągu

**Jan Grzybowski**

**Dominika Iskra-Świercz**, Instytut Politechniczny, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Elblągu

**Izabela Jabłońska-Barna**, Wydział Nauk O Środowisku, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

**Piotr Korzeniowski**, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska

**Malwina Marcinişzyn-Jedezsko**, Wydział Humanistyczny, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

**Przewłócki Jarosław**, Instytut Politechniczny, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Elblągu

**Tomasz Rogacewicz**, Instytut Informatyki Stosowanej im. Krzysztofa Brzeskiego, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Elblągu

**Daria Rybarczyk**, Instytut Informatyki Stosowanej im. Krzysztofa Brzeskiego, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Elblągu

**Agata Rychter**, Instytut Politechniczny, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Elblągu

**Marzanna Skowrońska**, Instytut Informatyki Stosowanej im. Krzysztofa Brzeskiego, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Elblągu

**Zdzisław Szczerbiński**, Instytut Informatyki Stosowanej im. Krzysztofa Brzeskiego, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Elblągu

**Katarzyna Wasielewska**, Instytut Informatyki Stosowanej im. Krzysztofa Brzeskiego, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Elblągu

**Marek Wesołowski**, Politechnika Gdańska

**Andrzej Wróblewski**, Instytut Budownictwa, Wydział Geodezji, Inżynierii Przestrzennej i Budownictwa, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

**Łukasz Żołędziewski**, Instytut Informatyki Stosowanej im. Krzysztofa Brzeskiego, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Elblągu

**Kamil Żyliński**, Instytut Politechniczny, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Elblągu



## **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 wносить 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 2016 ROKU**

- Prof. dr hab. Monika Bąk** (Uniwersytet Gdański)
- Dr hab. inż. Andrzej Borys, prof. nadzw. AMG** (Akademia Morska w Gdyni)
- Dr Maciej Brzozowski** (Politechnika Białostocka)
- Dr hab. Zbigniew Cieślak, prof. UKSW** (Uniwersytet Kardynała Stefana Wyszyńskiego w Warszawie)
- Dr Robert Fidytek** (Uniwersytet Gdański)
- Dr hab. Mirosław Grzybowski** (Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie)
- Prof. dr hab. inż. Tomasz Kacprzak** (Politechnika Łódzka)
- Dr hab. inż. Andrzej Karbowski** (Politechnika Warszawska)
- Prof. dr hab. Roman Kisiel** (Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie)
- Dr inż. Krzysztof Klempka** (Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie)
- Prof. dr hab. Marek J. Malinowski** (Akademia Humanistyczno-Ekonomiczna w Łodzi)
- Dr hab. inż. Leszek Małyszko, prof. UWM** (Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie)
- Prof. dr hab. Renata Marks-Bielska** (Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie)
- Dr Jacek Lebieź** (Politechnika Gdańska)
- Prof. dr hab. Mariola Lemmonier** (Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie)
- Prof. dr hab. inż. Danuta Leśniewska** (Politechnika Koszalińska)
- Prof. dr hab. Wiesława Lizińska** (Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie)
- Dr hab. inż. Zbigniew Łubniewski** (Politechnika Gdańska)
- Dr hab. Piotr Przybysz, prof. UW** (Uniwersytet Warszawski)
- Dr hab. inż. Bernard Quant** (Politechnika Gdańska)
- Dr inż. Anna Rehmus-Forc** (Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Elblągu)
- Dr inż. Robert Smyk** (Politechnika Gdańska)
- Dr hab. inż. Piotr Srokosz** (Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie)
- Prof. dr hab. Henryk Stroński** (Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie)

**Dr hab. inż. Waldemar Świdziński, prof. nadzw. IBW PAN** (Instytut Budownictwa Wodnego PAN)

**Dr Michał Twardochleb** (Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie)

**Dr Tomasz Winnicki** (Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie)

**Dr hab. inż. Ryszard Wojtyna prof. nadzw. UTP** (Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy)

**Dr Adrian Zwolicki** (Uniwersytet Gdański)

**Prof. dr hab. Krystyna Żołądkiewicz** (Uniwersytet Gdański)



